

分类号_____

密级_____

UDC _____

编号_____

中国科学院研究生院

博士学位论文

基于定量分析的海河流域生态环境承载力研究

黄 浩

指导教师 夏 军 教授

中国科学院地理科学与资源研究所

申请学位级别 博士 学科专业名称 自然地理学

论文提交日期 2006.3 论文答辩日期 2006.5

培养单位 中国科学院地理科学与资源研究所

学位授予单位 中国科学院研究生院

答辩委员会主席 _____

摘 要

海河流域是我国七大流域之一，由于地处我国的政治文化中心，在我国的社会经济发展中有着举足轻重的作用。然而近一二十年来，该流域生态与环境不断恶化，与经济的快速发展极不相符，尤其是水污染严重，河道干涸，河流功能退化，同时入海水量锐减，河口生态与环境退化，湿地面积大幅的减少，生物多样性消失，地下水严重超采，而且水土流失严重，由于水资源的匮乏，一部分回灌污水严重影响了人们健康。

海河流域现状年人口约占全国的 10%，国内生产总值占全国的 17.5%，由于海河流域地处我国广阔的华北平原，土地肥沃，光照条件充分，各种气象条件适宜农业耕作，因此该地区又是我国重要的粮食基地，粮食总产量占全国的 10%，为我国三大粮食生产基地之一，该区域在我国粮食安全等方面都有重要的意义。但是该区域多年平均水资源仅有 372 亿 m^3 ，只占全国的 1.3%，同时地域和年际分布不均匀，成为制约该地区今后发展的重要因素。

本文依据可持续发展思想，对海河流域的生态与环境的承载能力进行了研究。认为海河流域的生态环境问题主要有三个方面引起：第一，由于水资源短缺引起的河道断流，湿地萎缩，地下水超采等因素；第二，由于水污染治理力度不够引起的大范围污染问题；第三，由于水土流失引起的土壤肥力减轻等问题。针对上述的三个问题，本文采用 CGE 模型理论，建立 CGE 模型与生态与环境承载力评价体系相耦合的生态与环境计量模型，定量分析海河流域经济发展和环境治理之间的定量关系，为海河流域未来的可持续发展提供依据，在研究过程中，设情景分析了海河流域在生态与环境良好状态以及生态与环境逐步恢复状态的生态与环境承载能力大小。

本论文在以下几个方面进行了探索研究。

第一，依据可持续发展的观点建立了生态与环境承载力的评价指标体系，并进行其量化分析。包括生态与环境承载力概念的确定，量化指标体系的建立、生态与环境承载力计量模型的构造。在建立指标体系的过程中，首先分析了一般区域生态环境承载力的指标体系状况，然后依据海河为例，建立了海河流域生态环境承载力的指标体系。该体系包括水土资源指标、社会经济指标、生态与环境指标以及反映他们之间关系的综合指标。

第二，依据 CGE 模型的原理，建立了和生态与环境-社会经济-水土资源的互动模型，定量分析了流域的社会经济发展和生态与环境之间的关系。CGE 模型能够刻画经济活动与环境政策之间的量化关系，据此可以分析海河流域经济发展要素与生态与环境要素之间的定量关系。并建立以水为纽带的社会经济-生态与环境-水土资源模型，分析与生态与环境承载力对应最大的产业结构和生

产、生活以及生态用水。本论文着重于海河流域经济发展与生态环境之间关系的定量分析,依据 CGE 模型,一方面从生态与环境保护和恢复的角度考虑海河流域未来社会经济发展的走向,同时,根据未来海河流域的发展走向,分析海河流域社会经济发展对生态环境造成的压力大小,为海河流域未来的社会经济发展和生态规划提供了部分依据。

第三,依据建立的生态与环境承载力计量模型,以海河流域为对象,进行实例研究。分析研究了海河流域现状年(2003)的生态与环境承载力大小以及未来水平年在不同情景下的生态与环境承载力变化过程。根据上述建立的生态与环境评价指标体系,依据模糊数学隶属度的分析方法,本文建立了生态与环境承载力和可持续发展的量化分析计量模型,认为海河流域在 60 年代所对应的生态环境状况为良好状况,处于良性可持续发展状况,此时对应各生态与环境指标为 0.8,处于可承载状态,并在专家打分的基础上,分析了各生态与环境和社会经济发展的不可承载状态对应的指标以及完全可承载对应的指标,并在此基础上形成了生态与环境承载力的计量模型。

本研究的主要结论有以下几点:

第一,海河流域现状经济发展测度为 0.92,生态与环境综合评价测度为 0.0834,整体发展测度为 0.2770,远远低于可持续发展的 0.8,处于不可持续发展状态。可以看出海河流域现状年社会经济高速发展,总体评价为 0.92,超出良性发展状态 0.8,但是生态与环境恶化严重,生态与环境总体评价仅为 0.0834,可以说社会经济的发展是以牺牲生态环境为代价,整体处于不可持续发展状态,因此总可持续发展度为 0.2770;

第二,在生态与环境良好的状态下,流域现状所能承载的人口和 GDP 均低于实际值,说明目前海河流域处于超载状态,现状的社会经济发展是以牺牲生态与环境为代价的。可以看出如果在现状年完全恢复生态与环境状况,那么流域所能承载的人口和 GDP 将远远低于目前状况,对社会经济发展造成较大影响,无论海河的任何生态环境分区都是一样,因此可以说,对于海河的生态与环境恢复必须全面考虑经济发展因素;

第三,在南水北调以及未来技术水平提高和产业结构调整条件下,海河流域在 2038 年左右可以达到可承载状态,生态与环境用水 120 亿 m^3 ,生态与环境状态良好,处于良性循环状态。各个区域所达到生态与环境良好的年限不同,徒骇马颊河平原首先达到可承载状态,而海河南系山区将最后达到可承载状态。

关键词: 生态与环境承载力; CGE 模型; 海河流域

ABSTRACT

Haihe River Basin is one of seven major basins in our country. It is the political and cultural center of our country, and has an important status in the social economic development. But over the past twenty years, ecological system in the basin is worsening dramatically, thus is not consistent with the economic development, especially water is seriously polluted, the river dries up, the river function degrades, seaflow abates sharply at the same time, the ecological environment of seaports degrades, the wetland shrinks, bio-diversity disappears, and groundwater was seriously overexploited, soil loss is serious. For the shortage of water resources, people's health was seriously influenced by the recharging of irritate sewages.

The thesis bases on sustainable development thought, has carried on research to Haihe River Basin ecology and environment carrying capacity. Consider that there are three factors that causes ecological environment problems in Haihe River Basin: First, the river blanking caused by water resource shortage, the wetland shrinks, the groundwater exceeds the factor of adopting etc.; Second, because of not enough investment for water pollution control on a large scale causes heavily pollution; Third, such questions as the soil fertility caused by soil erosion lightens. Direct against three questions mentioned above, this literary grace uses CGE model theory, set up CGE model and ecology and index of carrying capacity appraise system couples ecology and environment and measure models to the environment, quantitative relation between the economic development of Haihe River Basin and environmental improvement of quantitative analysis, offer the basis for sustainable development in the future of Haihe River Basin, in the course of studying, have set up the scene and analysed that Haihe River Basin is in ecology and state and ecology that ecology and environment resume progressively and size of environmental bearing capacity with good environment.

Aimed at the problems mentioned above, the thesis uses sustainable development thought, and studies the carrying capacity in Haihe River Basin. Adopt measure economic CGE model theory, set up the ecological carrying capacity system and measure models, and has analysis the carrying capacity in Haihe River Basin in the state with good condition and carrying capacity in the state with progressively in view of the above.

This thesis has been explored in the following respects.

First, have set up the evaluation index system of ecology carrying capacity according to the view of sustainable development, and carry on the quantitative

analysis of the ecological strength index. Including the ecological carrying capacity concept, the setting-up of the quantization index system, build up ecological carrying capacity structure of the measurement model of carrying capacity.

Second, according to the principle of CGE model, setting up ecological environment-the dynamic model of social economy the water and soil resources, relation between the social economic development of the quantitative analysis basin and ecological environment. CGE model can portray the quantization relation between the economic activity and environmental policy, quantitative relation between economic development key element of Haihe River Basin and key element of the ecological factors in view of the above. And set up the social economy-ecological environment-water and soil resources model taking water as tie, it is analyses corresponding industrial structure and water distribution for domestic production ecological purpose when the ecological carrying capacity is the largest. This thesis focuses on the quantitative analysis of the relation between economic development and ecological environment protection of Haihe River Basin, according to CGE model, on one hand consider the trend of social economic development of the future of Haihe River Basin from ecology and environmental protection and angle resumed, meanwhile , according to the development trend of Haihe River Basin in the future , analyse the size of pressure caused to the ecological environment in social economic development of Haihe River Basin, have offered some bases for social economic development and ecological planning in the future of Haihe River Basin.

Third, according to the ecological carrying capacity method been set up, take Haihe River Basin as an example, carry on the case study of ecological carrying capacity. Analyses ecological carrying capacity with annual (2003) current situation in Haihe River Basin and its change course under different scenes of level in the future. According to the above-mentioned ecology and environmental evaluation index system, under the jurisdiction of the analytical method of degree according to fuzzy mathematics, this thesis has set up ecology and ration of bearing the weight of strength and sustainable development of the environment and analysed the model of measuring, think that the state of ecological environment corresponded to was a good state in the 1960s in Haihe River Basin, in benign sustainable state of development, it is 0.8 to correspond to every ecology and environmental index at this moment, in can bear the weight of the state , and on the basis of the thing that the expert gave a mark, the ones that have analysed every ecology and the

environment and social economic development can't bear the weight of the index with corresponding state and can totally bear the weight of the corresponding index , and has formed the measurement model that ecology and environment bear the weight of strength on this basis.

According to analysis, the study has the following conclusions:

first, the current social economy sustainable index is 0.92 of Haihe River Basin, and 0.0834 of ecology development index, and 0.3324 of total index, far lower than 0.8 of sustainable development, can not be in sustainable state. The results show that the annual social economy of current situation of Haihe River Basin is developed at a high speed , overall appraisal is 0.92 , go beyond benign 0.8 state of development, but ecology worsen with environment serious, ecology and environment overall appraisal 0.0834, we can say that the development of social economy is to regard sacrificing the ecological environment as the cost, can not be in sustainably state of development wholly, so the total sustainable development degree is 0.2770;

Second, with good ecological state, the population and GDP that the basin current situation can carry are lower than actual value, obviously, Haihe River Basin is in the state of overloading at present, the social economic development of the current situation regards sacrificing the ecological environment as cost. The results show that if totally resume ecology and environmental state annually in the current situation , population and GDP that then the basin can be born the weight of will be far lower than the state at present, cause bigger influence on social economic development, no matter any ecological environment dividing area of Haihe River is all the same, so can say , resume considering the economic development factor in an all-round way to Haihe River ecology and environment ;

Third, by South-North Water Diversion and improve technique level in the future and under the industrial structure adjustment condition, Haihe River Basin can reach and can bear the population and GDP of the state, about 12 billionm water used for ecological environment in about 2038, the ecological environment is in good condition, in the benign cycle state. Different area has different long time to reach good ecology condition. Tuhaimajia river basin first reach the state of carrying state, and the South Haihe River Basin reach in the last.

Keyword: The Ecological Carrying Capacity; CGE Model; Haihe River Basin

目 录

摘 要.....	i
ABSTRACT.....	iii
第 1 章 绪论.....	1
1.1 选题意义	1
1.2 国内外研究进展	2
1.2.1 生态与环境承载力研究进展.....	2
1.2.2 承载力研究方法	6
1.2.3 CGE模型研究进展	8
1.3 生态与环境承载力研究面临的挑战	12
1.4 本论文研究内容	14
1.5 本论文的研究思路	15
1.6 海河流域概况及主要生态与环境问题.....	18
1.6.1 海河流域概况及社会经济发展	18
1.6.2 主要生态与环境问题	19
第 2 章 海河流域经济计量模型理论方法.....	24
2.1 CGE模型分析.....	24
2.2 水资源价值分析	27
2.3 环境效应量化	29
2.3.1 水污染效应.....	29
2.3.2 水土流失效应.....	33
2.3.3 水资源短缺效应.....	34
2.4. 绿色GDP分析.....	35
第 3 章 海河流域生态与环境承载力指标体系.....	36
3.1 生态与环境承载力指标体系的概念与作用.....	36
3.2 指标体系的筛选方法.....	36
3.3 一般区域生态与环境承载力指标体系.....	37
3.3.1 社会经济指标.....	37
3.3.2 资源指标.....	39
3.3.3 生态与环境质量指标	41
3.4 海河流域生态与环境承载力的量化指标体系.....	43
第 4 章 海河流域生态与环境承载力的计量模型.....	46
4.1 生态与环境承载力的计量模型.....	46

4.2 量化指标度量方法	48
4.3 社会经济-水量-水质互动模型	54
4.4 现状年水量-生态与环境关系分析	59
4.5 流域生态与环境用水量分析	60
4.6 生态用地的确定	65
第5章 海河流域生态与环境承载力的计算与分析	66
5.1 现状年生态与环境发展测度分析	68
5.2 分区生态与环境发展测度分析	71
5.3 生态与环境承载力计算结果分析	96
第6章 结论	99
6.1 主要结论	99
6.2 建议	101
6.3 本次研究的不足之处和研究展望:	101
参考文献	103
在学期间发表学术论文目录	109
致 谢	110

第1章 绪论

1.1 选题意义

生态与环境是人类赖以生存的基础,在我国华北地区,尤其是海河流域,在经济高速发展的同时,生态与环境持续恶化,严重影响人们的生存条件,生态与环境问题成为我国乃至全世界关注的热点。这些问题涉及到资源、生态、科技、经济、社会发展等重大问题,能否解决这些问题涉及到多学科的交叉研究,解决的意义非常重大^[1]。

生态与环境承载力的研究,能够为解决该区域的社会经济发展中的重大问题提供决策依据,能够为区域的可持续发展研究和水资源安全战略研究提供决策手段。生态与环境承载力的研究以区域的可持续发展为基本思路,通过分析区域的社会经济、水土资源、生态与环境等多个系统之间的关系,量化分析区域所能承载的最大社会经济系统,设计区域的可持续发展途径,并通过分析以水为纽带的生态与环境问题与社会经济问题以及它们之间的关系,为海河流域的生态与环境恢复提供部分决策依据。

海河流域是我国七大流域之一,同时又是我国的政治文化中心,该区域生态与环境问题的解决对我国整体的经济可持续发展和生态环境保护都有重要意义。海河流域2003年人口占全国的10%,国内生产总值占全国的17.5%,区域的经济结构中第三产业比重为40.7%,华北地区土地广阔,光照条件充分,又是我国重要的粮食基地,粮食总产量占全国的10%,是我国三大粮食生产基地之一,因此该区域在我国粮食安全等方面都有重要的意义。但是该区域多年平均水资源仅有372亿 m^3 ,只占全国的1.3%,同时分布不均匀^[2-3]。

水是人类赖以生存和社会发展不可缺少的基本物质。随着人口增加和经济发展,人类正在以空前的速度和规模开发利用极其有限的水资源,水资源问题已从一些缺水国家和地区发展为世界性的问题,进入21世纪的全球社会经济发展普遍面临洪涝灾害严重、水资源短缺和水环境恶化的严峻挑战,以水资源的可持续开发利用和管理保证社会经济可持续发展是先进社会生产力的发展要求。

作为可持续发展研究和水资源安全战略研究中的一个基础性课题,生态与环境承载力研究业已引起学术界的高度关注并成为当前水资源科学中的一个研究重点和热点。尤其对于水资源短缺的华北地区,生态与环境承载力的分析计算和评价已成为寻求区域可持续发展道路的重要依据。本文以海河水利委员会项目“海河流域生态与环境承载力分析”为依托,选择海河流域作为研究对象,建立生态与环境承载力的理论和方法,寻求我国华北地区实现水、生态、社会经济发展协调持续发展的途径,不仅具有典型性,同时也具有十分重要的理论实践意义。

1.2 国内外研究进展

1.2.1 生态与环境承载力研究进展

在国外,目前以水资源承载力作为主题的研究尚不多见,国际上单项研究的成果较少。众多检索结果表明,国外学者与此相关的研究主要是在社会可持续发展的框架下提出承载力的概念并作为资源开发的一种宏观限制。国际上关于承载力的理论研究大多将其纳入可持续发展理论中。如Joardor等(1998)从供水的角度对城市水资源承载力进行了相关研究,并将其纳入城市发展规划当中;Rijberman.J等在研究城市水资源评价和管理体系中将承载力作为城市水资源安全保障的衡量标准;Jonathan M. Harris将水资源作为其中重要的影响因素,着重研究了农业生产区域的耕地承载力,并将土地承载力作为区域发展潜力的一项重要衡量标准^[4];Olli Varis等人以水资源开发利用为核心,分析了中国长江地区日益快速的工业化、不断增长的粮食增长需求、环境退化等问题给水资源系统造成的压力,并参照不同地区发展历史把长江流域的社会经济现状同其水环境承载力进行初步比较^[5]。在国内,我国最早开展水资源承载力研究是在1989年,新疆水资源软科学课题组首次对新疆的水资源承载力和开发战略对策进行了研究。从此揭开了承载力专题研究的序幕。随着承载力概念的提出和讨论,近年来国内众多学者针对承载力在具体流域和区域的应用进行了大量的相关研究。

在20世纪80年代初,联合国教科文组织(UNESCO)提出了“资源承载力”的概念:“一个国家或地区的资源承载力是指在可以预见到的期间内,利用本地能源及其自然资源和智力、技术等条件,在保证符合其社会文化准则的物质生活水平条件下,该国家或地区能持续供养的人口数量”。水资源作为一种资源,其承载力合乎上述定义的内容,但水资源承载力有着自己的特点。水资源承载力体现在一定社会经济条件和一定状态下水资源系统可以承载一定程度和方式的人类活动的指标,在这些指标所允许的范围和程度之内的人类经济发展活动作用下,水资源系统结构组合特征,功能状态不会发生质的变化,这是水资源具有承载力的内在原因;由于上述指标在量上是有限度的,当某一指标消耗过大(例如地下水超采),会影响水资源系统的整体结构水平,进而导致功能失常。因此,水资源系统的物质、能量的输入存在限度,水资源承载力具有极限。最早明确使用承载力概念的是Odum在1971年提出的生态学中衡量某一特定区域维持某一物种最大个数的潜力,后来则被广泛用于说明环境或生态系统承受发展和特定活动力的限度。例如Irmi Seidl等人在马尔萨斯人口理论基础,在当前的国土、生态资源条件下,多次研究全球人口和社会经济增长极限^[6];Alan Fricker追踪了新西兰社会的生态足迹占现有资源的比例,明确指出当前生态足迹超过实际国

土可承载力的国家和环境赤字程度^[7]；Gopal B.Thapa 等以尼泊尔耕作方式落后、耕地严重退化的地区为背景，研究脆弱的环境系统对经济社会的承载力，指出目前饲养的牲畜数量已经远超过其土地可承载容量^[8]；Satoru Okubo 等研究了泰国东南沿海热带湿润低地平原上人类活动导致硫化物排放的情况，提出了环境对酸化破坏的承载极限^[9]。

关于生态与环境承载力概念的起源可以追溯到马尔萨斯时代，马尔萨斯是第一个看到环境限制因子对人类物质增长过程有重要影响的科学家，他的资源有限并影响人口增长的理论不仅反映了当时社会形势，而且对后来的科学研究都产生了广泛的影响(Seidl I, Tisdell C.A,1999；程国栋，2002)。可见，马尔萨斯的资源环境对人口增长的限制(资源环境的容纳力)的观点就是生态与环境承载力的萌芽。第一个将马尔萨斯资源有限，并影响人口增长的观点用数学形式表达出来的是Verhust，他最早用数学公式表达了承载力的概念。生态与环境承载力虽很早就被提出，但其后研究的不是很广泛。而是主要研究生态与环境的组成要素的承载力，1921年帕克和伯吉斯首次将其用于研究人口问题，并指出在某一地区特定的环境条件下（主要是指生存空间、营养物质、水热矿物质等自然资源等因子的配合），所能供养的人口数量的最大值，它可以通过该地区的基本自然资源数量来寻踪确定。而后，承载力理论在畜牧业得到应用，草地承载力、最大载畜量等相关概念相继被提出。随着社会进步，人口增长，技术水平提高，人类开发利用资源与环境的力越来越高，但在社会经济活动过度开发利用现有资源的同时，排污而不治污，不采取相应的保护环境的措施，结果引起土地退化，水资源短缺、环境污染和人口膨胀等现象的出现并日益加剧，导致资源、环境、人口、经济不是协调共存，从而使区域的可持续发展。承载力一词不再只属于单纯的生态学领域，它不仅仅是草地承载力、最大载畜量等相关概念的代名词，它的意义得到延伸，它成为跨生态学、经济学、地理学、环境科学等好多学科领域的词，它成为描述生态与环境社会经济复合系统的词，因此出现了土地承载力、水资源承载力、水环境承载力、环境承载力以及其它综合承载力。这些承载力的提出以及研究为未来承载力的研究及可持续发展提供了很有力的科学依据。在干旱地区和缺水地区，无疑土地承载力、水资源承载力、水环境承载力、环境承载力以及其它综合承载力都是与水有关的承载力，因为水是干旱地区最大的制约因子。

土地承载力是随着全球人口不断增加，耕地面积日趋减少，人类面临越来越严重的粮食危机提出的。土地承载力是指一定生产条件下，土地资源的生产力及其在一定生活水平下所能供养人口数量。土地承载力在中国20世纪90年代已被广泛研究（陈百明，1988；张志良，1992；陈国先等，1996；刘文锴等，1996；王维艳，1996；王文义等，1997；）。水资源承载力、水环境承载力是随着进入工业

革命以后,人类开始对大自然进行大肆开发、掠夺与破坏。与此同时,科学技术迅猛发展,技术革新和发明层出不穷,为人类征服和改造自然提供了条件。随着世界各国经济的迅速发展,环境污染与资源短缺问题日渐明显,八大公害事件的发生向全人类敲响了警钟。

资源的承载力通常又称为基础支持系统,是一个国家或地区按人均的资源数量和质量,以及它对该空间范围内人口的基本生存和发展的支撑力。随人口增长、社会经济用水大大增加,且伴随社会经济活动的污水排放,人均水资源严重不足、环境污染提出的。在中国,对水资源承载力的研究始于20世纪80年代后期,其中以新疆水资源软科学课题组对新疆水资源承载力的研究(新疆水资源软科学课题组,1989)为代表,但当时的概念、理论和计算方法等都处于萌芽状态(李令跃,甘泓,2000),1995年之前研究并不广泛,而且采用的研究方法比较简单,利用趋势分析法进行承载力的研究,最具代表性的是施雅风、曲耀光^[12]等人对乌鲁木齐河流域水资源承载力的研究,主要认为水资源承载力的计算是解决水供需平衡和人们生活质量与水准问题(施雅风与曲耀光,1992)^[20]。

从1995年至2003年水资源承载力得到广泛研究,研究方法多样化,主要有综合评价法,系统动力学法,多目标优化法。比如魏斌与张霞在1995年采用系统动态信真模型(SD)预测了本溪市水资源系统的发展趋势,分析随着经济活动的扩大,水资源系统存在的矛盾,以寻求最佳解决处理方案(魏斌,张霞,1995)。高彦春与刘昌明在1997年采用模糊综合评价法对陕西关中地区的水资源承载力的研究中,认为水资源承载力是水资源开发的最大容量(高彦春与刘昌明,1997)^[28];傅湘和纪昌明在1999年利用主成分分析法对陕西关中地区的水资源承载力进行了综合评价;徐中民在1999年利用多目标分析法研究了黑河流域张掖地区不同情景下的水资源承载力,分析分水时间、分水量及种植业节水方式不同组合情景下对张掖地区经济和粮食占有量的影响,在2000年及2002年又把多目标分析法应用于黑河流域中游的承载力研究,预测出了黑河流域未来的用水需求(徐中民,1999;徐中民,程国栋,2000;徐中民,程国栋,2002)^[30];李令跃与甘泓在2000年论述了水资源合理配置和承载力概念与可持续发展之间的关系,认为水资源承载力是在某一历史发展阶段,以可预见的技术、经济和社会发展水平为依据,以可持续发展为原则,以维护生态与环境良性发展为条件,在水资源得到合理的开发利用下,该地区人口增长与经济可持续发展的最大容量。贾嵘等人在1998年至2000年利用多目标优化法以关中地区为例进行了缺水地区的水资源承载力的研究,认为承载力指一个地区或流域范围内,在具体的发展阶段和发展模式条件下,当地水资源对该地区经济发展和维护良好的生态与环境的最大支撑力(贾嵘,薛惠峰等,1998;贾嵘,蒋晓辉等,2000)^[31]。李丽娟与郭怀成等人在2000年用系统动力学方法对柴达木盆地的水资源承载力进行了研究,认为水资源承载力是一个描

述水资源支持人类活动力阈值的概念,认为承载人口是评价承载力大小的最直接的指标,认为承载人口是指在资源最有效利用和经济与环境协调发展的条件下,该地区资源环境所能承载的最大人口容量。夏军与朱一中在2002年对水资源承载力的理论及其研究方法进行了研究,认为水资源承载力是水资源安全的度量(朱一中,夏军与谈戈,2002;夏军,2002)^[36, 37, 38, 39, 103, 105];程国栋在2002年阐述了承载力概念的演变及西北水资源承载力的应用框架,龙腾锐与姜文超在2003年阐述了水资源承载力的研究进展,包括概念、研究方法及未来展望。另外还有很多人对水资源承载力进行了研究。

水资源承载力得以提出和研究的同时,水环境承载力的概念也在我国1990年后得以提出,最初以郭怀成等人1994年对我国经济开发区水环境承载力的研究为代表(郭怀成等,1994),以后便在环境科学方向又独立发展起了水环境承载力这一研究方向,不过其量化方法与水资源承载力大抵相同,其研究重点是区域水环境纳污能力以及该区域水环境可承载的人类活动的阈值和如何改善区域环境水污染。王淑华在1996年开展了区域水环境承载力及其可持续利用研究(王淑华,1996);钟建宏等人在1996年进行了水环境承载容量评估模式的发展过程以及实际应用研究(钟建宏,等,1996);崔凤军于1998年开展了城市水环境承载力研究(崔凤军,1998);2001年以来,汪恕诚多次对水环境承载力进行了论述,采用单目标最优化方法,以最大的人口当量数为目标,以地区或流域内特殊用地(如森林用地、湿地等)的面积比和水环境质量等为约束条件,求解出最佳的用地规划模式。汪恕诚所用的方法实际上是一种水污染控制系统规划方法,(汪恕诚,2001)。蒋晓辉,等人在2001年利用多目标分析方法对陕西关中地区水环境承载力研究(蒋晓辉等,2001)。龙腾锐与姜文超在2003年阐述了水资源承载力的研究进展同时也阐述了水环境承载力的研究进展,包括水环境承载力概念、特征、研究方法及未来展望(龙腾锐,姜文超,2003)。另外对水环境承载力开展研究的还有曾维华,程声通与申献辰等人(曾维华,程声通,1997;申献辰,2001)。

当土地(资源)承载力、水资源承载力、水环境承载力的研究趋于成熟,综合因素的承载力又开始被研究。土地(资源)承载力指一个地区土地资源一定情况下,在何种情况下,该地区可生产最多的农产品(粮食),可承载的最大的人口数。水资源承载力指一个地区在一定的技术条件下,最大可用水资源有多少,这些可用水资源在何种利用方案下,可承载最大的人口数。水环境承载力主要研究一个区域的环境纳污能力以及此区域环境容纳人类活动的阈值。生态(环境)承载力、生产生活生态承载力(唐剑武等,1997;郭秀锐等,2000;高吉喜,2001;张传国,2001;张传国,方创琳,全华,2002;张传国,方创琳,2002)^[51, 52, 111]都是比土地(资源)承载力、水资源承载力、水环境承载力更综合的承载力。

它们指的是综合因素构成的系统产生的承载力,更接近更符合实情。其中最具代表的定义属高吉喜的所给的定义:生态承载力是指生态系统的自我维持、自我调节能力,资源和环境子系统的供容能力及其可维育的社会经济活动强度和具有一定生活水平的人口数量(高吉喜,2001)。综合因素承载力在中国研究并不深入。

承载力一词虽最早是在国外提出的,但国外对承载力的研究并不广泛。但对承载力的概念的发展的贡献很大,使承载力由最早只表示环境对种群的容纳能力到现在表示生态系统所提供的资源和环境对人类社会系统良性发展的一种支持能力。容纳能力概念的发展主要是在有关生态学和人口统计学中研究完成的。生态学家将容纳能力定义为:对某一具体的研究区域,在不削弱其未来支持给定种群条件下,当前的资源和环境状况所能支持的最大种群数量。对容纳能力概念的发展有贡献的科学家有Hardin G(1986); Daily G C 和 Ehrlich P R.(1992); Mcleod S R(1997); Cohen J H, (1995); Meyer P S 和 Auubel J H (1999)。承载力是指生态系统所提供的资源和环境对人类社会系统良性发展的一种支持能力,承载力的研究面对的是生态经济系统,研究生态经济系统中所有组分的和谐共存关系,研究对象不是生态经济系统中某一子系统,更不是子系统中的某一组分(人口或种群)。

1.2.2 承载力研究方法

在以往的承载力研究中,多采用多种科学思想,如运筹学理论、系统动力学理论,甚至也可以利用简单的供需平衡理论进行估算。目前常见关于水资源承载力的定量研究方法有很多,如模糊综合评价法、主成分分析法、系统动力仿真模型、多目标决策分析方法等等。其中应用较为广泛的有以下几种:

(1) 系统动力学法

用系统动力学方法分析承载力,是基于对宏观系统的模拟分析。典型代表是全球经济模型,由系统动力学创始人W.Forrester教授的学生Meadow等在1972年将系统动力学应用于全球性的人口、粮食、资本、不可再生资源 and 环境污染五大未来环境问题的研究,得到了增长极限这一在世界各国产生巨大反响的结论。1984年,英国苏格兰资源利用研究所应用系统动力学建立提高人口承载力的备选方案模型,即“ECCO”(Enhancement of Carrying Capacity Options),并应用这种新方法进行肯尼亚承载力的实验性评价。此法把包括社会经济、资源环境在内的大量复杂因子作为一个整体,对一个区域的资源承载力进行动态计算,具有系统发展的观点。因此受到广泛关注和推广应用。系统动力学方法是目前使用的一种重要量化方法。这种方法的重要特点是通过一阶微分方程组来反映系统各个模块的变量之间的因果反馈关系。在实用中,对不同的发展方案采用系统动力

学模型进行模拟,并对决策变量进行预测,然后将这些决策变量视为水资源承载力和水环境承载力的指标体系,再运用前述的综合评价方法进行比较,得到最佳的发展方案及相应的承载力。

(2) 指标体系评价方法

指标体系评价方法是目前应用较广的一种量化模式,主要有向量模法^[36-39]、模糊综合评价法^[11, 23, 48]和主成分分析法^[15]等方法。向量模法是将水资源承载力和水环境承载力视为一个由 n 个指标构成的向量,设有 m 个发展方案或 m 个时期(地区)的城市发展状态,分别对应着 m 个水资源承载力和水环境承载力,对 m 个水资源承载力和水环境承载力的 n 个指标进行归一化,归一化后向量的模即是相应方案、时期或地区的水资源承载力和水环境承载力。模糊综合评价法是将水资源承载力和水环境承载力的评价视为一个模糊综合评价过程,其模型为:设给定两个有限论域 $U = [u_1, u_2, \dots, u_n]$ 和 $V = [v_1, v_2, \dots, v_n]$, 其中 U 代表评价因素(即评价指标)集合; V 代表评语集合,则模糊综合评价为下面的模糊变换: $B = A \times R$, 其中 A 为模糊权向量,即各评价因素(指标)的相对重要程度, B 为 V 上的模糊子集,表示评价对象对于特定评语的总隶属度, R 为由各评价因素 u_n 对评语 V 的隶属度 V_{ij} 构成的模糊关系矩阵,其中的第 i 行第 j 列元素 r_{ij} 表示某个被评价对象从因素 u_i 来看对 v_j 等级模糊子集的隶属度。通过上面的合成运算,可得出评价对象从整体上来看对于各评语等级的隶属度。再对上面的隶属度向量 B 的元素取大或取小,就可确定评价对象的最终评语。由于这种方法取大或取小的运算法则会使大量有用信息遗失,因此采用主成分分析法来克服这一缺陷^[31],通过对原有变量进行线性变换和舍弃小部分信息,将高维变量系统进行综合与简化,同时客观地确定各个综合变量的权重。可以看出,指标体系评价方法依赖人为的评价,以及不同承载力的指标数值之间或指标数值与标准值之间的对比,得出的结果都是无量纲的数值,因而实际上是社会经济系统与水系统的协调程度而非严格概念意义上水资源承载力和水环境承载力。

(3) 多目标优化互动分析法

多目标优化分析方法是另一种常用的量化方法,它采用分解——协调的系统分析思路,将特定地区的水资源、人类社会经济系统划分成若干个子系统,并采用数学模型对其进行刻画,各子系统模型之间通过多目标核心模型的协调关联变量相连接。若事先确定需要达到的优化目标和约束条件,结合模型模拟和对决策变量在不同水平年上的预测结果,就可解出同时满足多个目标整体最优的发展方案,其对应的人口或社会经济发展规模即为这一地区的水资源承载力和水环境承载力。多目标核心模型通常采用数学领域中的优化算法进行求解,对于权重叠代收敛,有时采用融合决策者对邻近点和 tradeoff 矢量的意见的 Z 、 W 算法进行。可以看出,方案的拟定和筛选对于优化求解结果的准确性具有决定意义,为避免

方案确定太早而产生次优解,可采用情景分析法来筛选备选方案^[25],这种方法开始只粗略提供一些可行的情景给决策者,设定出后台情景,然后根据决策者意见采用多目标模型方法筛选出前台情景作为规划方向。同系统分析法一样,多目标分析承载力也是将研究区域作为整体系统来研究,通过对系统内部各要素之间关系的剖析,用数学约束进行描述,通过数学规划,分析系统在追求目标最大情况下系统状态和各要素分布。多目标方法通过数学规划的方法得到系统在一定背景下的最佳状态,对系统的调节体现在对目标的追求上,当然广义上讲,多目标仍然存在外生变量即参变量选择问题。由于多目标规划问题在求解技术上存在的困难,使多目标方法包括单目标规划的使用局限于较小的模型规模,不能更全面的考虑系统的影响因素。但近些年由于计算机技术的发展以及数学规划工具的日臻完善,分析人员可以将精力更集中在模型建立、方案构成和目标选择上,特别是由于经济、社会、资源、环境综合分析具有的决策内涵,所以多目标方法又开始在包括承载力在内的综合决策分析中得到新的发展^[49]。

1.2.3 CGE 模型研究进展

可计算一般均衡模型(Computable General Equilibrium, 即 CGE)模型起源于西方经济学中的瓦尔拉斯一般均衡理论。CGE 模型通过对一般均衡经济系统的数值模拟分析,来反映市场经济中要素决定资源配置和收入分配的一般机制。它在涉及整个经济范围的约束条件下,把市场要素、产品通过价格机制连接在一起,即通过要素和产品的数量和价格的调整,实现瓦尔拉斯所说的一般均衡理论所描述的均衡。

一般均衡理论是经济学理论的核心,被认为西方经济学的主要成就之一,它的思想来源是亚当斯密的“看不见的手”的著名论断:在一个分散决策的经济中,追求个人最优的行为会在价格的调节下实现社会资源的最优化配置,或者追求个人最优化的行为的决策可以通过价格机制达到相互间的均衡。1874 年 Walras 在它发表的论文《纯粹经济学要义》中正式把这样的一般均衡理论思想用一组方程表达出来,然而,他所表达的结论是定性的。以后的经济学家不满足于此,他们试图用能表示现实经济的具体方程来代替抽象的函数。Leontief 在 1936 年做了首次尝试,他的投入产出模型成功的反映了部门间的关联以及产品价格与要素价格的联系,对后来的 CGE 模型的发展起到了重要影响。但是这一类的模型基本上都是假设成本是线性的,技术系数是固定的,而且把最终的需求看作是外生固定的,因此它只是一般均衡理论的初步近似模型。本世纪 50 年代,美国的数理经济学家 Arrow 和 Debreu (1954) 运用集合论、拓扑学等抽象的数学工具,精确的提炼了 Walras 的思想,通过 Kakutani 不动点定理证明了

在有限的经济学中存在符合帕累托最优境界的均衡价格。但是由于所有的证明都是非结构性的，无法给出如何计算均衡价格，是不可计算的。

世界上第一个实用的 CGE 模型是 60 年代出 Johansen 在他的博士论文中的《经济增长的多部门分析》中的模型。其中包括 20 个成本最小化的部门和一类效用最大化的家庭部门，并采用市场均衡假设来决定商品和市场要素的价格，他使用挪威的投入产出表作为基准均衡数据集，主要用于研究挪威主要经济部门的经济增长状况研究，采用的求解方法是将非线性的一般均衡方程做线性化的处理，其数值解描述了通过一定时间段内的内生变量偏离其初始状态的相对变化率。60 年代，数理经济学家对一般均衡理论模型解的唯一性，存在性、最优性和稳定性的命题做了大量的研究工作，使得该方面的应用研究趋于完善。美国经济学家 Scarf 将这些理论上的发展和 CGE 模型直接结合起来(Scarf, 1967 & 1973)，提出了求解一般均衡模型数值解的算法，该算法具有良好的收敛性，通过有限的步骤就可以得到均衡解。与前人的算法不同，Scarf 的算法在内生变量水平上直接求解。此后他的学生 Shoven 和 Whalley 在 CGE 模型建模领域也作出了开拓性的进展。基于 Scarf 算法的 Shoven—Whalley 模型多用于税收政策对效率和收入分配的影响。另一个著名的 CGE 模型是由澳大利亚 IMPACT 项目于 1978 年建立的 ORANI 模型(Dixon, et al.1982)，模型紧密联系澳大利亚的现实的经济规划和政策评价。这是一个真正的大尺度模型，涉及 113 个部门、115 种产品、9 类劳动力和 7 类农业土地。ORANI 模型主要采用 Johansen 线性化算法的改进算法。主要阐述外部条件变化对资源配置的影响。在过去的 20 年内，随着计算机求解 CGE 模型的应用研究，目前在全世界的范围内已经由 GEMPACK, GAMS 等众多方案求解，建模者可以省却编制计算机程序的麻烦，而将主要精力用于模型的结构的发展上，从而大大促进了 CGE 模型的应用研究。目前在世界范围内已经开发了上百种用于不同领域的 CGE 模型。应当指出，70 年代几个世界经济冲击较大的事件，例如原油价格上涨、国际货币体制突变等极大的刺激了应用经济学家对 CGE 模型的研究应用，这是因为没有严格理论设定的一般基于时间序列的经济计量模型无法模拟外部冲击对经济造成的影响，而 CGE 模型则可以对这种突发事件或者外部的各种影响做深入的研究分析。

