

分类号_____

密级_____

UDC _____

编号_____

中国科学院研究生院 博士学位论文

水资源保障风险评估研究

——以海河流域为例

刘奇勇

指导教师 葛全胜 研究员 中国科学院地理科学与资源研究所

郑景云 研究员 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 2010年3月 论文答辩日期 2010年5月

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 _____

Classification No. _____

Confidential _____

UDC _____

No. _____

**Graduate University of Chinese
Academy of Sciences
Doctor Dissertation**

**Study on Risk Evaluation of Water Resources Security
——A Case Study in Haihe River Basin**

Liu Qiyong

**Advisor Ge Quansheng Professor Institute of Geographic
Sciences and Natural Resources Research, CAS**

**Zheng Jingyun Professor Institute of Geographic
Sciences and Natural Resources Research, CAS**

Application Degree Doctor Major Physical Geography

Submitted Date 2010.3 Defence Date 2010.5

**Education Unit Institute of Geographic Sciences and
Natural Resources Research, CAS**

**Degree Awarding Unit Graduate University of
Chinese Academy of Sciences**

Chairman of Committee _____

独创性声明

本人声明所提交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得中国科学院或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

研究生签名：

时间： 年 月 日

关于论文使用授权的声明

本人完全了解中国科学院有关保留、使用学位论文的规定，即：中国科学院有权保留送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。同意中国科学院可以用不同方式在不同媒体上发表、传播学位论文的全部或部分内容。

(保密的学位论文在解密后应遵守此协议)

研究生签名：

时间： 年 月 日

导师签名：

时间： 年 月 日

摘要

水资源问题一直是影响中国社会经济稳定发展的重要因素之一。为合理利用水资源，众多学者多年来围绕水资源供求矛盾这一核心问题开展研究。本研究以风险评估的基本理论为指导，综合运用数理统计、模糊数学、水文学等相关专业知识，对海河流域的水资源保障风险进行了辨识和评估，并根据评估结果提出了海河流域水资源保障风险管理的初步建议。本文的主要内容有：

(1) 阐述了水资源风险的定义，并参考前人研究成果，构建了水资源系统风险辨识与评估框架，界定了水资源保障风险的评估指标，对水资源系统的风险属性和风险特性等进行了初步分析。

(2) 根据前人研究结果和方法：分析了海河流域各分区供需状况，并预测了未来年份水资源供需状况和缺水率。主要结果有：海河流域是我国降水量年际变化较大的区域。海河流域平均降水量自 2001 年来呈现出偏枯的趋势。地表水资源的区域 C_v 值差异与降水量的区域 C_v 值差异基本一致。海河流域达到极度缺水程度。海河南系和天津人均水资源量最低。海河流域地下水为主要供水水源。海河流域以农业用水为主。工业用水比重和用水量呈两阶段变化，近年呈下降趋势，农业用水一直呈下降趋势。生活用水比重则一直呈上升趋势。从水资源开发利用程度来看，海河流域总体上从地表水开发利用程度、地下水开发利用程度和水资源总体利用开发程度均达到高度开发利用程度。通过供需平衡分析表明，海河南系为二级区中最缺水的地区，河北是省区中缺水最严重的地区。

(3) 选用水资源风险率、脆弱性、可恢复性、事故周期（重现期）、风险度作为水资源系统水资源保障风险的评估指标，采用模糊综合评判方法的方法和模型，根据最大隶属原则，对海河流域水资源保障风险进行了综合评估。结果发现：海河流域水资源保障风险除山西省、辽宁省、内蒙古自治区处于低风险等级、滦河及冀东沿海处于中风险等级、天津市处于较高风险等级外，其他行政区域和二级水资源区均处于高风险等级。为进行比较和不同评估方法间的结果验证，本文还运用 F. Martin-Carrasco 等建立的方法，对海河流域的现状年（2005 年）和远景年（2020 年）的水资源保障风险进行了简化评估，结果表明海河流域在现状情景处于高风险等级，在远期情景下处于低风险等级；现状情景中，各二级区均处于高风险等级，省级行政区中，除辽宁处于低风险等级、内蒙古处于中风险等级外，其他省区均处于高风险；远期情景，海河北系、海河南系在二级区中处于低风险等级，北京、天津、辽宁处于低风险等级，内蒙古仍处于中风险等级，其他省区与现状情景基本一致。根据 F. Martin-Carrasco 等建立的方法与模糊综合评判法对于海河流域水资源保障风险评估的结果基本一致，表明本文对海河流域的水资源保障风险评估结果基本可靠。在此基础上，本文还提出了海河流域水资源保障风险管理的初步建议。

关键词：水资源保障，风险识别，风险分析，风险评估，海河流域

Abstract

Shortage of water resources is being one of the important factors that limit economic and social stability and development in China. As China is running rapidly in its economic development, water is becoming gradually a choke point in the national economy, a focal issue that threatens to affect China's sustainable social and economic development in the future. Whether shortage of water resources is determined by two factors, water demand and water supply, is still uncertain. Since it is also affected by social and economic like economy, population and standard of living and natural factors like run off and rainfall, therefore there are risks existing in the water supply system. To lessen the economic and social losses because of water shortage, it is necessary to identify, analysis, and evaluate the risk of water shortage. Now, many people research how to evaluation the risk of water resources scientifically. Based on concerned risk theories and specialty knowledge, such as probability theory, fuzzy mathematics, water resources and hydrology, the aims of the paper are to identify, analysis, and evaluate risks of water resources security, study cartography and build risk database in Haihe River Basin. This paper also supply risk defense and presentiment system and become a guide that can help social and economic development.

(1) Based on the definition of water resource risk and reseach results of many scientists, a system frame of water resource reliability and security risk is established, in which the indexes of water resources security are defined and the risk property and character of water system are presented simply.

(2) Based on reseach reluts and methord of many scientists, this paper analyses water demand and supply in Haihe River Basin and calculates them in future. The results are as follows. Haihe River Basin is one area of China where C_v (coefficient of variation) of amount of precipitation is more in different years. Amount of precipitation per year turns less in Haihe River Basin from 2001. C_v change in different areas is the same between surface water and precipitation. Water resource shortage is to the highest level in Haihe River Basin. Water resources per capita are the least in South area of Haihe River Basin and Tianjin. Ground water resource is main supply. Agricultural demand is more than other demand on water resource. The change of Industrial demand and percent of water resources have two stages. The demand and percent of industry become less in recent. Agricultural demand turns less and life demand turns more than before. The levels of water resource shortage amount to the highest on surface water resource exploitation, ground

water resource exploitation and total exploitation. Then ground water resource has severe shortage. Based on water resource demand and supply analysis, water resources of south area of Haihe River Basin and Hebei are the most shortage in 2005 , 2020, 2030 and 2040.

(3) Water resource security risk's factors affected include risk possibility, vulnerability, recoverability, recurrence interval and risk level. The fuzzy synthesize judge model is adopted to evaluate the calculation results of water security risk in Haihe River Basin, and maximum subjection principle is adopted to judge risk level in different area. The results show that Shanxi, Inner Mongolia and Liaoning are at lower risk level (safe), Luan River and the coastal eastern Hebei is at middle risk level (little risk), and Tianjin is higher risk level (unacceptable); others are at the highest risk level (catastrophe risk). In order to acquire the more accurate judgment and verified results between different analytical methods, the model made by F. Martin-Carrasco also is adopted to evaluate simply the calculation results of water security risk in Haihe River Basin, predict future risk and govern risk. The results show that the total basin is highest risk level in 2005 and is lower risk level in 2020. In 2005 , all second area are at highest risk level, and other provinces are at the highest risk level except for Liaoning at lower risk level and Inner Mongolia at middle risk level. In 2020, south and north area in Haihe River Basin are at lower risk level, and Beijing , Tianjin and Liaoning are at lower risk level, and Inner Mongolia is at middle risk level, and others are at the same level as in 2005. The studies of the model made by F. Martin-Carrasco and the fuzzy synthesize judge model show the same he results. This shows the paper's results on risk evaluation of water resources security are reliability, confidence and right.