进入 90 年代以后，利用 CGE 模型模拟水环境和水资源政策对经济影响的研究在发达国家不断增多。这是因为以减少污染物排放和减少需水为目的的各种环境政策直接影响到生产要素和产品的价格、数量以及经济结构等经济因素。这就意味着必须将环境和资源要素纳入 CGE 模型中，最初的努力是从 90 年代开始的。Bergman(1990), Jorgenson & Wilcoxon(1992), McDougall(1993) 以及

Beck(1990)等都对 CGE 环境模型的建立做出了贡献。其中 Beck 利用模型研究了美国加州 San Joaquin Valley 可供水量变化对区域经济的影响；Dixon(1990)建立了澳大利亚墨尔本市 CGE 模型用于研究供水部门最优水价的定价方法；最近 Decaluwe(1999)利用 CGE 模型研究了摩洛哥市的不同水价定价方法对国民经济和需水量的影响。

国内对 CGE 模型的应用研究是在最近几年才开始起步的。这也是基于我国经济体制的转变而言的，我国市场体系不断完善；宏观经济管理更多的倚赖于市场的间接调节，经济发展倚赖更多的国际贸易等，这些变化使得 CGE 模型的研究有了机会。国内的 CGE 模型的研究也普遍起来，其中最为代表的是由国务院发展研究中心和中国社会科学院数量经济与技术经济研究所开发完成。其中中国社会科学院还用他们开发的 PRCGEM 模型分析征收炭税及实行 CO₂ 减排对经济的影响。而将 CGE 模型用于水生态与环境和经济分析的则是由中国水利水电科学研究院水资源所（沈大军等，1999）采用了 CGE 模型计算了邯郸市的水的边际价格，采用间接的方法。通过供水量的变化推求部门总增加值的变化，然后以部门增加值的变化除以水量的变化即得出水量对总增加值的边际贡献，即边际水价。最近几年，随着我国经济的快速发展，将 CGE 模型用作政策分析的实例也越来越多，例如中国科学院农业政策研究中心，自己开发 AGROCHINA 模型分析我国的农业政策和贸易环境对我国农业发展的影响。李善同、许新宜等运用双区域 CGE 模型分析南水北调对我国北方地区的经济发展影响，其中着重分析了对北京地区经济发展的影响。CGE 模型已被经济学家和政策分析人员广泛应用于政策模拟和分析，如 国际贸易、税收政策、收入分配和发展战略方面的问题。近年来，CGE 模型也在能源、资源和环境等方面得以运用。

从最近几年 CGE 模型的发展来看，各国学者建立的 CGE 模型主要集中在三个方面的宏观经济政策研究：第一，国际贸易。该领域以 GTAP (Global Trade Analysis Project) 项目建立的全球贸易模型为典型代表，其中最为突出的代表人物是世界银行经济专家 Kermal Dervis, Jaime De Melo 和 Sherman Robinson。很多随后建立的世界（地区）贸易一体化、WTO 等方面的 CGE 模型研究都受到 GTAP 模型的强烈影响。中国社科院利用 GTAP 模型计算了 APEC 成员中除中国外的所有国家和地区之间采用贸易自由化措施对中国贸易条件的影响。第二，环境保护。该领域的研究一般都集中在一次能源利用、CO₂ 排放（温室效应）的研究上，其中应用最为广泛的是以评价全球 CO₂ 减排协议经济效应的 GEEM 模型（General Equilibrium Environmental Model）和 GLOBAL 2100 模型。我国在该方面就是上述所说的运用 PRCGEM 模型分析。第三，财政税收。该领域的研究以美国 Charles Ballard, Don Fullerton、John Shoven 和 John Whalley 合作开

发的以研究美国税制改革 BFSW 模型为代表。中国在该领域的研究工作主要有国家税务总局与加拿大工商研究院合作项目所建立的宏观税收负担 CGE 模型。

CGE 模型方法得以在世界范围内得到了广泛而迅速的开发和应用,原因有两点:首先,CGE 模型是投入产出模型和线性规划模型的结合和完善。这主要表现为 CGE 模型通过引入经济主体 (agents) 的优化行为,刻划了生产之间的替代关系和需求之间的转换关系,用非线性函数取代了传统的投入产出模型中的许多线性函数;其次,CGE 模型在传统的投入产出一般均衡基础上,引入了通过价格激励发挥作用的机制和政策工具,从而将生产和需求、国际贸易和价格有机地结合在一起,以刻划在混合经济条件下,不同产业、不同消费者对由一定政策冲击所引致的相对价格变动的反应。

与其它的模型技术如宏观计量模型、投入—产出模型和线性规划模型相比,CGE 模型有 4 方面优势:第一,严密的理论体系。CGE 模型往往与关于代表性消费者和生产者的标准新古典微观经济理论密切相联。另外,CGE 模型往往是“校准”的,而宏观计量模型通常是估计的;第二,经济范围内协调一致的相互作用机制。CGE 模型能按照某种协调的方式同时考虑整个经济范围内的相互作用机制,且定量解释所有经济主体在市场中的相互作用的综合效果;第三,替代可能和非线性关系。CGE 模型将投入—产出模型拓展到包括国内产品和进口品之间的不完全替代、国内销售和出口之间的不完全转换等替代可能;第四,价格内生和混合经济机制。CGE 模型包含了通过价格激励发挥作用的机制和政策工具,可以刻划生产、需求和国际贸易的相互依赖性。这样当经济受到突发冲击时,就可以全面考察该冲击对经济总量、结构、相对价格等各方面的影响,而不局限于局部。

有多种方法构建 CGE 模型,在以往的研究水土资源—生态与环境—社会经济的模型中,主要区别是怎样能够把经济活动的因素和资源、生态连接起来。一种方法是将水土资源和劳动力等作为一种生产要素纳入生产函数 (Berck, 1991); 另一种方式是将水资源的开发利用和供水有关企业作为单独的一个经济部门来处理 (Dixon, 1990), 从而在模型中形成新的动态平衡,并作为中间投入纳入到生产函数和效用函数中去。同时生态与环境的污染也以不同的方式进入到生产函数或者效用函数之中,例如在标准的 CGE 模型中引入污染系数 (伴随部门单位产出或者中间投入的污染量) 来估算污染排放的效果,或者在模型结构不发生变化的情况下人为的改变环境的价格或者征收税费。这种对模型的扩展不影响模型的动态平衡,而仅仅是从环境的角度对生产提供更加详细的分析。另一类的环境 CGE 模型则是进一步引入了环境经济系统的反馈。例如 Jorgenson & Wilcoxon (1992) 的模型在生产函数中增加了污染控制成本的内容。

再如 Bergman (1990) 对生产的设定做了进一步的假设, 在生产函数中认为应该加入环境质量对生产率的影响, 也就是不同的环境条件下, 生产的成本各不相同。还有不少模型都考虑了环境对效用的影响。例如 Robinson(1990)在效用函数中加入了污染排放因素。又如 Piggot & Whalley (1991), 把排减的收入放入到效用函数中, 上述的这些模型的本质就是在均衡模型中修改生产函数或者效用函数, 能够更加具体的反映实际环境和资源的生产和消费效用过程。除了上述以外, 一些模型则是设定了污染排减活动或者污染排放技术的生产函数 (Xie 1996), 还有一些模型通过对污染损失的货币化, 把环境的非市场价值引入到消费者偏好的设定中。1970 年 Leontief 曾经建立了一个与环境相关的投入产出表, 他在传统的两部门的投入产出表中加入了一个污染部门和对环境的实物核算。这种方法为后来的众多学者所采用。

关于 CGE 模型的求解方法, 由于其生产函数采用指数方法等多种函数, 因此求解相对比较困难, 虽然大都把非线性函数线性化的方法, 但是不同模型和软件的求解方法也不大一样, 目前主要由澳大利亚 Monash 大学的 Gempack 软件, 他的求解方法采用逐步线性跟踪方法逼近最真实值, Purdue 大学的 GTAP 也主要用这个软件, 还有 GAMS 软件也是最常用的求解 CGE 模型的方法。最近, 世界银行的专家 Essama-Nssah 利用 Eviews 计算 CGE 的。CGE 模型除传统的静态、完全竞争型的 CGE 模型外, 世代交替模型、动态模型、非竞争型模型研究已经成为一种研究趋势。国内比较较早涉及 CGE 模型求解的主要是国务院发展研究中心 (主要用 Gams 软件)、中国社会科学院数量经济与技术研究所 (一部分人用 Gempack, 一部分人用 Gams)、中国科学院系统科学研究所 (主要用 Gams 软件)。本次研究采用澳大利亚 Monash 大学的 Gempack 软件, 部分程序采用 GAMS 软件编写。

1.3 生态与环境承载力研究面临的挑战

没有成熟的理论与方法: 生态与环境承载力虽很早就被提出, 但一直没被广泛研究。直到近年来生态与环境问题越来越严重, 生态与环境承载力的研究又被提出。提出的背景是当今生态与环境问题日趋严重, 而且产生生态与环境问题的原因是人类活动、自然变化双重原因, 要从根本上解决, 必须研究综合因素的承载力。水利部海河水利委员会在做海河流域生态与环境恢复规划时提出进行海河流域生态与环境承载力的研究, 就是重新进行生态与环境承载力的一个例子, 目的是为解决海河流域社会经济发展过程中产生了严重的与水相关的生态与环境问题 (海河流域生态与环境恢复规划, 2002), 这个生态与环境承载力属于与水相关的生态与环境承载力, 对于与水相关的生态与环境承载力, 到现在还没有文

献研究过，更没有谁给予明确的定义，当然也就没有相应的理论与方法。

生态与环境承载力从系统论观点讲，它由三部分组成，包括支持系统、压力系统及约束条件系统组成。建立指标体系应从三个系统来建立，已有的文献中很少提到约束条件系统的指标。应建立一套系统的理论与研究方法，方法要理论化、具体化。从承载力概念的准确阐述，计量承载力的指标体系的建立，承载力计量模型的构建，包括目标函数的多目标如何单目标化，约束条件的确定，支持系统对压力系统如何可承载的判定。生态与环境承载力所涉及的资源-环境-社会经济之间的关系如何量化，与水相关的生态与环境问题不仅仅限于水污染，用什么方法把多个生态与环境质量指标同时量化。需要从系统论的观点建立一套完整的量化体系，包括概念界定、量化指标体系建立、量化模型的构造及量化程序的开发，以及在具体流域的应用等。

考虑的与水相关的生态与环境问题不仅仅是水污染：以前承载力考虑的与水相关的环境要素基本只是水污染，其它由于水引起的生态与环境问题比如水土流失、城市河湖生态、湿地生态、河道断流、地下水位下降、土壤盐渍化、入海口生态无以考虑，而进行生态与环境治理和环境保护，不应仅仅考虑水污染，其它与水相关的生态与环境问题都应考虑。比如徐中民与程国栋对黑河流域的水资源承载力的研究中考虑的与水相关的环境问题只是水污染，用人均生化需氧量（BOD）表示（徐中民，1999；徐中民，程国栋，2000；徐中民，程国栋，2002）；贾嵘等人在2000年以关中地区为例进行缺水地区的水资源承载力的研究中也只考虑水污染，用污染物排放负荷量（BOD）表示（贾嵘等，2000）。蒋晓辉等人在2001年对陕西关中地区水环境承载力研究中也只考虑水的纳污量，用污染物排放负荷量（BOD）表示（蒋晓辉，等；2001）。

上述回顾承载力研究的发展历程，可以发现对承载力的研究是随着人们对于自身生存环境的关注与水资源短缺的重视逐渐展开并深入的。由于国内外生态与环境情况不同，面临的问题也不同，于是研究方向就可分为两种：一种是如国外，生态与环境恶化状况利用还没有威胁到经济发展和自身生存，研究就主要建立在可持续发展的理念上，与其他各种资源的合理分配与高效的相互作用。这种研究主要集中在对区域（湿地、水域）内生态经济要素系统的特征、问题和创造效益等等。另一种研究方向如国内，环境恶化已经威胁到地区的经济发展与人类的生存环境，研究就不仅要建立在可持续发展的理念上，还要以及时治理并恢复生态与环境，保持经济、生活、生态等等之间的平衡为目标。这种研究主要集中在以供定需的前提下，如何调整经济发展速度与合理的产业结构，甚至探讨是否采用主动限制经济发展速度的措施，使得有限水资源得到有效可持续的利用，发挥最大的效益；并且由于我国处于水资源危机的地区众多，于是使得研究呈现区域化、动态化和多样化的特点。从上面的综述中，我们也可以看到水资源承载力的研究

方法和理论也是各不相同、角度各异的,既有一般的影响评价分析模型,又有复杂的动态模型,各有各的特点、适用范围,也各有各的缺陷。比如说经验公式法只采用一个或几个承载因子分析,因子间相互独立,简单易行,但分析多局限于静态的历史背景,割裂了资源、社会、环境之间的相互作用的联系,对生态与环境承载力这一复杂的自然—社会经济系统来说显得过于单薄;而指标体系评价方法或是由于在指标选取过程中,指标的合理与否,或是对指标的评价过程中的评价依据是否合理,是否主观性太强等等显得可靠性不高;而复杂系统分析方法中的每种方法都是以复杂系统分析理论为指导思想,将社会经济、生态与环境和水资源系统作为一个整体,综合考虑各子系统之间的相互联系,通过模拟、情景分析和优化等方法分析计算区域水资源承载力,使其具有很高的可信性。

1.4 本论文研究内容

本文拟在对生态与环境承载力研究理论和应用实践进行综述和展望的基础上,深入探讨当前生态与环境承载力研究中的若干理论,构建生态与环境承载力研究的复合模型,研究水土资源、社会经济与生态与环境之间相互作用的机理。在此基础上,建立CGE模型与生态与环境模型相耦合的流域生态与环境承载力计量模型,并在海河流域内应用。分析研究海河流域在不同发展情景下的生态与环境承载力变化过程及主要影响因素,将海河流域分为7个二级分区,分析区域的经济发展、生态与环境之间的内在联系,并通过生态与环境承载力的研究分析,提出与其区域发展条件相适应的生态与环境恢复和经济发展格局,为海河流域可持续发展提供依据。具体工作有以下几项:

(1) 对生态与环境承载力以及CGE模型在环境分析中的研究理论和应用研究背景进行全面的检索和分析,并对其相关研究的发展趋势、思路等进行总结综述。

(2) 在前人研究的基础上,建立海河流域的生态与环境承载力指标体系,并根据海河流域的实例建立海河流域生态与环境承载力的计量模型,在此基础上依据CGE模型建立海河流域的环境资源与社会经济计量模型。

(3) 通过模型建立分析环境、资源要素对经济发展的影响。分析了海河流域的生态与环境需水大小,产业结构变化过程,流域经济发展要素及未来变化。建立流域的水量平衡模型,社会经济-水土资源-生态与环境互动模型。采用CGE模型原理,建立流域经济发展与水资源、环境之间复合模型,对流域进行未来水平年的供需水情景分析。

(4) 在此基础上,分析计算海河流域整体以及二级分区在生态与环境状态所能承载的人口和GDP大小以及未来达到预期承载力所需要的年限,并分析了在生态与环境逐步恢复的情形下,流域未来的经济发展状况以及生态与环境达到良

好所需要的年限。

(5) 根据上述计算结果, 对未来流域的经济发展和生态与环境恢复措施提供部分意见和建议。

1.5 本论文的研究思路

基于CGE模型的海河流域生态与环境承载力研究的主要思路是: 流域主要与水有关生态和环境问题表现为: 河道断流、湿地萎缩、水体污染、平原区地下水超采、山区水土流失。

生态与环境承载力的定义是: 生态与环境承载力指在满足一定的生态与环境保护准则和标准下, 在一定的经济、技术水平条件下, 在保证一定的社会福利水平要求下, 利用当地(和调入)的水资源和流域“生态-社会-经济”系统其他资源与环境条件, 维系良好生态与环境所能够支撑的最大人口数量及社会经济规模^[4]。

根据生态与环境承载力的定义, 寻求在可持续发展条件下的流域最佳发展模式的经济规模和人口数量, 也就是维系一定的生态与环境质量要求又能够保持良好的社会经济发展水平的阈值, 即一定生态与环境质量水平、社会经济发展水平时资源-环境复合系统对社会经济系统的可承载的最大人口和GDP。

因此生态与环境承载力最终表现为一个生态与环境压力/承载框架体系, 而最大的国内生产总值和人口则是在一定的生态与环境准则的基础上。利用当地的水资源/土地资源所能承载的生态与环境体系, 表现为支撑能力系统和压力大小系统。

因此生态与环境承载力的内涵是: 它是一个综合系统, 系统用一系列的指标来表现, 最主要的是国内生产总值和人口。按照国民经济发展和我国建设小康水平的目标, 承载的人口是指占有粮食、一定水资源、土地资源的, 即承载人口是生活得非常好的, 具体用一个指标体系来衡量, 这些指标还包括人均国内生产总值、人均水资源、土地资源等、以及一定的生态与环境服务价值等。

同时, 支撑系统和压力系统之间各指标之间关系通过建立社会经济、水资源、土地资源和生态与环境之间的指标互动关系来确定, 也就是说, 支撑系统如何支撑最大的承载, 要通过建立人口、国内生产总值通过一定的生态与环境指标准则对水资源、土地资源和生态与环境的压力大小。这个互动关系的建立通过CGE模型来确定, 建立各指标因素之间的关系。

根据上述分析, 必须确定一定的生态与环境质量水平、社会经济发展水平、人均水土资源水平之间的互动关系, 研究建立CGE模型分析“水土资源-社会经济-生态与环境”互动关系以及它们之间制约。并设立情景分析流域未来不同发展模式下社会经济发展水平和生态与环境质量水平以及水土资源水土质量水平。

因此，必须建立流域生态与环境承载力的指标体系并确定量化方法，主要分析如下：

流域生态与环境承载力是针对其生态与环境中的水相关的生态问题提出的。流域与水相关的主要三个因素：

水资源因素：流域水资源开发过度，生态用水严重不足。这是造成流域生态与环境问题的主要矛盾，社会经济发展用水挤占生态用水，结果造成河道断流、地下水位下降、湖泊干涸、湿地萎缩、入海水量减少、河口淤积。

水污染因素：生产生活污水排放量太大，超过水体的净化能力。这是造成海河流域无论地表水还是地下水有河皆干，有水皆污染的主要因素。

水土流失因素：水土流失恶化造成耕地减少、河道水库淤积、沙尘暴肆虐。

因此建立CGE模型必须分析三个主要因素：一个是水资源因素，分析水资源约束；二是水污染问题，分析水污染收费对经济发展影响，以及水污染带来的损失；三是水土流失问题，必须分析流域水土流失投资治理，以及水土流失损失对经济发展的影响。以上三大因素的分析采用环境因素的剂量-响应方法。

CGE模型能够刻画经济内部各要素之间的具体关系，利用这种关系、通过分析任一要素的变化能够找到该要素对整体经济发展的影响，从而能够有效分析环境政策对经济发展的影响。在海河流域，通过分析海河各方面生态与环境恢复所引起的经济各要素之间的变化，确定污染损失与水污染收费之间、水资源短缺缓解与新增水源及节水投资之间以及水土流失比与水土保持投资之间的量化关系，以及他们之间的相互影响关系，通过这种关系建立环境恢复程度和经济各要素之间的关系，通过CGE模型，建立海河流域经济发展与生态与环境恢复之间的互动模型。

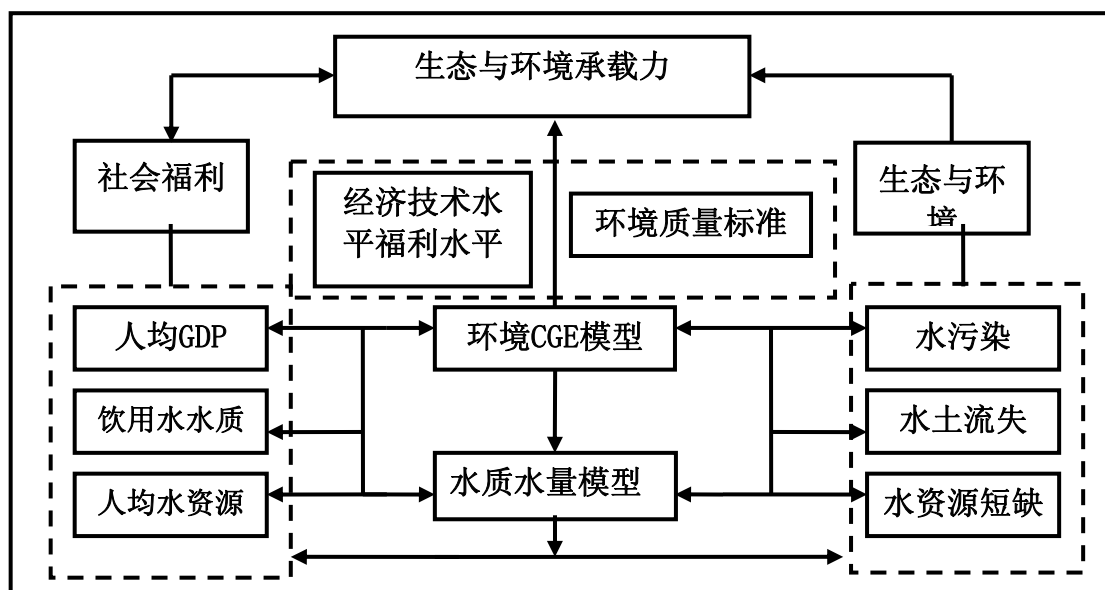


图1.1 研究思路示意图

根据上述分析可以看出依据生态与环境承载力的定义,生态与环境承载力的指标体系共有4个层次,分别为总体承载力表述层,系统层,状态层,变量层,要素层。

总体层:综述表达生态与环境承载力,用于分析系统可承载的总体状况,分别为承载人口和GDP,生态与环境发展测度,社会经济发展测度,可持续发展测度等;

系统层:水量平衡系统,生态与环境-社会经济-资源环境耦合系统,CGE模型描述的社会经济内部结构系统;

状态层:以年为单位,表述生态与环境在每一年的承载力状态,可持续发展逐年分析;

要素层:用于评价生态与环境承载力变量大小的各指标体系以及指标群,对生态与环境质量好坏,社会经济发展程度,人均福利状态要素进行描述的层次,也通过该层次的生态与环境指标与社会经济指标联系CGE模型变量与生态环境要素变量。

建立生态与环境承载力的评价方法,设情境分析海河流域不同的经济政策(产业结构调整)和环境政策(不同的环境恢复投资)引起的经济环境变化,进而确定生态与环境承载力变化,并通过互动模型的最优化分析,确定海河生态与环境承载力的极限值,通过模型的建立分析海河流域生态与环境达到最大承载力以及不同情景的经济发展和环境恢复状况。

根据上述分析建立CGE模型,计量分析“社会经济-水土资源-生态与环境”之间的关系,这样,根据承载力的计量模型,要解决海河的问题,还必须建立水量平衡模型,分析社会经济用水和生态与环境用水之间的关系,分析生产生活水体排放以及流域的环境容纳能力之间的关系。

第一,分析水资源、土地资源利用中的生态用水、生态用地,这样可以解决水资源短缺以及水土流失的主要问题。第二,分析环境容量,看生产生活中排出的污染物是否超过了环境的容纳能力,同时也要考虑生态用水、生态用地的质量是否符合环境标准。第三,分析经济活动方式(产业结构、)、人民生活方式与污染物排放量间关系研究,在环境容量的约束下进行。体现在经济规模(GDP)与污染物间的关系上,看是否在追求经济规模增大同时考虑产生的污染物不超过环境容量。

1.6 海河流域概况及主要生态与环境问题

1.6.1 海河流域概况及社会经济发展

海河流域位于东经 $112^{\circ}\sim 120^{\circ}$ ，北纬 $35^{\circ}\sim 43^{\circ}$ 之间，东临渤海，南界黄河，西靠云中、太岳山，北依蒙古高原。地跨八省、自治区、直辖市，包括北京、天津两市全部，河北省绝大部分，山西省东部，河南、山东省北部，以及内蒙古自治区和辽宁省各一小部分，总面积 $31.8\times 10^4\text{km}^2$ ，其中山丘和高原面积 $18.9\times 10^4\text{km}^2$ ，占 60%；平原面积 $12.9\times 10^4\text{km}^2$ ，占 40%。2003 年全流域共有 31 个地级市，2 个盟，256 个县(区)，其中含 35 个县级市。

海河流域属半湿润半干旱的温带大陆性季风型气候区，气温由北西南东递增。无霜期亦由北向南递增。北部大部分地区约 100~120 天，中部地区 100~150 天，平原南部及沿海地区在 200 天以上。相对湿度西部较小，东南和北部较大，全年平均在 50%~70% 之间，夏季相对湿度平均在 70%~80% 之间。由于气候比较干旱，流域内蒸发较大，年水面蒸发量山区约 1000~1200mm，平原约为 1200~1400mm，年陆面蒸发量平均为 400~500mm。流域多年平均年降水量 548mm（按 1956~1984 年资料统计），是我国东部沿海降水量最少的地区。来自西南和东南洋面的暖湿气流受地形抬升的影响，在燕山—太行山迎风坡形成了从东北到西南呈弧形分布的多雨地带，多年平均降水量一般为 600~700mm，由此向西北和东南两侧递减。降水量年内分配不均匀，多年平均汛期降水量（6~9 月）占全年的 75%~85%。降水量年际变化很大，为全国年降水量年际变化最大的地区之一。单站最大、最小年降水量比值在 3~5 倍，个别站为 9.4 倍。50 年来，海河流域的气候条件总体上是稳定的，但是由于大气环流和人类活动的影响，气候条件略有变化，90 年代平均降水量与多年平均降水量基本持平。这表明 50 多年来海河流域的降水量和气温基本处于正常变化状态。

海河流域包括海河、滦河、徒骇马颊河三大水系。海河水系各支流分别发源于蒙古高原、黄土高原和燕山、太行山迎风坡，流域面积 $23.18\times 10^4\text{km}^2$ ，由蓟运河、潮白河、北运河、永定河(以上水系为海河北系)、大清河、子牙河、漳卫南运河、黑龙港水系和海河干流(以上水系为海河南系)组成，汇集到天津入海。滦河源于坝上高原，经七老图山、阴山东和冀东平原于河北省乐亭县入渤海，流域面积 $4.45\times 10^4\text{km}^2$ ，是华北地区水量丰沛的河流，此外，还有发源于燕山南麓的冀东沿海诸河，由洋河、陡河等 17 条单独入海的河流组成，流域面积 $1\times 10^4\text{km}^2$ 。徒骇马颊河位于漳卫南运河以南，黄河以北，位于海河流域的最

南部，由徒骇河、马颊河、德惠新河及滨海小河等平原河道组成，流域面积 $3.18 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。海河流域河道呈扇形分布，具有水系分散、河系复杂、支流众多、过渡带短、源短流急的特点。海河流域行政和水资源分区面积见表 1.1。

表 1.1 海河流域行政分区和水资源分区面积 单位: km^2 , %

分区	北京市	天津市	河北省	山西 东部	河南 北部	山东 北部	内蒙 小部	辽宁 小部	合计	所占 比例
滦河及冀东沿海			45870				6950	1710	54530	17.1
海河北系	14581	6479	37033	19400			5626		83119	26.1
海河南系	2219	4826	88356	39733	13535				148669	46.7
徒骇马颊河			365		1765	29713			31843	10.0
海河流域	16800	11305	171624	59133	15300	29713	12576	1710	318161	100
所占流域比例	5.3	3.6	53.9	18.6	4.8	9.3	4.0	0.5	100	

注：本次研究以县为最小统计单元，海河流域共计 6 个省区以及北京天津两个直辖市，共 34 个城市 263 个区县，以 2003 年统计资料为准。各省、自治区、直辖市均指在海河流域内部分，其中北京、天津两市为全部，河北省为不包括内陆河和辽河流域的绝大部分，山西省为黄河、海河流域太行山分水岭以东部分，河南省、山东省为黄河以北的绝大部分，内蒙古自治区仅为滦河和永定河上游的小部分，辽宁省仅为滦河山区东部的小部分（朝阳市）。

表 1.2 海河流域人口增长情况 (单位: 万人, %)

年	1952	1957	1962	1970	1975	1980	1990	1998	2000	2003
数量										
合计	5705	6626	7483	8596	9277	9795	11672	12235	12748	15594
城镇	900	1300	1452	1459	1724	2016	2673	3317	3550	6589
农村	4805	5326	6031	7137	7553	7779	8999	8918	9198	9005
结构										
城镇	15.8	19.6	19.4	17	18.6	20.6	22.9	27.1	28.0	42.2
农村	84.2	80.4	80.6	83	81.4	79.4	77.1	72.9	78.0	57.8
年增长率		3.03	2.46	1.67	1.54	1.09	2.06	0.75	2.07	6.95

1949 年以来，流域人口及城市化海河流域总人口持续增长，城镇化率不断提高。流域总人口从 1952 年的 5791 万人增加到 2003 年的 1.56 亿人。人口自然增长率不断下降，城镇化率由 1992 年的 15.8% 增加到 2003 年的 42.2%。2003 年平均人口密度 $395 \text{ 人}/\text{km}^2$ ，如表 1.2 所示。

流域经济也得到了快速发展，国内生产总值从 1952 年的 185 亿元增长到 2003 年的 20585 亿元，表 1.3 为海河流域国民经济发展情况。

1.6.2 主要生态与环境问题

海河流域是我国七大江河中水资源最为紧缺的地区，生态与环境极其脆弱。

新中国成立以来，进行了大规模水利建设，保障了防洪安全，生产生活用水条件大为改善，促进了经济发展。但伴随人口的大量增加和经济的快速发展，对水资源的需求已大大超过了水资源与环境的承载力，生态与环境已恶化到十分危险的境地。海河流域水资源的短缺以及联系的生态与环境问题十分突出。

表 1.3 海河流域国民经济发展情况 单位：亿元，%

年份	GDP				国民经济结构		
	合计	一产	二产	三产	一产	二产	三产
1952	185	127	29	29	68.4	15.8	15.8
1957	286	142	82	62	49.6	28.6	21.8
1962	222	92	72	58	41.4	32.2	26.4
1965	339	143	120	76	42.1	35.4	22.5
1970	498	171	229	98	34.3	46.0	19.7
1975	652	208	306	137	31.9	47.0	21.1
1980	984	258	441	258	26.2	44.8	29.0
2000	11416	4806	4041	2568	12.3	47.1	40.6
2003	20585	2250	9826	8506	10.9	47.7	41.3

海河流域的与水相关的生态与环境问题可归纳为三个主要方面：一是水资源过度开发利用造成河道断流、地下水位下降、湖泊干涸、湿地萎缩、入海水量减少、河口淤积；二是污水排放造成水体污染(包括地表水、地下水)；三是水土流失持续恶化造成耕地减少、河道水库淤积、沙尘暴肆虐，即：

(1) 由于水资源短缺导致的流域生态与环境问题。

山区来水大量减少，水资源量衰减严重。以首都北京市供水水源地的密云、官厅水库为例(图 1.2)，官厅水库 1955-1984 年期间平均来水量 $11.3 \times 10^8 \text{m}^3$ ，但到 1985-1995 年期间平均来水量已衰减到 $2.7 \times 10^8 \text{m}^3$ ，仅为前者 1/4。两个时期的流域平均降水量却相当(407.5mm)。密云水库来水减少的趋势也十分严重，相比 1960-1979 年段，1980-1997 年的平均来水量已减少了 $4 \times 10^8 \text{m}^3$ 。山区水源地来水量的大量减少，给城市和中下游地区的生态与环境和社会经济发展带来极大的危害。

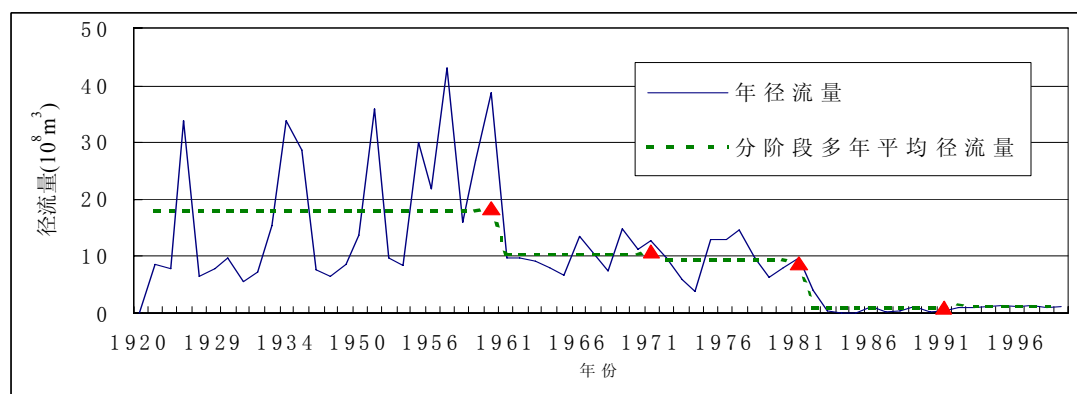


图 1.2 潮白河径流演化阶段示意图

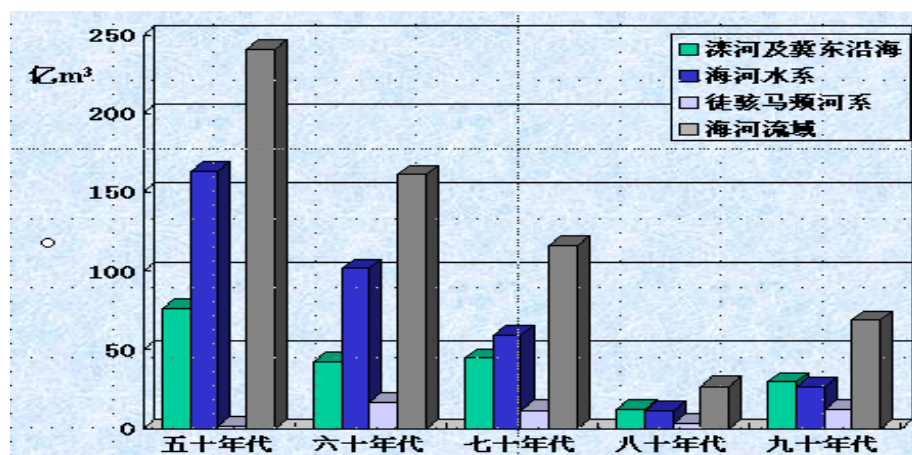


图 1.3 海河流域入海水量减少示意

河道断流、入海水量减少、河口淤积严重。从二十世纪五十年代至九十年代，全流域年均入海水量依次为 241 、 161 、 116 、 26.9 、 $68.5 \times 10^8 \text{m}^3$ ，从北向南，各河流入海水量逐渐减少（图 1.3）。1980~1998 年，海河流域年均入海水量 $45.8 \times 10^8 \text{m}^3$ ，其中滦河、海河、徒骇马颊河入海水量分别为 $20.4 \times 10^8 \text{m}^3$ 、 $18.5 \times 10^8 \text{m}^3$ 、 $6.9 \times 10^8 \text{m}^3$ ，海河南系入海水量仅 $5.8 \times 10^8 \text{m}^3$ ，且主要是汛期洪涝水和污水。由于入海水量减少，改变了水沙平衡关系，造成河道及河口淤积。流域内 12 个主要入海河口都存在淤积问题。河口淤积造成河口区生态根本性破坏。入海水量的减少，使流域生态系统由开放型逐渐向封闭式和内陆式方向转化，河流生物物种转向低级化。

湿地萎缩，湖泊干涸、地下水过量开采导致严重的漏斗问题。二十世纪五十年代，海河流域湿地面积达 9000km^2 ，而目前湿地面积和水库水面面积总和也只有 3852km^2 ，自然湿地已经大量消失。现有湿地仅占总面积的 7%（图 1.4）。在大力开发地表水资源的同时，地下水开采量不断增加。目前，全流域共有各类机井 120 万眼（其中平原区 105 万眼），平均每平方公里 8.2 眼，地下水年开采量达 $243 \times 10^8 \text{m}^3$ ，超采 $65 \times 10^8 \text{m}^3$ （其中浅层超采 $24 \times 10^8 \text{m}^3$ ，深层超采 $41 \times 10^8 \text{m}^3$ ），全流域已累计超采 $900 \times 10^8 \text{m}^3$ （其中浅层地下水 $470 \times 10^8 \text{m}^3$ ，深层水 $430 \times 10^8 \text{m}^3$ ）。浅层地下水超采面积 $4.1 \times 10^4 \text{km}^2$ ，深层地下水超采面积 $5.6 \times 10^4 \text{km}^2$ ，分别占平原区总面积的 32% 和 40%。浅层地下水超采最严重的地区为黑龙港地区（衡水、邢台、沧州）和白洋淀西部平原（保定及周边地区），形成了以石家庄、保定、邢台、邯郸、唐山等城市和宁柏隆（宁晋、柏乡、隆尧）、肃宁、成安等县城为中心的地下水位下降漏斗，漏斗中心水位埋深 20~56m。其中海河南系平原区漏斗已连成一片，面积 $2 \times 10^4 \text{km}^2$ 。浅层地下水长期超采，导致一些地区含水层疏干。1998 年海河平原地下水含水层疏干面积已达 $1.05 \times 10^4 \text{km}^2$ ，占平原总面积

的 8.1%，主要分布在北京西南郊、唐山、石家庄、保定、邯郸、宁柏隆、冀枣衡等漏斗区。

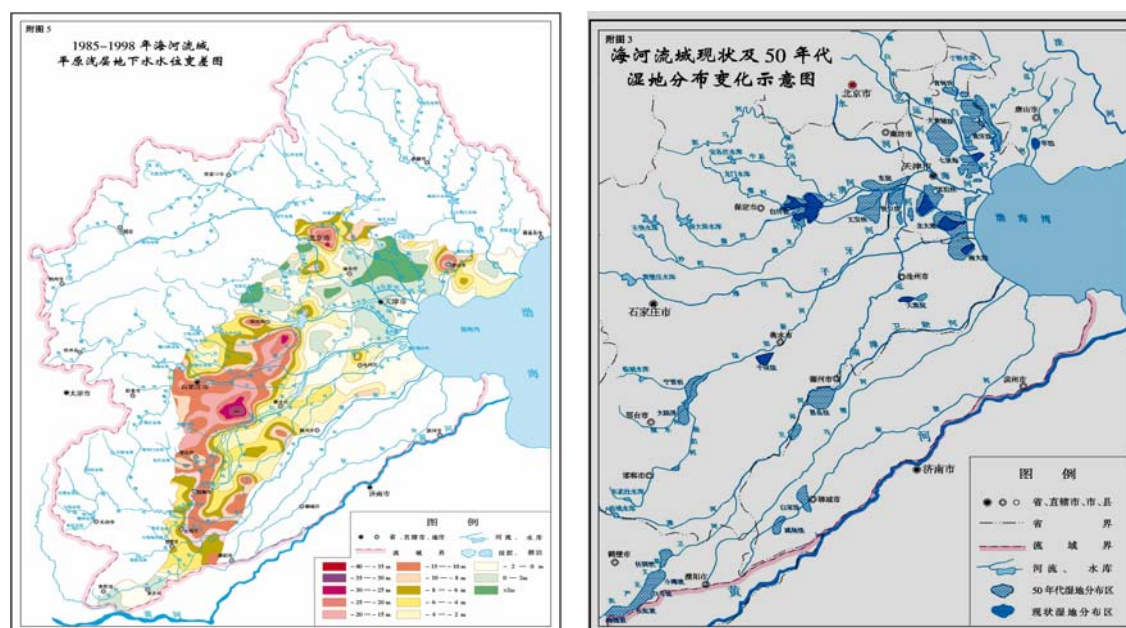


图 1.4 海河流域地下水超采与湿地系统的退化示意

(2) 由于地表水、地下水水体污染导致的严重生态与环境问题。海河流域的水污染问题十分严重，主要是工矿企业排放的废水和城镇生活污水携带大量污染物进入河流水体造成的。据统计 1998 年，全流域废污水排放总量已达到 $55.6 \times 10^8 \text{t}$ ，这些废污水中大部分未经处理就排入河流和水库，造成地表水的严重污染。地表水的污染河长已达 75%，有 2/3 井的地下水达不到饮用水要求。海河流域水污染形势十分严峻。目前，水污染已由 20 年前的局部河段发展到现在的全流域，由下游蔓延到中上游，由城市扩散到农村，由地表侵入地下。据统计，近年来海河流域的废污水排放量每年高达 $60 \times 10^8 \text{t}$ 。官厅水库因水质恶化，被迫于 1997 年开始退出生活供水。流域内每年还引用超过 $20 \times 10^8 \text{t}$ 污水进行灌溉，对浅层地下水、土壤和农作物造成污染。

(3) 水土流失持续恶化造成耕地减少、河道水库淤积、沙尘暴肆虐。水土流失是海河流域自然灾害之一。由于气候干旱多暴雨，山区地面坡度较大，且黄土广布，土质疏松，植被覆盖率低，加之人口密度大，生产落后，广种薄收，陡坡开荒等人为因素，形成了严重的水土流失。据统计，五十年代初期有各类水土流失面积 $12.6 \times 10^4 \text{km}^2$ ，八十年代末遥感调查时仍有 $11.93 \times 10^4 \text{km}^2$ ，其中山区水土流失面积 $11.06 \times 10^4 \text{km}^2$ ，占山区面积的 59.5%，年平均土壤侵蚀总量为 $4.02 \times 10^8 \text{t}$ 。海河流域水土流失总面积大约占流域总面积的 1/3。

整个海河流域有以上三个大的方面与水相关的生态与环境问题，具体到各

个地区以及水资源分区有其各自不同的特点，主要表现是：山区主要是严重的水土流失问题，平原区生态与环境问题最为严重，主要有水质污染、地下水超采、河道断流、湿地萎缩、入海水量减少等。具体到海河流域的二级分区如表 1.4 所示。

表 1.4 海河流域各分区的主要与水相关的生态与环境问题

区域名称	主要与水相关的生态与环境问题
滦河冀东沿海山区	水土流失、污水排放
滦河冀东沿海平原	地下水超采、水质污染、河道断流、入海水量减少
海河北系山区	水土流失、污水排放
海河北系平原	水质污染、地下水超采、河道断流、湿地萎缩、入海水量减少
海河南系山区	水土流失、污水排放
海河南系平原	地下水严重超采、水质污染、湿地萎缩、入海水量减少、河道断流、
徒骇马颊河平原	水质污染、湿地萎缩、入海水量减少、地下水超采、河道断流

第 2 章 海河流域经济计量模型理论方法

2.1 CGE 模型分析

如下的列昂惕夫线性动态投入产出模型是众所周知的：

$$x(t) = Ax(t) + B[x(t+1) - x(t)] + c(t) \quad (2.1)$$

其中，A 与 B 分别为中间投入系数阵与固定资本投入系数阵。

$x(t)$ 为某一年的总产出，右边对应的三项分别为中间投入，固定资产投资增长以及消费。根据上述模型，可以逐年递推的计算总产出逐年的变化。

上述投入产出模型应用于海河流域存在的问题是：线性投入产出模型假设一种产品由一种技术生产出来，即劳动与资本不可替代，只能体现出递推关系，没有闭合均衡的概念。但在现实的经济中，生产一种产品可采用资本密集型技术，也可采用劳动密集型技术，即资本与劳动可相互替代，为克服线性投入产出模型资本与劳动不可替代的缺点，目前国外经济学工作者普遍应用的可计算一般均衡(CGE) 模型中采用非线性生产函数，如在 CES 生产函数中，资本与劳动可相互替代，但由于生产函数的非线性，使得计算变得复杂化，因而目前 CGE 模型一般用于求解市场静态平衡点，而对于平衡增长解及最优增长解在多部门情况下，采用上述公式。

以下将分析投入产出模型和 CGE 模型耦合及其在海河流域的应用。

海河流域国民总产出投入产出关系为：

$$Y(t) = AY(t) + B[Y(t+1) - Y(t)] + c(t) \quad (2.2)$$

产出一共有以下几部分组成，中间投入、消费和再投资，以及进出口。生产的约束仅仅是投入最小的约束，也就是中间投入比例约束最小的影响生产的规模，生产函数用下式表示：

$$X_i(t) = \min\{x_{1i}/a_{1i}, \dots, x_{5i}/a_{5i}, x_{6i}/a_{6i}, Vi/(1 - a_{1i} - a_{2i} - \dots - a_{6i})\}$$

$$V_i = (a_i K_i^{\sigma_i} + d_i L_i^{\sigma_i})^{1/\sigma_i} \quad (2.3)$$

生产函数中， K_i 为第 i 部门使用的固定资产净值， L_i 为第 i 部门从业人员，很明显，这是一个 CES 生产函数，它表明第 i 部门增加值由固定资本 K_i 与就业人口 L_i 所创造。依中国统计年鉴海河流域相关省份容易找到各部门增加值 V_i 的数据。但各部门固定资本 K_i 的数据难以直接找到，这时可通过间接估算求出各部门固定资本 K_i 的历年数据。例如，对农业部门来讲，依中国 1999 年度统计年

鉴可找出农村居民平均每户占用生产性固定资产及总户数来估算农业部门历年固定资产 K_i 的数据, 当获得各部门 K_i , L_i , V_i 的数据后, 根据拟合可以估计各部门的生产函数, 参考海河流域农业生产水平进行调整, 各部门生产函数估计结果如公式 2-4 到 2-10 所示。

$$\text{农业部门生产函数: } V_1 = (0.30 \times K_1^{-0.5} + 0.78 \times L_1^{-0.5})^{-1/0.5} \quad (2.4)$$

$$R^2 = 0.99$$

$$\text{工业部门: } V_2 = (1.03 \times K_2^{-1} + 0.16 \times L_2^{-1})^{-1}, \quad (2.5)$$

$$R^2 = 0.997860$$

$$\text{建筑业部门: } V_3 = (0.19 \times K_3^{-1.5} + 0.22 \times L_3^{-1.5})^{-1/1.5} \quad (2.6)$$

$$R^2 = 0.97$$

$$\text{货运邮电业部门: } V_4 = (0.95 \times K_4^{-0.6} + 0.26 \times L_4^{-0.6})^{-1/0.6} \quad (2.7)$$

$$R^2 = 0.97$$

$$\text{商业饮食业部门: } V_5 = (0.036 \times K_5^{-12} + 0.06 \times L_5^{-12})^{-1/12} \quad (2.8)$$

$$R^2 = 0.93$$

$$\text{非物质生产部门: } V_6 = (0.78 \times K_6^{-0.4} + 0.31 \times L_6^{-0.4})^{-0.4} \quad (2.9)$$

$$R^2 = 0.99$$

有了上述的生产函数参数, 就可以估计投入产出模型中历年的变化情况。

$$A = (a + d)^{1/\sigma} \quad (2.10)$$

A 为部门技术系数, 参考日本经济技术系数平均增长速度, 如表, 根据经验取年均增长 4.5%。

表 2.1 主要发达国家 A 值

时期	美国	日本	德国	法国	英国
1960-1973	1.6	5.8	2.6	4.0	2.3
1973-1979	-0.4	1.4	1.8	1.7	0.6
1979-1990	0.2	2.0	0.8	1.8	1.6

上述分析给出了 CGE 模型生产函数的基准年主要参数, 分析海河流域经济增长需要对上述参数的增长率进行假设, 参考中国香港、台湾、东南亚等国以及我国总体增长速度, 分析海河的劳动力、资本以及人口的年增长率分析。

表 2.2 外生变量增长率设定 单位: %, 每年

	非技术劳动力	技术劳动力	资本	人口
中国大陆	1.2	4.9	11.0	0.6
海河流域	1.1	5.1	11.5	0.6
中国香港	-0.2	4.5	6.7	0.4
中国台湾	0.7	0.9	8.2	0.9
日韩	-0.5	-0.3	2.7	0.4
东盟	1.8	6.0	5.4	1.7
其他亚洲国家	2.5	5.9	6.6	2.0
北美自由贸易区	1.6	1.1	4.0	1.2
东欧	0.0	0.2	5.1	0.3

$$Y(t) = AY(t) + B[Y(t+1) - Y(t)] + c(t) \quad (2.11)$$

根据上述递推公式, 需计算出消费结构 $c(t)$, 消费分为三部分, 居民消费, 政府消费和企业消费。

消费采用最简单的线性比例分配。

$$p_i c_i = g_i WL; \quad (2.12)$$

其中 $g_1 + g_2 + \dots + g_6 = 1$;

当收入为 WL 时, 各种产品消费支出是 WL 的固定比例, 根据海河的投入产出表, 不难计算各行业消费品的比例。消费支出比例为:

$$g_1 = 0.205, \quad g_2 = 0.406, \quad g_3 = 0.049, \quad g_4 = 0.006, \quad g_5 = 0.081, \quad g_6 = 0.254$$

表 2.3 海河流域人均消费支出变化 单位: 元

年份	1995	1996	1997	1998	1999	2000
全国	3537.57	3919.47	4185.64	4331.61	4651.91	4998.00
北京	5019.77	5729.52	6531.81	6970.83	7498.48	8493.49
天津	4064.10	4679.61	5204.15	5471.01	5851.53	6121.04
河北	3161.99	3424.35	4003.71	3834.43	4026.30	4348.47
山西	2640.73	3035.59	3228.71	3267.70	3492.98	3941.87
内蒙古	2482.15	2767.84	3032.30	3105.74	3468.99	3927.75
山东	3285.50	3770.99	4040.63	4143.96	4551.05	5022.00
河南	2673.95	3009.35	3378.02	3415.65	3497.53	3830.71

资料来源: 中国物价及城镇居民家庭收入调查统计年鉴 (1996-2001), 国家统计局城市社会经济调查总队。

可以发现, 海河流域的居民消费支出增长速度均超出全国水平, 年均增长约为 8.9%, 而全国则年均增长 7.2%。

当估计出上述参数后:

$$c_i = \frac{g_i}{p_i} WL = \frac{g_i}{p_i} W(L_1 + L_2 + \dots + L_6) \quad (2.13)$$

根据 CES 生产函数: $V_i = (a_i K_i^{\sigma_i} + d_i L_i^{\sigma_i})^{1/\sigma_i}$ 以及成本最小化, 可以求得:

$$c_1 = \frac{wg_1}{p_1} \left[\left(\frac{w/d_1}{q_1} \right)^{1/(\sigma_1-1)} (1 - a_{11} - a_{21} - \dots - a_{61}) \right] \quad (2.14)$$

其他各行业消费类推。

逐年投资变化:

根据公式 $Y(t) = AY(t) + B[Y(t+1) - Y(t)] + c(t)$, 其中第二部分 $B[Y(t+1) - Y(t)]$ 为投资变化部分, B 为投资系数, 即每年总产出的部分作为投资进行再生产。

$$K_{ji}(t+1) = K_{ji}(t) - \delta_j K_{ji}(t) + I_{ji}(t) \quad (2.15)$$

$I_{ji}(t)$ 为第 t 年的新增固定资产投资, $\delta_j K_{ji}(t)$ 为固定资产折旧, 折旧率按照年均 4.4% 计算。只有第二部门和第三部门可以作为固定资本, 因此设 $K_{2i} = \beta_i K_i$, $K_{3i} = (1 - \beta_i) K_i$ 。根据 2003 年中国统计年鉴固定资产投资统计, K_{2i} , K_{3i} 成固定比例:

$\beta_1 = 0.55$, $\beta_2 = 0.35$, $\beta_3 = 0.36$, $\beta_4 = 0.50$, $\beta_5 = 0.15$, $\beta_6 = 0.15$ 由于最后一个部门没有统计, 所以认为和前一个相同。

2.2 水资源价值分析

为了将水资源因素纳入投入产出表的生产因素中, 必须对水资源价值进行估算。本文参考中国科学院生态与环境研究中系统生态重点研究室的研究成果, 将水资源的价值功能进行分类, 并建立指标体系进行评价(《自然资源学报》文章《中国陆地地表水生态系统服务功能及生态经济价值评价》)(2003.7)。参考《海河流域水资源承载力及水生态系统服务功能的研究》(熊艳辉), 将水资源价值分为直接使用价值和间接使用价值, 并根据 2000 年的评价数据进行计算。这里先分析生活和工业供水的水资源价值定价, 其他参考相关文献定价。

① 生活、工业供水

以 2000 年为评价基准年, 以海河流域水文资料为数据来源, 统计海河流域在工业和生活方面的用水总量为 116.4 亿 m^3 , 其单位均价来源于 2000 年《中

国物价年鉴》^[81]中的“36个大中城市居民基本生活必需品和服务项目价格检测汇总表”，定价为 1.00 元/m³。

② 农业供水

以 2000 年为评价基准年，以海河流域水文资料为数据来源，统计海河流域在工业和生活方面的用水总量为 323.3 亿 m³，农业生产用水均价取自河池全等人的研究报告^[82]，定为 0.03 元/m³。

表 2.4 海河流域水资源价值直接使用价值

功能类型	物质量	单位均价	价值量 (10 ⁸ 元)
供水 (生活、工业)	116.40 (10 ⁸ m ³)	1.00 (元/m ³)	116.40
供水 (农业生产)	323.27 (10 ⁸ m ³)	0.03 (元/hm ²)	9.73
水力发电	10.59 (10 ⁸ kwh)	0.43 (元/t)	4.55
航运	0		0
水产品生产	159.39 (10 ⁴ t)	7000 (元/t)	111.57
休闲娱乐	0		6.40
合计			248.65

其中休闲娱乐价值认为海河的水资源总量占全国的 1.3%，所以假设其休闲娱乐功能为水资源在全国旅游业总收入作用比例的 1.3%，全国为 491.86 亿元。

表 2.5 海河流域水资源价值间接使用价值

功能类型	物质量	单位均价	价值量 (10 ⁸ 元)
洪水调蓄 (湖泊, 沼泽)	14.09 (10 ⁸ m ³)	0.67 (元/m ³)	9.44
洪水调蓄 (水库)	206.72 (10 ⁴ km ²)	5532.9 (元/hm ²)	114.38
河流输沙	0.06 (10 ⁸ t)	1.5 (元/t)	0.09
水资源蓄积	67.38 (10 ⁸ m ³)	0.67 (元/m ³)	45.48
土壤保持	457.50 (hm ²)	9020.87 (元/hm ²)	0.04
净化功能	2849.92 (t/a)	2.0 (元/kg)	0.05
生物多样性维持	544.95(km ²)	3633.6 (元/hm ²)	2.02
合计			171.43

海河流域的水资源总价值为 420.08 亿元，根据上面的结果可以看出，在水资源的服务价值中，60%的价值用于生产功能，大于用于维持自然过程和流域的生态系统功能价值。

2.3 环境效应量化

2.3.1 水污染效应

美国印第安那大学丹尼尔教授认为,目前中国每年污染造成的损失占 GDP 的 4%,甚至有人估计 8%到 15%。他还运用诺贝尔经济学奖得主的“EKC 曲线”表明工业化与环境污染相关,在本文中借鉴中国计量经济研究所和中国水利水电科学研究院水环境研究所专题研究《水环境污染经济损失计量研究》课题部分研究成果,分析如下。根据海河水资源公报:

表2.6 1998年海河流域各行业用水量以及污水排放量(单位: $\times 10^8 \text{ m}^3$)

行业	农业	工业	建筑业	运输邮电业	商业饮食业	非物质生产部门	居民生活用水
用水量	280.74	38.15	0.52	3.85	13.28	6.18	50.68
污水排放	0	33.8	0	0	0	1.29	20.1

根据经验公式,流域的水污染对工业和农业生产造成损失为:

$$\gamma_i = K_i \left(\frac{e^{0.54(Q_i-4)} - 1}{e^{0.54(Q_i-4)} + 1} + 0.5 \right) \quad (2.16)$$

Q_i 分别为工业和农业的用水水质。污染效应包括两个方面,生产和消费。生产表现在各行业的生产成本增加,消费表现在政府消费和家庭消费费用增加上,同时污染治理的投资增加。

表 2.7 海河水污染造成工业损失 单位:亿元

分类	总产值	成本增加	污染治理费用	工业总损失
工业	14033.8	169.7	22.4	192.1

农业损失主要表现在农产品的产出变化损失,而工业表现为成本以及污染治理投资增加。

消费损失按照人均健康费用损失计算,分析政府消费损失和家庭消费损失和健康损失费用。

表 2.8 海河流域水污染造成消费损失

政府消费 ($\times 10^8$ 元)	防污损失 (元/人)	健康损失 (元/人)	家庭防污费 ($\times 10^8$ 元)	健康损失量 ($\times 10^8$ 元)	总损失 ($\times 10^8$ 元)
12.7	5.5	95.9	6.9	120.0	139.6

根据上述分析,当污染达到一定程度时候,消费损失表现在消费的额外支

出,可支付费用降低,进而影响整个经济发展过程。根据投入产出和CGE模型的递推公式。

农业生产函数:

$$V_1 = (0.30 \times K_1^{-0.5} + 0.78 \times L_1^{-0.5})^{-1/0.5} \cdot \gamma_i \quad (2.17)$$

工业生产函数为:

$$V_2 = (1.03 \times (K - \Delta K)_2^{-1} + 0.16 \times L_2^{-1})^{-1} \quad (2.18)$$

投资增加为 $\beta_2 \Delta V$ 以及 $(1 - \beta_2) \Delta V$, 其中 ΔV 为污染治理费用。

消费变化:假设居民消费和政府消费用于水污染的分别为 g_g 和 g_k , 则消费变化为。

$$c_i = \frac{g_g}{p_i} WL = \frac{1 - \sum_{i=1}^6 g_i}{p_i} W(L_1 + L_2 + \dots + L_6) \quad (2.19)$$

部门的用水和污染物的排放关系用耗水系数和COD排放模拟,并总量控制。成立单独的污水处理部门,假设WP为其总的污水处理量,这和产业部门的总产值以及污水排放强度有关。

由以上用水量为总用水控制量,结合全国部门的用水比例结构,各部门交纳污水排放费 tp_i 为第 i 部门的污水排放税率,假设由政府控制调节。生活用水按照用水量 and 污水排放量征收污水排放税率。假设2010年国民经济的总污水排放量为假设各部门的污水控制量为WP,则各行业的控制比例假设为 $\alpha_1 WP$, $\alpha_2 WP$, $\alpha_3 WP$, $\alpha_4 WP$, $\alpha_5 WP$, $\alpha_6 WP$, $\alpha_7 WP$, $\alpha_8 WP$, 由于在上述的国民经济行业分析中,没有考虑生活用水的控制,因此加入生活用水污水控制,则为 $\alpha_9 WP$ 。其中:

$$\sum_{i=1}^9 \alpha_i = 1 \quad (2.20)$$

假设部门的单位产出和中间投入对应的污染物排放量系数为 e_i , 则:

$$X_i \cdot e_i = \alpha_i WP_i \quad (2.21)$$

则污染消除在各部门的投入为 $\alpha_i WP_i \cdot d_i$, 其中 d_i 为污染费率, 则

$$\sum_{i=1}^8 \alpha_i WP_i \cdot d_i = X_9 - \alpha_9 WP_9 \cdot f \quad (2.22)$$

f 为消费者消费污染费率。

根据2010年计算总水资源量为503.8亿 m^3 （南水北调+多年平均水资源量）。
各行业用水量分别为 Q_i ，生活用水量为 Q_9 ，

$$\sum_{i=1}^8 Q_i = Q - W_{生态} - W_{生活} \quad (2.23)$$

表2.9 固定资产投资表 单位：亿元

年份	投资	年份	投资	年份	投资
1990	820.49	1997	4558.37	2004	10045.38
1991	1016.21	1998	5116.82	2005	11451.73
1992	1467.7	1999	5463.32	2006	13054.97
1993	2374.5	2000	5947.67	2007	14882.67
1994	3095.59	2001	6780.34	2008	16966.24
1995	3636.38	2002	7729.59	2009	19341.52
1996	4162.1	2003	8811.73	2010	22049.33

资料来源：2002 年以前根据全国统计年鉴北京、天津、河北和山东部分地区统计所得。

根据海河历年固定资产投资分析到2010年总投资假设为根据直线拟合及统计资料，取年均增长14%，折旧率取4.4%，逐年的固定资产投资如表2.10。

生产函数中加入水资源约束因素，污染消除部门只投入劳动力和资本，生产函数为：

$$X_9^S = AK_9^\alpha L_9^\beta Q^\gamma \quad (2.24)$$

其中 $\alpha + \beta + \gamma = 1$ 。

根据行业累计投资，按照线性折旧率计算，各行业的投资比例为：

表2.10 投资份额比例参数

比例参数	农业	工业	建筑业	运输邮电业	商业饮食业	公共事业以及居民服务业	金融保险业	其它服务业
β	0.0009k	0.05k	0	0.0006k	0.005k	0.01k	0.015k	0.28k

投资份额比例扣除水污染部门的投资外，其他部门的投资假设不变，假设水污染部门投资占总投资比例为 $(1-k)$ ，则其他行业的投资比例不变则：

$$g_g + \sum_{i=1}^6 g_i = 1 \quad (2.25)$$

只有建筑业和工业两个行业可以作为固定资本，全部投资购买的资本品，

比例如下：

表 2.11 资本构成表

行业	农业	工业	建筑业	运输邮电业	商业饮食业	公共事业以及居民服务业	金融保险业	其它服务业
工业 p	0.55	0.35	0.36	0.5	0.15	0.15	0.15	0.15
建筑业 q	0.45	0.65	0.64	0.5	0.85	0.85	0.85	0.85

资料来源：北京地区历年投资比例。

因此，投资消费为 Inv ：

$$\text{对于工业： } IND = TS\beta_1 p_1 + TS\beta_2 p_2 + \dots + TS\beta_8 p_8 + TS(1-k)0.5 \quad (2.26)$$

$$\text{建筑业： } CON = TS\beta_1 q_1 + TS\beta_2 q_2 + \dots + TS\beta_8 q_8 + TS(1-k)0.5 \quad (2.27)$$

$$\text{总消费为： } X_d = \sum_{i=1}^9 x_i + V_i + \sum_{i=1}^9 g_i + Inv \quad (2.28)$$

假设居民消费对行业部门的比例不变，则：

$$\lambda_1 = (1-f) 0.19, \quad \lambda_2 = (1-f) 0.485, \quad \lambda_3 = (1-f) 0.0, \quad \lambda_4 = (1-f) 0.044, \\ \lambda_5 = (1-f) 0.092, \quad \lambda_6 = (1-f) 0.079, \quad \lambda_7 = (1-f) 0.039, \quad \lambda_8 = (1-f) 0.070$$

政府消费不变比例为 $\rho_6 = (1-h)0.1$ ，根据2000年分析，政府消费仅在第六个部门和第八个部门，因此，按照同比例，假设用于水污染的消费比例为 ρ ，则：

$$\rho_8 = (1-h)0.9 \quad (2.29)$$

根据2003年分析， $t=0.0215$ ， $S_s=0.11$ 。

投资消费如下。

$$\text{根据上述假设： } TS = Y_s S_s + Y_g S_g \quad (2.30)$$

$$\text{对于工业： } \begin{aligned} IND &= TS\beta_1 p_1 + TS\beta_2 p_2 + \dots + TS\beta_8 p_8 + TS(1-k)0.5 \\ &= TS(0.3276k + (1-k)0.5) \end{aligned}$$

$$\text{建筑业： } \begin{aligned} CON &= TS\beta_1 q_1 + TS\beta_2 q_2 + \dots + TS\beta_8 q_8 + TS(1-k)0.5 \\ &= TS(0.6724k + (1-k)0.5) \end{aligned}$$

目标函数GDP最大：

$$\text{Max GDP} = \sum_{i=1}^8 (X_i(1-t_i) - \sum_{j=1}^8 a_{ji} X_j - X_i \cdot d_i \cdot e_i - W_i L_i) \quad (2.31)$$

2.3.2 水土流失效应

海河流域目前水土流失面积为 $10.55 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，占流域总面积 $31.8 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的 33.2%。其中水蚀面积 $9.87 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，风蚀面积 $0.655 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，工程侵蚀面积 $0.026 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，损失主要表现在年平均土壤侵蚀量为 $4.0 \times 10^8 \text{ t}$ ，相当于损失速效氮 $4.02 \times 10^4 \text{ t}$ ，速效磷 $0.26 \times 10^4 \text{ t}$ ，速效钾 $3.2 \times 10^4 \text{ t}$ ，相当于流失化肥 $22.21 \times 10^4 \text{ t}$ 。山区坡耕地年侵蚀深度为 0.23~2cm，耕作层（按 30cm 考虑）损失速率为 0.7~5.0%。

海河流域极强度侵蚀面积为 $3.9 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，主要分布在永定河水系，强度侵蚀面积为 $2.2 \times 10^8 \text{ km}^2$ ，主要分布在永定河、漳卫河、子牙河；中度侵蚀面积为 $3.9 \times 10^8 \text{ km}^2$ ，主要分布在滦河、子牙河、大清河；轻度侵蚀面积为 $4.6 \times 10^8 \text{ km}^2$ ，主要分布在滦河、其次是永定河。

根据能值分析，水土流失对海河农业生产带来的损失主要表现在两方面，一是农业投入增加，另一方面产出的损失。产出损失可以直接根据统计计算，投入增加。

表 2.12 水土流失损失分析

损失分类	能量或者物质	太阳能值转换率	太阳能值 (sej)	太阳能值/货币 比率(sej/\$)	经济损失
氮肥	$4.02 \times 10^{12} \text{ g}$	$4.19 \times 10^9 \text{ sej/g}$	16.84×10^{21}	8.0×10^{12}	
磷肥	$0.26 \times 10^{12} \text{ g}$	$1.78 \times 10^9 \text{ sej/g}$	0.46×10^{21}	8.0×10^{12}	
钾肥	$3.20 \times 10^{12} \text{ g}$	$1.50 \times 10^9 \text{ sej/g}$	4.80×10^{21}	8.0×10^{12}	
表层土壤	$2.04 \times 10^{16} \text{ J}$	$7.40 \times 10^4 \text{ sej/J}$	15.10×10^{20}	8.0×10^{12}	
总计			23.61×10^{21}	8.0×10^{12}	$2.9 \times 10^9 \text{ \$}$

根据表 2.12 计算，海河流域的水土流失引起的农业生产增加为 29 亿美元左右，为 239 亿元。根据海河规划，每年减少水土流失面积 5000 km^2 ，则每年可减少 5% 的损失，直到 2030 年为止。农业生产函数为：

$$V_1 = (0.30 \times (K_1 + \Delta K_1)^{-0.5} + 0.78 \times L_1^{-0.5})^{-1/0.5} \cdot \gamma_i$$

$$\Delta K(t) = \Delta K(2003) - (t - 2003) \times 239 \times 5\%$$

计算方法和水污染计算一样，增加水土流失部门

3.3.3 水资源短缺效应

水资源短缺主要表现在影响工业生产和粮食安全。根据研究，华北地区每一吨水能够生产一吨小麦，价格为 200 美元；但是同样用于工业生产，产值增加为 14000 美元，为农业产出 70 倍。因此工业缺水和农业缺水必须分开计算。

农业因缺水造成的经济损失可从以下方面进行考虑计算：

(1) 收集灌溉试验资料及已有的水分生产函数，通过综合对比分析及计算，建立各地区各种主要作物的水分生产函数，即水分与作物产量之间的函数关系。

(2) 农作物有无灌溉、灌多灌少，其产量将不相同。这可由农业水分生产函数来反映。满足作物需水时的产量与实际灌水情况下的产量之间的差值即减产量为农业缺水经济损失。

$$L_{\text{灌}} = \sum_{i=1}^n A_i \Delta y_i C_i \quad (2.34)$$

式中： A_i 为缺水的灌溉面积（亩）； Δy_i 为缺水的减产量（kg/亩）； C_i 为农作物产品价格（元/kg）； n 为农作物种类。根据中国水利水电科学研究院水资源研究所对海河流域多种农业作物分析研究结果如下：

表 2.13 不同保证率农业缺水量及损失 单位：亿 m³，亿元

P=50%		P=75%		P=95%	
缺水量	损失	缺水量	损失	缺水量	损失
136	172.31	154.9	189.85	222	261.53

因此缺水量的损失大约 1.20 元/m³。

工业缺水经济损失考虑如下。

根据受旱年份当地工业供水的缺水量 W 和万元产值取水量求得，其计算公式为：

$$V_{IS} = (W/W_0) \cdot V_{Im} \quad (2.35)$$

式中： W_0 为万元产值取水量，m³/万元。

表 2.14 不同保证率工业缺水量 单位：亿 m³，亿元

P=50%		P=75%		P=95%	
缺水量	损失	缺水量	损失	缺水量	损失
34.4	2273	42.5	2938	55.6	4013

因此缺水量的损失大约 70 元/m³。

2.4. 绿色 GDP 分析

相对于传统的GDP而言，绿色GDP（gGDP）则考虑环境因素，认为环境因素必须考虑自然资源的耗损与环境品质的退化两部分。Maler（1991）指出，对传统国内生产总值常见批评之一是环境品质的退化并未从国民生产净额中扣除；而近年来绿色国民所得相关理论架构的提出，即是希望修正传统国民经济核算体系缺点。Hamilton（1996）指出，对传统国民所得帐架构的调整大致上可分为自然资源的耗损与环境品质的退化两部份。目前已能够用于计算绿色GDP的国民经济核算体系有联合国的环境经济整合帐（SEEA），以及Peskin 等所推动的环境暨自然资源会计帐（ENRAP）等。参考 Chu^[10]（1999）所建构的绿色国民所得理论模型，推导仅考虑水污染影响效果的绿色国民所得模型，不考虑废弃物弃置累积，认为水污染并无累积的问题，因此模型假设水污染造成的损害仅及于当期，根据上述假设，用 λ 表示污染排放造成的边际损害，或者因为减少排放带来的边际效益（此时 λ 为负值），各行业排放量 $X_i e_i$ ，环境无污染排放量 $X_i e_{i0}$ ，则gGDP表示如下：

$$\begin{aligned} gGDP &= GDP - C \\ &= GDP - [\lambda X_i (e_{i0} - e_i) - X_i \cdot d_i] \end{aligned} \quad (2.35)$$

其中，C是由于环境污染导致的经济损失， $X_i d_i$ 表示污染防治成本减少，也就是现在投入的污染治理成本与污染较少至无害时候的污染成本之差。污染减少到无害的时候，将对国民经济体系产生整体的影响，这可以通过本文的CGE模型分析对整个绿色GDP和传统GDP的影响。其中 X_i 、 d_i 、 λ 以及 e_i 在上述已经给出，这里只需确定 e_0 即可。 e_0 为无污染排放量，目前发达国家的污水处理率达到90%以上，而海河污水处理率仅为15%，本文分析认为如果海河污水处理率达到90%，此时的污染损失为零。

第3章 海河流域生态与环境承载力指标体系

3.1 生态与环境承载力指标体系的概念与作用

分析和评价一个区域的生态与环境承载力如何,除了进行定性的描述和分析以外,更重要的要对其进行定量的描述和定量分析。所谓的定量分析就是寻找和建立一个度量标尺,通过这个标尺去测量一个区域的生态与环境承载力的大小。生态与环境承载力涉及经济、环境、科技、社会、生态等多个方面,采取一个或几个指标不足以分析和评价区域的生态与环境承载力大小,所以需要建立一个可持续的评价生态与环境承载力的指标体系。

确定生态与环境承载力评价的指标体系,是评价承载力大小的关键环节,指标体系的涵盖大小,指标体系层次结构是否清晰直接影响评价结果。根据生态与环境承载力的研究思路,量化指标体系建立主要分析水土资源、生态与环境、社会经济三个方面的指标。而这些指标的选取首选要具有以下功能:第一,能够描述区域的社会经济、水土资源、生态与环境的现状和发展趋势;第二,能够体现区域的社会经济、水土资源和生态与环境的协调发展程度;第三,也是最主要的,要能够反映流域的生态与环境问题及其产生的根源。针对海河,由于水生态与环境的恶化,将着重分析海河流域的水生态与环境指标体系。

3.2 指标体系的筛选方法

生态与环境承载力的指标体系由若干相互联系、相互补充、具有层次性和结构性的指标组成的有机系列。这些指标既有直接从原始数据而来的基本指标,用以反映子系统的特征;又有对基本指标的抽象和总结,用以说明子系统之间的联系及复合系统的整体特性的综合指标,如各种“比”、“率”、“度”及“指数”等。在选择指标时,要特别注意选择那些可受到管理措施直接或间接影响的指标;选择那些具有时间和空间动态特征的指标;选择那些显示变量间相互关系的指标和那些显示与外部环境有交换关系的开放系统特征的指标。

指标体系筛选的方法有频度统计法、理论分析法和专家咨询法以及主成分分析法、独立性分析法。下面给出在指标体系建立原则的指导下,适合一般区域(或流域)的生态与环境承载力确定的指标体系。对于具体的研究区域(或流域)还需要进一步考虑被研究区域的生态与环境特点、资源特性和社会经济状况,并在指标数据能够获得的前提下,得到具体指标体系。

3.3 一般区域生态与环境承载力指标体系

3.3.1 社会经济指标

社会经济指标主要由描述和表征人口、经济、社会、科技等发展的指标集组成，该类指标比较繁杂，定性的较多，可操作性不强。在可持续生态与环境承载力研究中，我们主要选取与水土资源开发利用紧密相关的、以及能够综合衡量社会经济发展态势的可量化指标。通过这些指标能够反映出水土资源在社会经济系统中的配置状况，水土资源对社会经济发展的贡献作用，以及社会福利的增长情况。

下文根据国内外有关可持续发展与生态与环境承载力指标研究的最新成果，在频度统计、理论分析与专家咨询的基础上，初步筛选出可持续生态与环境承载力中的社会经济系统的一般指标（如表 3.1）。大致可将其分为以下几部分，并作简要的说明：

（1）人口发展指标 {人口密度或人口总数（现状），人口增长率（趋势）}

“人口”是可持续发展的关键部分。人口的增长是复合系统发展的主要驱动因子之一。描述人口发展的指标主要来自人口数量、质量、结构与变化率等方面。在可持续生态与环境承载力研究中，我们主要考虑的是反映人口发展状况、与社会用水量相关的指标，“人口密度”和“人口增长率”。

（2）经济发展指标 {人均 GDP（现状），GDP 增长率（趋势），经济密度（GDP/km²），人均粮食产量（农业），工业总产值占 GDP 比重（结构），水利投资系数（投资）}

分为经济增长指标、经济发展水平指标和经济结构指标。“经济”是可持续发展的基础部分。经济与人口互相作用，共同驱动复合系统的发展。在可持续生态与环境承载力研究中，经济系统既是水资源土地资源的主要消耗系统，又是水土资源的开发、利用、保护和治理的保障系统。经济发展带来了与水土资源相关的生态与环境问题，各种与生态与环境问题也制约了经济发展，同时生态与环境问题的解决最终还要依赖于经济发展。协调经济与生态与环境、水土资源间的关系是可持续生态与环境承载力的确定的核心内容。衡量经济发展的指标繁多，与可持续发展和生态与环境承载力相关的指标主要有：①“人均 GDP”和“GDP 增长率”，用于描述经济的总体状况。②“经济密度”、“第一、二、三产业占 GDP 的百分比”、“第一产业结构（按照产值结构或者用地结构表示）”、“第二产业结构（能源、原材料、化工占工业总产值比重）”和“工业总产值占 GDP 比重”，用于描述经济结构。③“水利投资系数”，用于描述经济发展对于水资源系统的补偿作用。

(3) 社会发展指标 {人口总量, 人口密度、人口自然增长率、受教育程度等表示}

社会的发展进步是衡量可持续发展的主要依据。可持续发展的最终目标是提高人类的生存能力、生活质量和健康水平。其中, 自然资源的占有量, 特别是耕地资源和水资源的占有量, 是人类生存的主要物质基础。而社会发展水平主要体现在人口总量上, 同时受教育程度表现人们文化水平状况。

(4) 科技发展指标 {灌溉用水定额(农业科技), 工业用水重复利用率(工业科技)}

科技是实现可持续发展的重要环节。科技的发展能够减少环境的污染, 能够降低单位产值的资源消耗。在生态与环境承载力的确定中, 科技发展主要表现在农业和工业的节水技术上, 可以用两个可量化的指标“灌溉用水定额”和“工业用水重复利用率”加以描述。

(5) 水资源需求指标 {耕地灌溉率(农业), 城镇需水比例(结构), 需水量模数(土地), 人均需水量(人口), 单位 GDP 需水量(经济), 需水增长率(综合), 污径比(水环境)}

表 3.1 生态与环境承载力指标体系之一: 社会经济指标

指标名称	单位	指标计算公式及含义
人口密度	万人/km ²	总人口/土地面积
人口自然增长率	%	(现状人口-基准年人口)/基准年人口
人均 GDP	元/人	GDP/总人口
GDP 增长率	%	(现状 GDP-基准年 GDP)/基准年 GDP
经济密度	万元/km ²	GDP 总值/土地面积
人均耕地面积		耕地面积/总人口
人均粮食产量	Kg/人	粮食总产量/总人口
耕地灌溉率	%	灌溉面积/耕地面积
灌溉用水定额	m ³ /亩	灌溉用水量 / 灌溉面积
城镇需水比例	%	(城镇生活需水+工业需水)/总需水量
需水量模数	10 ⁴ m ³ /km ²	需水量/土地面积
人均需水量	m ³ /人	需水量/总人口
单位 GDP 需水量	m ³ /万元	需水量/GDP
需水增长率	%	(现状需水量-基准年需水量)/基准年需水量
工业总产值占 GDP 比重	%	工业总产值/GDP
工业用水重复利用率	%	工业回用水/工业用水量
水利投资系数	%	水利投资/GDP
污水治理率	%	污水处理量/总污水排放量
社会安全饮用水比例	%	饮用卫生达标水的人口/总人口

人口、经济、社会的发展使得人们对水资源(在质与量方面)的需求(包括生存需求、发展需求和享乐需求)不断增加, 给水资源系统造成了一定的压

力。压力主要来自农业、工业、生活和环境需水方面。其中，农业需水是需水大户，一般占需水量的 70%-80%，主要体现在农业灌溉需水上，可用“耕地灌溉率”指标来反映农业需水的程度。用水的组成结构也是影响需水压力的关键因素，为避免指标信息的重复，仅用“城镇需水比例”表示。另外，需水量还可以分别以土地、人口和经济为单位进行度量，用于反映需水的地区间的差异。“需水增长率”综合反映需水的变化趋势，“污水处理率”反映经济与社会发展对水环境或生态与环境的治理能力。