Key words: water resources security, risk identification, risk analysis, risk evaluation, Haihe River Basin

目 录

第一章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 选题依据	1
1.3 国内外研究进展	3
1.3.1 国外研究进展.....	3
1.3.2 国内研究进展.....	4
1.4 研究目的与意义	7
1.5 研究方案	8
1.5.1 研究内容.....	8
1.5.2 研究方法.....	9
1.5.3 技术路线.....	10
第二章 世界和中国水资源基本形势	13
2.1 水资源定义	13
2.2 世界水资源概况	15
2.3 中国水资源概况	17
2.3 小结	21
第三章 水资源保障风险及其相关研究概述	23
3.1 风险定义	23
3.2 水资源保障风险定义及其属性	24
3.3 水资源风险评估的相关理论与方法	26
3.3.1 水资源风险评估过程及内容.....	26
3.3.2 水资源风险评估的主要理论简介.....	29
3.3.3 水资源风险评估的主要方法.....	33
3.4 IPCC 关于水资源风险的评估综述	35
3.4.1 水资源变化驱动力.....	35
3.4.2 各区域的水资源脆弱性.....	36
3.4.3 水资源风险适应和管理对策.....	38
3.5 小结	39
第四章 海河流域水资源基本形势	41
4.1 自然地理概况	41
4.2 社会经济概况	42
4.3 水资源概况	43
4.4 海河流域水资源供需分析	43
4.4.1 海河流域水资源.....	44
4.4.2 供用水分析.....	52
4.4.3 水资源开发利用程度.....	63

4.4.4 供需分析.....	64
4.4.5 水环境质量.....	65
4.4.6 需水预测与供需分析.....	71
4.5 小结	75
第五章 海河流域水资源保障风险评估	79
5.1 水资源保障风险评估指标构建	79
5.1.1 风险率.....	79
5.1.2 脆弱性.....	80
5.1.3 重现期（重现周期）	80
5.1.4 可恢复性.....	80
5.1.5 风险度.....	81
5.2 水资源保障风险评估方法与模型	85
5.3 现状年与远景年水资源保障风险简化评估	90
5.3.1 水资源供给保障率指标.....	90
5.3.2 水资源保障可靠性指标.....	91
5.3.3 水资源利用率指标.....	91
5.3.4 水资源利用效率指标.....	91
5.3.5 水资源保障风险评估与决策体系.....	92
5.3.6 海河流域水资源保障风险简化评估.....	93
5.4 小结	97
第六章 海河流域风险管理的初步建议	99
6.1 宏观管理	99
6.2 水资源保障风险管理技术方法	102
6.2.1 需水管理.....	102
6.2.2 供水管理.....	105
6.3 小结	106
第七章 结论与展望	107
7.1 研究结论与建议	107
7.2 论文创新点	110
7.3 研究展望	110
参考文献	111
致 谢	125
作者简介	127

第一章 绪论

1.1 引言

水资源作为国民经济建设中的基础性自然资源和国家的战略性资源，将成为引发国际争端的重要导火索之一，正如联合国《联合国世界水资源开发报告》第二版中指出的那样：目前全球仍有11亿人口没有充足的饮用水，大约26亿人口缺乏基本卫生设施，这些人属于世界最贫困的人口，其中一半以上生活在中国和印度（UNESCO, 2006）。根据1993年国际人口行动提出的“持续水—人口和可更新水的供给前景”报告所确定的水资源紧缺评价指标的标准（Robert Engelman, et al, 1993），目前我国有8个省级行政区面临缺水或严重缺水，4个省级行政区用水紧张；全国人均水资源占有量低于全国平均水平的省级行政区有18个，且基本都在我国北方地区；全国4.3亿人口面临缺水，其中3.9亿人口将面临严重缺水（汪党献等，2000）。因此，水资源保障、供需的失衡始终是世界和中国社会经济可持续发展、水资源可持续开发利用和管理保护所面临的重大问题和难题。

1.2 选题依据

（1）全球变化影响

近代特别是自工业革命以来，据 IPCC（2007）第四次评估报告称，以全球变暖为主要特征的全球气候与环境发生了重大变化，全球出现水资源危险，生态系统退化，土壤侵蚀加剧，生物多样性锐减，臭氧层耗损，大气化学成分改变，渔业产量下降等；海平面升高将导致生活在低洼三角洲地区的数百万居民流离失所，若干个小岛国被淹没。气候变化通过水温、水流方式和水位的改变还会使湖泊、河流和湿地受到影响，将导致淡水生态系统的水质、生物生产率和生境下降；根据全球地表温度的器测资料（自 1850 年以来），最近 12 年（1995~2006 年）中，有 11 年位列最暖的 12 个年份之中；最近 100 年（1906~2005 年）的温度线性趋势为 $0.74^{\circ}\text{C}[0.56^{\circ}\text{C}\sim 0.92^{\circ}\text{C}]$ ，这一趋势大于《第三次评估报告》（TAR）给出的 $0.6^{\circ}\text{C}[0.4^{\circ}\text{C}\sim 0.8^{\circ}\text{C}]$ 的相应趋势（1901 年~2000 年）；全球温度普遍升高，

在北半球高纬度地区温度升幅较大，且陆地区域的变暖速率比海洋快。卫星资料表明：雪盖范围自 20 世纪 60 年代后期以来可能减少了 10%。地面观测站资料表明，20 世纪北半球中、高纬度地区每年的河、湖冰盖期大约减少 2 周，尤其是中纬度地区，雪盖范围和体积将减少，而高纬度地区则可能出现季节性覆雪的增加。中国现在所处时期的温度虽未达到历史最暖时期—隋唐时期的温度，但却是历史上温度变化较为剧烈的时期（葛全胜等，2002）。

因此，在全球变化的影响背景下，水资源保障风险问题是关乎人类生存的问题，其问题严重性要远大于其他资源问题，更值得引起人们的关注和研究。

（2）中国经济的快速增长和人民生活水平的提高

从 1978 年至今的 29 年间，中国经济的年均增长率超过 9%，是近代历史上持续增长速度最快的时期。国家统计局（2007）发布的《从十六大到十七大经济社会发展回顾系列报告》称，自十六大以来，国民经济不仅增长速度快，而且持续的时间长、稳定性好，总量在世界的位次由第六位跃居第四位，人均国民总收入步入了中等收入国家行列。随着中国经济的快速发展和人民生活水平的提高，对于资源的需求也更加紧迫，无论质量和数量都会出现可能难以估计的旺盛需求，而作为生存生活和经济发展所必需的水资源来说，加强保护并提高其利用效率，准确评估其水资源保障风险状况，是关系民生和国家大计的主要课题。

（3）中国面临的严峻水资源与环境形势

以水资源的可持续利用保障经济社会的可持续发展，是当今世界各国的共同使命。联合国千年宣言呼吁：通过在区域、国家和地方各级拟订促进公平获取用水和充分供水的水管理战略，制止不可持续地滥用水资源，并确定了到 2015 年将无法持续获得安全饮用水的人口比例减半的具体目标。联合国第 58 届大会确定 2005~2015 年为生命之水国际行动 10 年，敦促各国、各地区更加关注与水相关的问题，实现与水相关的目标（李雪松，2005）。水资源评估的最新成果表明（陈雷，2009），北方地区水资源量明显减少，其中以黄河、淮河、海河和辽河地区最为显著，资源总量减少了 12%，北方部分流域周期性的水资源保障风险加剧，将会严重制约着经济社会的可持续发展。