以上只是给出了一个粗略的划分，因为，在选取指标时，为了使指标既完整又简洁，既具有较大的信息量又具有较小的重叠度，我们选择了大量的综合性指标。这些指标涉及到了社会经济系统内部各个子系统的发展及相互作用，因此，有些指标跨越不同的部分，既可看作经济发展指标又可看作社会发展指标。

3.3.2 资源指标

资源包括水资源、土地资源、林草资源、动物资源、矿产资源、旅游资源等，但最基本最主要的资源是水资源和土地资源，故这里主要考虑水资源、土地资源。水资源指标主要由反映水文循环状况和水资源开发利用情况的指标集组成，包括水质和水量两个方面。由于水资源产生于地球上不同尺度的水文循环过程，所以水文循环系统是水资源生成的物质基础性条件，水资源种种特性也与水文循环有关，如可再生性、时空分布特性等。因此，水文循环系统完整性的保护是水资源可持续利用的基础性条件，也是评估生态与环境承载力的一个重要方面。另外，水资源生成后，如果没有必要的水利工程设施进行开发利用，那么本可以作为资源的水就会如同洪水般地流失掉，甚至还会泛滥成灾，失去其资源的价值性。我们把这些用作调蓄、抽取、输送等用途的水利工程设施所构成的系统统称为水资源供给系统，它们是开发、调配水资源的工具，是水资源系统的工程基础部分。该系统的运行情况及其运行结果是我们评估生态与环境承载力的又一个重要方面。根据以上所述，分别从水文循环和水资源开发、调配等方面选取指标，便构成表 3.1 中生态与环境承载力指标体系中的水资源指标。土地资源主要由当地的总土地面积及反映土地开发利用情况的指标集组成，见表 3.2。并把表 3.2 中的各个指标进行简单分类，并做说明。

(1) 水资源总量指标 {人均水资源量 (人口)，水资源模数 (土地)，亩均水资源量 (耕地)，径流系数 (产水)，干旱指数 (蒸发)}

在生态与环境承载力确定中，我们比较关心的是区域 (或流域) 水资源量在人口、土地和耕地方面的分布情况，这是协调“人与水”关系的必备信息。“径

流系数”和“干旱指数”提供了区域（或流域）的产流和蒸发的信息。

(2) 水资源质量指标 {水质等级 (水质)}

水资源包括质与量两个方面。水资源的质量可以用评价水体的水质指标或类别（即水质等级）进行描述。

表 3.2 生态与环境承载力指标体系之一：资源指标

指标名称	单位	指标计算公式及含义
总水资源量	亿 m ³	
人均水资源量	m ³ /人	水资源总量/总人口
水资源模数	10 ⁴ m ³ /km ²	水资源总量/土地面积（考虑过境水）
亩均水资源量	m ³ /亩	水资源总量/耕地面积（考虑过境水）
径流系数	%	径流量/降水量（考虑过境水）
干旱指数	%	水面蒸发量/降水量
水质等级		评价水体的水质类别
水资源利用率	%	(地表可供水+地下可供水)/水资源总量
人均可供水量	m ³ /人	可供水量/总人口
供水量模数	10 ⁴ m ³ /km ²	可供水量/土地面积
供水增长率	%	(现状供水量-基准年可供水量)/基准年可供水量
地下水供水比例	%	地下可供水总量/可供水总量
地表水供水比例	%	地表可供水总量/可供水总量
跨流域调水比例	%	跨流域调水量/可供水总量
供水普及率	%	用水人口/总人口
总用水量	亿 m ³	
农业用水比例	%	农业用水量/总用水量
工业用水比例	%	工业用水量/总用水量
生活用水比例	%	生活用水量/总用水量
生态用水比例	%	生态用水量/总用水量
总土地面积	亿亩	
人均土地面积	亩/人	总土地面积/总人口
总耕地面积	亿亩	
城市用地面积	亿亩	
农业用地面积	亩/人	
生产生活用地面积	亿亩	总土地面积-生态用地面积
生态用地面积	亿亩	生态用地面积=原林草地面积+城市新增林草地面积+山区水土流失生态治理面积+河湖湿地生态用地面积。

(3) 水资源开发指标 {水资源利用率 (开发), 人均可供水量 (人口), 供水量模数 (土地), 供水增长率 (变化), 地下水供水比例 (地下水), 地表水供水比例 (地表水), 跨流域调水比例 (外境水), 供水普及率}

水资源的开发最终表现在供水能力上。开发的程度用“水资源利用率”表示。供水的状况分别用人均、地均、增长率、各种水源比例以及普及率来反映。

(4) 水资源使用指标 {总用水量, 农业用水比例, 工业用水比例, 生活用水比例, 生态用水比例}

水资源使用指标反映出水资源在现有供水能力基础上的分配情况, 是优化配置水资源的重要参数。水资源使用情况通过“总用水量”和各种用水的比例加以表示, 其中, “总用水量”在理论上应等于“总供水量”, 与“总需水量”之差便是“供水缺口”。

(5) 土地资源指标 {总土地面积, 人均土地面积, 总耕地面积, 城市用地面积, 农业用地面积, 生产生活用地面积, 生态用地面积}

土地资源指标在生态与环境承载力分析中它是必不可少的, 它是生态与环境承载力的一个基本组成部分。土地资源指标不同反映情况不同。反映当地自然状况的土地面积, 它是生态与环境承载力的支持系统的最基本的构成要素; 反映当地土地开发利用状况的总耕地面积; 既反映当地土地开发利用状况又反映当地社会经济发展状况的城市用地面积、农业用地面积、生产生活用地面积、生态用地面积。

3.3.3 生态与环境质量指标

生态与环境质量系统是水资源系统和社会经济系统赖以存在的环境基础, 是实现可持续发展的重要保证, 是生态与环境承载力确定中必不可少的指标。在以往水资源规划和管理实施中, 很少真正对生态与环境质量的变化与影响进行量化。如何量化和评价生态与环境承载力中所涉及的生态与环境质量问题, 是生态与环境承载力研究中一个十分重要的问题。

根据以往经验, 建立区域(或流域)生态与环境质量评价指标体系, 应先从区域(或流域)生态与环境典型结构分析入手, 找出影响和表征生态与环境质量的主要因子; 然后, 建立指标体系, 并加以量化和评价。本章在选取指标时, 主要考虑影响和表征生态与环境质量的、且与水资源密切相关的指标。它们可以大致分为以下几个部分(如表 3.3):

(1) 总体质量指标 {生物多样性指数}

生物多样性指数是生态与环境总体质量状况的一个十分重要的参数。它的描述方法很多, 主要由多样性指数、均匀度和优势度三个方面表征。

(2) 植被质量指标 {森林覆盖率(森林分布), 草场面积比(草场分布), 载畜量(草场质量), 植被面积变化率(变化)}

生态与环境质量在很大程度上依赖于植被的分布。而且区域森林和草场的覆盖率是影响区域水文循环和水资源形成的重要因子。

表 3.3 生态与环境承载力评价指标体系之三：生态与环境质量指标

指标名称	单位	指标计算公式及含义
生物多样性指数		由多样性指数、均匀度和优势度三个方面表征
森林覆盖率	%	林木面积/土地面积
草场面积比	%	草场面积/土地面积
植被面积变化率		$(\text{现状植被面积} - \text{基准年植被面积}) / \text{基准年植被面积}$
河湖水体矿化度	g/l	反映河湖生态的一个重要指标
河道断流天数	d	指三级河流河道断流的总天数
河道断流长度	km	指三级河流河道断流的总长度
城市河湖面积比	%	城市河湖面积/城市面积
水库面积变化率	%	$(\text{现状水库面积} - \text{基准年水库面积}) / \text{基准年水库面积}$
盐渍化面积比		盐渍化面积/土地面积
盐渍化面积变化率	%	$(\text{现状盐渍化面积} - \text{基准年盐渍化面积}) / \text{基准年盐渍化面积}$
地下水平均矿化度	g/l	影响土地盐渍化的重要因子
沙化面积比	%	沙化面积/土地面积
沙化面积变化率	%	$(\text{现状沙化面积} - \text{基准年沙化面积}) / \text{基准年沙化面积}$
沙化区地下水位埋深	m	影响土地沙化的重要因子
水土流失面积比	%	水土流失面积/土地面积
土壤侵蚀模数	t/km ² .a	土壤侵蚀量/(水土流失面积×年)
河道输沙量	t	输移比×土壤侵蚀模数×水土流失面积
河道外生态需水量	m ³	天然林木需水+天然草场需水+野生动物需水
河道内生态需水量	m ³	河道生态用水+河道冲沙用水
生态与环境用水率	%	生态与环境用水量/水资源总量
生态与环境缺水率	%	生态与环境缺水量/生态与环境用水量

(3) 河湖质量指标 { 河湖水体矿化度, 主河长缩减率, 湖泊面积缩减率, 水库面积变化率 }

河湖水体矿化度及水体面积的变化是影响生态与环境质量和评估生态与环境承载力的重要指标。

(4) 土地质量指标 { 盐渍化面积比, 盐渍化面积变化率, 地下水平均矿化度, 沙化面积比, 沙化面积变化率, 沙化区地下水位埋深, 水土流失面积比,

土壤侵蚀模数，河道输沙量}

土地质量是生态与环境质量的一个重要组成部分，可以从土地盐渍化、沙化、水土流失几个方面进行描述，而且不论是盐渍化、沙化还是水土流失，均与人类开发、利用和管理水资源有密切的联系。

(5) 生态需用水指标 {河道外生态需水量，河道内生态需水量，生态与环境用水率，生态与环境缺水率}

水资源是影响和组成生态与环境的基本要素，生态与环境需水的满足情况将影响生态与环境的质量。

3.4 海河流域生态与环境承载力的量化指标体系

上面给出了一般区域生态与环境承载力的评价指标体系，针对海河流域，由于区域的生态与环境问题主要是水资源短缺、水环境污染、水土流失严重，因此根据海河流域具体的生态与环境特点、水资源、土地资源特性和社会经济发展状况，以及要解决的实际问题，并在指标数据能够获得的前提下，分析确定了适合海河流域实际的生态与环境承载力的量化指标体系。下面针对海河流域给出了针对流域的指标体系，其中水资源系统指标主要考虑与水资源短缺有关的量，用水资源总量及人均水资源量表示；土地资源系统指标主要考虑与粮食生产有关的量；与水相关的环境系统指标主要考虑能反映海河流域生态与环境问题的各个量。社会经济系统指标主要考虑反映社会经济发展水平和社会经济规模的量。

水资源指标如下：

表 3.4 水资源系统指标

指标名称	单位	指标计算公式及含义
总水资源量	亿 m ³	基准年的区域水资源量+调入水量
人均水资源量	m ³ /人	总可用水资源量/总人口
工业用水量	亿 m ³	基准年的工业用水量
农业用水量	亿 m ³	基准年的农业用水量
生活用水量	亿 m ³	基准年的生活用水量
人均可供水量	m ³ /人	可供水量/总人口
总用水量	亿 m ³	基准年的总用水量
农业用水比例	%	农业用水量/总用水量
工业用水比例	%	工业用水量/总用水量
生活用水比例	%	生活用水量/总用水量

水资源指标中除了水资源总量以及人均水资源量之外，农业工业和生活用水及其比例不仅反映了区域的用水结构，更反映了区域的用水效率，现状以及未来的用水结构变化以及区域的经济结构变化。

表 3.5 土地资源系统指标

指标名称	单位	指标计算公式及含义
总土地面积	km ²	基准年的区域土地面积
人均土地面积	km ² /人	总土地面积/基准年的总人口
有效灌溉面积	万 hm ²	基准年的有效灌溉面积

表 3.6 社会经济系统指标

指标名称	单位	指标计算公式及含义
人口		基准年的总人口
人均 GDP	元/人	GDP/总人口
GDP 增长率	%	(现状 GDP-基准年 GDP)/基准年 GDP
工业用水定额	m ³ /万元	工业用水量/工业产值
灌溉用水定额	m ³ /亩	灌溉用水量 / 灌溉面积
人均生活用水定额	升/人·日	基准年的生活用水量/基准年的总人口
人均粮食产量	kg/人	粮食总产量/总人口
第三产业的比重	%	第三产业的产值与总产值之比
可承载人口	万人	预测年生活用水量/预测年人均生活用水额
污水治理率	%	基准年污水处理量/基准年污水排放量
排污率	%	基准年的污水排放量/基准年的用水量

表 3.7 与水有关的生态与环境系统指标

指标名称	单位	指标计算公式及含义
水土流失面积比	%	基准年区域水土流失面积/总区域面积
污水排放量	亿 m ³ /年	基准年污水的排放量
COD 排放量	万 t/年	基准年 COD 入河量
纳污能力	万 t/年	基准年河水最大纳污量
地下水开采系数		基准年的地下水实际开采量/可开采量
河道断流长度	Km/年	基准年的区域发生断流的河道长度之和
湿地面积比		基准年的区域湿地水面面积/总区域面积
城市河湖面积比		基准年的城市河湖面积/总城市市区面积
入海水量	亿 m ³ /年	基准年的入海水量
森林覆盖率	%	基准年的林木面积/总区域面积

土地资源指标主要反映区域的用地变化，海河流域在山区，主要的生态与

环境问题为水土流失，生产生活用地挤占生态用地，造成严重的水土流失，表层土壤和农业化肥的大量流失，土地资源系统指标反映区域的总土地状况以及水土流失状况和生产生态用地状况。

经济发展指标一方面反映海河流域经济的总体增长趋势，另一方面也要反映人均获得的福利状况，以及流域的经济发展阶段和发展水平，尤其生产用水定额和第三产业比重以及污水处理率对于提高区域的生态与环境用水量和生态与环境质量水平至关重要。根据上述指标分析海河流域现状年以及未来水平年的经济发展状况，社会福利以及生活状况。

与水相关的生态与环境指标则是这次分析的重点，海河流域的不同二级分区，生态与环境状况各不相同，在山区主要是水土流失、水污染严重，在平原区，地下水超采，湿地面积萎缩，同时入海水量减少、河道断流长度增加、河流的纳污能力下降，因此上述每一项指标对反映海河流域及其二级分区生态与环境问题起到重要作用。

上述分析了海河流域水土资源、社会经济、生态与环境指标体系，据此能够科学、完善的分析海河流域的生态与环境整体状况。

第 4 章 海河流域生态与环境承载力的计量模型

在第 2 章我们分析了经济和环境之间的定量关系，并在第 3 章建立了海河流域的生态与环境承载力的量化指标体系。在本章中，我们根据已有的指标体系来定量的分析或者判断评价一个区域的生态与环境是否可承载，各要素之间的内部关系如何，以及可承载的准则是什么。

4.1 生态与环境承载力的计量模型

从可持续发展量化研究角度来讲，生态与环境质量、社会经济水平是衡量流域可持续发展的两个重要指标。生态与环境质量越好，社会经济发展水平越高，是流域可持续发展追求的目标。实际中，二者通常会发生矛盾。例如，追求高的社会经济发展效益，往往以牺牲了生态与环境为代价。另一方面，有良好的环境质量，但是没有高的社会福利和经济发展水平，这样的发展模式也是不可取的。

不失一般性，令流域社会经济发展水平的综合测度为 $EG(T)$ ，取值 $(0, 1)$ 。 $EG(T)$ 越大说明流域社会经济发展水平越高。通常流域的社会经济发展水平可以用多个指标体系(如社会福利的人均 GDP，人口 P 等)来表达，即定义为：

$$EG(T) = \prod_{i=1}^n U_i(T)^{a_i} \quad (4.1)$$

式中： $U_i(T)$ 表示第 i 个社会经济水平指标在 T 时段的隶属度值。 n 表示社会经济水平指标的个数。 a_i 表示第 i 个社会经济水平指标在社会经济水平综合测度中占的权重。

同样，令流域生态与环境质量综合测度为 $LI(T)$ ，取值 $(0, 1)$ 。 $LI(T)$ 越大说明生态与环境质量越高。通常流域的生态与环境质量综合测度也可以用多个指标体系(如河流断流、水土流失、水体污染程度等)来表达，即定义为：

$$LI(T) = \prod_{j=1}^m H_j(T)^{b_j} \quad (4.2)$$

式中： $LI(T)$ 分别表示 T 时段生态与环境质量综合评价的量值。 $H_j(T)$ 表示第 j

个生态与环境质量指标在 T 时段的隶属度值。 m 表示生态与环境质量指标的个数。 b_j 分别表示第 j 个生态与环境质量指标在生态与环境质量综合测度中占的权重。

现在,进一步的问题是:如何综合集成反映社会经济与环境质量协调发展的综合程度呢?为此,我们提出流域复合系统的生态与环境质量-社会经济水平综合测度(ES)的集成关系,即:

$$ES(T) = \frac{\sum_{t=1}^T EG(t)^{\beta_1} \cdot LI(t)^{\beta_2}}{T} \quad (4.3)$$

式中: β_1 、 β_2 分别表示生态与环境质量、社会经济水平在综合测度中的权重,由层次分析法确定。

式(4.3)表达的概念是:当流域系统有很好的经济效益(EG 大)但是生态与环境损失严重(LI 小),或者生态与环境良好(LI 大)但是经济不发达(EG 效益低),都不能获得良好的 $ES(T)$ 结果。欲使得 $ES(T)$ 大,则必须寻求既保障社会经济高的发展水平(EG 大)同时又要有良好的生态与环境质量(LI 大)的社会经济发展与生态与环境保护协调发展的模式,即流域可持续发展的模式。换句话说,只有 $EG(T)$ 、 $LI(T)$ 同时最大时, $ES(T)$ 最大。 $ES(T)$ 越大,说明生态与环境质量越高、社会经济水平越高,也说明生态与环境社会经济复合系统综合状况越好。随着时间递增, ES 递增,说明所描述的生态与环境-社会经济复合系统可持续发展。

由于社会福利(如人均 GDP)在不同社会发展阶段有一定的要求(给定),在一定的生态与环境需求(如生态需求保障、水资源配置)制约条件下,所追求 ES 目标最大化的发展模式,对应的优化人口数以及水土资源制约下的经济发展规模,就是我们要求的生态与环境承载力的具体表达。

生态与环境承载力的目标函数记为

$$BTI = \max \{ES(T)\} = \max \left\{ \frac{\sum_{t=1}^T EG(t)^{\beta_1} \cdot LI(t)^{\beta_2}}{T} \right\} \quad (4.4)$$

由于流域生态与环境系统对社会经济系统可承载的判定决定于生态与环境质量测度 LI 和自然预测人口(指自然增长和机械迁移人口)。认为当 $LI \geq 0.8$ 且可承载人口大于自然预测人口时生态与环境系统对社会经济系统可承载。因此认为当生态与环境良好的状态下,可承载人口大于或者等于自然发展人口则是可承载状态;同时认为当生态与环境逐步恢复时,以上述目标函数最大为条件,

当生态与环境测度大于或者等于 0.8 时认为流域可持续发展，对应人口和经济规模为流域可承载最大人口和经济规模。

4.2 量化指标度量方法

根据上述生态与环境承载力测度的集成方法，下面对每一个指标的量化方法进行分析。并在下一节中建立水质-水量-社会经济的约束条件。

(1) 指标选取

社会经济水平的量化指标定为：均国内生产总值 D_1 、第三产业产值的比重 D_2 、城镇化率 D_3 、人均粮食产量 D_4 、可承载人口 D_5 ；生态与环境质量的量化指标定为水土流失面积比 C_1 、COD 排放量 C_2 、地下水开采系数 C_3 ，河道断流长度 C_4 、湿地面积比 C_5 ，城市河湖面积比 C_6 、入海水量 C_7 。和社会经济指标一起，一共 12 个指标。

(2) 社会经济与生态与环境质量隶属函数

假设各种指标的实际值为 x ，如果该指标对生态与环境承载力提高起到正的作用，如人均 GDP、城镇化率、第三产业比重等，则

$$y = \frac{x}{A} \quad (4.5)$$

如果指标在模型中起负作用如：COD 排放量、水土流失面积比等，则

$$y = \frac{A}{x} \text{ 或 } y = \frac{A}{x} - A \quad (4.6)$$

其中 A 为具体指标的可承载状态临界值，指人类可忍受的生态与环境社会经济指标的下限值，规定 A 对应隶属度值为 0.8。规定 A_1 为具体指标的完全承载状态临界值，认为是指标的实际值为 A_1 时，系统对应的状态为完全良好状态，理想状态，生态与环境社会经济复合系统处于完全良好状态对应的隶属度为 1，当第二类指标 $x \leq A_1$ 时(实际值越小，复合系统越好，如 COD 排放量)，或者第一类指标 $x \geq A_1$ 时(实际值越大，复合系统越好，如人均 GDP，城市河湖面积比)，生态与环境的状态更佳。令 $a_1 = \frac{A}{A_1}$ ，当指标值越大，可持续发展测度越小时用

该公式计算，如 COD 排放量；或 $a_1 = \frac{A_1}{A}$ ，当指标值越大，可持续发展测度越大

时用该公式计算，如城市河湖面积比。或 $a_1 = \frac{A}{A_1} - A$ ，当指标值越大，可持续

测度越小，且指标值为 1 时，其对应隶属度值为零。此情况下计算指标隶属度用该公式，如水土流失面积比。

$$\mu = \begin{cases} 1 & y \in [a_1, +\infty) \\ \frac{0.2}{a_1 - 1}(y - 1) + 0.8, & y \in [1, a_1) \\ 0.8y^\gamma, & y \in [0, 1) \end{cases} \quad (4.7)$$

γ 为一修正系数, $\gamma > 1$, 反映的是具体指标的在临界下限之后的恢复度以及修正具体指标在系统隶属度中的贡献。 γ 值是个相对值, 表示具体指标在系统不可承载后要恢复到可承载临界值的难易程度, 具体反映了生态恢复系数。

其中 $y = \frac{A}{x} - A$ 主要应用于水土流失面积比的隶属度计算, 是为了让水土流失面积比为 1 时, 其对应的隶属度值为 0。

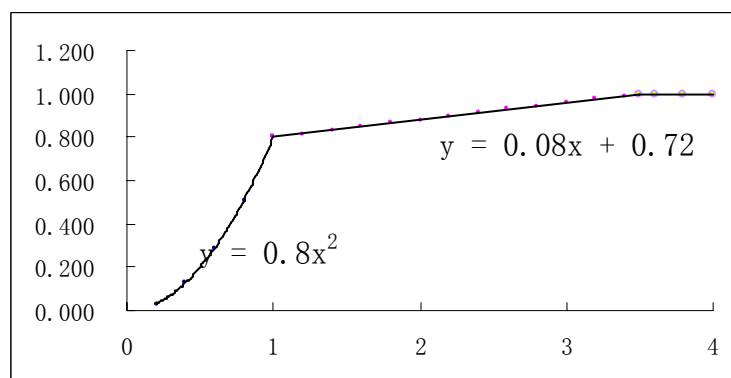


图 4 隶属函数图像

另外人均 GDP、及可承载人口的隶属函数形式参考《博斯腾湖水资源可持续利用研究》(夏军、左其亭、邵民诚, 2003):

$$u = \frac{y - \beta}{y + \beta}, \quad (y = \frac{x}{A}), \quad (4.8)$$

其中 β 为引入参数。规定人均 GDP、可承载人口实际值 $x = A$ 时, 其对应的隶属度为 0.8。可承载人口以 1980 年的人口数作为可承载状态临界值, 原因是 1980 年与水相关的生态与环境问题不是太严重, 而且实际人口也较多。用以确定 β 。

(3) 隶属度函数参数确定

社会经济水平指标的可承载状态临界值、完全承载状态临界值取值根据专家评定, 结合海河流域的实际定出, 如表 4.1 所示。

表 4.1 社会经济水平指标参数确定

指标	可承载状态临界值 A	完全承载状态临界值 A_1
人均 GDP(元/人)	3280.0	
可承载人口(10^4 人)	9800.0	
第三产业占 GDP 比重(%)	0.3	0.6
人均粮食占有量(kg/人)	300	590.0
城镇化率(%)	20.0	70.0

为确定生态与环境质量指标的可承载状态临界值 A 、完全承载状态临界值 A_1 ，引入生态与环境指标的不可承载临界状态值 A_0 。认为生态与环境指标 $x \geq A_0$ 或 $x \leq A_0$ 时，生态与环境系统完全崩溃，其对应的隶属度为 0。承载力计算中不可承载临界状态值 A_0 (表 4.2 及表 4.3) 不直接参与计算，它只用来与完全承载状态临界值 A_1 确定可承载状态临界值 A 。生态与环境质量指标分为两大类，一类是指标值越大，生态与环境-社会经济复合系统状态越好，这类生态与环境质量指标称为对可持续测度起正作用的指标；另一类是指标值越大，生态与环境-社会经济复合系统状态越差，这类生态与环境质量指标称为对可持续测度起负作用的指标。

海河全流域及七个分区的生态与环境质量指标可承载状态临界值、完全承载状态临界值取值见表 4.2、表 4.3。生态与环境指标的确定依据如下：

入海水量：入海水量的可承载状态临界值 A 、完全承载状态临界值 A_1 取流域最小生态与环境需水量的 80% 以及最小生态与环境需水量时对应的值。入海水量的可承载状态临界值 A 、完全承载状态临界值 A_1 在全流域和各个二级分区的确定方法相同。根据分析，现状枯水年流域入海水量只有 12 亿，在这种情况下海河流域入海口生态与环境十分恶劣，计算中，我们认为以海河流域现状枯水年入海水量为其全流域不可承载状态值，海河流域四个生态与环境平原区的入海水量的不可承载状态值分配比例与其最小生态与环境入海水量的分配比例一致。

COD 排放量：从污水处理率考虑。中等发达国家的污水处理水平为 70%；世界发达国家大城市的先进水平污水处理率则为 90%。到 2000 年底，全国已建设城市污水处理二级处理率约为 15%。按照国家有关规划要求，2005 年，我国城市污水处理率将达 45%。到 2010 年，所有城市的污水处理率不得低于 60%。因此，低水平可采用采用 15%、45%、70% 分别作为 A_0 、 A 、 A_1 。高水平则

可采用 15%、60%、90% 分别作为 A_0 、 A 、 A_1 。考虑海河流域经济社会两极分化的情况和有关水污染防治规划实施情况滞后的情况，计算选取低水平。即完全承载状态临界值为污水处理率为 70% 对应的 COD 的排放量。不可承载状态值为污水处理率为 15% 对应 COD 的排放量。可承载状态临界值为污水处理率为 45% 对应 COD 的排放量。

地下水开采系数：即实际开采量与可开采量之比。由于统计数字中地下水可采量不包括深层可采量，计算数值偏大，根据专家建议和相关分析，以 0.85 为承载状态良好值。根据地下水位变化情况，80 年代以前是平稳变化略有下降，80 年代则是急剧下降，90 年代则是快速下降。现状水位认为已是最差的水位，不允许继续恶化。可见，地下水生态与环境变化在近二十年，地下水开采系数的不可承载状态值按 20 年的平均值来取。流域地下水资源量为 $150 \times 10^8 \text{m}^3$ ，目前浅层累计超采约 $400 \times 10^8 \text{m}^3$ 。按照 20 年计算，平均每年超采 $20 \times 10^8 \text{m}^3$ 。加上深层的地下水，约为 $900 \times 10^8 \text{m}^3$ ，按照 20 年计算，年超采为 $45 \times 10^8 \text{m}^3$ ，开采系数为 $(150+45)/150=1.3$ 。即地下水开采系数的不可承载状态值为 1.3。把不可承载状态值与完全承载状态临界值分为五个等级，由差到好的第四个等级为可承载状态临界值。七个分区的各个值与全流域的相同。

山区水土流失面积比：即流域水土流失面积和总流域面积之比，水土流失的触发因素很多，不仅与地形、坡度有关，而且与植被覆盖度也存在某种联系。良好的植被能够覆盖地面、拦截雨滴、调节地面径流、减缓流速、过滤淤泥和固结土壤，从而起到增加土壤渗透性、增加蓄水能力、涵养水源、防止水土流失、提高土壤肥力和改善生态与环境等功能。一般来说，林草覆被率小于 30%，对应强度侵蚀区；30-50% 对应中度侵蚀区；50-70%，对应轻度侵蚀区；当植被覆盖度大于 70% 时，不论土质或石质山区，不论何种地形，土壤侵蚀均极轻微。据此，可以将轻度侵蚀作为临界状态，取其下限定为 50%。优良状态取 70%，最次定为 30%。这是低标准的；高标准则可取 60%、80%、30%。以此换算成对应的水土流失面积。以低标准来确定海河流域山区水土流失面积比的不可承载状态值和完全承载状态临界值及可承载状态临界值。

河道断流长度比：即流域河道断流的长度与流域总河长之比，考虑枯水年河道断流长度为临界值，而丰水年作为最优值。根据海河流域统计资料，50 年代是丰水年。80 年代是枯水年。河道断流，50 年代是丰水年，通航里程达到 3523 km；1965 年是特旱年，干河长度 1391 km，1960-1969 年平均干河长度是 718 km；1972 年干旱，干河长度 2465 km；1970-1979 年干河长度为 1574 公里；80 年代是前 5 年连续干旱，干河长度达到 1668 km。2000 年，29 条河流全年平均干涸时间为 274 天，河道干涸总长度达 3171km，占统计河道总长 4010km 的 79%。因此，选取 1000(1500)、1500(2000)、3000 分别对应好、临界、最差三

种状态的高、低两种标准。也分别对应 60 年代、70 年代、2000 年和 70 年代、80 年代、2000 年两种年份。采用低标准作为计算值，则河道断流长度比的可承载状态临界值为 0.375；不可承载状态值为 0.75 和完全承载状态临界值为 0.25。

表 4.2 对可持续测度 *BTI* 起负作用的生态与环境指标

二级分区	指标及算法	不可承载状态 临界值 A_0	可承载状态 临界值 A	完全承载状 态临界值 A_1
海河流域	山区水土流失面积比	0.550	0.193	0.079
	COD 排放量($\times 10^4 t$)	118.870	80.360	48.350
	地下水开采系数	1.300	0.940	0.850
	河道断流长度比	0.750	0.375	0.250
滦河冀东沿海山区	山区水土流失面积比	0.645	0.193	0.079
	COD 排放量($\times 10^4 t$)	5.240	3.540	2.210
	地下水开采系数	1.300	0.940	0.850
滦河冀东沿海平原	COD 排放量($\times 10^4 t$)	8.290	5.710	3.560
	地下水开采系数	1.300	0.940	0.850
	河道断流长度比	0.750	0.375	0.250
海河北系山区	水土流失面积比	0.569	0.193	0.079
	COD 排放量($\times 10^4 t$)	6.500	4.370	2.590
	地下水开采系数	1.300	0.940	0.850
海河北系平原	COD 排放量($\times 10^4 t$)	17.210	11.560	6.850
	地下水开采系数	1.300	0.940	0.850
	河道断流长度比	0.750	0.375	0.250
海河南系山区	水土流失面积比	0.563	0.193	0.079
	COD 排放量($\times 10^4 t$)	6.540	4.500	2.790
	地下水开采系数	1.300	0.940	0.850
海河南系平原	COD 排放量($\times 10^4 t$)	45.430	31.230	19.400
	地下水开采系数	1.300	0.940	0.850
	河道断流长度比	0.750	0.375	0.250
徒骇马颊河平原	COD 排放量($\times 10^4 t$)	29.660	19.450	10.950
	地下水开采系数	1.300	0.940	0.850
	河道断流长度比	0.750	0.375	0.250

平原湿地面积比: 50 年代湿地约 10000 km^2 ，现报告主要湿地水面约 3000 平方公里，60 年代比 2200 km^2 稍多，70 年代至今，在 700-900 km^2 左右。因此，现状的湿地面积比为最差状态；70 年代可作为临界状态，60 年代为最优状态。2000 平方公里，1000 km^2 ，700 km^2 作为海河流域完全承载状态良好、可承载临

界状态、不可承载状态时的湿地面积。则平原湿地面积比的完全承载状态临界值、可承载状态临界值以及不可承载状态值为 1.5%，0.76%以及 0.53%。

城市河湖面积比：根据海河流域生态与环境用水研究项目成果，认为城市河湖面积 10-15%为优，考虑绿地等因素以及规划区面积普遍较建成区扩大较多，故取 5%为优；现状流域多数城市均在 1%左右，以此为最差。说明不能侵占水面搞建设；考虑流域平均值以 3%为临界。可见城市河湖面积比的完全承载状态临界值、可承载状态临界值以及不可承载状态值分别为 5%,3%及 1%。

海河流域整体以及流域分区的生态与环境指标参数确定如表 4.2 所示：

表 4.3 对可持续综合测度起正作用的生态与环境指标

区域	指标及算法	不可承载状态 临界值 A_0	可承载状态 临界值 A	完全承载状 态临界值 A_1
海河流域	湿地面积比	0.0053	0.0076	0.015
	城市河湖面积比	0.010	0.030	0.050
	入海水量($\times 10^8 m^3$)	12.000	24.000	30.000
滦河冀东沿海山区	城市河湖面积比	0.010	0.030	0.050
滦河冀东沿海平原	城市河湖面积比	0.010	0.030	0.050
	入海水量($\times 10^8 m^3$)	4.000	8.000	10.000
海河北系山区	城市河湖面积比	0.010	0.030	0.050
海河北系平原	湿地面积比	0.0053	0.0076	0.0150
	城市河湖面积比	0.010	0.030	0.050
	入海水量($\times 10^8 m^3$)	3.000	6.000	7.500
海河南系山区	城市河湖面积比	0.0100	0.030	0.050
海河南系平原	湿地面积比	0.0053	0.0076	0.0150
	城市河湖面积比	0.010	0.030	0.050
	入海水量($\times 10^8 m^3$)	3.000	6.000	7.500
徒骇马颊河平原	湿地面积比	0.0053	0.0076	0.015
	城市河湖面积比	0.010	0.030	0.050
	入海水量($\times 10^8 m^3$)	2.000	4.000	5.000

(4) 隶属度函数修正系数确定

在计算过程中， γ 为一修正系数， $\gamma > 1$ ，反映的是具体指标的在临界下限之后的恢复度以及修正具体指标在系统隶属度中的贡献。由于每一项生态与环境恢复的难易程度不同，因此 γ 的大小也不同。比如水土流失和河道断流，要保持 $100m^2$ 大小的地方水土不流失 1 年需要 $10m^3$ 水，如果这 $1m^2$ 大小的地方全部发生了水土流失，要恢复这里的生态与环境，将需要比 $10m^3$ 多的水才可恢复；要保持 1m 长的河道不断流，1 年只要保持河中有 $10m^3$ 的水就行，如果这 1m 长的河道断流，只要补充同样多的水。可见水土流失治理比河道断流治理要

难。因此水土流失面积比隶属度函数中， γ 值大一些，河道断流长度比隶属度函数中， γ 值等于 1。 γ 从某种意义上说是各指标“权重”的反映，反映生态与环境的恢复系数。参考专家意见，确定如表 4.3:

表 4.3 各个指标隶属函数式中修正系数 γ 的值

指标	修正系数 γ	指标	修正系数 γ
山区水土流失面积比	2	人均粮食占有量(kg/人)	3
COD 排放量(10^4 t/a)	2	城镇化率(%)	2
地下水开采系数	2	城市河湖面积比	1
河道断流长度比	1	平原区湿地面积比	2
第三产业比重(%)	2	入海水量	1

4.3 社会经济-水量-水质互动模型

根据生态与环境承载力的计量模型，对于海河流域，需建立社会经济-水量-水质互动模型。为了比较简单清晰的描述流域总体水循环的状态及其与水生态与环境的关系，本研究以整个流域为一个单元，以年为尺度，重点描述流域各种水量变化与各种耗水之间的关系，以揭示水循环过程、状态与水生态与环境演变的宏观关联。

研究的方法是在水平方向以流域边界为界，在竖直方向以深层地下水隔水层为下边界，以地表及其附属物、植被为上边界形成一个封闭的单元。首先分析年度间进入单元的总水量，单元内的总蓄变量和总消耗量，摸清水循环过程中各种水量之间的转化关系，然后分析各种水量对不同水生态与环境子类的驱动关系，以此分析和判断流域水生态与环境的现状和对未来的水生态与环境进行分析和评估。水循环的过程可通过水量均衡方程式来表示。

$$W_{in} - W_{out} = \Delta W_t \quad (4.9)$$

式中： W_{in} — t 年进入流域总水量；

W_{out} — t 年流域总蓄变量；

ΔW_t — t 年流域总耗水量。

在水量均衡方程式中，进入这一单元的水量有降雨形成的当地水资源总量（包括地表水和地下水资源量并扣除二者的重复计算量）、从外流域调入的地表水水量和从深层开采的地下水水量三项；平衡方程中的总蓄变量是当年在单元内增加（或减少）的水量，包括水库蓄变量和浅层地下水蓄变量；总耗水量是指通过不同方式排出本单元的总水量，主要包括水平排出单元的入海水量和竖直

排出的蒸发消耗量。总耗水量又可以根据其消耗性质分为经济社会耗水量和非经济社会耗水量。经济社会耗水量是指由人工供给的用于国民经济发展和人类生活所消耗的水量,包括农业用水、工业用水、城市生活和农村生活用水的消耗。而非经济社会耗水可视为水生态与环境消耗水量,包括维护河口生态与环境的入海水量,水系生态与环境耗水量和陆地生态与环境耗水量。其中水系生态与环境耗水量包括天然河道水面蒸发量、湖泊湿地水面蒸发量和城市河湖水面蒸发量。陆地生态与环境耗水是指平原区和山区河谷盆地陆地上地下水的腾发量,但不计灌溉回归地下水的腾发量。

(1) 水量平衡模拟模型

在本次研究中,对于海河的每一个子流域,上述的水量平衡方程表示如下,某一年内水量平衡方程式为:

$$P + W_{\lambda} = R + E + W_{\text{出}} + \Delta W \quad (4.10)$$

式中, P 、 R 、 E 为计算时段内流域降水量、径流量和蒸发量; W_{λ} 是计算时段内从外流域流入或调入本流域的水量; $W_{\text{出}}$ 为计算时段内从本流域流出外流域的水量; ΔW 是流域地面及地下蓄水量的变化量。

在有人类活动影响下,流域水量平衡要考虑生产生活取用水,人类经济活动影响下的流域水量平衡方程式为:

$$\frac{\Delta W}{\Delta t} = P + W_{\lambda} - (W_{\text{生产}} + W_{\text{生活}} + W_{\text{生态}}) - W_{\text{出}} \quad (4.11)$$

式中: $W_{\lambda} = W_{\text{调入}} + W_{\text{流入}}$

$$W_{\text{生产}} = W_{\text{工业}} + W_{\text{农业}}$$

$W_{\text{调入}}$ 为从外流域调入本流域水量, $10^4 \text{m}^3/\text{a}$; $W_{\text{流入}}$ 是海河流域内部二级流域之间水量交换, $10^4 \text{m}^3/\text{a}$; $W_{\text{生产}}$ 是生产用水量, $10^4 \text{m}^3/\text{a}$; $W_{\text{工业}}$ 为内工业用水量, $10^4 \text{m}^3/\text{a}$; $W_{\text{农业}}$ 为农业用水量($10^4 \text{m}^3/\text{a}$); $W_{\text{生活}}$ 为生活用水量($10^4 \text{m}^3/\text{a}$); $W_{\text{生态}}$ 是生态用水量。

(2) 社会经济—水量关系模型

水土资源—环境—社会经济互动关系模型中,社会经济指标中考虑工业增加值 $GDP_{\text{工}}$ 、农业增加值 $GDP_{\text{农}}$ 、国内生产总值 $GDP_{\text{总}}$ 及粮食产量 L_c 。

工业增加值与工业用水量、农业增加值与农业用水量、国内生产总值与生活用水量、粮食产量与农业用水量之间有必然的联系,根据它们之间的关系构

造社会经济-水量间关系模型，见下式。

$$GDP_{\text{工}} = f_1(W_{\text{工业}}, \text{工业用水定额}) \quad (4.12)$$

$$GDP_{\text{农业}} = f_2(W_{\text{农}}) \quad (4.13)$$

$$GDP_{\text{总}} = f_3(\text{单位生活用水产生的GDP}, W_{\text{生活用水}}, \text{人口}) \quad (4.14)$$

$$LC = f(\text{农业用水量}, \text{农业灌溉定额}) \quad (4.15)$$

同时，根据各行业的生产函数，加入水资源因素之后为：

$$V_i = (a_i K_i^{\sigma_i} + d_i L_i^{\sigma_i} + e_i Q_i^{\sigma_i})^{1/\sigma_i} \quad (4.16)$$

其中， Q_i 为行业用水的水资源价值，因此，可以得出总产出和用水定额之间以及中间投入之间的关系。

(3) 环境—水量关系模型

根据上面分析的生态与环境用水分析，环境与水量约束关系考虑与水相关的环境因素有水土流失面积比 C_1 、COD 排放量 $C_2(10^4\text{t/a})$ 、地下水开采系数 C_3 、河道断流长度 $C_4(\text{km})$ 、湿地面积比 C_5 、城市河湖面积比 C_6 、入海水量 $C_7(10^8\text{t})$ 。

根据水土流失面积比、地下水开采系数、河道断流长度、湿地面积比、城市河湖面积比分别与生态用水量之间关系建立环境——水量间关系模型，如下：

$$W_{\text{生态}} = W_{\text{水土保持}} + W_{\text{地下水回补}} + W_{\text{河道}} + W_{\text{湿地}} + W_{\text{城市河湖}} + W_{\text{入海}} \quad (4.17)$$

$$W_{\text{水土保持}} = f(c_1, c_{01}, k_{01}) \quad (4.18)$$

$$W_{\text{地下水回补}} = f(c_3, c_{03}, k_{03}) \quad (4.19)$$

$$W_{\text{河道}} = f(c_4, c_{04}, k_{04}) \quad (4.20)$$

$$W_{\text{湿地}} = f(c_5, c_{05}, k_{05}) \quad (4.21)$$

$$W_{\text{城市河湖}} = f(c_6, c_{06}, k_{06}) \quad (4.22)$$

式 4.17 表示了生态用水量的基本组成，它由水土保持用水量 $W_{\text{水土保持}}$ 、地

下水回补水量 $W_{\text{地下水回补}}$ 、河道生态用水量 $W_{\text{河道}}$ 、湿地生态用水量 $W_{\text{湿地}}$ 、城市河湖生态用水量 $W_{\text{城市河湖}}$ 及入海水量 $W_{\text{入海}}$ 组成。

式 4.18 表示水土保持水量与基准年区域水土保持水量没补充前水土流失率 c_{01} 、单位区域面积水土保持用水量 k_{01} 、基准年水土保持水量补充后的水土流失率 c_1 之间的关系。

式 4.19 表示地下水回补水量与基准年区域地下水回补水量没补充前地下水开采系数 c_{03} 、区域可采地下水资源量 k_{03} 、基准年与地下水回补水量相等的水量禁采后的地下水开采系数 c_3 之间的关系。

式 4.20 表示河道生态用水量与基准年 60 年代末 70 年代初河道环境良好时断流长度 c_{04} 及对应的河道最小生态用水量 k_{04} 、现状河道生态用水补充后的河道长度 c_4 之间的关系。

式 4.22 表示湿地生态水量与基准年湿地生态用水量没补充前湿地面积比 c_{05} 、单位湿地面积生态用水量 k_{05} 、基准年湿地生态用水量补充后湿地面积比 c_5 之间的关系。

式 4.23 表示城市河湖生态水量与基准年市区生态用水量没补充前城市河湖面积比 c_{06} 、单位河湖面积年生态用水量 k_{06} 、基准年市区生态用水量补充后市区河湖面积比 c_6 之间的关系。

COD 排放量与工业用水量、农业用水量、生活用水量之间关系用行业污水排放和处理系数建立，入海水量与总生态用水量关系用比例系数表示。

COD 排放量 c_2 、水量间关系模型描述的是污染物 COD 排放量 c_2 与水资源间的关系用下面公式表示。

$$c_2 = c_{2\text{工}} + c_{2\text{农}} + c_{2\text{生活}} \quad (4.24)$$

$$c_{2\text{工}} = f(W_{\text{工}}) \quad (4.25)$$

$$c_{2\text{农}} = f(W_{\text{农}}) \quad (4.26)$$

$$c_{2\text{生活}} = f(W_{\text{生活}}) \quad (4.27)$$

式(4.24-4.27)中, $c_{2\text{工}}$ 、 $c_{2\text{农}}$ 、 $c_{2\text{生活}}$ 分别为工业、农业和生活 COD 排放量。

入海水量与生态用水量关系如下:

$$W_{\text{入海}} = k_{\text{入海}} W_{\text{生态}} \quad (4.28)$$

式(4.28)中, $k_{\text{入海}}$ ——入海水量占总生态用水量的比例系数, 通过层次分析法得到。

应用以上方程式可以描述流域单元的整个水循环过程和状态, 同时由于水循环中的各项几乎都与水生态与环境有着极为密切的关系, 因此通过水循环中各项的分析就可以反映出流域水生态与环境的状况。上述水量均衡方程式中的各收支项可以对三类水生态与环境问题进行分析评价: 第一类有关地下水超采问题, 包括进入单元的总水量中的深层开采量以及浅层地下水蓄变量。从多年平均来看, 如深层开采量过大形成深层超采或浅层地下水蓄变量小于零形成浅层地下水超采时, 水生态与环境就受到破坏, 超采量越大, 受破坏的程度就越深, 直至出现地面沉降、地裂和塌陷以及引发海水入侵等各种环境问题; 第二类是水系生态与环境耗水量和陆地生态与环境耗水量减少问题, 如果二者特别是水系生态与环境耗水量不能达到一定要求, 则会出现河道干涸, 湖泊萎缩, 湿地消失、土壤沙化、生物多样性消失等一系列生态与环境问题; 第三类是入海水量衰减问题, 如果入海水量不能满足河口生态与环境要求, 则河口海区会出现盐度升高、升温迟缓、松散的底质消退, 进而影响鱼类产卵、生长, 导致近海渔业资源的衰退。此外, 入海水量减少还造成泥沙淤积、河道萎缩、河道自然功能下降。

在流域水循环中, 水量平衡方程两侧收支各项是遵循流域水循环的规律相互关联的, 即来水、蓄存和消耗量之间存在此消彼涨的关系, 比如经济社会耗水增加, 非经济社会耗水必然减少; 河道、湖泊湿地耗水增加, 入海水量也会减少。因此区域水循环的状态可能会因为人类不合理的开发利用而被改变, 从而引发严重水生态与环境问题; 但另一方面通过区域水资源合理的开发利用与优化配置, 甚至采用跨流域调水, 可以重新调节水循环状态而使区域水生态与环境得以改善。

从以上分析可以看出, 流域水循环的收支平衡关系直接影响流域水生态与环境状况, 因此既可以利用水循环的状态来评价水生态与环境情况, 还可以通过分析预测不同水资源开发利用方案情况下的流域水循环状态去预测流域水生态与环境未来情景, 进而从流域水生态与环境的角度去调整水资源的开发利用

方案, 以实现区域水资源开发利用与生态与环境的相互协调, 这就是水循环与水生态与环境关联的分析方法和思路。

在此需要特别补充说明的是, 由于本单元将深层地下水上隔水层作为单元的下边界, 对深层地下水的开采作为系统的输入处理, 因此关于地下水超采问题并不放在循环过程当中进行研究, 而是利用深层地下水补给相对稳定的特点, 通过直接比较单元该部分输入和深层地下水补给量的大小来进行判断。

根据上面建立的水质水量联合模型, 现状情况下, 污水回用水中指达到可用水标准的一部分, 回用率按污水处理率计, 流域可用水资源量为流域水资源量与调入流域水量之和。水资源量根据 1956-1998 系列评价, 海河流域水资源总量 $372 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。可调用黄河水按国务院分配方案, 鲁北 $33.8 \times 10^8 \text{ m}^3$ (城市 $2.8 \times 10^8 \text{ m}^3$, 农村 $31 \times 10^8 \text{ m}^3$), 豫北 $4.4 \times 10^8 \text{ m}^3$ (城市 $\times 10^8 \text{ m}^3$, 农村 $\times 10^8 \text{ m}^3$), 天津市、河北省多年平均分配指标为 $20 \times 10^8 \text{ m}^3$, 山西省引黄入晋工程 2010 年建成, 2010 年、2030 年进入海河流域大同、朔州等城市的水量分别为 $1.65 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $3.74 \times 10^8 \text{ m}^3$, 可引黄总量为约 $60 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。因此现状年多年平均流域可用的水资源总量为 $432 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

4.4 现状年水量-生态与环境关系分析

根据以上水循环模型, 建立了相应的流域水循环与水生态与环境关联的数学模型。应用 1994~1999 年水资源公报和海河流域水资源规划的相应数据, 对单元水量平衡方程各项进行了计算, 得到相关的水生态与环境现状评价结果, 见表 4.4。

表 4.4 海河流域 1994~1999 年流域水循环相关数据 单位: $\times 10^8 \text{ m}^3$

项 目		年 份						平均	
		1994	1995	1996	1997	1998	1999		
进入单 元的总 水量	水资源总量	426.6	440.5	522.3	212.1	353.9	192.5	358	
	外调水量	57.3	52.3	55.0	56.4	51.1	53.7	54.3	
	深层开采量	54.0	63.8	57.8	61.2	63.7	71.5	62	
	小计	537.9	556.5	635.1	329.6	468.7	317.6	474.2	
蓄变量	水库蓄变量	29	10.7	8.8	-45	10.2	-23.8	-1.7	
	地下水蓄变量	10.4	4	46	-31.9	-7	-75	-8.9	
	小计	39.4	14.7	54.8	-76.9	3.2	-98.8	-10.6	
总耗 水量	经济耗水量	281.4	272.0	284.5	291.0	281	285.7	282.6	
	非经 济耗 水量	水系生态耗水	2.6	2.5	2.5	2.9	2.7	2.9	2.7
		陆地生态耗水	111.9	159.2	119.7	98.6	127.7	110.1	121.2
		入海量	102.7	108.1	173.6	14.0	54.1	17.7	78.4
	小计	217.2	269.8	295.8	115.6	184.5	130.6	202.3	
	合计	498.6	541.8	580.3	406.5	465.5	416.3	484.8	

数据来源: 1994~1999 年《水资源公报》和《海河流域水资源规划》。

从表 4.4 中进入单元总水量栏可以看出, 进入单元的总水量主要受降雨影

响。如降雨最小的 1997 年和 1999 年，年降雨量分别为 366 和 385mm，进入单元的总水量分别为 329.6 亿和 317.6 亿 m^3 ；降雨量最大的 1995 年和 1996 年，年降雨量分别为 609 和 599mm，进入单元的总水量分别为 556.5 亿和 635.1 亿 m^3 。进一步考察表中数据总体构架和变化，由于流域降雨年际变化大，因此不同年份进入流域的总水量变化很大，变幅可高达 300 亿 m^3 ，导致相应的蓄变量和总耗水量变化也很大。当流域单元在输入减少条件下，总耗水量也减小同时蓄变量也呈现为负值，说明枯水年份会消耗地表水和地下水的蓄存量以支撑国民经济的发展。

考察枯水年份的各分项耗水，可以发现尽管总耗水量大幅度减少，但在一定国民经济发展水平下经济耗水量的变化不大，变幅大多在 10 亿 m^3 以内，而非经济社会耗水会大幅度减少，与总耗水量呈明显的正相关关系。这进一步说明了即使在降雨小、水资源量少的情况下，经济社会用水并未因此受到较大幅度的影响，仍然通过超采深浅层地下水、挤占非经济社会耗水等手段来维持，总耗水的减少几乎完全转嫁为非经济社会耗水量的减少。在非经济社会耗水项各栏中，水系生态耗水目前所占比例很小，非经济社会耗水的大量衰减主要是减少了入海水量，从而对河道内和入海口的生态与环境造成破坏。

以上探讨了海河流域近年的水循环状态，从它与生态与环境的关联中可知，目前海河流域地下水超采严重，虽然全流域浅层地下水蓄变量 6 年平均衰减 8.9 亿 m^3 ，但由于超采区比较集中，因此超采区生态与环境破坏严重；另一方面流域水系生态与环境耗水量很小，说明流域内河道干涸、湖泊湿地萎缩现象由来已久，水系生态系统长期处于破坏状态，给今后流域的河流、湖泊、湿地生态系统的恢复带来很大困难；现状入海水量在偏早年份仅有十几亿立方米，在一般年份也只有几十亿立方米，河口生态与环境堪忧。

4.5 流域生态与环境用水量分析

广义的生态需水是生态系统运转所需要的水。其供给来源可以是降水及其转化的土壤水，也可以是地表或地下径流。从常规水资源的开发利用而言，最重要的是径流水资源的供需平衡。因此，在总的生态需水中，我们最关心的是需要径流供给的那部分生态需水量。而且生态需水主要是从保护天然生态的角度提出来的，所以从径流水资源角度而言，生态需水可定义为生态系统总需水量中需要径流供给的那部分天然生态需水。

从空间角度而言，生态需水包括河道内生态需水和河道外生态需水。河道内生态需水是满足河道或湖泊等天然地表水体通航、排沙、水生动植物繁衍、景观等要求的最低需水量。河道外生态需水是天然地表水体之外陆域植被对地下水的需要量。

这里强调从生态系统对径流水资源消耗的角度而言,所谓河道内生态需水是对地表水体的需求,河道外生态需水是对地下水的需求。原因是所谓“河道内”是根据地表的水陆界线划分的,只能是“地表水体”,而不应包括“地下水体”。否则就不存在“内外”之分。因此,既然河道内生态需水界定为对地表水的需求,与此对应的河道外生态需水就必然是对地下水的需求。河湖边缘的过度带比较特殊,在水位高时消耗的是地表水,可归为河道内需水,在水位低时消耗的是地下水,可归为河道外需水。

进一步推理:既然河道外生态需水是对地下水的需求,那么在地下水位埋藏很深的地方,例如高山山坡上,就不存在河道外生态需水。实际上,所有与当地气候条件相适应的地带性植被都只需要当地降水来供养,不需要消耗径流水资源;只有生长于地下水埋藏较浅的地方的非地带性植被,才需要地下水的供养。由此又可明确河道外生态需水的一个性质,那就是:径流口径的河道外生态需水是针对非地带性植被而言的。

河道外天然生态需水的另一个重要性质是它不需要通过灌溉来满足,仅仅是利用埋藏较浅的地下水而已,要求是地下水位不能太深。由此也可明确天然生态和人工生态的一个明显区别:天然生态用水是不需要人工灌溉的,需要人工灌溉的生态用水必然是人工生态用水。因此人工生态用水和其它生产生活用水有同样的性质:都必须通过人工设施来调蓄和输送。而天然生态需水只要限制人类用水不超过规定的限度,就能自然地得到满足。天然生态需水和人工生态需水的这一差别,和人工生态用水与其它生产生活用水的共同性,因此将人工生态耗水归并到生产生活耗水。

综上所述,生态用水分为人工生态用水和天然生态用水,人工生态用水归为生产和生活用水部分;天然生态用水分为河道内生用水和河道外省太用水两部分,河道内生态用水主要有天然河道用水以及入海水量和天然湖泊生态用水,(绿水),而河道外生态用水则包括平原非地带性的植被用水、径流洪水量、地下水恢复用水量以及水土保持用水量。

以下诸项分析海河的生态与环境总用水量大小。

湿地生态用水量:湿地生态用水量主要是指以流域最低生态与环境标准确定湿地养鱼、芦苇、水生生物、旅游业以及维持生态平衡所需的最低水位。

设生态平衡水位为 h , 水面面积是 $s(\text{km}^2)$, 水面蒸发量 e 取值为 $1100\text{mm}/\text{年}$, 渗漏率 r 按 0.15 计, 则湿地总的生态与环境用水量计算如下:

$$W_{\text{湿地}} = W_{\text{wp}} + W_{\text{we}} + W_{\text{ws}} = hs + se + hsr \quad (4.29)$$

$W_{\text{湿地}}$ 为湿地最低生态水量; W_{wp} 为最低水位用水; W_{we} 为湿地蒸发; W_{ws} 为湿地渗漏, 计算结果如表 4.5 所示。

流域平原区湿地总面积 1039.61 km²，共计年需补水量为 12.53×10⁸m³。其中海河北系平原区湿地面积为 224.0 km²，生态用水量为 2.65×10⁸ m³，海河南系湿地面积为 708.86 km²，生态用水量为 8.63×10⁸m³，徒海马颊河平原湿地面积为 106.75 km²，生态用水量为 1.26×10⁸m³。

水土保持生态用水量的确定：水土保持所需的生态用水(耗水)，也属于生态与环境用水的范围。根据相关研究，黄河生态用水定额为 1.8×10⁴ m³/km²。海河流域西部和北部的自然条件与黄河流域差不多，降雨在 380~500 mm，生态用水定额也应相近。燕山、太行山区降雨大一些，约在 550~700mm，但多石质山区，坡度大，土层薄，降雨集中，坡面生物耗水受到限制，生态用水定额也不会很大。另有资料介绍，海河流域山区每治理 1km² 消耗水资源 1.2×10⁴m³。计算中，海河流域土壤侵蚀强度为中度及中度以上的地区每治理 1 km² 消耗水资源量采用以上两个值的平均值，取为 1.5×10⁴m³，土壤侵蚀强度轻度的地区每治理 1 km² 消耗水资源量就采用 1.2×10⁴ m³。土壤侵蚀强度微度的地区还没发生水土流失，不考虑其生态用水。

表 4.5 流域湿地所需的最低生态与环境用水指标

评价分区	水系名称	湿地名称	最低生态与环境用水指标(×10 ⁸ m ³)				
			面积 (km ²)	生态 水量	蒸发 水量	渗漏 水量	年补 水量
海 河 北 系 平 原	北三河	青甸洼	61.00	0.32	0.67	0.05	0.72
	北三河	大黄浦洼	103.00	0.32	1.13	0.05	1.18
	永定河	东七里海	10.00	0.05	0.11	0.01	0.12
	永定河	西七里海	50.00	0.50	0.55	0.08	0.63
海 河 南 系 平 原	大清河	白洋淀	122.00	1.20	1.34	0.18	1.52
	大清河	团泊洼	262.90	1.96	2.89	0.29	3.19
	大清河	东淀	86.80	0.55	0.95	0.08	1.04
	子牙河	千顷洼	37.00	0.22	0.41	0.03	0.44
	子牙河	宁晋泊	151.16	1.06	1.66	0.16	1.82
	黑龙港	大浪淀	49.00	0.52	0.54	0.08	0.62
徒马平原	徒马河	恩县洼	106.75	0.59	1.17	0.09	1.26
	合 计		1039.61	7.29	11.44	1.09	12.53

海河流域现有水土流失面积为 11.1×10⁴km²，若要实现全部治理，相应的水资源消耗量为 15.2×10⁸m³。(指生物措施需水量，未包括工程措施需水量)。海河流域水土保持生态用水表 4.6 所示。

入海水量的确定：海河流域入海河口大致分为三个海区：即滦河、海河、漳卫新河(含徒骇马颊河)。根据中国水资源公报 1994~1999 年海河入海水量

统计, 连续六年最小入海水量 1997 年为 $14.0 \times 10^8 \text{m}^3$, 平均入海水量为 $78.4 \times 10^8 \text{m}^3$ 。根据前人研究在平水年, 海河流域入海水量最少为 $30 \times 10^8 \text{m}^3$, 枯水年入海水量得有 $23 \times 10^8 \text{m}^3$ 。

表 4.6 海河流域各河系的土壤侵蚀强度及治理水土流失生态用水情况

河系	面积 (km^2)		土壤侵蚀强度分级面积 (km^2)					生态用水量 ($\times 10^8 \text{m}^3$)
	山区	流失	微度	轻度	中度	强度	极强度	
滦河	46990	30293	16696	14221	13205	2515	354	4.1
北三河	22115	11891	10224	5851	4435	1604	-	1.6
永定河	45063	26261	18802	11389	4594	8136	2141	3.6
大清河	18659	9627	9032	3083	5814	730	-	1.4
子牙河	31126	16904	14222	6626	6244	4034	-	2.3
漳卫河	25436	15629	9806	4960	4334	4882	1454	2.2
合计	189389	110605	78784	46131	38626	21900	3949	15.2

表 4.7 海河流域超采现状与多年平均超采量

二级分区	评价区域	面积 (km^2)	现状年超采量 ($\times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$)			1985—1998年平均超采量 ($\times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$)		
			浅层	深层	合计	浅层	深层	合计
滦河冀东沿海地区	山区	38460	-1.68	0	-1.68	-0.69	0	-0.69
	平原	7410	0.27	-2.14	-1.87	-4.63	-0.59	-5.22
	总计	45870	-1.41	-2.14	-3.55	-5.32	-0.59	-5.91
海河北系	山区	61183	6.76	0	6.76	5.52	0	5.52
	平原	16310	1.34	-4.17	-2.83	1.51	-2.74	-1.23
	总计	77493	7.10	-4.17	2.93	7.03	-2.74	4.29
海河南系	山区	75216	10.91	0	10.91	11.96	0	11.96
	平原	73453	-29.65	-29.07	-58.72	-20.44	-20.09	-40.53
	总计	148669	-18.74	-29.07	-47.81	-8.48	-20.09	-28.57
徒骇马颊河	平原	31843	3.86	-5.73	-1.87	4.94	-4.32	0.62
海河流域	山区	174859	15.99		15.99	16.78		16.78
	平原	129016	-24.18	-41.11	-65.29	-18.62	-27.74	-46.36
	总计	303875	-8.19	-41.11	-49.30	-1.84	-27.74	-29.58

根据历史资料记载, 五十年代河口生态并未出现大的生态问题, 年最小入海水量为 $30 \times 10^8 \text{m}^3$ (1951 年), 对应各海区最小入海水量为: 滦河口 $10 \times 10^8 \text{m}^3$, 海河口 $10 \times 10^8 \text{m}^3$ (永定新河 $5 \times 10^8 \text{m}^3$ 、海河干流 $5 \times 10^8 \text{m}^3$), 漳卫新河口 5×10^8

m^3 ，徒骇马颊河口 $5 \times 10^8 m^3$ ，以此作为海河的入海水量最小值。

地下水恢复用水量：为了恢复海河流域的生态与环境状况，必须禁止地下水超采，并且采用逐年回灌的方法不断恢复，流域多年平均禁采量如下表，主要发生在平原区，因此，把多年平均超采量作为地下水回补量，总流域地下水回补量定为 $29.58 \times 10^8 m^3/a$ 。

河道最小环境用水量的确定：参考海河流域生态恢复计算用水量，即河道最小环境用水量要满足多年平均径流量的 10%，结果如表 4.8 所示。

表 4.8 河道维持生态与环境良好最小径流量 ($\times 10^8 m^3$)

一级分区	滦河及冀东沿海		海河北系		海河南系		徒骇马颊河	全流域		
二级分区	山区	平原	山区	平原	山区	平原	平原	平原	山区	平原
最小径流量	4.97	5.50	4.78	6.19	9.89	13.15	1.52	19.65	26.36	46.02

城市河湖用水量的确定：根据经验，为满足城市景观和娱乐休闲的需要，城市河湖环境年用水的下限为人均 $20m^3$ ，河湖用水用下式计算：

$$W_{\text{河湖环境}} = P_{\text{人口}} \cdot 20 \quad (4.30)$$

$P_{\text{人口}}$ 指计算年的城市人口。按 2003 年计算：海河流域 2003 年城市人口为 6318 万人，因此，2003 年城市河湖年用水量为 $12.6 \times 10^8 m^3$ 。

表 4.9 海河流域最小生态与环境用水总量($\times 10^8 m^3$)

二级分区	评价区域	河道用水	湿地用水	城市河湖用水	地下水回补	水土保持	入海水量
滦河冀东沿海区	山区	4.98		0.20	-0.69	4.12	
	平原	0.53		0.36	-5.22		10.00
海河北系	山区	4.78		0.62	5.52	5.21	
	平原	1.416	2.65	1.51	-1.23		7.50
海河南系	山区	9.95		0.70	11.96	5.88	
	平原	3.26	8.63	2.76	-40.53		7.50
徒骇马颊河系	平原	1.52	1.25	0.58	0.62		5.00
海河流域	山区	19.7		1.52	16.78	15.21	
	平原	6.71	12.53	5.21	-46.36		30.00
	总计	26.36	12.53	6.73	29.58	15.21	30.00

注：- 表示地下水超采量

稀释水量的确定：根据海河水资源公报资料，海河流域 2003 年污水排放量为 $54 \times 10^8 m^3$ ，多年平均约为 $40 \times 10^8 m^3$ ，除饮用水源地为 II 级外，大部分水体的水质功能要求为 IV 类和 V 类水。按照现行的《污水综合排放标准》(GB8978-88) 的 COD 三级标准(500mg/l)，若仅按稀释作用考虑，要达到规划的水质最低功能

标准(COD V类, 40mg/l), 约需要 12 倍的清水稀释, 考虑水体自净能力(污染物衰减率按 30%计), 多年平均稀释水量约需要 $144 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。显然对于海河流域的水资源状况而言, 不宜考虑用清洁水稀释的办法来改善水质。因此本研究不考虑稀释水量部分。改善水质必须靠推广清洁生产技术、控制污染源以及提高污水处理率来实现。

海河流域生态与环境恢复总用水量: 根据上述几项分析, 海河流域各个区域现状最小生态与环境需水总量如下表所示, 初步估计的全流域最小生态与环境需水量为 $120 \times 10^8 \text{ m}^3$, 各分区分别如表 4.9。

4.6 生态用地的确定

本次计算中, 生态用地指城市有植被覆盖的地区, 河流生态用地(多年平均径流量的 30%对应的河宽加河岸带 100-150m 所占的面积)、城市湖泊面积、湿地面积、山区水土保持用地。

限于资料, 本次计算中, 只考虑城市绿化地区, 据全国生态城市的绿化标准。即城市绿化覆盖率达到 40%, 绿地率达到 35%, 人均公共绿地达到 10m^2 。

以此为据, 本次计算中, 城市植被覆盖率(城市植被面积与城市总面积 S_{city} 之比)最大定为 35%, 人均植被覆盖面积以 10m^2 计算。

则城市生态用地约束为:

$$P_{\text{人口}} \bullet 10 \leq S_{\text{city}} \bullet 35\% \quad (4.31)$$

$P_{\text{人口}}$, 指计算年的城市人口, 全流域城市面积按 1999 年计算, 为 3180km^2 。

第 5 章 海河流域生态与环境承载力的计算与分析

海河流域涉及 6 省区及北京市和天津市，共计 34 个城市，263 个区县，流域总面积 30.2 万 km²。2003 年流域内人口 1.56 亿，平均人口密度 489 人/km²。流域 GDP 为 2.05 万亿元，其中第三产业比重为 41.3%，城镇化水平 40.3%。流域多年平均降雨量 535mm。多年平均水资源总量 372 亿 m³。

由于行政区划和流域区划并不能完全重合，因此，本次的资料仅统计到 2003 年，最小统计单元为县，计算中将流域分为 7 个生态分区，七个分区社会经济资料如表 5.1 所示。

表 5.1 2003 年海河流域社会经济状况

分区	面积 (km ²)	国内生产总 值 (亿元)	第一产业 (亿元)	第二产业 (亿元)	第三产业 (亿元)	人均 GDP (元/人)	总人口 (万人)	城镇人口 (万人)
滦冀山区	44070.0	851.2	152.5	388.2	310.4	8881.4	1058.4	524.7
滦冀平原	10460.0	820.7	112.7	421.3	286.7	17829.0	460.3	172.0
海河北系山区	66836.0	3309.3	222.4	1354.9	1731.8	15700.9	2107.7	1029.1
海河北系平原	16310.0	3069.7	144.9	1369.6	1553.8	23908.8	1283.9	790.9
海河南系山区	59817.0	3061.4	348.2	1612.2	1101.0	9699.5	3156.3	1389.7
海河南系平原	73418.0	5700.3	744.6	2888.9	2065.9	11362.2	5016.9	1353.4
徒马河平原	31878.0	3772.0	524.9	1791.0	1456.1	14994.5	2515.6	1158.0
海河流域	302789.0	20584.7	2250.3	9826.1	8505.8	13281.3	15599.0	6318.0

资料来源：中国统计年鉴及分省，各县统计年鉴。

上述可以看出，就无论人均 GDP 还是城市化水平海河北系平原都是最高的，人均 GDP 为 23908.8 元/人，城镇化水平 61.4%。第三产业比重以海河北系山区最高，为 52.3%。

2003 年全流域总用水量 367.98 亿 m³，其中农业用水量 256.14 亿 m³，占 69.6%，为第一用水大户；工业用水量 56.58 亿 m³，占 15.4%；生活用水量 52.51 亿 m³（其中城镇生活占 54.8%），占 14.3%；生态与环境用水 2.75 亿 m³，占 0.7%。和 1998 年相比，工业用水比例已经大幅度下降，但是生态用水仍然较小。用水指标如表 5.2 所示，由于 2003 年降水量和多年平均相差不大，因此以 2003 年为现状年分析。

在本次研究中，对人口进行预测引用的是联合国人口署的预测结果，认为由于中国人口政策的推行，可望于 2035 年达到人口峰值，届时我国总人口为 15.6 亿。计划生育是我国的基本国策，随着计划生育政策的贯彻执行，人口出生率将逐年降低，随社会老龄化程度的加深，人口死亡率将逐年增大，最后二者趋于平衡，预测结果如表 5.3 所示。

城市化程度是通过城市人口占总人口的比率来反映的。区城市化进程是在参考我国城市建设总体规划的基础上确定的（贾绍凤等，2004），表 5.4。

表 5.2 2003 年海河流域分区用水指标

分区	人均用水量	万元 GDP 用水	工业增加值用	农田灌溉亩均	人均生活用水(L/d)	
	(m ³ /人)	量(m ³ /万元)	水(m ³ /万元)	用水(m ³ /亩)	城镇	农村
滦河及冀东沿海	286	239	83	363	171	63
海河北系	202	123	66	268	75	65
海河南系	221	185	65	235	116	43
徒骇马颊河	329	321	78	242	249	56
全流域	236	183	68	250	156	52
北京市	141	76	61	386	99	102
天津市	169	75	35	270	140	74
河北省	258	234	66	245	126	50
山西省	134	181	147	208	160	31
山东省	338	331	72	243	165	57
河南省	272	272	114	298	258	47
内蒙古	130	173	114	88	140	13
辽宁省	98	290	289	169	134	41

资料来源：中国统计年鉴，海河流域水资源公报，中国水资源公报。

表 5.3 分区人口总量预测结果（单位：万人）

	2003	2010	2020	2030
北京	1456	1598.5	1605.7	1608.1
天津	1011.1	1164.6	1173.9	1176.9
河北	7703.3	8001.7	8220.4	8307.1
山西	1364.1	1408.0	1442.9	1455.9
河南	2173.5	2292.1	2377.2	2405.9
山东	1477.3	1605.5	1654.3	1672.6
内蒙古	414.0	111.8	115.5	117.0
海河流域总计	15599.3	16182.2	16589.9	16743.4

表 5.4 海河流域城市化进程（单位：%）

	2003	2010	2020	2030
北京	79.0	82	87	90
天津	74.2	77	83	85
河北	28.0	34	41	46
山西	36.8	42	50	55
河南	26.2	32	40	45
山东	43.2	46	53	58
内蒙古	44.5	50	57	62
海河流域总计	40.3	42.5	49.9	55.0

2003 年海河流域 GDP 总量构成为 10.9%，47.7%和 41.3%，2000 年产业结构为 12.4%，46.4%和 41.2%，相比较而言农业比重有所下降，工业 GDP 比重稍微上升，第三产业变化不大。海河流域现状工业结构以重工业为主导，以河北、北京、天津三省、市为例进行分析。2003 年上述三省市全部国有及规模以

上非国有工业企业总产值中，重工业占 70.1%，轻工业占 29.9%。在重工业中，万元产值用水较大的采掘及原材料工业比重较高，占重工业总产值的 48.3%，其中包括钢铁、石油加工与石油化工、石油及煤炭开采以及建材等部门，而电子通信设备制造、机械、食品饮料、轻纺则是加工工业的主导部门。自 2000 年以来，工业内部结构增长主要为能源、化工、重工业等，这和本区域的水资源状况极不适应。本流域未来 30 年仍处于工业化中期向后期阶段，第二产业所占比重不可能出现大幅度下降趋势；而第一产业由于受京津唐及京广铁路城市群的带动，其比重会在现有基础上继续下降，根据分析到 2030 年时海河流域的产业结构大体接近 1997 年世界银行所提出的中等收入国家的产业结构水平(12%: 38%: 50%)。

海河流域近 20 年平均农业用水量约为 300 亿 m^3 ，占总用水量的 75%左右。2003 年，海河流域大农业(农林牧渔业)总产值中，农业占 56.9%，林业占 2.4%，畜牧业占 34.4%，渔业占 3.6%。与先进发达地区相比，海河流域种植业比重偏高，牧业比重偏低，无论从农牧结合，提高种植业产品转化增值以及用地与养地相结合的角度，还是从水资源优化配置来看，今后 20 多年，大农业的结构将逐步调整优化。根据联合国粮农组织提出的，要满足一个人的生存，至少要有 $533m^2$ (0.8 亩) 耕地来生产粮食，考虑到海河流域地处首都圈与京津唐经济区的特殊区位条件，粮食消费水平可按 350kg/人，自给率为 85%。

上述分析了海河流域现状年的社会经济和水资源基本概况，在进行承载力分析时，以 2003 年各县统计资料为现状年基本数据，模型采用 GAMS 编程，目标函数为流域可持续发展度最大，根据 CGE 模型结构，在 CGE 模型的每一个结构处加入水资源和水污染约束，同时分析目标函数最大化为可持续发展度最大的均衡状态，加入水量平衡约束，水土资源-生态与环境-社会经济互动关系。

5.1 现状年生态与环境发展测度分析

根据上述指标体系以及量化方法计算海河流域生态与环境承载力之前，首先分析现状年各分区生态与环境承载力。首先分析海河流域 2003 年的可持续发展度，可以直接根据海河现状实际数据进行计算，不需要优化分析，直接进行评价，输入数据如下，生态与环境和社会经济可持续发展状况如表 5.5，计算结果如表 5.6。

由上述计算可以看出，海河流域目前社会经济水平测度均大于或者接近于 0.8，经济发展水平相对较高，但是生态与环境发展却很低，流域整体生态与环境评价测度仅为 0.0834，环境恶化程度严重，因此综合可持续发展度仅为

0.2770, 远低于可持续发展度 0.8, 所以流域经济发展是不可持续的, 或者说流域现状的经济发展是以牺牲生态与环境为代价, 处于恶性发展状态。同时也可以看出, 就分区的发展水平而言, 海河北系无论山区或者平原的可持续发展水平比其他区域都较高, 生态与环境测度也较高, 这是因为海河北系的污水处理水平较高, 技术水平相对较高, 工农业用水定额相对其它区域都较低, 因此, 生态与环境的破坏程度相对较小, 生态与环境也相对比较容易恢复。而滦河和冀东沿海山区的可持续发展程度在各个分区中最低, 不但流域经济发展状况不如其它分区, 而同时生态与环境质量也是最差的, 综合评价得分仅为 0.1636, 因此滦河和冀东沿海山区的生态与环境恢复任务最为艰巨。就现状年的评价情况来看, 同一个评价区域的平原区和山区的发展测度相差不大, 生态与环境状况山区要好于平原区一些, 而社会经济发展来看平原区要相对好于山区。

表 5.5 海河流域 2003 年社会经济及生态与环境数据

计算指标	海河流域	滦冀山区	滦冀平原	海河北系山区	海河北系平原	海河南系山区	海河南系平原	徒马河平原
人口(万人)	15599.0	1058.4	460.3	2107.7	1283.9	3156.3	5016.9	2515.6
水资源量(亿 m ³)	320.2	18.3	25.4	30.0	38.1	41.1	101.8	65.5
用水量(亿 m ³)	367.9	21.0	29.2	34.4	43.7	47.3	117.0	75.3
GDP(亿元)	20584.7	851.2	820.7	3309.3	3069.7	3061.4	5700.3	3772.0
人均粮食(kg/人)	438	348.8	383.6	321.5	364.2	375.8	438.7	694.4
人均水资源量(m ³ /人)	349.9	419.2	774.0	365.3	364.2	285.3	265.0	530.0
农业用水(亿 m ³)	245.5	5.7	8.72	15.7	30.31	20.4	102.8	63.4
工业用水(亿 m ³)	55.4	1.9	1.81	4.0	8.55	7.6	23.1	6.1
生活用水(亿 m ³)	37.4	1.3	0.9	2.4	9.61	3.3	14.9	4.3
生态用水(亿 m ³)	100.0	7.5	12.4	8.6	11.0	13.6	42.5	5.9
污水回用量(亿 m ³)	6.0	0.0	0.3	0.7	5.0	0.0	0.9	0.8
地下水超采量(亿 m ³)	0.7	5.2	-5.5	1.2	-11.9	40.5	-0.6	29.6
工业定额(m ³ /万元)	143.7	182.7	124.5	146.5	94.6	186.8	148.2	164.9
农业定额(m ³ /万元)	2377.5	1462	2602.5	1771	2719.1	2008.5	2975.6	4379
污水处理率(%)	13	3.5	24.7	49	54.8	3.2	5	15
人均 GDP(元/人)	13281.3	8881.4	17829.0	15700.9	23908.9	9699.5	11362.2	14994.5
第三产业的比重(%)	41.3	36.5	34.9	52.3	50.6	36.0	36.2	38.6
城市化水平(%)	44.3	37.4	48.8	61.6	44.0	27.0	46.0	40.8
COD 排放量(万 t)	128.1	5.3		7.1	18.8	6.8	47.3	34.0
污水排放量(亿 m ³)	60.3	1.1	4.5	4.2	14.1	4.8	26	5.5
城市河湖用水量(亿 m ³)	1.4	0	0	0	0.8	0	0.5	0.1