水资源和水环境问题造成巨大经济损失，危害群众健康，影响社会稳定和生态环境安全，严重制约了经济社会的可持续发展。有效节约和保护水资源，实现

水资源的可持续利用,是中国全面建设和谐社会、实现现代化必须加以解决的重大课题。

1.3 国内外研究进展

1.3.1 国外研究进展

国际上,水资源风险问题的研究于 20 世纪 30~40 年代因军事领域的需求而开展(韩宇平, 2005)。随着社会经济的发展与水资源风险问题的日益突出,有关水资源系统风险的研究已从单目标风险决策问题向多目标风险决策问题转变,进而向不完备信息情况下的水资源风险决策发展。国外对水资源系统风险决策问题的研究具有一定的深度和广度,并取得了一定的研究成果,如 1983 年, Molostvov (1983) 讨论了不确定性情景下多数据优化概念及其充分条件,其中多值向量函数的极值点、鞍点和均衡点以及充分条件的理论有着相当重要的影响; Simonovic (1983) 研究了多用途水库管理问题的可靠度规划问题; Colomi (1976) 对洪水和干旱两个可靠度约束的单目标优化问题作了深入讨论; Goicoechea (1979) 研究了不确定性下的多个目标情形,并把折衷法应用到 5 个目标函数和 5 组决策变量问题之中; Haimes (1985) 探讨了将风险和不确定性集结考虑的多目标规划方法,并提出分段多目标风险分析方法和多目标、多阶段的影响分析法,该方法适用于解决不同阶段与多个目标不可公度问题;他还在对风险效益进行分析时提出了代用风险函数的概念。上述研究成果还被广泛应用于城市供水风险的研究中,如在日本福冈采用上述指标评估了干旱期的水资源保障风险,并通过建立的水库调度与供水管理,优化了该时期的供水管理方案,从而降低了干旱期的保障风险(K Jinno, 1995; Xu Zongxue, 1998; A Kawamura, 1999; T Merabtene, 2002)。

全球气候变化对水资源造成的风险越来越剧烈,使全球气候变化对区域水资源保障风险的影响逐渐成为研究热点。这些研究主要以全球气候变化为情景,通过研究气候变化对降水、径流和蒸发等水文要素的影响,来推断气候变化可能给水资源系统造成的影响,结合社会经济发展情况,分析未来情景下的水资源风险问题,并通过对风险因子的分析,为政府和流域管理部门提供制定综合风险管理措施的基础依据(R N Jones, 2001, 2002, 2007; H J Fowler, 2003; A Iglesias,

2006, 2007)。

伴随着风险分析研究的逐步深入以及人们对水资源系统认识的不断深化,水资源风险评价引入了运筹学、网络技术、信息技术、大型数据库、非线性科学技术和系统工程管理方法等技术手段,尤其是在计算机网络发展的大力推动下,如Cisco、Oracle和Microsoft等的信息技术,无疑给风险管理提供了强有力的技术支持,提高了水资源风险管理者的管理和决策的能力。

此外,在水文风险分析中,国际学者对水资源系统风险的风险参数的估计计算进行了大量的研究工作,先后提出了权函数法、数值积分权函数法、极大似然法、概率权重矩法、适线法、模糊权函数法以及统计实验法和单权函数数值积分逼近算法等。另外,线性规划、动态规划、非线性规划、多目标分析模型等方法先后被引入水资源系统风险研究。这些都可为课题的开展提供思路与方法借鉴。

1.3.2 国内研究进展

风险研究是国民经济与社会可持续发展的保障机制之一,对推动我国社会经济的快速与可持续发展发挥着重要作用。近年来,我国对风险问题进行了重点研究,并取得了重要进展。其主要体现以下几个方面:

(1) 风险研究向广深发展。我国除许多高等院校和科研机构,继续对自然灾害、工程风险、经济风险、危机管理等与风险防范密切相关的科学问题进行研究外,一些民间组织和学术团体也积极参与到风险防范和研究工作中。更为重要的是,政府部门也对风险问题给予了高度关注,如国务院发布的《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006~2020年)》中,就将风险防范工作列为未来20年中国科技发展中的重要议题之一;国家科技部在“十五”期间部署了有关综合风险研究的专项课题;国家自然科学基金委也设立了风险研究领域。

(2) 成立了许多相关研究机构。如2001年,中国自然资源学会成立了资源可持续利用与减灾专业委员会,专门开展资源开发中的综合风险防范研究;2004年,经过民政部的批准,中国自然灾害防御协会成立了我国第一个专门进行风险研究的社团组织“风险分析专业委员会”;2005年,全球变化人文因素计划中国国家委员会(CNC-IHDP)成立了“风险防范”研究工作组,就以综合风险防范的策略问题为核心研究内容。

(3) 我国相继出版了若干相关专著, 如史培军(2003)主编的《中国自然灾害系统地图集(中英文对照版)》, 马宗晋(2004)主编的《中国重大自然灾害与社会图集》, 黄崇福(2001, 2005)所著的《自然灾害风险分析》、《自然灾害风险评价—理论与实践》等虽然这些成果多注重于自然灾害领域, 但也对风险辨识、评估与防范等问题进行了不同程度的探讨。特别是在我国“十五”国家科技攻关计划课题“中国风险综合管理战略研究”的带动下, 我国较为系统地开展了风险评估的理论与方法论研究, 完成了《风险管理—新世纪的挑战》(刘燕华等, 2005)等成果。该书系统介绍了风险和风险管理研究的发展过程、国际风险研究的最新进展、国际上有关风险管理的理论; 探讨了我国转型时期所面临的可能风险以及目前我国风险管理中存在的问题, 这为我国进一步开展综合风险防范技术研究, 尤其是重要资源保障风险的防范提供了重要的理论指导。

(4) 国际交流与合作日益频繁。中国近年相继召开了亚洲综合风险会议、第五届IIASA-DPRI国际综合灾害风险管理论坛、亚洲减灾大会和国际综合风险防范理事会年会等重要会议, 为开展风险研究拓展了广阔的国际空间。尤其2005年国际综合风险防范理事会年会的召开, 使得中国正在开展的风险研究工作能够更好地借鉴国外经验并与国际接轨; 从长远来看, 参与IRGC的工作, 将有助于我国在国际风险管理及相关国际公约的制订方面发挥更大的作用。

另外, 我国在水资源配置与水资源保障风险方面的研究起步虽迟, 但发展快。20世纪80年代初, 以华士乾教授为首的课题组(1988)利用系统工程方法对北京地区的水资源进行了研究, 并在“七五”国家重点科技攻关项目中加以提高和应用。郭仲伟、言茂松等(郭仲伟, 1986; 言茂松, 1989)对风险模型做了一定研究。徐宗学(1988)曾以随机点过程理论为依据导出具有成丛特征的洪水风险率计算的两种模型, 即GPP模型和GPB模型。朱元牲(1990)在研究洪水风险的基础上, 提出洪泛区洪灾风险分析和管理的风险综合分析方法, 并对长江南京段进行了防洪效益计算, 其中曾综合考虑过安全水位和演算误差两种因子带来的风险估计问题。冯尚友等(1990)对水库防洪、发电和灌溉三目标问题采用分解聚合方法建立了多目标风险分析模型系统, 其中洪灾风险分析是与防洪标准联系起来考虑的, 而其它目标则引用保证率的概念加以考虑, 具体处理多目标问题时是将向量优化问题转化为多维状态单目标规划问题。1991~1993年, 王浩等(1993)在“华北水资源管理研究”中, 首次在我国开发出华北宏观经济水资源优化配置

模型，研制了京、津、唐地区宏观经济水规划决策支持系统，并利用Oracle软件及ARC/INFO软件支持的数据库和多级菜单驱动的人—机界面等，实现了多模型之间的连接与信息交换；1998年，甘泓（1998）等结合邯郸市水资源管理项目，率先在地市一级行政区域研究中应用了水资源配置动态模拟模型，并开发出界面友好的水资源配置决策支持系统；同年，王忠静等（1998）根据可持续发展理论，在总结和延伸了水资源规划的多目标发展、相互作用、动态与风险性、公众接受和滚动规划的原则基础上，提出一种交互式宏观多目标优化与方案动态模拟相结合的决策支持规划思想和操作方法，用分段静态长系列法模拟水资源系统的动态特性，开发出相应的规划决策支持系统。

21世纪以来，我国在水资源保障风险研究方面又取得一些重要进展。如2000年，谢新民等（2000）根据宁夏的实际情况和问题，基于社会经济可持续发展和水资源系统风险的观点，分析和确立了宁夏水资源优化配置的目标及可能存在的风险；2001年，王浩等（2001）在黄淮海水资源合理配置研究中，首次提出了水资源“三次平衡”的配置思想，系统阐述了基于流域水资源可持续利用的系统配置方法，在国民经济用水过程和流域水循环转化过程等2个核心层面上分析了水量亏缺态势，并在统一的用水竞争模式下研究流域之间的水资源风险问题；同年，王劲峰等（2001）针对我国因水资源供需平衡在空间上的巨大差异而造成的区际调水的需求，提出了水资源在时间、部门和空间上的三维优化分配理论模型体系，并提出解析解法；2002年，尹明万等（2002）结合河南省水资源综合规划试点项目，根据国家新的治水方针和“三先三后”的原则，在国内外首次建立了基于河道内与河道外生态环境需水量的水资源配置动态模拟模型，该模型综合反映了水资源系统的多水平、多层次、多地区、多用户、多水源、多工程等特性，为科学制定各种水源配置方案及其风险防范提供了技术支撑；2003年，谢新民等（2003）针对珠海市水资源开发利用面临的问题和水资源管理中出现的新情况，采用现代的规划技术手段，包括可持续发展理论、系统论和模拟技术、优化技术等，根据国家新的治水方针，建立了珠海市水资源配置模型——基于原水—净化水耦合配置的多目标递阶控制模型，为珠海市未来20年的水资源优化配置和统一管理提供了科学依据；2008年，马黎等（2008）采用模糊层次分析评价方法对全国二级水资源分区的缺水风险进行了综合评价；2009年，王红瑞、张士峰等（王红瑞等，2009；张士峰，2009）利用Logistic回归模型模拟和预测了水资源短缺风险发生的概率，

建立了基于模糊概率的水资源短缺风险评价模型,评估了北京地区南水北调后水资源短缺风险和华北地区的缺水风险。国内还有韩宇平等(2003, 2005, 2008)对风险决策原理和模型作过较详细的阐述。

从世界和中国的研究来看,对于水文水资源系统的风险决策研究更多的则集中在防洪系统的风险决策方面。从水资源系统风险决策的发展过程来看,一般是先探讨单目标的风险决策问题,然后才是多目标的风险决策问题,直到研究信息不完备情况下的水资源风险型决策。从上述进展看,虽然我国水资源的系统风险问题已得到了高度重视,也相继开展了一些相关的研究工作,但与国际上发达国家先进的风险防范技术相比,我国的综合风险防范技术研究还处于起步阶段,这与我国经济和社会发展对综合风险防范的需求相差甚远。在高风险行业和高风险区域研究方面,本研究所涉及到的二级区水资源风险问题,至今还处在风险研究的较少状态。因此,必须从水资源风险保障的角度,加强对水资源保障风险的识别、评价、模拟、响应的研究,以满足各方面与日俱增的需求。

综合国内和国际的研究方向,水资源风险已由单纯的资源型风险研究向综合型、多部门并结合社会经济发展的方向转变,由水文水资源的学科研究向社会学、经济学、生态学、环境科学、灾害学以及公共管理等多学科交叉的综合研究方向转变;模型研究由单一的水文水资源模型向以复杂的、多因素、数量化数学模型转变,并综合运用现代数据库技术,实现运筹学、信息技术、数据库和系统工程管理方法等多种技术手段结合的计算机模型化。

1.4 研究目的与意义

“十七大”报告指出,要贯彻科学发展观,努力构建社会主义和谐社会,建设资源节约型、环境友好型社会,实现速度和结构质量效益相统一、经济发展与人口资源环境相协调,使人民在良好生态环境中生产生活,实现经济社会永续发展。本研究贯彻科学发展观的精神和指导,为科学发展观提供理论支持和帮助,形成在水资源方面构建和谐社会的理论基础,完善科学发展观的知识构架。

目前我国对水资源风险的理论、方法及标准体系的研究尚处于初级阶段,在缺水风险管理及风险决策等方面的科技支持极为薄弱。如何规避缺水风险,减少缺水风险所造成的国民经济损失及其对社会经济可持续发展的危害,已刻不容

缓。面对国家的强烈需求和水资源管理决策实践的迫切要求,开展水资源保障风险研究,提出一套水资源保障风险评价的理论与方法,对于国家或地区科学、合理、持续的利用各种水资源,为决策部门提供决策依据和各级水资源保障管理部门提供科学支撑,具有非常重要的科学意义和实践指导价值。

从社会与环境效益上看,本研究可为进一步完善我国的风险防范提供技术支撑,同时降低因资源过度利用而导致的环境风险,从而为我国可持续发展和构建和谐社会的战略实施提供更为有力的保障,并将有力地推动中国综合风险防范能力建设。

总之,在我国开展水资源保障风险的识别、评估等技术和方法的研究,并在水资源保障行业的高风险地区进行技术研究,不但可为各级政府、管理部门提供风险防范的技术支撑,而且具有重大的经济效益、社会效益和环境效益。本研究将通过对水资源保障风险的系统研究,建立水资源保障风险的综合识别、分类标准体系与风险综合评价的指标体系;努力开发水资源保障风险的综合评价模型;提出水资源保障风险综合防范的一般应对策略,并提供相应的社会经济发展建议。

1.5 研究方案

1.5.1 研究内容

本文从世界和中国水资源整体概况入手,分层次探讨流域层面、省级行政区、水资源二级区的水资源现状和发展趋势,并结合经济发展情况,对水资源风险作出相应的等级评估,并结合社会经济规划和人口发展情况,运用现代数学方法,构建相应的风险评估模型和预测模型,为我国水资源开发利用提供理论依据和现实可行的策略。在此基础上,针对水资源风险情况,提出相应合理的、以实现可持续发展的建议 and 对策。本研究以水资源区划为基本研究对象,综合水资源供需量和社会经济等方面资料,开展水资源保障风险评估内容的研究。具体内容如下:

(1) 在各种水资源系统风险定义、评估理论综合分析基础上,选择适合本研究的水资源保障风险评估理论和研究方法;

(2) 依据水资源供需量和社会经济数据,对海河流域水资源供需平衡进行总体分析,分析海河流域的水资源丰枯情况,并对未来水资源供需进行情景分析;

(3) 研究风险损失评估方法和合理的理论、适合的模型。在水资源区划和基本概况研究的基础上,利用风险率等风险评估指标,得到水资源保障程度的风险评估结果,综合进行风险等级评估。风险等级评估参考吴舜泽等(2006)在水环境安全的研究,采用5级风险等级评价,分为安全(基本无风险)、预警(低微风险)、低危(较低风险)、中危(中等风险)、高危(高风险),并逐步完善等级评估内容。运用国外流域风险评估模型进行评估和对策研究,将二者的评估结果进行对比分析,评估模型评估的可靠性。