资料来源:《海河流域水资源规划报告》专题 6,《海河流域生态与环境恢复水资源保障规划》,《海河流域水功能区划》。

表 5.6 现状年可持续发展测度

计算指标	海河流域	滦冀山区	滦冀平原	海河北系山区	海河北系平原	海河南系山区	海河南系平原	徒马河平原
社会经济水平测度 (EG)	0.92	0.79	0.88	0.89	0.96	0.79	0.89	0.82
生态与环境发展测度 (LI)	0.0834	0.0339	0.1392	0.1654	0.1504	0.1404	0.0791	0.0936
可持续发展测度 (BTI)	0.2770	0.1636	0.3500	0.3837	0.3800	0.3330	0.2653	0.2770

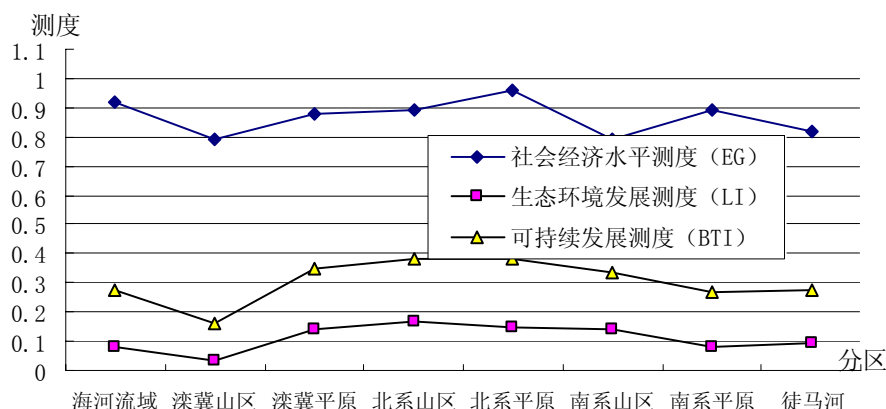


图 5.1 海河流域现状可持续发展状况分析

表 5.7 海河流域现状年生态与环境良好状态主要指标

计算指标	海河流域	滦冀山区	滦冀平原	海河北系山区	海河北系平原	海河南系山区	海河南系平原	徒马河平原
水资源量(亿 m ³)	320.2	18.3	25.4	30.0	38.1	41.1	101.8	65.5
地下水超采量 (亿 m ³ /a)	0.5	3.4	-3.6	0.8	-7.8	26.5	-0.4	19.4
工业定额(m ³ /万元)	143.7	182.7	124.5	146.5	94.6	186.8	148.2	164.9
农业定额(m ³ /万元)	2377.5	1462.0	2602.5	1771.0	2719.1	2008.5	2975.6	4379.0
污水处理率(%)	90.0	85.0	90.0	90.0	90.0	85.0	90.0	90.0
第三产业的比重(%)	33.0	34.0	36.0	37.4	48.0	30.0	34.0	29.0
城市化水平(%)	27.6	17.5	36	28.2	54	18.2	26.9	17.7
COD 排放量(万 t)	15.1	0.6	0.0	0.8	2.2	0.8	5.6	4.0
污水排放量(亿 m ³)	60.3	1.1	4.5	4.2	14.1	4.8	26.0	5.5
城市河湖用水量(亿 m ³)	4.2	0.0	0.0	0.0	2.4	0.0	1.5	0.3

上述分析了海河流域现状年的生态与环境可持续发展度，可以看出流域的综合发展测度低于 0.8，处于不可持续发展的状态，为了计算流域的生态与环境承载力，调整流域的社会经济和生态与环境发展不对称结构，采用产业结构调整 and 加大生态与环境用水用地，使流域达到可持续发展的状态，即 LI 为 0.8 状态下，计算现状年可承载的人口和社会经济。具体做法是：生态与环境用水、生态与环境用地、城市河湖面积、地下水开采量、COD 排放指标等等均为达到上述指标的隶属度上限值，即生态与环境良好，测度为 0.8，污水处理率为 90%，

地下水开采系数为 0.85，河道断流比 0.25，计算流域的现状可以支撑的社会经济和人口大小。输入数据如下表 5.7，计算结果如表 5.8。

表 5.8 现状年生态与环境良好海河流域分区生态与环境承载力

计算指标	海河流域	滦冀山区	滦冀平原	海河北系山区	海河北系平原	海河南系山区	海河南系平原	徒马河平原
人口(万人)	12575.2	421.2	243.4	1187.2	1514.4	1719.0	5146.3	2002.1
水资源量(亿 m ³)	320.2	18.3	25.4	30.0	38.1	41.1	101.8	65.5
用水量(亿 m ³)	432.3	16.4	25.3	29.9	54.5	44.9	182.4	78.9
人均 GDP(元/人)	11815.0	6376.9	14203.4	6000.6	15985.6	5232.4	6933.2	4473.9
GDP(亿元)	14857.6	438.0	563.7	1161.8	3947.9	1466.8	5818.6	1460.9
人均粮食(kg/人)	438	348.8	383.6	321.5	364.2	375.8	438.7	694.4
人均水资源量(m ³ /人)	254.6	603.2	1043.9	252.5	251.4	239.3	197.9	327.1
地下水超采量(亿 m ³ /a)	0.7	5.2	-5.5	1.2	-11.9	40.5	-0.6	29.6

由上述计算结果可以看出，现状年海河流域在生态与环境良好的状况下，所能承载的人口为 12575.2 万人，而现状海河流域的总人口为 1.56 亿，生态与环境良好状态下的 GDP 为 14857.6 亿元，为现状 GDP 的 74.8%，人均 GDP 和现状实际情况比都有所下降，总的来说，目前海河流域无论人口还是国内生产总值，都处于超载状态。

5.2 分区生态与环境发展测度分析

在具体的海河流域生态与环境承载力分析中，分析海河流域的水量平衡约束，水质水量和社会经济生态与环境约束条件下，不断提高海河流域的生态与环境质量，并考虑南水北调，技术系数提高，产业结构调整，通过社会经济可持续发展测度和生态与环境质量测度等综合信息进行分析，主要分析海河流域再维持良好的生态与环境条件下和生态与环境不断改善的条件下的生态与环境指标，资源环境。社会经济福利水平指标，产业结构调整，生态与环境用水等状态。分别分析海河流域各个分区达到可持续发展状态下所能承载的社会经济体系和相关生态与环境状况。主要从海河流域实际水土资源和社会经济结构出发，考虑到未来几十年内社会经济发展和生态与环境恢复和建设的主要变化，利用承载力模型计算不同情景方案下优化结果，重点分析 2003 直到未来海河流域可持续发展的流域生态与环境系统可承载人口以及人均 GDP 大小，以及绿色 GDP 的大小，分析比较它与自然增长人口的差距以及相应的生态与环境指标、水资源指标、社会福利水平指标和产业结构调整。

模型采用 GAMS 编程，目标函数为流域可持续发展度最大，约束条件为水量平衡约束和 CGE 均衡，根据水资源-社会经济-生态与环境互动关系分析。同

时，根据 CGE 模型结构，在 CGE 模型中分析水质水量约束对社会经济各部门以及总体产出的变化约束，分析目标函数最大化条件下社会经济系统和生态环境系统状况。

海河流域整体生态与环境承载力分析：流域整体生态与环境承载力的计算分为两种情形：即首先计算现状以及未来的生态与环境一直为良好的情况下，即生态与环境测度为 0.8，分析社会经济逐步发展的状况；另一种情形是按照海河水利委员会的海河流域规划，生态与环境逐步恢复，此时考虑生态与环境投资，以及不断提高污染处理水平的情况下，人口和社会经济承载状况。

在第一种情形下，以生态与环境的良好为优先条件，既在水量平衡，社会经济-水土资源-生态与环境互动关系中首先考虑生态与环境恢复用水，不考虑环境恢复对经济发展的影响，考虑经济发展自身的产业结构调整，以及技术水平提高，分析海河流域的承载力变化；第二种情形下，根据海委生态与环境恢复规划，逐年恢复生态与环境状态，分析海河流域水污染治理，水土流失等一系列生态与环境的经济社会效益，根据前面的社会经济-水土资源-生态与环境互动关系以及社会经济社水污染、水资源短缺的量化关系分析在生态与环境逐步改善的条件下，海河流域逐年的生态与环境承载力大小以及达到可持续发展所需要的年限。

表 5.9 海河流域 2000 年投入产出表 (单位：亿元)

行业分类	农业	工业	建筑业	运输邮电业	商业饮食业	其他服务业	中间使用合计
农业	246.4	532.0	5.2	0.8	55.6	13.8	853.8
工业	435.9	6902.2	967.8	294.4	376.2	565.9	9542.5
建筑业	4.6	11.8	1.1	16.8	5.9	69.6	109.7
运输邮电业	34.5	343.5	143.9	38.6	49.8	187.9	798.1
商业饮食业	47.0	572.4	134.7	19.6	136.7	112.9	1023.3
其他服务业	72.2	364.4	103.9	58.3	180.3	326.5	1105.6
中间投入合计	840.6	8726.3	1356.6	428.4	804.5	1276.6	13433.0
固定资产折旧	36.6	962.7	46.1	241.5	69.5	272.2	1523.9
劳动者报酬	824.9	2003.6	399.8	273.8	513.3	886.7	5247.8
生产税净额	25.5	985.7	56.0	41.0	236.9	185.6	1399.4
营业盈余	51.6	1070.8	106.6	104.0	120.0	160.1	1503.4
增加值合计	938.7	5022.7	608.5	660.3	939.7	1504.5	9674.5
总投入	1779.3	13749.0	1965.1	1088.8	1744.2	2781.1	23107.4

资料来源：根据中国统计年鉴，海河流域水资源规划报告，中国 1998 年投入产出表分析，中国分省投入产出表中海河流域各省份统计所得。其中固定资产折旧为计算值。

海河流域承载力表现为流域整体和流域分区域的承载力。下面首先进行海河流域整体承载力的计算与分析，然后进行分区承载力的对比分析。

参数输入:承载力输入参数分为两部分,首先是进行量化可持续测度 *BTI* 的生态与环境质量测度 *LI*、社会经济水平测度 *EG* 的各个指标的不可承载状态值、可承载状态临界值、完全承载状态临界值,也就是各个分区的不同生态与环境临界状态值,根据前面的分析得到。在第一种情形的计算中,生态与环境指标采用生态与环境良好状态值,即生态与环境指标评价为 0.8。考虑海河流域生态与环境的相关参数,认为水土流失面积比, COD 排放量,地下室开采系数以及河道断流比的良好状态分别为 0.079, $48.4 \times 10^4 \text{t}$, 0.85 和 0.25,而对应的不可承载状态值为 0.550, $118.87 \times 10^4 \text{t}$, 1.3 和 0.75。社会经济数据主要为现状年的人口 GDP 等,投入产出如表 5.9 所示。

表 5.10 海河流域生态与环境承载力计算输入参数

参数	现状		未来水平年预测值		
	2003	2010	2020	2030	2040
总水资源量(亿 m^3)	320.2	503.8	503.8	537	537
实际用水量(亿 m^3)	432.3				
南水北调水量(亿 m^3)		79.9	79.9	108.4	108.4
工业用水定额(m^3 /万元)	143.7	71.9	61.09	50.3	46.1
农业用水定额(m^3 /万元)	2077.5	2139.8	2020.9	1902.0	1859.0
污水处理率(%)	13.0	45.0	55.0	60.0	66.0
人均 GDP(元/人)	13281.3	17000.0	26572.0	41940.0	48400.0
第三产业的比重(%)	41.3	46.0	49.5	53.0	75.0
城市化水平(%)	44.3	46.3	50.4	54.4	76.0
COD 排放量(万 t)	128.1				
污水排放量(亿 m^3)	60.3				
工业废水排放率(%)	56.7	51	48.2	45.3	42.5
生活污水排放率(%)	16.7	16.7	16.7	16.7	16.7
最小生态需水量(亿 m^3)	121.3				
最低人均粮食占有量(kg/人)	357.5	382.7	382.7	369.8	369.4

其次是为现状年的相关指标输入以及未来水平年外生变量预测,主要是 CGE 模型的外生变量,如技术水平提高,劳动力人口,人均消费水平等,在前面已经分析。下面进行分析 2003 到未来水平年生态与环境承载力状况以及区域的可持续发展状态,主要输入数据如表 5.10 所示。计算结果如表 5.11 和 5.12 所示,分析如下。

(1) 由上述结果可以看出,首先,如果为了满足海河流域生态与环境需水的要求,以生态与环境现状恢复到 0.8 为目标,那么海河整体现状的人口和 GDP 仅能承载 12575.2 万人和 14857.6 亿元的国内生产总值,以现状的在海河的人口和 GDP 来看,海河流域处于超载状态,可承载人口数明显低于流域实际人口。主要原因是最小生态需水不能被满足(1998~2003 年平均为 8 亿 m^3),流域生态

与环境质量恶化趋势明显。在 $LI \geq 0.8$ 要求下,优化的最后结果通过压缩人口直接或间接反映。其次,在未来水平年,生态与环境一直保持良好状态的情况下,流域人口若按照正常的增长速度变化过程,海河流域的整体经济缓慢发展,一直到发展到 2035-2040 年之间才可以承载预期人口,此时,可持续发展测度为接近 0.9。

表 5.11 生态与环境良好情形下生态与环境承载力变化过程

年份	2003	2010	2020	2030	2035	2040
预测人口(亿人)	1.20	1.61	1.65	1.67	1.67	1.67
可承载人口(万)	12575.2	13250.0	14625.4	15205.0	16753	16820.0
水资源总量(亿 m ³)	438.3	520.4	530.9	583.2	591.1	600.3
工业用水(亿 m ³)	55.4	107.1	127.2	158.2	147.5	135.3
农业用水(亿 m ³)	245.5	245.7	228.4	229.6	237.0	245.2
生态用水(亿 m ³)	100.0	100.0	95.5	94.5	93.5	93.0
生活用水(亿 m ³)	37.4	67.7	79.9	100.9	113.1	126.7
回用用水(亿 m ³)	6.0	16.6	27.1	46.2	54.1	63.3
社会经济测度 EG	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0
可持续发展测度 BTI	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
总 GDP(亿元)	14857.6	19615.0	32677.0	59421.0	68682.0	79120.0
人均 GDP(元)	11815.0	14803.8	22342.6	39079.9	40996.8	47039.2
人均粮食(kg)	438.0	400.0	375.0	350.0	347.5	345.0
人均水资源量(m ³)	348.5	392.8	363.0	383.6	352.8	356.9

表 5.12 生态与环境逐步恢复情形下生态与环境承载力变化过程

年份	2003	2010	2020	2030	2036	2040
可承载人口(万人)	15599.0	15932.1	16025.1	16264.7	16750.2	16920.7
水资源总量(亿 m ³)	438.3	520.4	530.9	583.2	591.1	600.3
工业用水(亿 m ³)	69.1	125.7	143.1	172.3	157.6	142.1
农业用水(亿 m ³)	303.6	301.7	267.4	255.7	262.6	271.0
生态用水(亿 m ³)	8.0	40.0	66.3	95.0	107.5	120.0
生活用水(亿 m ³)	46.6	53.0	54.1	60.2	63.4	67.1
回用用水(亿 m ³)	7.6	17.4	26.4	42.2	46.5	51.0
生态与环境水平测度	0.077	0.246	0.427	0.723	0.799	0.811
社会经济测度 EG	0.910	0.931	0.942	0.968	0.981	0.985
可持续发展测度 BTI	0.265	0.478	0.634	0.837	0.885	0.894
总 GDP(亿元)	20584.7	26181.5	35269.3	61573.6	69297.2	77753.2
人均 GDP(元)	13196.2	16433.2	22008.8	37857.2	41371.0	45951.5
人均粮食(kg)	438.0	400.0	360.0	320.0	317.5	315.0
人均水资源量(m ³)	281.0	326.6	331.3	358.6	352.9	354.8

(2) 在生态与环境逐步恢复的情况下,流域现状年的生态与环境发展测度

为 0.0772, 根据南水北调 2010 年和 2030 年调水情况, 2010 年调水 79.9 亿 m^3 , 2030 年调水 108.4 亿 m^3 , 生态与环境用水不断增大, 到 2036 年, 生态与环境用水达到 120 亿 m^3 , 生态与环境基本恢复, 测度为 0.799, 此时流域的可持续发展度为 0.885, 实现生态与环境和社会经济的良性循环。

表 5.13 生态与环境逐步恢复情形下产业结构变化

年份	2003	2010	2015	2020	2030	2036	2040
农业	2250.3	1512.7	1691.3	1943.7	3161.0	2397.8	2445.8
工业	6306.5	7317.3	8181.2	9402.3	15290.3	11598.7	11830.9
建筑业	2855.4	3192.4	3569.2	4101.9	6670.7	5060.2	5161.5
运输邮电业	961.1	1099.0	1550.2	2144.2	3943.2	5434.8	6308.2
商业饮食业	2258.4	2625.5	3744.6	5217.7	9679.2	13378.5	15544.7
其他服务业	5281.3	6434.7	9035.7	12459.5	22829.2	31427.2	36461.9
总 GDP	20584.7	24181.5	27772.3	35269.3	61573.6	69297.2	77753.2
第三产业比重	0.413	0.478	0.516	0.562	0.592	0.725	0.750
第三产业 GDP	8505.8	10159.1	14330.5	19821.3	36451.6	50240.4	58314.9

(3) 流域产业结构调整如表 5.13, 由表中可以看出, 第三产业比重不断增加, 一二产业比重不断下降, 尤其以第二产业比重下降最快, 第三产业中商业饮食业受水资源约束较小, 增长速度相比较快, 而第二产业比重则不断下降, 农业比重也在下降, 第二产业中含有能源, 以及大耗水重工业等, 因此产业结构调整中下降比例较快。

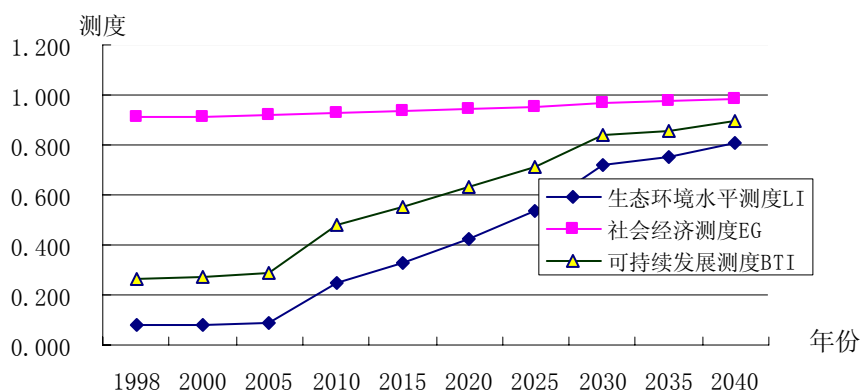


图 5.2 海河流域整体生态逐步恢复情形发展测度

(4) 到 2038 年流域的可承载人口为 16750 万人左右, 总 GDP 为 70000 亿元左右, 人均 GDP 为 4.3 万元左右, 第三产业比例为 72.5%, 流域生态与环境良好, 并且人口不超载, 处于可持续发展状态。

滦河冀东沿海山区承载力的计算与分析

社会经济发展状况与主要生态与环境问题: 滦河冀东沿海山区位于海河流域东北部, 面积 44070 km^2 。包括辽宁省的朝阳市、内蒙古自治区的锡林郭勒市、

河北省的承德市、唐山市、秦皇岛市、张家口市。其中以承德市的计算面积最大，可用承德市的特性及数据代替本区域的特性及数据。2003 年城镇化率为 44.3%，在海河流域七个分区中最低，第三产业的比重为 36.5%，人均粮食产量 348.8kg/人。人均 GDP 为 8515.2 元/人。现状滦河冀东沿海山区的社会经济水平测度为 0.79，接近 0.8。该区域最大的生态与环境问题为水土流失和水污染问题。水土流失率为 0.65，在所有二级分区中最为严重。年污水排放量为 1.1 亿 m³，COD 排放量为 5.33 万吨，现状污水处理率仅为 3.5%，城市河湖面积比为 0.008，现状年滦河和冀东山区的生态与环境测度为 0.0339，在山区中最低。

表 5.14 2003 年滦河冀东沿海山区社会经济基本状况

地区	面积	GDP (亿元)	第一产业 (亿元)	第二产业 (亿元)	第三产业 (亿元)	人均 GDP (元/人)	总人口 (万人)	城镇人口 (万人)
朝阳市	1710.0	119.8	31.9	43.2	44.7	3568.0	336.5	270.1
承德市	28273.0	188.8	35.0	88.2	65.6	5259.1	288.5	36.5
秦皇岛市	3660.0	182.8	18.4	72.5	91.9	6695.2	128.9	34.9
唐山市	2551.0	246.9	36.9	136.3	73.7	3496.7	134.6	56.2
锡林郭勒盟	6950.0	100.7	28.5	42.5	29.7	10582.0	94.0	42.0
张家口市	926.0	12.2	1.8	5.6	4.9	272.1	17.2	3.3

表 5.15 滦河冀东沿海山区参数输入

参数	现状		规划值		
	2003	2010	2020	2030	2040
总水资源量(亿 m ³)	18.3	24.4	24.4	24.4	24.4
实际用水量(亿 m ³)	21.7				
工业用水定额(m ³ /万元)	182.7	91.4	77.7	64.0	58.4
农业用水定额(m ³ /万元)	1462.0	1315.8	1242.7	1169.6	1058.6
污水处理率(%)	3.5	35.0	45.0	50.0	60.0
人均 GDP(元/人)	8515.2	12566.9	19638.2	26709.4	30000.0
第三产业的比重(%)	36.5	38.0	44.0	48.0	55.0
城镇化率(%)	44.3	45.2	47.1	52.0	56.0
COD 排放量(万 t)	5.3				
污水排放量(亿 m ³)	1.1				
工业废水排放率(%)	81.1	73.0	68.9	64.9	61.0
生活污水排放率(%)	7.6	7.6	7.6	7.6	7.6
最小生态需水量(亿 m ³)	10.0				
人均粮食占有量(Kg/人)	348.8	320.0	300.0	300.0	300.0

生态与环境承载力的计算也分为两种情形，第一种情形考虑现状恢复生态与环境良好，分析海河流域现状能够承载的人口和 GDP，看是否超载；第二种情形分析生态与环境逐步恢复，根据社会经济和生态与环境最大可持续发展看承载的最大人口和 GDP 以及未来达到可持续良性发展的状态。主要输入数据根

据前面生态与环境需水分析, 以及劳动力和技术系数的提高分析。其中生态与环境指标主要分析一下三方面, 水土流失面积比的良好状态为 0.079, COD 排放量指标为 $2.21 \times 10^4 \text{t}$, 地下水开采系数为 0.85, 不可承载值分别为 0.65, $5.24 \times 10^4 \text{t}$ 以及 1.30。其他相关指标如表 5.15 所示:

其中 2003 年数据为实际值, 而未来水平年工业用水定额为输入初始值, 考虑因素主要有总产出与用水投入之间的关系, 其中农业用水定额则是估算, 第三产业的比重为 CGE 模型外生变量, 根据人均 GDP 和产业结构发展所处阶段分析。计算结果如表 5.16 所示。

表 5.16 生态与环境良好情形下社会经济和生态与环境状况

年份	2003	2010	2020	2030	2039	2040	2042
预测人口(万)	1058.4	1635.0	1654.0	1682.0	1735.0	1735.0	1736.0
可承载人口(万)	835.2	1569.2	1593.3	1614.6	1725.3	1730.5	1735.5
水资源总量(亿 m^3)	16.4	24.4	24.4	24.8	26.8	27.0	27.0
工业用水(亿 m^3)	1.8	4.9	5.5	6.2	5.9	5.9	5.9
农业用水(亿 m^3)	5.8	8.4	8.1	7.5	8.9	8.9	8.9
生态用水(亿 m^3)	7.5	8.2	7.6	7.5	7.3	7.3	7.3
生活用水(亿 m^3)	1.3	2.9	3.2	3.6	4.7	4.9	4.9
回用用水(亿 m^3)	0.0004	0.0058	0.049	0.3917	2.425	2.9778	2.9778
社会经济测度 EG	0.76	0.892	0.911	0.931	0.951	0.951	0.951
可持续发展测度 BTI	0.79	0.845	0.854	0.863	0.872	0.872	0.872
总 GDP(亿元)	851.2	1851.2	2759.7	4063.4	5178.4	5428.6	5447.4
人均 GDP(元)	6376.9	11797.2	17320.8	25166.3	30014.3	31370.1	31388.0
人均粮食(kg)	348.8	315.2	307.8	300.4	296.0	295.5	296.5
人均水资源量(m^3)	518.6	435.3	418.3	409.5	364.0	358.2	357.2

由表 5.16 和表 5.17 可以看出, 第一, 在满足生态与环境良好的情形下 ($\text{LI} \geq 0.8$)。滦河冀东沿海山区现状 (2003 年) 处于超载状态, 滦河冀东沿海山区 2003 年实际人口为 1058.4 万人, 可承载人口为 835.2 万人, 可承载人口明显低于实际人口。这也说明通过压缩人口, 滦河冀东沿海山区生态与环境才可承载。根据前面的指标我们可以看到, 该区域社会经济发展水平不高, 污水处理水平较低, 水土流失严重, 单方面地追求经济发展而不重视环境治理, 城市河湖用水也不足。

第二, 现状用水量为 16.4 亿 m^3 , 2010、2030 年根据南水北调调水情况, 总水资源量为 24.4 亿 m^3 , 在这种情况下, 通过自身结构的调整, 到 2042 年左右可以承载预期的人口。

第三, 在生态与环境逐步恢复的情况下。首先, 滦河和冀东沿海山区现状是不可持续发展的, 2003 年生态与环境综合测度为 0.0337, 远远低于 0.8。生

态用水仅仅为 0.005 亿 m³，在区域产业结构调整以及南水北调前提下，到 2040 年区域的生态与环境综合测度达到 0.801，处于良好状态，此时人口为 1730 万人左右，GDP 为 5500 亿元左右，人均 GDP 大约 32000 元。

表 5.17 生态与环境逐步恢复情形下生态与环境以及社会经济发展状况

年份	2003	2010	2020	2030	2038	2040	2042
可承载人口(万)	1058.4	1220.1	1450.2	1532.1	1559.2	1685.1	1733.8
水资源总量(亿 m ³)	16.6	25.1	25.5	26.3	27.3	27.6	27.6
工业用水(亿 m ³)	4.46	10.6	10.35	8.54	8.17	8.16	8.17
农业用水(亿 m ³)	9.89	10.49	7.89	7.55	7.63	7.69	7.7
生态用水(亿 m ³)	0.005	1	4.2053	7.09	8.0489	8.2886	8.3
生活用水(亿 m ³)	2.25	3.01	3.05	3.12	3.45	3.46	3.5
回用用水(亿 m ³)	0.16	0.7	1.15	1.87	2.87	3.19	3.2
生态与环境水平测度	0.0337	0.112	0.286	0.582	0.767	0.795	0.801
社会经济测度 EG	0.78	0.884	0.893	0.912	0.922	0.932	0.951
可持续发展测度 BTI	0.162	0.315	0.506	0.728	0.841	0.861	0.873
总 GDP(亿元)	851.2	1324.1	2625.1	3320.1	4075.1	4562.1	5447.4
人均 GDP(元)	8042.3	10852.4	18101.6	21670.3	26135.8	27073.2	31418.8
人均粮食(kg)	348.8	355	330	305	301	300	296.5
人均水资源量(m ³)	303.4	348.8	352.3	352.8	329.0	322.5	329.5
第三产业 GDP	310.7	485.9	1078.9	1520.6	1956.0	2189.8	2625.6
第三产业比重 (%)	0.365	0.367	0.411	0.458	0.480	0.480	0.482

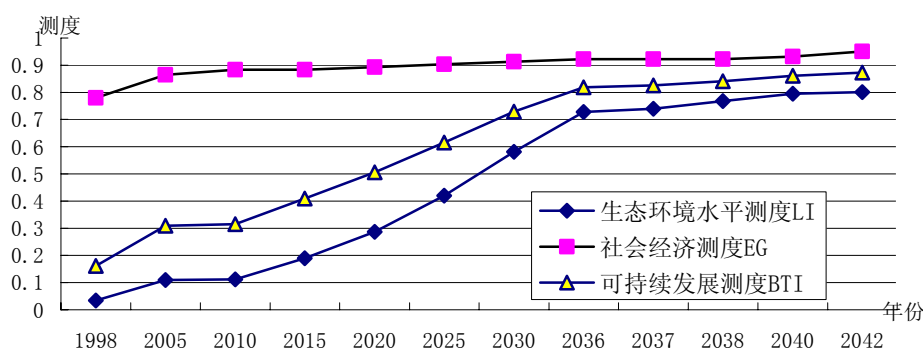


图 5.3 生态环境逐步恢复时可持续发展测度

滦河与冀东沿海平原承载力的计算与分析

社会经济发展状况与主要生态与环境问题：滦河冀东沿海平原位于海河流域的东北部，面积 10460km²，人口 460.3 万人，城镇人口 179.4 万人，城镇化率为 48.8%。第三产业的比重为 34.9%，人均粮食产量 383.6kg/人，人均 GDP 为 17829.0 元/人，工业万元产值用水量为 124.5m³/万元。2003 年总用水量为 33.9

亿 m^3 ，主要为当地水资源量和部分海水淡化，由于该区域临近海边，因此未来的海水利用潜力巨大，2003 年生产生活用水量为 25.3 亿 m^3 。现状年社会经济综合评价测度为 0.90。该区域的主要生态与环境问题为地下水超采、水质污染、河道断流、入海水量减少。地下水开采系数为 1.28，地下水超采严重，年污水排放量为 4.5 亿 m^3 ，COD 的年排放量为 8.6 万吨，2003 年污水处理率为 24.7%，污水处理水平较低，河道断流长度比为 25%。生态与环境质量综合测度为 0.1382。

滦河冀东平原主要生态与环境问题是生态用水不足，造成地下水超采、河道断流、入海水量减少，以及污水排放而处理率不高造成的水质污染。

现状年及未来水平年承载力分析：和前面分析一样，设计两种情形，第一种一生态与环境恢复为主，现状以及未来水平年生态与环境用水首先保证，生态与环境发展测度最小值为 0.8，具体的 COD 排放量为 $3.5 \times 10^4 t$ ，地下水开采系数为 0.85，河道断流比为 0.25，并且在未来的非常规用水中，海水淡化用水量预测要高于其他任何区域，根据上述数据，分析该状态下，流域分区承载的最大人口以及 GDP；第二种情形下，生态与环境逐步恢复，以可持续发展度最大化为目标，分析现状和未来流域的承载力大小。根据前面分析，该区域不可承载的相关临界值分别为：COD 排放量为 $8.3 \times 10^4 t$ ，地下水开采系数为 1.3，河道断流比为 0.75。相关的数据预测在第四章中已经分析。

表 5.18 滦河冀东沿海平原生态与环境承载力计算输入参数

参数	现状		规划值		
	2003	2010	2020	2030	2040
总水资源量(亿 m^3)	33.9	34.6	34.6	34.9	34.9
实际用水量(亿 m^3)	25.3				
工业用水定额 (m^3 /万元)	124.5	62.2	52.9	43.6	39.5
农业用水定额(m^3 /万元)	2602.5	2342.2	2212.1	2082.0	2000.0
污水处理率(%)	24.7	50.0	60.0	65.0	70.0
城镇化率(%)	48.8	60.0	65.0	70.0	75.0
人均GDP(元/人)	17829.0	34989.5	61821.1	88652.8	94234.5
第三产业的比重(%)	34.9	48.0	55.0	60.0	66.0
污水排放量(亿 m^3)	4.5				
工业废水排放率(%)	59.6	53.6	50.7	47.7	45.0
生活污水排放率(%)	22.0	22.0	22.0	22.0	22.0
最小生态需水量(亿 m^3)	16.1				
人均粮食占有量(kg/人)	383.6	360.0	350.0	320.0	330.0

计算结果以及相关分析：

根据上述参数分析，代入计算模型，结果如表 5.19 和表 5.20。有表可以看

出, 第一, 在满足生态与环境可承载的基本要求 ($LI \geq 0.8$) 前提下, 区域在 2038 到 2040 年之间可承载人口正常发展的总人口, 在第二种情形下, 到 2040 年, 计算所得生态与环境测度为 0.796, 生态与环境状况朝良性循环方向发展。

表 5.19 第一种情形下滦冀平原生态与环境承载力变化过程

年份	2003	2010	2020	2030	2037	2038	2040
预测人口(万)	460.0	472.2	483.6	518.0	518.0	518.0	518.0
可承载人口(万)	187.2	375.4	409.5	449.0	510.3	518.4	537.8
水资源总量(亿 m ³)	25.6	36.0	36.7	37.8	38.0	38.0	38.1
工业用水(亿 m ³)	3.6	8.7	8.4	9.7	8.4	8.16	7.94
农业用水(亿 m ³)	8.7	11.3	12.0	11.0	11.5	11.5	11.6
生态用水(亿 m ³)	12.4	12.9	12.4	12.4	12.4	12.38	12.38
生活用水(亿 m ³)	0.9	3.2	3.9	4.7	5.8	5.9	6.2
回用用水(亿 m ³)	0.3	1.4	2.1	2.9	3.1	3.1	3.2
社会经济测度 EG	0.860	0.921	0.948	0.964	0.974	0.974	0.974
可持续发展测度 BTI	0.829	0.858	0.871	0.878	0.883	0.883	0.883
总 GDP(亿元)	265.9	1321.3	2362.4	4004.9	4731.7	4842.6	5068.4
人均 GDP(元)	14204.1	35199.0	57687.5	89199.6	92726.4	93419.1	94234.5
人均粮食(kg)	383.6	360.0	340.0	320.0	316.5	316.0	315.0
人均水资源量(m ³)	1367.5	959.0	896.2	841.9	744.7	733.1	708.4

表 5.20 第二种情形下滦冀平原可持续发展过程及承载力大小

年份	2003	2010	2020	2030	2035	2038	2040
可承载人口(万)	460.3	469	485	521	523	523	523
水资源总量(亿 m ³)	25.6	36.0	36.7	37.8	38.0	38	38.1
工业用水(亿 m ³)	4.0	10.4	11.0	11.8	9.9	8.0	8.1
农业用水(亿 m ³)	19.5	16.3	13.0	10.3	9.8	9.2	9.3
生态用水(亿 m ³)	0.005	5.000	7.571	9.984	12.045	14.105	14.105
生活用水(亿 m ³)	2.0	4.3	5.1	5.7	6.2	6.7	6.7
回用用水(亿 m ³)	0.65	2.16	2.77	3.57	3.47	3.33	3.33
生态与环境水平测度	0.1368	0.426	0.571	0.674	0.745	0.775	0.796
社会经济测度 EG	0.9	0.899	0.918	0.937	0.946	0.946	0.946
可持续发展测度 BTI	0.35	0.619	0.724	0.795	0.839	0.857	0.868
总 GDP(亿元)	820.7	2060.0	3077.0	4860.2	5039.2	5152.0	5248.0
人均 GDP(元)	14121.0	43923.2	63443.3	93286.0	96351.8	98508.6	990344.2
人均粮食(kg)	383.6	370	346.1	321.6	316.7	311.8	311.8
人均水资源量(m ³)	584.5	767.6	756.7	725.5	726.6	726.6	728.5
第三产业 GDP	222.7	988.8	1692.4	2916.1	3325.9	3730.0	3883.5
第三产业比重	34.9	48.0	55.0	60.0	66.0	72.4	74.0

第二, 现状条件下 (2003 年) 滦河冀东沿海平原生态与环境系统是处在超载状态。滦河冀东沿海平原 2003 年实际人口为 460.3 万人, 可承载人口为 187.2

万人，可承载人口明显低于实际人口，社会经济综合发展测度为 0.86，总体可持续发展测度为 0.829。

第三，区域新增水源主要来源于海水淡化和 2010 年以及 2030 年南水北调供水量。因此，除了自身的技术水平提高和产业结构调整之外，在 2010 年和 2030 年区域的生态与环境承载力有明显的提高。到 2038 年，可承载人口基本达到正常速度发展的可预测人口数值，在生态与环境良好的情形下，达到可承载状态。此时，人口为 518 万人左右，总 GDP 接近 5000 亿元。

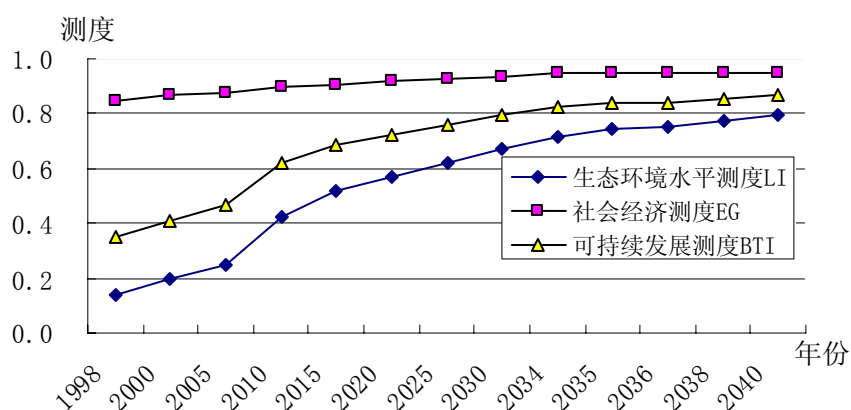


图 5.4 生态与环境逐步恢复情形下可持续发展过程

第四，在生态与环境逐步恢复的情形下，2003 年生态与环境测度为 0.1368，远远低于 0.8 水平，虽然社会经济发展测度为 0.9，但是生态与环境恶化严重，流域不可持续发展，测度为 0.35。如果逐步改善生态与环境，流域生态与环境可持续发展度最大的状态下，流域的生态与环境在接近 2040 年的时候达到良好状态，总体测度为 0.796，流域此时处于生态与环境和社会经济的良性循环状态。可持续发展过程如图 5.4 所示。

海河北系山区承载力的计算与分析

社会经济状况与生态与环境问题：海河北系山区位于海河流域的北部，面积 66809km²，人口 2107 万人，其中城镇人口 1073 万人，第三产业的比重为 52.3%，人均粮食产量只有 321.5kg/人，人均 GDP 为 15700.9 元/人。工业万元产值用水量为 120.49m³/万元。农业万元产值用水量为 1771 m³/万元。2000 年的生产生活用水量 29.9 亿 m³，可用水量为 40 亿 m³。海河北系无论山区还是平原区社会经济发展程度在整个海河流域都是最高的，2003 年山区的社会经济水平测度为 0.90。该区域主要的生态与环境问题是水土流失和水质污染。水土流失率为 0.57，年污水排放量为 4.222 亿 m³，COD 排放量为 7.1172 万吨，城市河湖面积比为 0.033。相比较而言，海河北系山区生态与环境综合状况在海河所有山区中是最好的，现状生态与环境质量测度为 0.1654。