为了流域管理组织对流域综合风险管理及行政管理的方便,分别对海河流域4个水资源二级区和8个省级行政区进行了水资源保障风险评估。

1.5.2 研究方法

(1) 部门分析综合预测法

部门分析综合预测法是编制水资源可持续利用规划时常用的预测方法,是大多数计划工作人员所熟悉的。基本思路是通过对各部门水资源消耗水平的现状分析,根据计划期内各部门生产发展水平和水耗下降的可能,并依据个部门之间的比例变化来综合预测水资源需求量以及预期经济效益。

(2) 层次分析法

层次分析法(AHP)是将决策总是有关的元素分解成目标、准则、方案等层次,在此基础之上进行定性和定量分析的决策方法。该方法的优点在对复杂的决策问题的本质、影响因素及其内在关系等进行深入分析的基础上,利用较少的定量信息使决策的思维过程数学化,从而为多目标、多准则或无结构特性的复杂决策问题提供简便的决策方法,而且定性与定量相结合,便于决策者之间彼此沟通,尤其适合于对决策结果难于直接准确计量的场合。层次分析法在本研究中,主要应用在各种风险评估指标体系的设计方面。

(3) 情景分析法

情景分析法亦称前景描述法、情景描述法等,是决胜于未来的一种竞争情报分析方法,它是通过想象、联想、推测和猜想来构思和描绘可能的未来面貌的一种创造性思维。通过情景分析法的运用,根据历史气候资料和水资源数据,对未来可能产生的水资源供需情况做出分析,并据此分析制定弥补损失的社会经济建

议。

(4) 模糊综合评估法

模糊综合评估法是对受多种因素影响的事物做出全面评价的一种十分有效的多因素决策方法，其特点是评价结果不是绝对地肯定或否定，而是以一个模糊集合来表示。它是指在考虑多个目标的情况下，将模糊信息处理理论应用于综合评价的方法。模糊评估法可在全面，综合考虑各项影响因素的前提下，对一个既包含了各种定量因素，又包括了各种非定量模糊因素和模糊关系的被测对象给出合理的评估值。用模糊评估方法对有多个特征的事物进行评估是模糊数学在实践中的具体应用。此方法可用于水资源保障风险的风险等级划分。

(5) 专家系统法

根据专家组（包括相关领域的科学研究人员、政府管理人员与对评估区有深入了解其他各类人员）对风险形成过程、机制及其所造成的可能损失的系统认识（包括专业知识与经验等）与主观判断，形成风险管理措施。

1.5.3 技术路线

首先通过基础资料（水资源供需、社会经济资料）的搜集整理，进行水资源供给风险评估和主要承险对象的需水量评估，运用风险度、事故周期、风险可恢复性和风险率等构建风险指标体系，评估水资源保障风险的等级；再借鉴国外的水资源风险简化评估模型；最后对两种评估模型进行分析比较，综合评估风险的准确性。本研究内容之间的相互关系及研究技术路线如下图1-1所示：

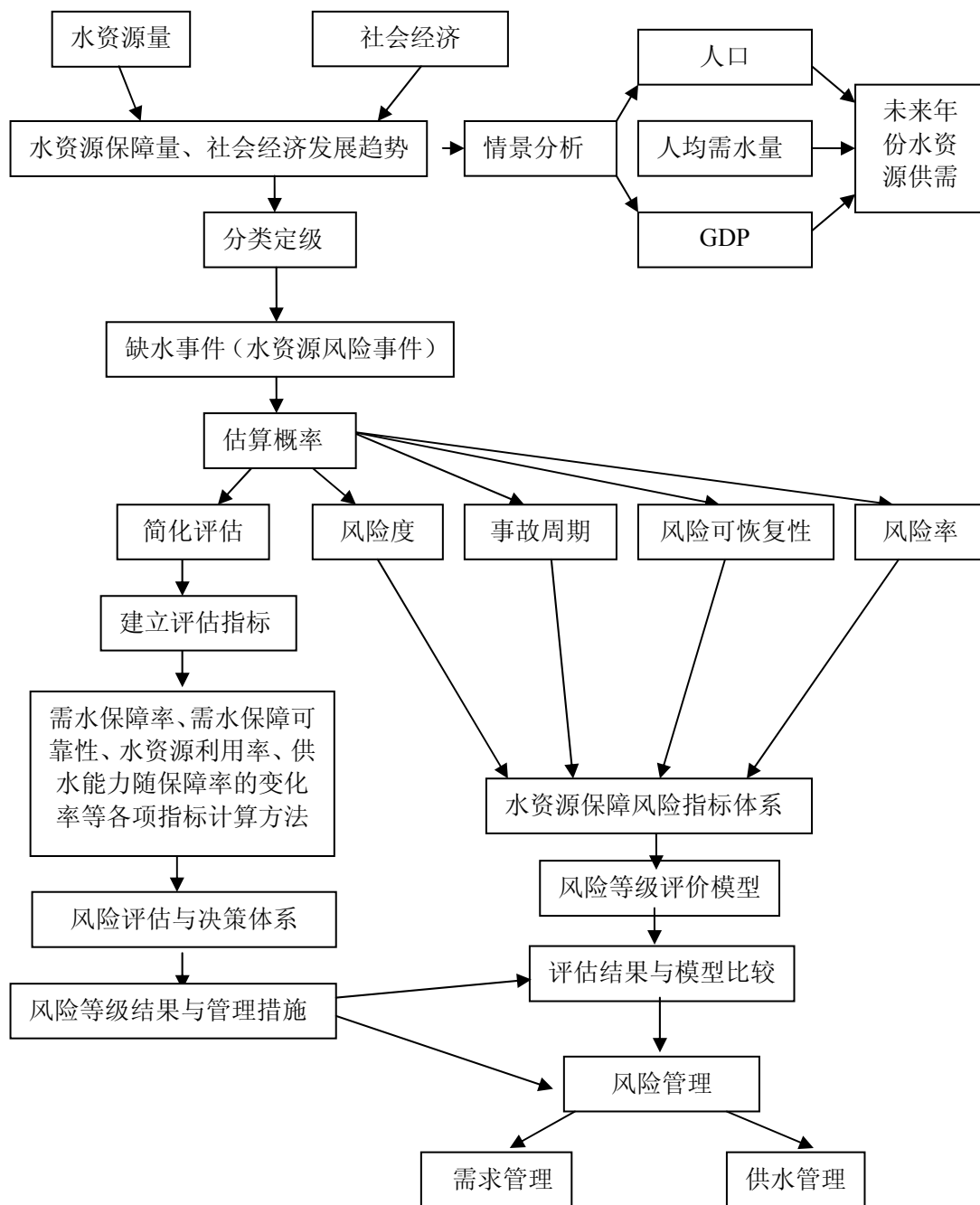


图 1-1 技术路线

第二章 世界和中国水资源基本形势

水资源是地球上一切生命的来源，人类社会的产生和发展都与水息息相关（张丽，2005；张天曾，1990；蔡云华，2005）。随着社会经济发展和人口激增，水资源已经由工业化初期的一钱不值，演变为现代社会的“瓶颈”资源，它严重地制约着一个地区、国家乃至全球的发展。现代城市工业的发展，城市人口迅速增长，城市水资源的需求量也急剧增大，供需矛盾也日趋尖锐（牟海省，1994；陈梦熊，1992；刘俊民，1999）。

当今世界面临的人口、资源和环境三大课题中，水已成为关键的问题（中国可持续发展水资源战略研究，2000），也是可持续发展的本质（冯宝平，2004）。1992年初，“世界水资源与环境大会”警告：“水资源保障已成为当今人类面临的最严峻挑战之一，至20世纪末及21世纪初，此种情况更令人忧虑”。2000年3月17日国际水问题联合会在荷兰召开了“世界水问题论坛”会议，主题就是“水的安全：从洞察到行动”，这次会议就水的安全性问题进一步向人们提出警告。21世纪水的安全面临着满足基本需求、保护生态、水资源共享、水的价值、科学管水、食品安全、处理灾害等7个主要挑战（夏军，2005）。

2.1 水资源定义

目前，“水资源”名词在国内外对其内涵和概念，尚无公认的定论（陈家琦，1996）。国际上较早采用“水资源”这一概念的是1894年设立水资源处的美国地质调查局（USGS）。1963年，英国通过的水资源法将水资源定义为“具有充足数量的可用水源”。1965年，美国通过了水资源规划法案，同时成立了Water Resources Council（水资源理事会），此时水资源具有浓厚的行业内涵。在《英国大百科全书》中，水资源被定义为“全部自然界任何形态的水，包括气态水、液态水和固态水”。英国大百科全书的权威性使该定义被很多人认可并被广泛引用。联合国教科文组织（UNESCO）和世界气象组织（WMO）在1988年对水资源的定义是：“可供利用或有可能被利用、具有足够数量和可用质量、并为适应特定地区的水需求而能长期供应的水源”，对水资源的社会经济属性认识更进一步。

国内学术界对水资源一词的理解也各有不同。《中国大百科全书》是国内最具有权威性的工具书,但在不同卷册中对水资源给予了不同解释(叶永毅,1987),如在大气科学、海洋科学、水文科学卷中,水资源被定义为“地球表层可供人类利用的水,包括水量(水质)、水域和水能资源,一般指每年可更新的水量资源”;在水利卷中,水资源则被定义为“自然界各种形态(气态、固态或液态)的天然水,并将可供人类利用的水资源作为供评价的水资源”。《中华人民共和国水法》指出:“水资源包括地表水和地下水”,仍未能全面反映可持续发展不同层面的需求。1991年王浩基于水资源的最为本质的3个特性(有效性、可控性和可再生性)提出了对水资源的定义:“水资源是对人类社会经济发展和生态环境保护具有效用的淡水资源,其来源为大气降水,赋存形态为地表水、土壤水和地下水。水资源在数量上为扣除降水期蒸发的总降水量,通过天然水循环不断得到补充和更新,同时受到开发利用的人工调控和人类活动的其他影响”(《水科学进展》编辑部,1991)。

从以上水资源定义中可发现,水资源定义尚未完全统一,基本上都是基于水的形态、利用、水量等来定义水资源,很少考虑水资源的质即水质。然而,水质对于水资源而言,是十分重要的,如果不考虑水质而研究水资源,很可能导致水资源开发利用中出现由污染引起的水质性缺水,而且从现实角度来看,水资源不仅具有自然属性、社会属性、环境属性,更重要的是它还具有经济属性(王浩等,2004)。

姜文来,王浩等的定义比较接近,他们给水资源重新进行了界定:水资源包含水量与水质两个方面,是人类生产生活及生命生存不可替代的自然资源和环境资源,是在一定的经济技术条件下能够为社会直接利用或待利用,参与自然界水分循环,影响国民经济的淡水(姜文来,1999;王浩等,2004)。

但随着技术进步、科技发展和人类认识的深入(如随着海水淡化技术的发展,海水淡化的成本渐低,很多国家开始使用淡化的海水应用于生产生活各个领域;冰川、冻土以及沼泽中的水也许不能被人类全部或部分直接利用,但对生态系统和气候系统具有重要的作用,也应加以保护并留待未来利用),人类可利用的水资源范围和需要保护的水资源范围也越来越广泛。因此,本研究根据姜文来、王浩等对水资源的定义,基于上述的认识,对水资源的定义做出了一定的修改,认

为可以将水资源定义为当代人及后代人生存发展必不可少的, 在一定的经济技术条件下能够被人类现在可利用或随着技术进步、经济发展将来可利用, 参与自然界各种循环, 具有生态意义和经济意义的各种形态水的总称。

2.2 世界水资源概况

水是地球极其丰富的自然资源, 它以气态、固态和液态等三种基本形态存在于自然界之中, 分布极其广泛。由表 2-1 可知, 地球上的水量是极其丰富的, 其总储水量约为 13.86 亿 km^3 , 大部分水储存在于海洋中, 占 96.54%, 淡水仅占总水量的 2.53%, 且主要分布在难以利用的永久冻土带、地下冰川、极地冰川 (占 69.45%) 和地下水 (占 30.06%) 中。

各种淡水更新周期存在着较大的差异, 大气中的水只需 8 天时间就更新一次, 是可更新资源, 极地冰川需要 9700 年, 地下水更新一次得需要 1400 年, 时间较长, 它告诉我们对于这种近似于不可更新的淡水资源而言, 在开发利用时, 必须慎而又慎。

表 2-1 地球各水体更新周期与储量

分类	更新周期 (年)	总储量 (km^3)	淡水储量 (km^3)
永久冻土带、地下冰川	10,000	300	300
极地冰川	9,700	24,023	24,023
海洋	2,500	1,338,000	—
山脉水	1,600	40.6	40.6
地下水 (不包括南极洲)	1,400	23,400	10,530
湖泊	17	176.4	91.0
沼泽水	5	11.5	11.5
土壤水	1	16.5	16.5
河流	16 天	2.1	2.1
大气水	8 天	12.9	12.9
生物圈	几个小时	11.2	11.2
总计		1,385,985	35,029

来源: Shiklomanov and Rodda, 2003.

如果考虑现有的经济、技术能力，扣除无法取用的冰川和高山顶上的冰雪储量，理论上可以开发利用的淡水不到地球总水量 1%，实际上，人类可以利用的淡水量远低于此理论值，主要是因为总降水量中，有些是落在无人居住的地区如南极洲，或者降水集中于很短的时间内，由于缺乏有效的水利工程措施，很快流入海洋之中。由此可见，尽管地球上的水是取之不尽的，但适合饮用的淡水水源是十分有限的。

世界水资源供需状况并不乐观。水资源短缺形势越来越严峻，水资源矛盾日趋尖锐，争夺水资源控制权和使用权的冲突在全世界有逐渐蔓延的趋势，从摩擦对抗到局部地区的战争日趋频繁（杨树清，2004；胡庆和，2007）：在南亚、中亚、中东地区，由水引起的冲突从古至今不断，并愈演愈烈。亚洲的巴基斯坦和印度常因萨特莱杰河流的水域问题发生争执；非洲的埃及、苏丹和埃塞俄比亚在尼罗河水的分配问题上互不相让；中东的幼发拉底河沿岸国家在上游修坝数十座，使下游河水减少而引发了土耳其、叙利亚等国间的分歧；在中东地区，由于对尼罗河、幼发拉底河、底格里斯河、约旦河以及太巴列湖的水源争夺导致该地区近半个世纪以来战争不断。世界银行副行长伊斯梅尔·萨拉杰丁曾预示：“20 世纪的许多战争都是因石油而起，而到 21 世纪水将成为引发战争的根源（何德功，2003）”。1996 年 5 月，在纽约召开的“第三届自然资源委员会”上，联合国开发支持和管理服务部（United Nations Department of Development Support and Management）对 153 个国家（占世界人口的 98.93%）的水资源，采用人均占有水资源量、人均国民生产总值、人均取（用）水量等指标进行综合分析，将世界各国分为四类，即水资源丰富国（包括吉布提等 100 多个国家）、水资源脆弱国（包括美国等 17 个国家）、水资源紧缺国（包括摩洛哥等 17 个国家）、水资源贫乏国（包括阿尔及利亚等 19 个国家）。按此种评价法目前世界上有 53 个国家和地区（占全球陆地面积的 60%）缺水（潘理中等，1996）。《联合国世界水资源开发报告》第二版指出，世界大部分地区的水质在下降，淡水动植物种类在逐年减少；由于森林遭到严重破坏和其他土地使用不当行为，致使同水有关的自然灾害呈上升趋势。现在世界上有 2/5 的人口居住在易于发生水患的地区，风险最大的国家包括：孟加拉国、中国、印度、荷兰、巴基斯坦、菲律宾、美国和一些小岛国；11 亿人仍然缺乏安全饮用水，26 亿人缺乏基本的卫生设施；到 2030 年，全球