表 5.21 海河北系山区生态与环境承载力计算输入参数

参 数	现状		规划值		
	2003	2010	2020	2030	2040
总水资源量(亿m ³)	40.0	41.7	41.7	43.7	43.7
实际用水量(亿m ³)	29.9				
工业用水定额(m ³ /万元)	120.5	73.3	62.3	51.3	48.2
农业用水定额(m ³ /万元)	1770.9	1593.8	1505.3	1416.8	1416.0
污水处理率(%)	49	58	65	70	73
人均GDP(元/人)	15700.9	18465.5	20787.1	28108.7	32000
第三产业的比重(%)	52.3	59.3	63.9	68.2	73.4
城镇化率(%)	61.6	69.2	73.5	79.2	80.1
工业废水排放率(%)	33.0	29.7	28.1	26.4	24.0
生活污水排放率(%)	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0
最小生态需水量(亿 m ³)	10.6				
人均粮食占有量(Kg/人)	321.5	320.0	300.0	300.0	320.0

表 5.22 第一种情形下流域生态与环境承载力变化过程

年份	2003	2010	2020	2030	2035	2038
预测人口(万)	2107.7	2392	2464	2612	2612	2612
可承载人口(万)	1826.4	2281	2390	2502	2573.8	2614.4
水资源总量(亿 m ³)	29.9	43.3	43.4	45.9	45.9	45.9
工业用水(亿 m ³)	4.0	8.3	8.5	10.6	10.0	9.3
农业用水(亿 m ³)	15.7	20.9	20.8	20.3	20.3	20.3
生态用水(亿 m ³)	8.6	8.6	7.6	7.4	7.4	7.4
生活用水(亿 m ³)	1.6	5.5	6.5	7.6	8.2	8.9
回用用水(亿 m ³)	0.7	1.6	1.7	2.2	2.2	2.2
社会经济测度 EG	0.871	0.911	0.921	0.940	0.940	0.950
可持续发展测度 BTI	0.835	0.854	0.858	0.867	0.867	0.872
总 GDP(亿元)	3012.3	4685.3	5776.5	7976.5	9076.5	10176.7
人均 GDP(元)	18119.3	20540.6	24169.5	31880.5	35265.0	38895.9
人均粮食(kg)	273.1	362.0	352.3	351.5	351.5	351.5
人均水资源量(m ³)	380.4	378.8	357.1	360.6	350.6	340.6

现状及未来水平年承载力的计算：计算过程也分为两种情形，生态与环境良好以及生态与环境逐步恢复情形。在第一种情形下，考虑主要生态与环境问题为水土流失面积比，COD 排放量和地下水开采系数三个主要生态与环境指标，良好状态下分别为，水土流失面积比为 0.193，COD 排放量为 $4.37 \times 10^4 \text{t}$ ，地下水开采系数为 0.94，认为不可承载状态的指标值分别为 0.569， $6.5 \times 10^4 \text{t}$ 和 1.3。城市河湖面积比认为 0.01 为不可承载状态，而最佳状态则为 0.05。第

二种情形下考虑生态与环境逐步恢复, 分析可持续发展测度最大值情形下, 社会经济和生态与环境发展状态。主要相关参数如表 5.21 所示, 计算结果分别如表 5.22 和表 5.23, 由表中可以看出:

第一, 在满足生态与环境可承载的基本要求($LI \geq 0.8$)前提下, 海河北系山区现状可承载人口为 1826.4 万人, 而目前该区域的总人口为 2107.7 万人, 明显超载, 生态与环境良好情况下, 总 GDP 为 3012.3 亿元, 低于现状的 3309.3 亿元, 现状承载的人口和 GDP 是以牺牲生态与环境为代价, 属于不可可持续发展的状态, 现状实际的生态与环境发展水平测度为 0.1645, 严重恶化状态。现状的主要问题为生态用地造成了严重的山区水土流失, 同时水污染严重, 河道水质严重不达标。

第二, 在生态与环境良好状态情形下, 社会经济发展比较慢, 按照人口的正常增长速度, 流域一直到 2038 年才可以达到可承载的人口, 此时预测人口和可承载人口相当, 为 2610 万人左右, 流域 GDP 为 3772 亿元左右, 流域社会经济朝良性循环方向发展。

表 5.23 生态与环境逐步恢复情形下社会经济和可持续发展状况

年份	2003	2010	2020	2030	2035	2038
可承载人口(万)	2107.7	2459.8	2571.52	2626.4	2693.04	2614.2
水资源总量(亿 m^3)	29.9	43.3	43.4	45.9	45.9	45.9
工业用水(亿 m^3)	5.04	12.07	9.73	11.16	10.21	9.26
农业用水(亿 m^3)	22.67	21.03	21.03	21.03	21.03	21.03
生态用水(亿 m^3)	0.00	1.00	4.41	7.49	8.27	9.06
生活用水(亿 m^3)	3.09	6.1	7.3	8.11	8.64	9.25
回用水(亿 m^3)	0.91	2.2	1.97	2.35	2.27	2.2
生态与环境水平测度 LI	0.1654	0.177	0.359	0.599	0.777	0.803
社会经济测度 EG	0.9	0.921	0.931	0.950	0.950	0.960
可持续发展测度 BTI	0.386	0.404	0.578	0.755	0.860	0.878
总 GDP(亿元)	3309.3	4985.3	5986.5	8176.5	9076.5	10176.72
人均 GDP(元)	18119.3	20540.6	24169.5	31880.5	35265.0	38895.9
人均粮食(kg)	321.5	341	328	305	302.5	300
人均水资源量(m^3)	273.1	352.1	337.5	349.5	340.9	333.4
第三产业 GDP	1730.8	2771.8	3430.3	5004.0	6208.3	7449.4
第三产业比重	52.3	55.6	57.3	61.2	68.4	73.2

第三, 再生态与环境逐步恢复的情况下, 可以看出, 由于 2010 年和 2030 年从外区域向本区域调水, 区域的生态与环境状况极大改善, 发生转折点, 但是流域的生态与环境状态一直到 2038 年才能达到良好的状态, 到 2038 年流域的生态与环境测度为 0.803。

第四,在 保证生态与环境逐步恢复情形下,到 2038 年流域生态与环境处于可持续发展状态,此时的可持续发展测度为 0.878,流域对应人口和 GDP 分别是 1376.0 万人和 4430 亿元,人均 GDP 为 31528 元/人,对应第三产业比重为 65%。

海河北系平原承载力的计算与分析

社会经济发展状况与主要生态与环境问题:海河北系平原位于海河流域中东部,面积 16310km²。人口 1283.9 万人,城镇人口 824.9 万人,第三产业的比重 50.6%。人均粮食产量为 364.2kg/人,人均 GDP23908.9 元/人。工业万元产值用水量在海河流域七个区中最小,为 94.6m³/万元。2003 年的生产生活用水量 54.5 亿 m³,可用水量为 50.8 亿 m³。社会经济水平测度为 0.95,在海河二级分区中属于最好的。主要生态与环境问题是水质污染、地下水超采、河道断流、湿地萎缩、入海水量减少。2003 年污水排放量为 14.1 亿 m³/年,COD 排放量为 18.8 万吨,污水处理率为 54.8%,地下水开采系数为 1.04,河道断流长度比为 0.45,为河道断流最为严重的区域。该区域社会经济发展和生态与环境矛盾最为严重,不仅河道断流严重,而且也是湿地萎缩最为严重的区域,状年份的湿地面积几乎为零,在二十世纪五十年代,海河北系平原有湿地青甸洼、大黄浦洼、东七里海、西七里海,现在只有东七里海,但无水。同时该区域入海水量急剧减少。生态与环境质量测度为 0.150。

表 5.24 海河北系平原生态与环境承载力计算输入参数

参数	现状		规划值		
	2003	2010	2020	2030	2040
总水资源量(亿m ³)	50.8	62.8	62.8	68.7	68.7
工业用水定额(m ³ /万元)	94.6	47.3	40.2	33.1	30.1
农业用水定额(m ³ /万元)	2719.1	2447.2	2311.2	2175.3	2000.0
污水处理率(%)	54.8	65.0	70.0	75.0	80.1
人均GDP(元/人)	23908.9	39102.2	69786.9	78298.	107449.
第三产业的比重(%)	50.6	55.0	60.0	65.0	72.0
城镇化率(%)	44.0	73.6	75.7	77.8	80.0
COD 排放量(万 t)	18.8				
污水排放量(亿 m ³)	14.1				
工业废水排放率(%)	64.0	57.6	54.4	51.2	48.0
生活污水排放率(%)	46.0	46	46.0	46.0	46.0
城市河湖生态用水量(亿 m ³)	0.8				
最小生态需水量(亿 m ³)	12.8				
人均粮食占有量(Kg/人)	364.2	320.0	300.0	300.0	300

承载力的计算与分析:该区域的主要问题为地下水超采、河道断流、湿地

萎缩、入海水量减少和污水排放而其处理率不高造成水质污染。承载力的计算和分析设计两种情形，第一种情形为生态与环境良好状态下，分析该区域所能承载的最大人口和 GDP，生态与环境良好的主要指标为，湿地面积比为 0.0076，城市河湖面积比为 0.03，入海水量为 $6.00 \times 10^8 \text{m}^3$ ，COD 排放量为 $6.85 \times 10^4 \text{t}$ ，地下水开采系数为 0.94，河道断流比为 0.375，据此为生态与环境良好状态，分析承载力的大小；第二种情形以流域生态与环境逐步恢复，流域综合可持续发展度最大为目标，分析流域逐年社会经济发展水平和生态与环境恢复状况。

流域不可持续的生态与环境主要指标临界值为：COD 排放量为 $17.21 \times 10^4 \text{t}$ ，地下水开采系数为 1.3，河道断流比为 0.75。计算主要指标如表 5.24。

表 5.25 生态与环境良好状态下海河北系平原所能承载的社会经济状况

年份	2003	2010	2020	2030	2032	2035	2040
预测人口(万)	1283.9	1415	1564	1660	1760	1760	1760
可承载人口(万)	1164.9	1422.3	1555.3	1735.1	1756.6	1761	1770.1
水资源总量(亿 m^3)	50.8	72	72.5	81.2	81.5	81.7	82.2
工业用水(亿 m^3)	8.55	15.24	15.12	20.1	20.1	20.3	20.4
农业用水(亿 m^3)	21.6	30.51	28.76	29	29.02	28.1	26.6
生态用水(亿 m^3)	11	10.4	10.2	10	9.8	9.8	9.8
生活用水(亿 m^3)	9.61	15.85	18.42	22.1	22.58	23.5	25.4
回用用水(亿 m^3)	4.97	9.17	9.75	12.55	12.77	13.05	13.49
社会经济测度 EG	0.931	0.951	0.960	0.970	0.970	0.970	0.970
可持续发展测度 BTI	0.863	0.872	0.877	0.881	0.881	0.881	0.881
总 GDP(亿元)	2762.2	13333.9	14051.5	16585.6	22627.8	24197.2	27019.6
人均 GDP(元)	23711.9	93748.9	90345.9	95588.7	128815.9	137406.0	152644.5
人均粮食(kg)	364.2	323	320.625	318.25	317.3	315.875	313.5
人均水资源量(m^3)	436.1	506.2	466.1	468.0	464.0	463.9	464.4

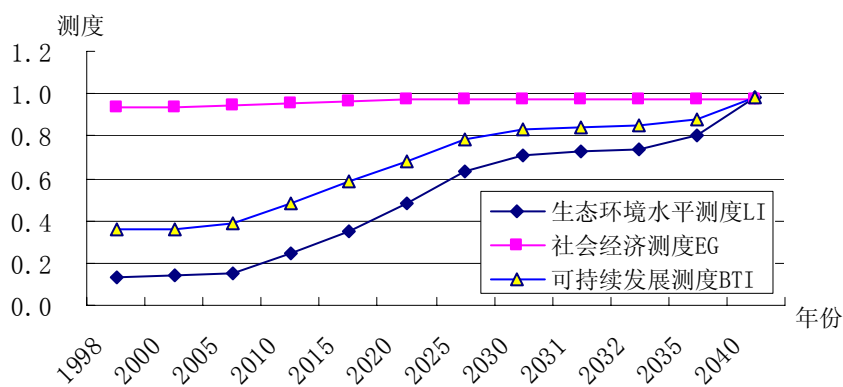


图 5.5 生态与环境逐步恢复情形下可持续发展过程

计算结果及结果分析：计算结果如表 5.20 和表 5.21 所示。由表中可以看出：

第一，在满足生态与环境可承载的基本要求(LI≥0.8)前提下，2003 年海河北系平原生态与环境系统是处在超载状态。海河北系平原 2003 年实际人口为 1283.9 万人，可承载人口为 1164.9 万人，可承载人口明显低于实际人口。可承载 GDP 为 2762.2 亿元，实际 GDP 为 3067.7 亿元，不可承载的主要原因是经济用水过大，生态用水不足造成，也就是说现状经济和人口规模是以牺牲生态与环境为代价的，如果生态与环境恢复到良好状态，所承载人口和 GDP 必然较少。

表 5.26 生态与环境逐步恢复状态下社会经济和生态与环境变化状态

年份	2003	2010	2020	2030	2032	2035	2040
可承载人口(万)	1283.9	1468.6	1525.8	1648.9	1686.3	1750.5	1826.2
水资源总量(亿 m ³)	50.8	72	72.5	81.2	81.5	81.7	82.2
工业用水(亿 m ³)	9.93	22.1	19.93	23.5	21.7	20.32	17.28
农业用水(亿 m ³)	28.82	29.28	27.35	26.72	27.97	27.60	28.14
生态用水(亿 m ³)	0.80	3.00	6.57	9.79	10.27	11.01	12.23
生活用水(亿 m ³)	11.25	17.62	18.65	21.2	21.56	22.77	24.55
回用用水(亿 m ³)	5.72	10.84	11.08	13.38	13.32	13.26	13.21
生态与环境水平测度	0.136	0.245	0.480	0.705	0.741	0.800	0.9837
社会经济测度 EG	0.936	0.955	0.975	0.975	0.975	0.975	0.975
可持续发展测度 BTI	0.356	0.484	0.684	0.829	0.850	0.883	0.979
总 GDP(亿元)	3069.7	7012.6	10220.8	18195.0	19688.4	24200.2	25652.3
人均 GDP(元)	23909.2	47750.2	66986.5	110346.3	116755.0	138247.4	140468.2
人均粮食(kg)	364.2	322.0	314.9	307.8	306.8	305.4	303.0
人均水资源量(m ³)	364.2	490.3	475.2	492.5	483.3	469.4	450.1
第三产业 GDP	1553.3	3856.9	6050.7	11826.8	12659.6	17230.5	19495.7
第三产业比重	50.6	55.0	59.2	65.0	64.3	71.2	76.0

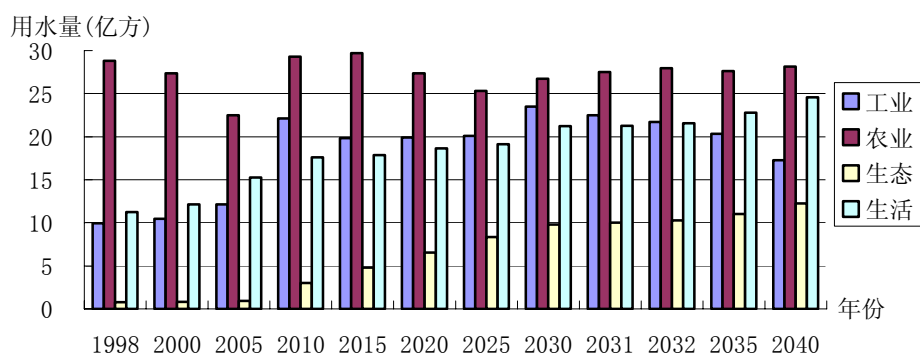


图 5.6 经济用水和生态用水结构变化

第二，在生态与环境良好的状况下，流域经济发展缓慢，可承载人口明显

低于正常增长人口数量,一直到 2035 年通过南水北调以及本身技术产业结构调整,流域所能承载的人口和 GDP 才达到正常发展水平,生态与环境承载力明显改善。

第三,在生态与环境逐步恢复的情形下,流域的经济发展不受影响,生态与环境在 2010 年和 2030 年南水北调调水后明显改善,但是完全恢复到良好状态仍需到 2035 年,此时的生态与环境测度为 0.800,可持续发展测度为 0.883,对用的人口总数为 1750 万人左右,总 GDP 为 24200 亿元左右,第三产业占总 GDP 的 71.2%,实现社会经济和生态与环境的良性循环。

海河南系山区承载力的计算与分析

表 2.27 海河南系山区生态与环境承载力计算输入参数

参数	现状		规划值		
	2003	2010	2020	2030	2040
总水资源量(亿 m^3)	54.9	54.9	54.9	54.9	54.9
实际用水量(亿 m^3)	44.9				
工业用水定额(m^3 /万元)	136.8	93.4	79.4	65.4	60.0
农业用水定额(m^3 /万元)	2008.5	1807.7	1707.2	1606.8	1550.0
污水处理率(%)	3.2	30.0	40.0	50.0	60.0
人均GDP(元/人)	9699.5	1504.9	21077.2	24249.3	28000.0
第三产业的比重(%)	36.0	43.0	48.2	53.2	58.6
城镇化率(%)	27.0	30.4	34.8	39.1	45.0
COD 排放量(万 t)	6.8				
污水排放量(亿 m^3)	4.8				
工业废水排放率(%)	59.3	53.4	50.4	47.4	42.0
生活污水排放率(%)	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6
最小生态需水量(亿 m^3)	16.5				
人均粮食占有量(Kg/人)	375.8	360.0	350.0	320.0	330.0

社会经济发展状况与主要生态与环境问题:海河南系山区位于海河流域的西南部,面积 75216 km^2 ,2003 年人口 3156.3 万人,城镇人口 1449.4 万人,第三产业比重 36%,人均粮食产量 375.8kg/人,人均 GDP 9699.5 元/人。工业万元产值用水量 136.8 m^3 /万元。农业万元产值用水量 2008.5 m^3 /万元。2003 年的生产生活用水量 44.9 亿 m^3 ,可用水量为其当地的水资源量,为 54.9 亿 m^3 。2003 年水平测度为 0.8。海河南系山区与水相关的生态与环境问题是水土流失和水质污染。水土流失情况在三个山区生态与环境区域中是最弱的,水土流失率为 0.563,但是由于其水土流失率比可承载临界值 0.1928 大 0.3702,因此相对而言水土流失强度很大。年污水排放量为 4.8421 亿 m^3 ,COD 排放量为 6.816 万吨,

现状污水处理率为 3.2%，污水入河后，污染物除自然衰减外，其余全随水逐流，城市河湖面积比为 0.006，2003 年生态与环境水平测度为 0.141。

海河南系山区生态与环境承载力的计算：和前面分析一样，承载力的计算分为生态与环境良好状态和逐步恢复两种情形分析。第一种情形下，生态与环境良好，首先保证生态与环境用水，用水指标根据前面分析，按照生态与环境测度为 0.8 时的用水量，分析对应的指标为：水土流失面积比 0.079，COD 排放量 $6.54 \times 10^4 \text{t}$ ，地下水开采系数为 0.85，城市河湖面积比为 0.05，认为此时为生态与环境良好状态；第二种情形下，生态与环境逐步会恢复，以可持续发展度最大为目标，此时认为该区域不可承载的生态与环境相应指标为：水土流失面积比 0.563，COD 排放量 $2.79 \times 10^4 \text{t}$ ，地下水开采系数为 1.3，城市河湖面积比为 0.01。其他相关指标如表 2.27 所示。

根据上述分析，输入参数，计算结果如表 5.28 和表 5.29 所示：由表中数据可知，第一，如果现状年满足生态与环境用水，那么海河南系山区目前只能承载人口 2622.3 万人，承载 GDP 为 2691.9 亿元，而该区域实际人口为 3156.3 万人，实际 GDP 为 3061.4 亿元，因此处于超载状态。

表 5.28 第一种情形下社会经济发展状况及流域生态与环境承载变化过程

年份	2003	2010	2020	2030	2040	2043	2045
预测人口(万)	2691.9	4208.0	4336.0	4734.0	4734.0	4734.0	4734.0
可承载人口(万)	2622.3	3632.8	3763.4	3885.8	4354.6	4733.4	4742.0
水资源总量(亿 m ³)	44.9	54.9	55	55.4	58.5	58.5	58.6
工业用水(亿 m ³)	7.6	11.7	12.8	14.6	14.5	14.5	14.5
农业用水(亿 m ³)	20.4	22.9	22.2	20.2	21.3	21.1	21
生态用水(亿 m ³)	13.6	13.4	12	11.8	11.6	11.6	11.6
生活用水(亿 m ³)	3.3	6.9	8	8.8	11.1	11.3	11.5
回用水(亿 m ³)	0	0	0.1	0.5	3.6		
社会经济测度 EG	0.784	0.894	0.913	0.933	0.953	0.958	0.963
可持续发展测度 BTI	0.792	0.845	0.855	0.864	0.873	0.875	0.878
总 GDP(亿元)	2691.9	5246.2	6406.5	7915.7	8166.2	10728.4	12013.8
人均 GDP(元)	10265.4	28882.4	34046.3	40741.7	37506.1	45330.6	50669.8
人均粮食(kg)	378.3	341.8	331.6	321.4	327.0	326.0	331.0
人均水资源量(m ³)	339.6	302.2	292.3	285.1	268.7	247.2	247.2

第二，剖析不可承载的主要原因，根本在于社会经济发展过快，生态与环境治理程度和区域经济发展跟不上，主要表现在污水排放量过大而不经处理，严重恶化环境，生态与环境用水用地由于经济发展而被占用，造成水土流失和城市河湖面积过小。

第三，在以生态与环境治理为主要目的的第一种经济发展状况下，流域在

2043年方才可以承载按照正常人口增长速度的总人口，此时总人口为4734万人左右，总GDP为10730.0亿元左右，人均GDP为45300元左右。在此之前，由于环境治理用水，流域社会经济发展用水一直不能得到满足，严重制约了经济和社会发展。

表 5.29 生态与环境逐步改善状况下社会经济和生态与环境承载力变化过程

年份	2003	2010	2020	2030	2040	2043	2045
可承载人口(万)	3156.3	3652.1	3943.2	4212.3	4567.1	4730	5120.3
水资源总量(亿 m ³)	44.9	54.9	55	55.4	58.5	58.5	58.6
工业用水(亿 m ³)	9.35	13.92	14.02	14.08	14.05	14.05	14.05
农业用水(亿 m ³)	31.315	28.78	24.3021	20.098	21.0217	20.56	20.6
生态用水(亿 m ³)	0.005	5	8.1579	11.022	12.2783	12.28	12.28
生活用水(亿 m ³)	4.23	7.2	8.52	10.2	11.15	11.61	11.67
回用用水(亿 m ³)	0.18	0.6	0.98	1.71	3.15	3.23	3.3
生态与环境水平测度	0.135	0.220	0.379	0.621	0.774	0.8023	0.891
社会经济测度 EG	0.800	0.898	0.918	0.938	0.958	0.964	0.971
可持续发展测度 BTI	0.328	0.445	0.590	0.763	0.861	0.879	0.930
总 GDP(亿元)	3061.4	4992.3	6396.2	7450	9090.2	10730.2	12002.1
人均 GDP(元)	9699.3	13669.7	16220.8	17686.3	19903.7	22685.4	23440.2
人均粮食(kg)	375.3	359.8	345.1	320.6	315.7	318.2	332.4
人均水资源量(m ³)	233.4	299.2	283.8	273.1	278.2	271.5	271.3
第三产业 GDP	1102.1	2146.7	2935.9	3613.3	4636.0	5729.9	7033.2
第三产业比重	36.0	43.0	45.9	48.5	51.0	53.4	58.6

第四，在以经济发展为主，生态与环境恢复和经济发展共同协调的第二种情景中，流域在2043年之前生态与环境一直不能达到可持续的良好状态，虽然在2010年和2030年通过南水北调两次调水，但是生态与环境的恢复还需要一段时间。到2043年，流域生态与环境测度为0.803，环境状态良好，此时对应的人口和GDP分别为4730万人和10730.2亿元，第三产业比重为53.4%。

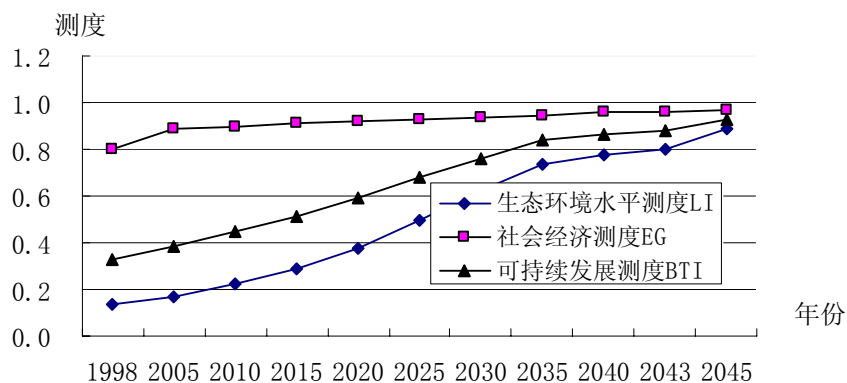


图 5.7 生态与环境逐步恢复情形下社会经济以及可持续发展测度变化

海河南系平原承载力的计算与分析

社会经济发展状况与主要生态与环境问题：海河南系平原面积 73418km²，人口 5016.9 万人，城镇人口 1411.6 万人，第三产业的比重为 36.2%，人均粮食产量 438.7kg/人，人均 GDP 为 11362.2 元/人。工业万元产值用水量为 148.27m³/万元，农业万元产值用水量为 2975.6 m³/万元，2003 年的生产生活用水量 181.9 亿 m³。可用水量为 135.9 亿 m³，其中，127.9 亿 m³ 为其当地的水资源量，微咸水利用量为 2.7 亿 m³。海水利用量为 0.3 亿 m³，黄河水为 5.0 亿 m³。现状社会经济水平测度为 0.90。海河南系平原与水相关的生态与环境问题是地下水严重超采、水质污染、湿地萎缩、入海水量减少、河道断流。地下水严重超采，地下水超采量在二级分区中最为严重，超采系数为 1.75，年污水排放量为 25.99 亿 m³，COD 排放量为 47.34 万吨，污水排放 COD 排放量在海河二级分区中总量最大，现状污水处理率为 0.05，水质污染十分严重。现状湿地面积比为 0.001662，比 60 年代末、70 年代初的流域平原湿地面积比 0.011 还要小，可见海河海系平原湿地严重萎缩。入海量锐减，在所有入海口中减少量最多，河道断流长度比为 0.41，在四个平原生态与环境区中河道断流长度比居第三位，比可承载状态临界值 0.375 大，城市河湖面积比为 0.05。现状海河南系平原的生态与环境质量测度为 0.0791，在平原区中最低，生态与环境状况最为严重。

表 5.30 海河南系平原生态与环境承载力计算输入参数

参数	现状		规划值	
	2003	2010	2020	2030
总水资源量(亿m ³)	135.9	204.5	204.5	224.2
实际用水量(亿m ³)	182.4			
南水北调水量(亿 m ³)		62.4		79.9
工业用水定额(m ³ /万元)	148.3	74.1	63.0	51.9
农业用水定额(m ³ /万元)	2975.6	2678.0	2529.2	2380.4
污水处理率(%)	5.0	45.0	55.0	60.0
人均GDP(元/人)	11362.2	17232.4	30123.7	43014.9
第三产业的比重(%)	36.2	45.0	50.0	55.0
城镇化率(%)	46.0	54.4	60.2	65.0
COD 排放量(万 t)	47.3			
污水排放量(亿 m ³)	25.9			
工业废水排放率(%)	56.0	50.4	47.6	44.8
生活污水排放率(%)	29.0	29.0	29.0	29.0
城市河湖生态用水量(亿 m ³)	0.5			
最小生态需水量(亿 m ³)	47.60			
人均粮食占有量(Kg/人)	438.7	400.0	380.0	360.0

生态与环境承载力的计算和分析：生态与环境承载力计算分为两种情形，第一种情形下首先保证生态与环境用水，即生态与环境良好状态，分析区域所能承载的最大社会经济状态，此时生态与环境测度为 0.8，具体对应海河南系平原的指标为：湿地面积比 0.015，入海水量为 $7.5 \times 10^8 \text{m}^3$ ，COD 排放量为 $19.2 \times 10^4 \text{t}$ ，地下水开采系数为 0.94，城市河湖面积比为 0.03，河道断流比为 0.375，分析在上述生态与环境状态时生态涌水量大小以及承载力大小；第二种情形为生态与环境逐步恢复，社会经济发展和生态与环境兼顾，以区域可持续发展度最大为目标，此时认为流域生态与环境不可承载指标如下：COD 排放量为 $45 \times 10^4 \text{t}$ ，地下水开采系数为 1.3，城市河湖面积比为 0.01，河道断流比为 0.75，入海水量为 $3 \times 10^8 \text{m}^3$ ，其他相关指标输入如表 5.30 所示。

根据上述分析，输入参数，计算结果如表 5.31 和表 5.32 所示：由表中数据可知，第一，如果现状年满足生态与环境用水，那么海河南系平原目前只能承载人口 4558.7 万人，承载 GDP 为 5044.6 亿元，而该区域实际人口为 5016.9 万人，实际 GDP 为 5700.3 亿元，因此处于超载状态。

第二，剖析不可承载的主要原因，首先在于该区域本身就是 7 个分区中水资源最为短缺的地区，本身自然地理条件较差，其次，生态与环境治理程度和区域经济发展跟不上，主要表现在经济用水占用了大量生态用水造成地下水严重超采、湿地萎缩、入海水量减少、河道断流及污水排放造成水质污染。

表 5.31 第一种情形下社会经济发展状况及流域生态与环境承载变化过程

年份	2003	2010	2020	2030	2035	2040
预测人口(万)	5016.9	5727.0	5901.1	6408.0	6408.0	6408.0
可承载人口(万)	4558.7	4781.5	4834.7	5334.1	5859.9	6411.1
水资源总量(亿 m^3)	183.3	207.6	210.6	237.8	241.8	247.2
工业用水(亿 m^3)	23.1	46.2	49.2	65.8	63.4	63.5
农业用水(亿 m^3)	102.8	97	93.1	95.9	97.0	95.5
生态用水(亿 m^3)	42.5	39.5	38.0	37.5	37.0	37.0
生活用水(亿 m^3)	14.9	24.9	30.3	38.6	44.4	51.2
回用水(亿 m^3)	0.9	3.1	6.1	13.6	17.6	23.0
社会经济测度 EG	0.87	0.93	0.95	0.98	0.98	0.99
可持续发展测度 BTI	0.83	0.86	0.87	0.89	0.89	0.89
总 GDP(亿元)	5044.6	17501.1	25679.1	46630.2	56288.7	62532.0
人均 GDP(元)	12504.2	36601.7	53114.2	87419.1	96057.4	97537.1
人均粮食(kg)	438.7	401.0	381.4	361.8	347.1	332.4
人均水资源量(m^3)	463.0	473.8	454.4	445.8	412.6	385.6

第三，在以生态与环境治理为主要目的的第一种经济发展状况下，流域在 2040 年方才可以承载按照正常人口增长速度的总人口，此时总人口为 6410 万

人左右，总 GDP 为 62500 亿元左右，人均 GDP 为 97500 元左右。在此之前，由于环境治理用水，流域社会经济发展用水一直不能得到满足，严重制约了经济和社会发展。

表 5.32 生态与环境逐步改善状况下承载力变化过程

年份	2003	2010	2020	2030	2035	2040
可承载人口(万)	5016.9	5674.7	5862.3	5958.1	6257.5	6409.1
水资源总量(亿 m ³)	183.3	207.6	210.6	237.8	241.8	247.2
工业用水(亿 m ³)	29.8	50.5	51.4	72.2	66.2	61.3
农业用水(亿 m ³)	134.0	118.8	105.8	93.3	93.3	93.8
生态用水(亿 m ³)	0.5	6.0	16.0	31.0	36.6	41.0
生活用水(亿 m ³)	19.2	32.9	38.0	42.8	47.1	50.9
回用用水(亿 m ³)	1.11	3.65	6.68	14.99	18.93	22.80
生态与环境水平测	0.0791	0.1577	0.2994	0.514	0.6646	0.8018
社会经济测度 EG	0.90	0.93	0.95	0.97	0.98	0.99
可持续发展测度 BTI	0.27	0.38	0.53	0.70	0.81	0.89
总 GDP(亿元)	5700.3	1684	24369.6	49661	56370.4	62520.0
人均 GDP(元)	11362.2	2969	41570.0	83350.4	90084.5	97548.8
人均粮食(kg)	438.7	400.0	380.3	360.6	358.1	356.2
人均水资源量(m ³)	357.4	365.8	359.2	399.1	386.4	378.4
第三产业 GDP	2063.5	7581.1	11697.4	27313.6	32131.1	37574.5
第三产业比重	36.2	45.0	48.0	55.0	57.0	60.1

第四，在以经济发展为主，生态与环境恢复和经济发展共同协调的第二种情景中，流域在 2040 年之前生态与环境一直不能达到可持续的良好状态，虽然在 2010 年和 2030 年通过南水北调两次调水，但是生态与环境的恢复还需要一段时间。到 2040 年，流域生态与环境测度为 0.8018，环境状态良好，此时对应的人口和 GDP 分别为 6400 万人和 62500 亿元左右，第三产业比重为 60.1%。

徒骇马颊河平原承载力的计算与分析

社会经济发展状况与主要生态与环境问题：徒骇马颊河平原位于海河流域的东南部，面积 31878km²，人口 2515.6 万人，城镇人口 1207.8 万人，第三产业的比重为 38.6%，人均粮食产量 694.4kg/人，人均 GDP 为 14994.5 元/人。工业万元产值用水量为 164.88m³/万元。农业万元产值用水量为 4379 m³/万元。2003 年的生产生活用水量 78.9 亿 m³，可用水量为 87.4 亿 m³，其中，微咸水利用量为 0.5 亿 m³，海水利用量为 0.2 亿 m³，黄河水为 46.0 亿 m³。现状年社会经济水平测度为 0.77，社会经济发展水平在海河流域属于较低水平。该区域主要生态与环境问题是水质污染、湿地萎缩、河道断流及入海水量的变化。水质污染

体现在污水排放量和 COD 排放量上, 年污水排放量为 5.5 亿 m^3 , 仅低于海河北系平原和海河南系平原, COD 的年排放量为 34.0 万吨, 仅低于海河南系平原, 现状污水处理率为 15%, 现状湿地面积为零, 河道断流长度比为 0.44, 地下水开采系数为 0.86, 比可承载状态临界值 0.94 小, 说明本区域的地下水是可承载的。徒骇马颊河平原的城市河湖面积比为 0.123, 比完全承载状态临界值 0.05 大的多, 说明徒骇马颊河平原的城市河湖环境是好的。从以上分析可得出徒骇马颊河平原的主要生态与环境问题是水质污染问题。该区域 2003 年的生态与环境质量测度为 0.0936。

表 5.33 徒骇马颊河平原生态与环境承载力计算指标和外生变量预测

参数	现状		规划值	
	2003	2010	2020	2030
总水资源量(亿 m^3)	87.4	80.9	80.9	86.2
实际用水量(亿 m^3)	78.9			
南水北调水量(亿 m^3)		5.5		10.6
工业用水定额(m^3 /万元)	164.9	82.4	70.1	57.7
农业用水定额(m^3 /万元)	4379.0	3941.1	3722.2	3503.2
污水处理率(%)	15	35	45	50
人均GDP(元/人)	14994.5	27400	44200	80000
第三产业的比重(%)	38.6	45.0	50.0	55.0
城镇化率(%)	40.8	47.5	52.3	56.2
COD 排放量(万 t)	34.0			
污水排放量(亿 m^3)	5.5			
工业废水排放率(%)	63.0	56.7	53.6	50.4
生活污水排放率(%)	29.0	29.0	29.0	29.0
城市河湖生态用水量(亿 m^3)	0.1			
最小生态需水量(亿 m^3)	7.694			
人均粮食占有量(Kg/人)	694.4	650.0	600.0	550.0

徒骇马颊河平原生态与环境承载力的计算和分析: 根据前面分析, 该区域生态与环境承载力分析同样设计两种情景, 第一种情景以生态与环境恢复为主, 首先保证生态与环境用水, 其次分析在良好状态下所能承载的最大人口和 GDP, 针对该区域, 生态与环境良好状态下对应的生态与环境指标分别如下: 地下水开采系数为 0.94, COD 排放量为 $10.95 \times 10^4 t$, 河道断流长度比为 0.375, 湿地面积比为 0.0076, 城市河湖面积比为 0.03, 入海水量为 4 亿 m^3 ; 第二种情形为生态与环境逐步恢复状态, 此时以流域的可持续发展度最大为目标, 分析生态与环境逐步恢复, 经济发展不受影响状态下流域的社会经济和生态与环境变化过程。生态与环境不可承载对应的指标为地下水开采系数为 1.3, COD 排放量为 $29.7 \times 10^4 t$, 河道断流长度比为 0.350, 湿地面积比为 0.0053, 城市河湖面积比为

0.01，入海水量为 2 亿 m³，认为在这种状态下流域的生态与环境为不可承载状态，其它相关指标和外生变量预测如表 5.33。

计算结果以及相关分析：

根据上述参数分析，代入计算模型，结果如表 5.34 和表 5.35。有表可以看出，第一，在满足生态与环境可承载的基本要求（LI≥0.8）前提下，区域在 2026 到 2027 年之间可承载人口正常发展的总人口，在第二种情形下，到 2026 年，计算所得生态与环境测度为 0.799，生态与环境状况朝良性循环方向发展。

表 5.34 徒马河平原生态与环境良好状态下承载力变化

年份	2003	2010	2020	2027	2030
预测人口(万)	2515.6	2728.8	2811.8	2822.7	2853.9
可承载人口(万)	2333.5	2614.7	2743.8	2820.3	2878.8
水资源总量(亿 m ³)	79.7	82.87	83.6	84.18	90.43
工业用水(亿 m ³)	6.1	9.3	11.6	12.9	15.7
农业用水(亿 m ³)	63.4	60.8	57.8	56.0	58.1
生态用水(亿 m ³)	5.9	5.9	5.9	5.9	5.9
生活用水(亿 m ³)	4.3	6.9	8.3	9.4	10.7
回用用水(亿 m ³)	0.8	1.6	2.5	3.3	4.2
社会经济测度 EG	0.797	0.896	0.896	0.896	0.896
可持续发展测度 BTI	0.798	0.847	0.847	0.847	0.847
总 GDP(亿元)	3445.5	7170.5	12146	16694.5	23092.5
人均 GDP(元)	14765.4	27423.8	44267.1	59194.1	80215.7
人均粮食(kg)	694.4	610.0	580.0	562.0	550.0
人均水资源量(m ³)	517.5	480.2	461.6	447.7	464.6

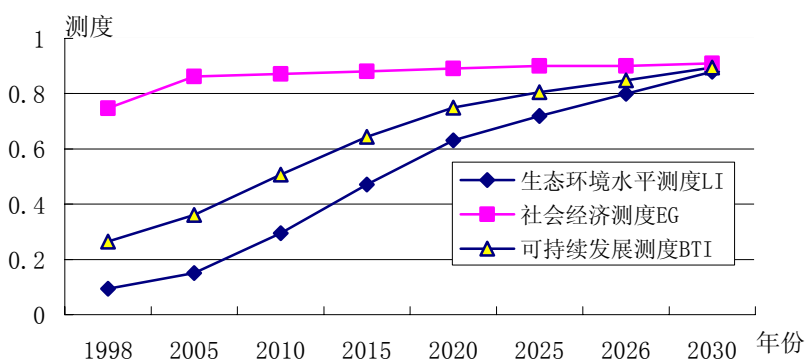


图 5.8 徒马河平原生态与环境逐步恢复情形下可持续发展测度

第二，现状条件下（2003 年）徒马河平原生态与环境系统是处在超载状态。徒马河平原 2003 年实际人口为 2515.6 万人，可承载人口为 2333.5 万人，可承载人口明显低于实际人口，社会经济综合发展测度为 0.797，总体可持续发展测度为 0.798。社会经济发展测度是唯一一个低于 0.8 的区域。而生态