粮食需求将提高55%。这意味着需要更多的灌溉用水,而这部分用水已经占到全球人类淡水消耗的近70%。过去50年来,粮食生产大幅增加,但全球人口仍有13%的人口(8.5亿,大多为农民)食不果腹。到2007年,全球一半人口将居住在城镇。到2030年,城镇人口会增加到近三分之二,从而造成城市用水需求激增。估计将有20亿人口居住在棚户区和贫民窟。缺乏清洁用水和卫生设施对这些城市贫民的打击最沉重的(UNESCO, 2006)。

总之,水危机已是全人类面临的重大环境问题,水资源危机发展将更加迅速,前景令人担忧。如何合理地开发利用保护水资源,已是摆在全人类面前刻不容缓的课题。

2.3 中国水资源概况

中国水资源的总量为2.8万亿 m^3 ,占全球水资源的6%,仅次于加拿大、巴西和俄罗斯,居世界第四位,略多于美国和印度尼西亚,占世界水资源总量的7%,水资源总量比较丰富(刘昌明等, 2005)。

综合各方面情况,我国水资源具有以下几方面的特点。

(1) 我国水环境安全状态层总体属预警状态,其中预警状态、中警状态呈集群化、联片化的区域特征(吴舜泽等, 2006)(见图2-1)。全国水环境安全压力处于良好水平的省份有四川、江西、云南、福建、贵州、云南、湖北、浙江,这些省份集中在我国北纬35°至北纬21°的区域范围内。处于重警状态的省份有辽宁、河北、山西、天津、北京、山东、江苏、上海。全国水环境安全响应安全度处于良好水平的省份为天津、河北和山东,这一区域也是水环境安全压力比较大的区域。全国水环境安全响应安全度处于较差水平的省份为广东省和广西省。从整体来看,我国大部分省份水环境安全响应力度不够,北方大部分省份的水环境安全均为预警状态以下。

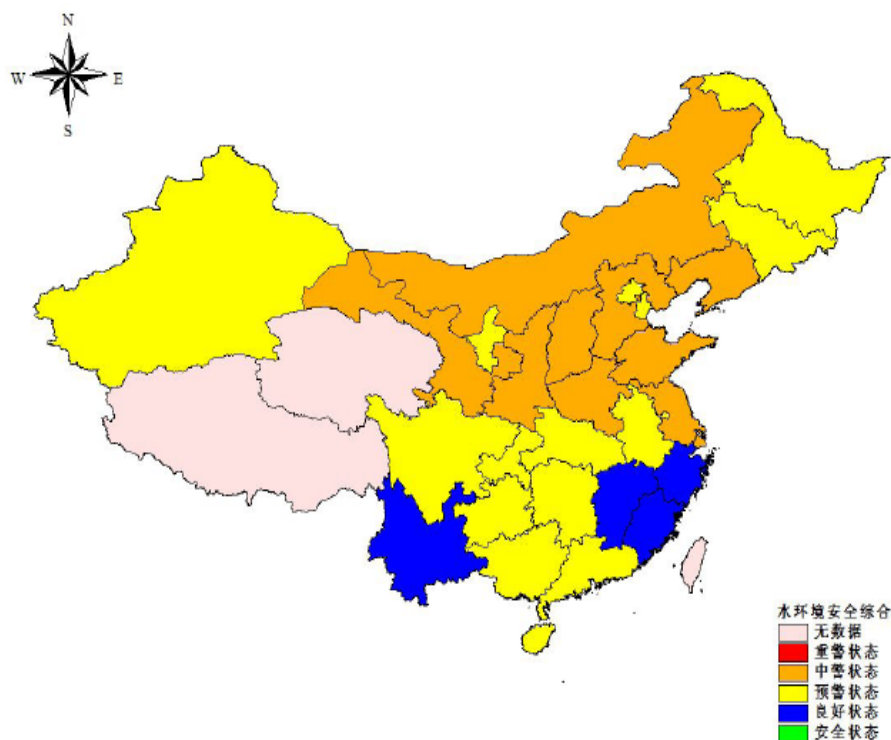


图 2-1 中国部分省区水环境安全综合评估分值空间分布图

来源: 吴舜泽等, 2006.

(2) 我国水资源人均量低, 分布极不均衡 (陈家琦等, 1996)。联合国粮农组织已经指出我国北方、印度南方和墨西哥水问题的严重性 (康绍忠, 1999)。与世界主要国家相比, 我国水资源总量是可观的, 但是由于人口众多, 导致人均水资源量远远低于世界主要国家, 也大大低于全世界的平均水平 (陈家琦等, 1996)。如果从单位耕地面积水量来看, 也远远小于世界的平均水平, 我们用全世界 7.2% 的耕地, 养育了全球 1/5 的人口, 从中可以窥测我国的水土资源是多么稀缺。应该特别强调, 由于我国国土辽阔, 各地区之间自然条件存在很大差异, 导致水资源丰富程度出现显著的差别。我国人口占世界的 22%, 人均只有 2200 立方米, 人均用水量远远低于世界平均水平, 仅为世界平均水平的 1/4, 排在世界 110 位, 是全球 13 个人均水资源最贫乏的国家之一; 扣除难以利用的洪水径流和散布在偏远地区的地下水资源后, 中国现实可利用的淡水资源量仅为 1.1 万亿立方米左右, 人均可利用水资源量约为 900 立方米, 并且分布极不均衡 (刘昌明等, 2005)。

我国水资源分布同人口、耕地分布极不协调, 长江流域及其以南的珠江流域、浙闽台诸河、西南诸河等流域, 国土面积、耕地和人口分别占全国的 36.5%、36%

和 54.4%，但水资源总量却占全国的 81%，人均水量为全国平均水平的 1.6 倍，亩均占有量是全国平均值 2.3 倍；辽河、海滦河、黄河、淮河流域，面积为全国的 18.7%（相当于南方的一半），水资源总量却只为南方 4 片的 10%；北方耕地占全国的 45.2%，人口占全国的 38.4%，水资源总量更少，特别是海滦河流域尤为明显，人均占有水量为全国平均水平的 16%，亩均为全国平均水平的 14%，水资源这种不均衡分布，严重地制约了国民经济的健康发展，调水成为经济和政治的热门话题（姜文来等，2005）。

（3）中国经济和社会的发展面临严峻的水资源形势（Varis, 2001）。水资源供需矛盾加剧，威胁社会可持续发展。我国水资源供需状况不容乐观。长期以来，我国社会经济发展一直受缺水困扰，缺水量越来越多，缺水地区迅速由点到面，几乎成为全国性问题，并且此问题越来越突出，未来我国水资源供需矛盾更加尖锐，见表 2-2。