与环境问题的核心在于污水排放量大而污水处理措施不充分造成的水质污染以及河道断流。

第三, 该区域供水量增加主要依靠 2030 年南水北调供水增加。在第一种情形下, 根据人口发展预测, 到 2026 年, 区域的总人口为 2823 万人左右, 和 2026 年可承载人口大致相当, 此时, 流域处于可承载状态, 对应的 GDP 为 16700 亿元左右。

第四, 在生态与环境逐步恢复的情形下, 2003 年生态与环境测度为 0.0936, 远远低于 0.8 水平, 社会经济发展测度为 0.747, 流域不可持续发展, 总体测度为 0.264。如果逐步改善生态与环境, 流域生态与环境可持续发展度最大的状态下, 流域的生态与环境在接近 2026 年的时候达到良好状态, 总体测度为 0.799, 流域此时处于生态与环境和社会经济的良性循环状态。可持续发展过程如图 5.8 所示:

表 5.35 徒马河平原生态与环境逐步恢复状态下承载过程变化

年份	2003	2005	2010	2020	2026	2030
可承载人口(万)	2515.6	2524.2	2574.2	2680.2	2810.8	2880.3
水资源总量(亿 m ³)	79.71	80.34	82.87	83.6	84.18	90.43
工业用水(亿 m ³)	6.57	10.24	12.51	12.87	13.14	15.48
农业用水(亿 m ³)	68.4	63.91	62.05	58.44	55.64	58.12
生态用水(亿 m ³)	0.1	0.3545	1.5	3.9501	6.1578	6.1681
生活用水(亿 m ³)	4.7	5.8	6.8	8.4	9.3	10.7
回用用水(亿 m ³)	0.8	1.4	1.9	2.7	3.3	4.2
生态与环境水平测	0.0936	0.151	0.295	0.631	0.799	0.879
社会经济测度 EG	0.747	0.862	0.871	0.891	0.900	0.910
可持续发展测度 BTI	0.264	0.360	0.507	0.750	0.848	0.894
总 GDP(亿元)	3772.0	7391.0	9862.0	13676.5	16960.5	22648.5
人均 GDP(元)	14994.4	29280.6	38310.9	51027.9	60340.5	78632.4
人均粮食(kg)	693.3	667.2	648.5	598.0	567.7	547.5
人均水资源量(m ³)	483.4	482.2	487.8	472.6	456.9	464.9
第三产业 GDP	1456.0	2963.8	4437.9	6838.3	10040.6	14291.2
第三产业比重	38.6	40.1	45.0	50.0	59.2	63.1

从上述计算分析可以看出, 海河流域的承载力从七个生态与环境分区看, 由于各个区域生态与环境、社会经济系统间的差异性, 各个区域可承载的年限是不一样的。海河流域不同区域, 生态与环境问题不同, 污水处理率不同, 社会经济水平不同, 结果可持续测度不同, 各个区域的可承载的年限也不同。

因此生态与环境可承载达到的年限决定于众多因素, 单单现状区域的生态与环境质量测度、社会经济水平测度及污水处理率是无法判断的, 因为它还与

各区域经济发展速度、污水处理能力、各区域生态需水量占总可用水量的比等有关。

5.3 生态与环境承载力计算结果分析

由上述计算结果可以看出，在首先保证生态与环境用水，生态与环境良好状态下，海河流域经济发展受到一定程度约束，但是通过技术系数提高和产业结构调整等因素，流域分区一般在 2027 到 2042 年左右达到可承载的状态；在生态与环境逐步恢复，社会经济发展为主的条件下，生态与环境状况虽然一直不是十分理想，但是经济发展相对较好，经济总体评价测度都一直较高，生态与环境状况通过南水北调调水以及用水定额下降等因素，大约在 2026 到 2042 年左右恢复到良好状态。各分区情况不同，徒马河平原由于现状生态与环境状况相对较好，社会经济发展水平不是很高，因此生态与环境恢复相对较为容易，在 2026 到 2027 年左右首先达到生态与环境良好的状态，而海河南系山区则最慢，一直到 2043 年才可承载，生态与环境状况良好。在各个分取经济结构中，其中以海河北系平原经济状况最好，不但现状社会经济发展测度最高，而且未来水平年都一直高于其它区域，人均 GDP 最大。各分区达到承载的时间如下表所示：

表 5.36 海河流域分区生态与环境承载力计算结果 单位：万人，亿元

分区	生态与环境良好对应指标			生态与环境逐步恢复对应指标		
	年份	人口	GDP	年份	人口	GDP
全流域	2035	16753	68682.0	2035	16750.2	69297.2
滦河冀东沿海山区	2042	1735.5	5447.4	2042	1733.8	5447.4
滦河冀东沿海平原	2038	518.0	5068.4	2040	523.0	5248.0
海河北系山区	2038	2614.4	10176.7	2038	2614.2	10176.7
海河北系平原	2035	1760.0	24197.2	2035	1750.5	24200.2
海河南系山区	2043	4734.0	10728.4	2043	4730.3	10730.2
海河南系平原	2040	6411.1	62532.0	2040	6409.1	62520.0
徒骇马颊河平原	2027	2820.3	16694.5	2026	2810.8	16960.5

由计算结果可知：

第一，无论在生态与环境良好的状态下还是生态与环境逐步恢复的状态下，生态与环境达到可承载的年限主要取决于各个分区的生态与环境指标、也就是生态与环境用水量的大小，生态与环境指标主要为污水处理率和 COD 排放量和山区水土流失比以及平原区地下水开采系数。社会经济指标对可达到承载年限也起到重要作用，主要是区域的产业结构关系，用水定额变化。南水北调对该区域承载力的提高起到了重要作用，因此，总的有三个因素影响承载力的变化

过程,第一是现状的社会经济发展结构,第二是流域现状生态与环境问题大小,第三是未来可供水量大小和产业结构调整状况。

第二,同一个二级分区,在生态与环境良好的情形下,平原区要比山区容易首先达到承载的人口和GDP,首先,因为平原区经济发展相对较好,虽然山区在2003年的生态与环境综合评价要好于平原区,但是平原区的经济结构相对较好,经济发展迅速,因此首先达到可承载的人口和GDP。

第三,在同一个区域,无论在生态与环境良好状态,达到承载预测的人口,还是在生态与环境逐步恢复状态,生态与环境良好恢复所需要的时间来看,两者所需时间差不多,而且,在可承载的年限内,生态与环境逐步恢复时显然经济发展状况要好于生态与环境良好的状况,因此,从经济发展和生态与环境的综合来看,应该采取第二种发展策略较好,生态与环境逐步治理,经济发展不能放慢。在第一种情形下,生态与环境虽然良好,但是经济发展受到制约,虽然南水北调来水以及其他因素提高可供水量,但是经济发展和第二种情景比较还是滞后,在第二种情景下,虽然考虑生态与环境的逐步恢复,但是即使在南水北调供水的条件下,生态与环境完全恢复还需要一定的年限,并不是一旦有供水增加马上就恢复环境。因此生态与环境的治理一定要长远考虑。

第四,在考虑技术水平和污染治理投资,水土流失治理以及水资源短缺效应后,第一种情景的社会经济发展受到严重制约,第二种情景下,环境投资较少,经济发展较快,但是必须也要考虑环境状况对人们生产生活的影响,以维持人们正常的生活为基本条件,不能造成大的污染损失,并逐步恢复生态与环境。

第五,同一个二级分区,山区的要想达到可承载状态所需的年限明显要比平原区时间更长。很明显,滦河冀东沿海山区比滦河冀东平原在环境良好的状态下,需要更多时间达到承载预测的人口,同样道理在海河南系和海河北系也是适用的。现状滦河冀东沿海山区的生态与环境综合状况、社会经济综合状况都比滦河冀东沿海平原差,因此经济发展速度会慢于平原区,同时该平原区由于海水淡化使用部分缓解水资源,因此更加容易达到可承载。海河北系山区比海河北系平原达到可承载的年限长,这是因为海河北系平原的社会经济水平高,社会经济发展速度快且有南水北调的供水之故,相对的海河北系山区的第三产业的比重小且增长速度慢,虽2010、2030年也有黄河水调入,但数量不大。对于海河南系分区来说也是同样的道理。

第六,徒骇马颊河平原首先达到可承载状态,而且在2030年南水北调调水之前已经达到可承载状态。这是因为徒骇马颊河平原现状的生态与环境问题只有污水处理率不高造成的水质污染以及生态用水不足造成的河道断流与湿地消

失，水质污染通过技术水平提高就可解决，徒骇马颊河平原由于以农业为主，从人均水资源来看，在七个区中水资源是最充足的，河道断流及湿地退化都可通过提高技术水平进行产业结构调整很快得到恢复，因此很容易达到可承载状态。

第6章 结论

6.1 主要结论

本论文通过建立生态与环境承载力的理论和方法,并以海河为研究对象,分析了流域现状的生态与环境状况,可持续发展状况,承载力大小,以及未来的生态与环境承载力变化过程,为海河流域的生态与环境恢复和经济发展规划提供了部分依据。论文主要在以下几个方面进行了探索和研究:

(1) 提出了一般流域的生态与环境承载力评价指标体系,并针对海河流域进行案例分析。根据生态与环境承载力的定义,本文分析了生态与环境承载力四个不同层次,并据此建立了水土资源、社会经济、生态与环境的评价指标体系。

(2) 运用 CGE 模型,建立资源-生态与环境-社会经济互动模型,该模型通过剂量-响应的方法分析了流域生态与环境-社会经济系统各子系统指间的相互关系。对于整体分析海河流域的生态与环境问题和社会经济发展很有意义。

(3) 通过建立社会经济、生态与环境的量化指标体系以及生态与环境承载力的可持续发展综合测度,提出了流域经济发展和生态与环境恢复的计量模型评价方法,以流域的综合可持续发展度为目标,寻求在保证一定的社会发展水平、生态与环境状况的条件下,区域的最大可持续发展度和区域所能承载的最大人口和经济规模。

(4) 在分析海河流域未来经济技术发展状况、劳动力转移、技术水平提高、用水定额转变和生态与环境需水总量的基础上,依据生态与环境承载力计量评价模型分析海河流域现状以及未来水平年的生态与环境承载力大小。

通过海河流域生态与环境承载力分析计算,得出以下结论,为海河流域的生态与环境规划和生态恢复提供部分依据:

(1) 海河流域 2003 年实际情况评价得知,现状年海河流域虽然经济高度发展,但是生态与环境恶化程度极其严重,流域整体处于不可持续发展状态。

根据计算结果,海河流域社会经济发展测度为 0.92,但是生态与环境评价测度为 0.0834,综合评价测度为 0.2770,远远低于可持续发展水平的综合评价测度 0.8。在现状水平年,流域可持续发展度最高的为海河北系山区,综合评价测度为 0.3837,最差的为滦河和冀东沿海山区,综合评价测度为 0.1636。经济发展水平最高的为海河北系平原,经济发展水平最低的为滦河和冀东沿海山区。

目前海河流域整体社会经济水平测度均大于或者接近于 0.8,经济发展水平相对较高,但是环境恶化程度严重,因此综合可持续发展度仅为远低于 0.8,所

以流域经济发展是不可持续的，或者说流域现状的经济发展是以牺牲生态与环境为代价，处于恶性发展状态。同时也可以看出，就分区的发展水平而言，海河北系无论山区或者平原的可持续发展水平比其他区域都较高，生态与环境测度也较高，这是因为海河北系的污水处理水平较高，技术水平相对较高，工农业用水定额相对其它区域都较低，因此，生态与环境的破坏程度相对较小，生态与环境也相对比较容易恢复。而滦河和冀东沿海山区的可持续发展程度在各个分区中最低，不但流域经济发展状况不如其它分区，而同时生态与环境质量也是最差的，综合评价测度仅为 0.1611，因此滦河和冀东沿海山区的生态与环境恢复任务最为艰巨。就现状年的评价情况来看，同一个评价区域的平原区和山区的发展测度相差不大，生态与环境状况山区要好于平原区一些，而社会经济发展来看平原区要相对好于山区。

(2) 在生态与环境满足良好的条件下，首先，如果为了满足海河流域生态与环境需水的要求，以生态与环境现状恢复到良好状态为目标，那么海河整体现状年可承载的人口和 GDP 为 12575.2 万人和 14857.6 亿元，可承载人口和 GDP 明显低于流域实际人口和 GDP，海河流域处于超载状态。主要原因是最小生态需水不能被满足，流域生态与环境质量恶化趋势明显。在生态与环境良好指标的要求下，优化的最后结果通过压缩人口和 GDP 直接或间接反映。其次，在未来水平年，生态与环境一直保持良好状态的情况下，流域人口若按照正常的增长速度变化过程，海河流域的整体经济缓慢发展，一直到发展到 2035-2040 年之间才可以承载预期人口，此时，可持续发展测度为接近 0.9。这也说明，现状流域的经济发展是以牺牲生态与环境为代价的。

(3) 在生态与环境逐步恢复，经济高速发展情形下，海河流域整体在 2036 年生态与环境恢复到良好状态。流域现状年的生态与环境发展测度为 0.0834，根据南水北调 2010 年和 2030 年调水情况，2010 年调水 79.9 亿 m^3 ，2030 年调水 108.4 亿 m^3 ，生态与环境用水不断增大，到 2036 年，生态与环境用水达到 120 亿 m^3 ，生态与环境基本恢复，测度为 0.799，此时流域的可持续发展度为 0.885，实现生态与环境和社会经济的良性循环。

由于各个区域的具体情况不同，所达到生态与环境良好的年限也不同，徒骇马颊河平原首先达到可承载状态，而且在 2030 年南水北调调水之前已经达到可承载状态。这是因为徒骇马颊河平原现状的生态与环境问题只有污水处理率不高造成的水质污染以及生态用水不足造成的河道断流与湿地消失，水质污染通过技术水平提高就可解决，徒骇马颊河平原由于以农业为主，从人均水资源来看，在七个区中水资源是最充足的，因此很容易达到可承载状态。而海河南系山区最后达到可承载状态，是因为海河南系山区现状可用水量并没有被该区

域利用，而被人为调出被别的区域利用，这样造成现状人均可利用水量只有 $260.1\text{m}^3/\text{年}$ ，远远低于人均水资源的临界 $305\text{m}^3/\text{年}$ ，可见这么低的人均水资源用于经济用水都远远不够，就更谈不上生态用水了，而且海河南系山区生态与环境问题十分严重，在三个山区中，水土流失面积比与 COD 排放量都是最大的，且其污水处理率现状最低，社会经济发展速度又缓慢，而且未来可用水没有增加。

6.2 建议

根据生态与环境承载力计算的结果分析表明，生态与环境恢复是一个涉及诸多因素的综合难题，根据各个分区的比较显示，在生态与环境破坏程度较小、技术水平较高、用水定额较小的分区，生态与环境恢复所需年限相对较短。同时通过比较发现，和水资源短缺相比，水污染是同样重要甚至更加紧迫的问题，水污染恢复治理所引起的社会经济内部结构的变化也是巨大的，对流域总体的生态与环境承载力的影响也较大。因此针对海河流域，可以通过以下几个方面提高生态与环境承载力。

(1) 加大水污染治理力度。现状年全流域污水排放为 56 亿吨，用水总量为 300 多亿方，平均每 6 方水产生 1 方污水，极大破坏了当地的生态与环境状况，污染治理投资巨大，而且通过承载力研究发现，水污染严重的区域生态与环境恢复时间也较长。

(2) 增强对外贸易。目前海河流域产业结构不断调整，根据海河流域水资源短缺的情形，通过对外贸易和区域贸易，发挥“虚拟水”的作用，不单单通过南水北调途径调用看得见的水。这样一方面可以缓解区域水资源压力，另一方面，节省下来的水量可以用于生态与环境恢复，增加地区生态与环境承载能力。

(3) 调整产业结构。不但调整三产结构，同时也要调整工业结构内部变化。以发展轻工业低耗水工业为主，通过技术改进大幅度降低用水定额。农业用水在保证粮食安全的基础上大力节水，发展新型灌溉技术。

6.3 本次研究的不足之处和研究展望：

(1) 本文采用 CGE 模型分析海河流域生态与环境承载力分析，但是对于模型中的参数分析有待进一步完善，例如对中国和美国的投入产出系数的对比分析方法，以及技术进步系数、未来用水定额、排放强度的估算和其他参数的估算等，在本文中只是简单的进行模拟，直接采用澳大利亚 GEMPACK 模型修

改源代码做出，因此在随后的工作中，针对海河流域的具体情况，可以更进一步对参数进行分析。

(2) 针对建立的生态与环境评价指标体系，不同的区域，评价指标的权重各不相同，本文仅针对海河流域的具体情况，采用隶属度的方法进行量化，并根据可持续发展的目标函数进行优化分析。在以后的工作中，针对海河生态与环境修复指数等指标需要进行试验分析，提出海河生态恢复各指标的实际分析数据，在专家打分的基础，会更加科学准确。

(3) 由于 CGE 模型的资料有限，本文根据中国统计年鉴、海河流域水资源规划、我国 1998 年全国投入产出表的基础上，根据各省的数据分析汇总海河的投入产出表，其中难免存在误差，在今后的研究中，将更加在重视资料的收集分析。

(5) 由于缺乏相关资料，论文没有分析在全球化条件下以及对外贸易对地区生态与环境承载力的影响，今后应当运用 CGE 模型进一步加强这方面的工作。

参考文献

1. Xia Jun, et al. Water problems and opportunities in hydrological Sciences in China[J]. Hydrological Science Journal, 2001, 46(6): 907~921.
2. Xia Jun & Yongqin David Chen, Water problems and opportunities in hydrological Sciences in China, Hydrological Science Journal, 2001, 46(6):907-921.
3. Xia Jun, Zuo Qiting, Pang Jinwu. Enlightenment on sustainable management of water resources from past practices in the Bositeng Lake basin, Xinjiang, China. Regional Management of Water Resources (IAHS Publication No.268). Wallingford: IAHS Press, UK. 41-48, 2001.
4. Xia Jun, Takeuchi K. Barriers to sustainable management of water quantity and quality. Guest editors for Special Issue, Hydrological Science Journal. 1999, 44 (4): 503~505.
5. Olli Varis, Pertti Vakkilainen·China's 8 challenges to water resources management in the first quarter of the 21st Century·Geomorphology, 2001, 41: 93~104
6. Irmi Seidl, Clem A. Tisdell. Carrying capacity reconsidered: from Malthus' population theory to cultural carrying capacity. Ecological Economics, 1999, 31: 395~408
7. Alan Fricker. The ecological footprint of New Zealand as a step towards sustainability. Futures, 1998, 30 (6): 559~567
8. Gopal B. Thapa, Giridhari Sharma Paudel. Evaluation of the livestock carrying capacity of land resources in the Hills of Nepal based on total digestive nutrient analysis. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2000, 78: 223~235
9. Satoru Okubo, Kazuhiko Takeuchi, Benjaporn Chakranon, Apichart Jongskul. Land characteristics and plant resources in relation to agricultural land-use planning in a humid tropical strand plain, southeastern Thailand. Landscape and Urban Planning, 2003, 65: 133~148
10. Chu, Y-P. (1999), "Green Accounting:SEEA and ENRAP Compared" Working Paper. Aaheim, A. and Nyborg, K. (1995), "On the Interpretation and Applicability of a "Green National Product"" Review of Income and Wealth, 41,p.57-71.
11. Souro D. Joardar. Carrying Capacities and Standards as Bases towards Urban Infrastructure Planning in India: A Case of Urban Water Supply and Sanitation. Urban Infrastructure Planning in India, 1998, 22 (3): 327~337
12. Tony Prato. Modeling carrying capacity for national parks. Ecological Economics, 2001, 39: 321~331
13. Petts G E, Maddock I, Bickerton M, et al.1995. Linking Hydrology and Ecology: the Scientific Basis for River Management[M].Chichester:Wiley,1-16
14. Pulliam and Haddad, 1994. Human population growth and the carrying capacity concept. Bull. Ecol.Soc.Am.75:141

15. R.M. Argent, B. Houghton, 2001. Land and water resources model integration: software engineering and beyond, *Advances in Environmental Research* 5:351-359
16. Robert Costanza,1995.Economic growth, carrying capacity, and the environment, *Ecological Economics* 15:89-90
17. Sagoff, M, Carrying capacity and ecological economics. *BioScience* 45(9):610-619
18. Scoones,I., 1993. Economic and ecological carrying capacity: application to pastoral systems in Zimbabwe.In: Barbier, E.B.(Ed.),*Economic and Ecology: New Frontiers and Sustainable Development*. Chapman & Hall, London,96-117
19. 夏军.华北地区水资源及水安全问题的思考与研究[J].*自然资源学报*,2004,(9):550~560
20. 施雅风, 曲耀光. 乌鲁木齐河流域水资源承载力及其合理利用[M]. 北京: 科学出版社, 1992.210~220.
21. 许有鹏. 干旱地区水资源承载能力综合评价[J]. *自然资源学报*, 1993, 8(3): 229~237
22. 蔡安乐. 水资源承载能力浅谈——兼谈新疆水资源适度承载能力研究中应注意的几个问题[J]. *新疆环境保护*, 1994, 16(4): 190~196
23. 傅湘, 纪昌明. 区域水资源承载能力综合评价——主成分分析法的应用[J]. *长江流域资源与环境*, 1999, 8(2): 168~172
24. 何希吾. 水资源承载能力[M]. *中国资源百科全书*. 北京: 中国大百科全书出版社, 2000
25. 惠泱河, 蒋晓辉, 黄强, 薛小杰. 水资源承载能力评价指标体系研究. *水土保持通报*, 2001, 21(1): 31~34
26. 朱一中, 夏军, 谈戈. 关于水资源承载能力理论与方法的研究. *地理科学进展*, 2002, 21(2): 180~188
27. 翁文斌, 蔡喜明, 史慧斌, 王浩等. 宏观经济水资源规划多目标决策分析方法研究及应用. *水利学报*. 1995
28. 高彦春, 刘昌明. 区域水资源开发利用的阈限研究[J]. *水利学报*, 1997, (8): 73~79
29. 王建华, 等. 基于 SD 模型的干旱区城市水资源承载能力预测研究[J]. *地理学与国土研究*, 1999, 15(2): 18~22
30. 徐中民. 情景基础的水资源承载能力多目标分析理论及应用[J]. *冰川冻土*, 1999, 21(2): 99~106
31. 贾嵘, 等. 区域水资源承载能力研究[J]. *西安理工大学学报*, 1998, 14(4): 382~387
32. 冯尚友, 刘国全. 水资源持续利用的框架[J]. *水科学进展*, 1997, 8(4): 301~307
33. 王浩. 西北地区水资源合理配置与承载能力研究《技术大纲》. “九五”国家重点科技攻关项目. 1998
34. 夏军.可持续水资源管理研究与展望. *水科学进展*, 1997,8(4): 370-375.
35. 夏军.水资源安全的度量: 水资源承载力的研究与挑战. *自然资源学报*. 2002, 17(3). 262-269
36. 夏军. 可持续水资源管理研究的若干热点及讨论[J]. *人民长江*, 1997, 28(4): 25-26.
37. 夏军, 谈戈, 全球变化与水文科学新的进展与挑战[J], *资源科学*, 24(3), 2002.

38. 夏军. 华北地区水循环与水资源安全: 问题与挑战[J]. 地理科学进展, 2002, 21(6): 517~526.
39. 夏军. 水文非线性系统理论与方法[M]. 武汉: 武汉大学出版社. 2002.
40. 夏军, 许新宜, 胡宝清. 可持续水资源管理研究与实践. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 1999.
41. 夏军. 国际水资源研究与塔里木河流域可持续水资源管理问题, 塔里木河流域水资源、环境与管理[M]. 中国环境科学出版社, 296-303. 1998.
42. 夏军. 水资源安全的度量: 水资源承载力的研究与挑战[J]. 海河水利. 2002, 2: 5-7.
43. 夏军, 朱一中. 水资源安全的度量: 水资源承载力的研究与挑战[J]. 自然资源学报, 2002, 17(3): 262-269.
44. 程国栋. 承载力概念的演变及西北水资源承载力的应用框架[J]. 冰川冻土. 2002, 24(4): 361-367.
45. 陈国先, 徐等耀, 李明东. 土地资源承载力的概念与计算[J]. 四川师范学院学报(自然科学版), 1996, 17(2): 66-70.
46. 陈百明. 中国土地资源的人口承载能力[J]. 中国科学院院刊. 1988, 3.
47. 程克坚, 彭补拙, 濮励杰. 干旱区绿洲土地资源人口承载力研究[J]. 安徽师大学报(自然科学版), 1998, 21(2): 170-174.
48. 陈传美. 郑州市水资源承载力与可持续利用对策研究[J]. 水利经济, 1999, 2: 15-18.
49. 陈冰, 李丽娟, 郭怀成, 孙海林. 柴达木盆地水资源承载力方案系统分析[J]. 环境科学, 2000, 3: 16-21.
50. 迟道才, 赵红巍, 张伟华, 任庆生. 盘锦市水资源承载力研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2001, 32(2): 137-140.
51. 崔凤军. 城市水环境承载力及其实证研究[J]. 自然资源学报, 1998, 13(1): 58-62.
52. 方创琳, 余丹林. 区域可持续发展 SD 规划模型的实验优控—以干旱区柴达木盆地为例[J]. 生态学报, 1999, 19(6): 767-774.
53. 傅湘, 纪昌明. 区域水资源承载能力综合评价—主成分分析法的应用[J]. 长江流域资源与环境, 1999, 8(2): 168-172.
54. 冯利华. 黄河断流与黄河的水资源承载力[J]. 灾害学, 2002, 17(1): 82-85.
55. 封志明, 陈百明. 现实与未来: 中国的人口与粮食问题[J]. 科技导报, 1991, 4.
56. 封志明. 土地承载力研究的过去, 现在和未来[J]. 中国土地科学, 1994, 8(3): 1-9.
57. 高志强, 孙希华. 基于中国资源环境数据库的土地资源承载力研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2000, 10(专刊): 1-3.
58. 高彦春, 刘昌明. 区域水资源开发利用的阈限研究[J]. 水利学报, 1997, (8): 73-79.
59. 郭怀成, 等. 我国新经济开发区水环境规划研究[J]. 环境科学进展, 1994, 2(5): 14-22.
60. 郭秀锐, 毛显强与冉圣宏. 国内环境承载力研究进展[J]. 中国人口·资源与环境, 2000, 13(3): 28-30.
61. 何世水, 葛生年. 金塔灌区地下水动态演变及其对环境的影响[J]. 中国沙漠, 1986, 6(3): 38-49.

62. 黄宁生. 广东资源承载力探讨[J]. 中山大学学报论丛, 1997, 5: 193-197.
63. 惠洪河, 蒋晓辉, 黄强, 薛小杰. 水资源承载力评价指标体系研究[J]. 水土保持通报, 2000, 21(1): 30-34.
64. 贾嵘, 薛惠峰, 解建仓, 蒋晓晖. 区域水资源承载力研究[J]. 西安理工大学学报, 1998, 14(4): 382-387.
65. 贾嵘, 蒋晓辉, 薛惠峰, 沈冰. 缺水地区水资源承载力模型研究[J], 兰州大学学报(自然科学版). 2000, 36(2): 114-121
66. 蒋晓辉, 等. 陕西关中地区水环境承载力研究[J]. 环境科学学报, 2001, 21(3): 312-317.
67. 李爱贞. 生态与环境保护概论[M]. 北京: 气象出版社. 2001.
68. 李令跃, 甘泓. 试论水资源合理配置和承载能力概念与可持续发展之间的关系[J]. 水科学进展, 2000, 11(3): 307-313.
69. 李丽娟, 郭怀成, 陈冰与孙海林. 柴达木盆地水资源承载力研究[J]. 环境科学, 2000, 2: 20-23.
70. 李清龙, 王路光. 水环境承载力研究进展[J]. 河北环境科学, 2003, 2: 28-32.
71. 李晓青. 攸县耕地资源及其承载力研究[J]. 湖南师范大学自然科学学报, 1996, 19(2): 88-93.
72. 林虎林等. 河西走廊水资源供需平衡及其对农业发展的承载潜力[J]. 自然资源学报, 1997, 12(3): 224-232.
73. 刘亚传, 常厚春. 干旱区咸水资源利用与环境[J]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1992. 170-191.
74. 刘长运, 杨丰华, 蒋国富. 河南省土地资源承载力研究[J]. 南都学坛(自然科学版), 1998, 18(6): 72-75.
75. 刘昌明, 何希吾. 中国 21 世纪水问题方略[M], 科学出版社, 北京: 1996.
76. 唐云梯. 实用环境保护数据大全(第二分册)[M]. 武汉: 湖北人民出版社, 1993.
77. 刘玉宝, 丁霞. 枣庄市农业资源承载力量化研究[J]. 枣庄师专学报, 1997, 3: 78-80. 刘文锴, 胡贵颖, 张子平. 平顶山市土地人口承载力研究[J]. 焦作工学院学报, 1996, 15(5): 40-46.
78. 龙腾锐, 姜文超. 水资源(环境)承载力的研究进展[J]. 水科学进展, 2003, 14(2): 249-253.
79. 卢宗凡, 卢增澜. 我国的“生态适度人口”与“人口理论最大承载力”潜析[J]. 水土保持通报, 1997, 17(1): 52-53.
80. 马琼, 杨可晗, 买英. 塔里木灌区土地人口承载力研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2000, 12(专刊): 98-99.
81. 潘家华. 持续发展途径的经济学分析[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 1997.
82. 中国物价年鉴编辑部. 中国物价年鉴 2001 年[Z]. 北京: 中国物价出版社, 2001
83. 何池全, 等. 吉林省湿地效益评价和生态评价研究总报告[R]. 长春: 中科院东北地理与农业生态研究所, 1999
84. 阮本清, 等. 流域水资源管理[M]. 北京: 科学出版社, 2001. 152-169.

85. 钱正英 张光斗.中国可持续发展水资源战略研究(综合报告及各专题报告)[M], 北京:中国水利水电出版社, 2001.
86. 钱正英,西北地区水资源配置、生态与环境建设和可持续发展战略研究。中国水利, 2003, A 刊, 17-24.
87. 曲耀光, 樊胜岳. 黑河流域水资源承载力分析计算与对策[J]. 中国沙漠, 2000, 20(1):1-8.
88. 桑德拉·波斯泰尔著, 吴绍洪,等. 最后的绿洲[M]. 北京:科学技术文献出版社,1998. 2.
89. 申献辰.水环境承载能力及其定量描述方法[EB/OL].[http:// tech.waterinfo.net.cn/NewsR/ NewsDisplay.asp. Id = 24688,2001-12.](http://tech.waterinfo.net.cn/NewsR/NewsDisplay.asp.Id=24688,2001-12)
90. 施雅风,曲耀光.乌鲁木齐河流域水资源承载力及其合理利用[M]. 北京:科学出版社, 210-220. 1992.
91. 水利部南京水文水资源研究所,中国水利水电科学研究院水资源研究所.21 世纪中国水供求[M]. 北京:中国水利水电出版社, 131-138. 1998.
92. 水利部海河水利委员会. 海河流域水生态恢复研究(初步报告). 2002.
93. 水利部海河水利委员会. 海河流域水资源规划报告. 2000.
94. 唐剑武等. 环境承载力及其在环境规划中的初步应用[J]. 中国环境科学, 1997, 17:6-9.
95. 新疆水资源软科学课题研究组. 新疆水资源及其承载力的开发战略对策. 水利水电技术, 1989, (6):2-9.
96. 许有鹏. 干旱地区水资源承载能力综合评价[J]. 自然资源学报,1993,8(3):229-237.
97. 许新宜, 王浩, 甘泓, 等. 华北地区宏观经济水资源规划理论与方法[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1997. 24-38.
98. 徐恒力,等.水资源开发与保护[M]. 北京:地质出版社, 219-223, 1999.
99. 徐中民. 情景基础的水资源承载力多目标分析理论及应用[J]. 冰川冻土, 1999, 21(2): 99-106.
100. 徐中民, 程国栋. 运用多目标决策分析技术研究黑河流域中游水资源承载力[J]. 兰州大学学报(自然科学版). 2000, 36(2): 122-132.
101. 徐中民, 程国栋. 黑河流域中游水资源需求预测[J]. 冰川冻土, 2002 , 22 (2) : 139 - 146.
102. 熊康宁, 苏维词. 喀斯特生态与环境良好区与恶劣区耕地生产潜力与人口承载力——以贵州茂兰自然保护区和波玉河流域为例[J]. 贵州科学, 2000, 18(2): 149-155.
103. 左其亭, 夏军, 陈嘻. 区域可持续发展量化研究方法[J]. 生态经济. 2001 年增刊. 9-13
104. 左其亭, 夏军, 邵民诚, 陈跃滨. 博斯腾湖水资源可持续利用调度系统[J]. 水利水电技术. 2003. 34(2): 1-4.
105. 朱一中, 夏军, 谈戈. 关于水资源承载力理论与方法的研究[J]. 地理科学进展. 2002, 21(2): 180-188.
106. 张鑫, 王纪科, 周建召. 关中平原区地下水资源承载力现状及提高承载力的途径[J]. 地下水, 2001, 24(2): 65-67.

107. 张鑫, 王纪科, 蔡焕杰, 王正兴. 区域地下水资源承载力综合评价研究[J]. 水土保持通报, 2001, 21(3): 24-27.
108. 张学雷. 鲁中平原高产农区土地生产潜力和人口承载力的预测研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2001, 11(52): 131-133.
109. 钟建宏, 等. 水环境承载容量评估模式之发展与应用[M]. 第四届海峡两岸学术研讨会会议论文集, 台湾中坜, 中央大学, 1996, 1247-1254.
110. 曾维华, 程声通. 区域水环境集成规划刍议[J]. 水利学报, 1997,(10):77 - 82.
111. 张传国, 方创琳, 全华. 干旱区绿洲承载力的全新审视及展望[J]. 资源科学, 2002,24(2): 42-48.
112. 张传国, 方创琳.干旱区绿洲系统生态—生产—生活承载力相互作用的趋动机制分析[J]. 自然资源学报, 2002, 17(2): 181-187.
113. 张传国. 干旱区绿洲系统生态-生产-生活承载力评价指标体系构建思路[J]. 干旱区研究. 2001, 18(3): 7-12.
114. 张国良主编. 21 世纪中国水供求[M], 北京: 中国水利水电出版社.
115. 张岳主编. 中国水资源与可持续发展[M].南宁: 广西科学技术出版社, 2000.
116. 中国二十一世纪议程—中国 21 世纪人口、环境与发展白皮书[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1994.
117. 张志良. 人口承载力与人口迁移[M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社. 69-76,1992.
118. 王根绪,程国栋,徐中民. 中国西北干旱区水资源利用及其生态与环境问题[J]. 自然资源学报,1999,14(2):109-116.
119. 王维艳. 宁蒗县土地资源特点及承载力初探, 云南教育学院学报, 1996, 12(2): 89-92.
120. 王文义, 戴有学, 薛双青, 沈丽峰. 关于临汾市主要粮食作物生产潜力对人口承载力的探讨[J].山西气象. 1997,4: 23-26.
121. 王宝山, 丁安明, 王赞国, 李明秋, 张子平, 刘文锴. 区域土地人口承载力预测模型研究[J]. 焦作工学院学报. 1998, 17(2): 121-125.
122. 王建华, 江东, 顾定法, 齐文虎, 唐青蔚. 水资源承载力的概念与理论[J]. 甘肃科学学报. 1999, 11(2): 1-4
123. 王建华, 江东, 顾定法, 齐文虎, 唐青蔚. 基于SD模型的干旱区城市水资源承载力预测研究[J]. 地理学与国土研究, 1999, 15(2): 18-22.
124. 王淑华. 区域水环境承载力及其可持续利用研究[J]. 北京:北京师范大学, 1996.
125. 魏斌, 张霞. 城市水资源合理利用分析与水资源承载力研究[J]. 城市环境与城市生态, 1995, 8(4):19-24.
126. 王志民主编.面向 21 世纪的海河水利[M], 天津: 天津科学技术出版社, 2000.
127. 王其藩.高级系统动力学[M], 北京: 清华大学出版社, 1995.
128. 邬建国. 景观生态学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
129. 朱永华.海河流域生态环境承载能力研究[博士论文].北京.2003
130. 马明.基于 CGE 模型的水资源短缺对国民经济的影响研究[博士论文].北京.2001

在学期间发表学术论文目录

1. Virtual Water, a New Strategy of Agricultural Security for China”, *International Association of Hydrology Sciences*. 293, 2005. **EI** 核心 第一作者
2. 海河流域水污染及水资源短缺对经济发展的影响, *资源科学*, 2006.3, CSCD, 第一作者
3. 基于水量平衡的流域生态耗水量计算——以海河为例, 《*自然资源学报*》, CSCD, 第四作者, 2004.5
4. 水资源经济学研究进展及展望, 《*水问题的复杂性与不确定性研究*》, 第一作者, 2004.12
5. 我国城市化过程中的水资源开发利用研究, 收入《*中国自然资源学会 2004 年学术年会论文集*》, 第一作者, 2004.11

致 谢

论文从选题、设计直至最后完稿，都得到了导师夏军研究员的悉心指导。三年来，导师在我的工作、学习、生活和为人方面，所给予的谆谆教诲和细心关怀，学生终生难以忘怀。同时导师严谨的治学态度和敬业精神，活跃的学术思维，渊博的知识结构，丰富的实践经验，都深深感染和鼓舞着学生，也才使得学生三年来在学习、科研素养和成果方面，取得了些许进步。

也深深地感谢我的硕士导师窦以松先生，窦老师在生活和工作各方面都给了我极大的鼓励和帮助，使我能够在地理所顺利完成毕业论文。

感谢在论文的选题、设计、研究过程中，地理所各位给予热情指导和帮助的刘昌明院士、宋献方研究员、贾绍凤研究员、于静洁研究员，刘苏峡研究员，王中根师兄，以及王纲胜师兄。

感谢研究生部舒晓明老师、陈力老师、王淑强老师和地理科学与资源研究所各位领导老师的关心与帮助。

也深深的感谢和我一起工作学习的同门，他们是丰华丽、朱永华、谈戈、朱一中、占车生、乔云峰、刘相超、朱奎、王渺林、叶爱中、严冬、刘蕾、尹雄锐、刘星、赵长生、李浩、张永勇等，他们慷慨无私的帮助，兄弟姐妹般的情谊，会成为漫漫岁月中的温暖记忆。

感谢远在厦门我的女朋友吴琳女士，三年来给予给我极大的鼓励和帮助，她的宽容、理解和支持成为我三年来不断努力的支撑。