表 2-2 我国水资源供需状况

水平年	流域	可供水量 (亿 m ³)	利用量 (亿 m ³)	需水量 (亿 m ³)	缺水量 (亿 m ³)	缺水率 (%)
2030	松辽河	746	721	759	13	1.8
	海滦河	487	311	539	52	9.7
	淮河	774	600	815	41	5.1
	黄河	528	443	535	7	1.3
	长江	2340	2647	2341	1	0.0
	珠江	1005	989	1006	1	0.1
	东南诸河	344	328	345	1	0.2
	西南诸河	126	126	127	1	0.6
	内陆河	640	635	652	12	1.8
	全国	6990	6800	7119	129	1.8
2050	松辽河	766	733	767	1	0.1
	海滦河	554	311	556	2	0.3
	淮河	838	606	839	1	0.1
	黄河	543	439	545	2	0.3
	长江	2482	2833	2429	1	0.1
	珠江	1020	1003	1021	1	0.0
	东南诸河	353	335	353	0	0.0
	西南诸河	144	144	145	1	0.0
	内陆河	654	646	664	10	1.6
	全国	7300	7050	7319	19	0.3

来源: 姜文来等, 2005

(4) 地下水超采严重(施嘉场, 1996; 刘培哲, 1996; 刘昌明, 2005)。地下水资源是我国水资源的重要组成部分, 特别是在地表水资源相对贫乏的干旱、半干旱地区, 地下水在保证居民生活用水、社会经济发展和生态环境平衡等方面起着不可替代的作用。因开发利用不合理, 我国地下水资源面临着供需紧张、污染严重、地质灾害影响大等问题。杨建锋等通过构建地下水资源支撑度评价指标体系, 对我国各省(自治区、直辖市)地下水对经济社会发展的支撑作用进行了初步评价(杨建锋等, 2007): 地下水资源支撑度最高的 10 个省份依次是山西、北京、河北、内蒙古、山东、河南、宁夏、贵州、陕西和辽宁; 地下水资源开发利用最不可持续的 5 个省份依次是河北、天津、山东、宁夏和上海, 海河平原和银川平原地下水形势最为严峻; 南方地下水资源可持续度高于北方; 地下水资源支撑度北方高于南方, 地下水资源支撑度最高的是黄淮海地区、鄂尔多斯高原与银川河套平原区、黄土高原东部地区及贵州省, 其次是东北地区和西北地区, 而在东南沿海地区地下水资源支撑度最低; 北方在经济社会发展过程中地下水所起的支撑作用高于南方, 北方比南方更加依赖于地下水提供居民生活和各经济部门用水。

综上所述, 由于中国的气候属于季风气候, 水资源时空分布不均匀, 与土地资源的匹配状况也十分不理想, 表现为水多、水少、水脏、水浑和水生态失衡(夏军, 2005), 即水多指洪涝灾害, 以及水资源时空分布与经济发展布局和要求不匹配; 水少指水量型和水质型缺水; 水脏指水环境遭到破坏, 水源水质达不到生活和工农业生产用水的质量要求; 水浑指水土流失严重, 水资源难以对土壤、草原和森林等资源起到保证作用; 水生态失衡指江河断流、湖泊萎缩、土地沙化、林草退化等由水引起的生态恶化。

2.3 小结

本章提出了水资源定义, 概述了世界和我国的水资源状况, 指出我国水资源面临的形势非常严峻, 如果在水资源开发利用上没有大的突破, 在管理上不能适应这种残酷的现实, 水资源很难支持国民经济迅速发展的需求。

第三章 水资源保障风险及其相关研究概述

水资源保障风险的评估研究是根据水资源系统的复杂性、开放性、随机性、模糊性、灰色性和混沌性等特性，将风险的思想 and 概念引入到水资源评价中，实现对不确定性因素进行定性和定量化的研究，定性或定量的展示风险等级的评估结果。

3.1 风险定义

要进行水资源保障风险评估，首先要清楚风险以及由此衍生的水资源风险的定义。风险（risk）一词由来已久（杨雪冬，2004），最为普遍的一种说法是，远古时期的渔民，在出海捕鱼时体会到“风”给他们带来的无法预测无法确定的危险，由此意识到“风”即意味着“险”，便有了“风险”一词。

关于风险的讨论，在西方最早可见于 19 世纪末的经济学研究中，美国学者 J. Haynes 在其 1895 年所著的《Risk as Economic Factor》一书中认为风险意味着损害的可能性（Beck, 1992; Haynes, 1895）。经过两百多年的演变，风险一词成为人们生活中出现频率很高的词汇。据 Hasson 在 2000 年的统计（2000），经常性的用法有：非期望发生的事件；非期望发生事件的原因；非期望发生事件的概率；非期望发生事件于统计学上的期望值；在已知晓的概率情况下作出决定的事实等。目前，学术界对风险的内涵还没有统一的定义，由于对风险的理解和认识程度不同，或对风险的研究的角度不同，不同的学者对风险概念有着不同的解释，但可以归纳为以下几种代表性观点。

（1）通过探讨风险与损失的内在联系，将风险定义为损失机会和损失可能性（许谨良，1998）。该定义只强调了损失发生的可能性，但未说明产生损失可能性的大小以及程度，无法定量衡量风险，只能定性说明风险存在与否，可用于风险源的识别。

（2）风险定义为损失不确定性（郭仲伟，1987），损失的不确定程度可以用概率来描述，即风险是损失、费用或损害相关的不确定性。此定义只强调了风险损失部分，并没有明晰风险与不确定性的区别。风险具有不确定性，但不确定

性事件并不一定会引起风险事件。

(3) 损失发生的概率即为风险（朱元牲，1992；吴世伟，1990）。此定义可以用来衡量风险事件出现的概率，但不能反映风险事件造成的损失程度。可在系统可靠性评估中应用此定义。

(4) 风险定义为产生不利后果的剧烈程度及其发生的概率（Lowrance, 1976）。此定义包含了损失的程度及其发生的频率。

(5) 风险是预期结果与实际结果的变动性，认为风险是在一定条件下、一定时期内可能产生结果的变动（于蕙春，1999，2000）。预期结果和实际结果的变动，意味着猜测结果不一致或偏离。

(6) 定义风险是风险事件与风险概率的一体化（王建群，1994），在一定的时间内一定的条件下，非期望的可能发生的事件称之为风险事件(risky event)，风险事件发生的概率称之为风险率(risky event probability)，而风险就是上述的风险事件与风险率两位一体。这种定义实质上是投机风险的定义。

(7) 联合国(United Nations)在2004年实施的“国际减灾战略”项目中，提出了自然灾害的风险定义：风险是自然或人为灾害(hazard)与承灾体的脆弱性(易损性)之间相互作用而导致一种有害的结果或预料损失发生的可能性。此定义包含两个关键意义，一是某种既定威胁，即灾害产生的可能性；二是暴露于灾害的敏感度，即脆弱性(vulnerability)。

综上所述，尽管风险的定义多种多样，在各自研究的领域内各有其合理性和科学性，但就本文的研究领域而言，刘燕华等(2005)对风险的定义更为适合本文的研究内容和目标，即可以认为风险是指某个客体遭受某种伤害、损失、毁灭或不利影响的可能性以及造成的可能损失，表达式(2-1)为： $R=f(H \times V/C)$ ， H 为事件发生的概率， V 为事件发生的后果， C 为能力，即风险事件的可恢复性。

3.2 水资源保障风险定义及其属性

与风险的一般概念一样，水资源风险的定义多种多样。在随机水文学中，它被定义为一个失事事件发生的概率；在水资源工程经济分析评价中，风险是指当考虑特征指标的随机性时，工程在整个运用时间获取某一决策指标小于或大于某一规定值的可能性或概率（罗高荣，1989）。在水库调度中的风险被定义为“水

库在调度、运行期间失事事件发生的可能性或概率和偏离正常状态或预期目标的程度”（黄强等，1998）。吴泽宁等（2002）将水资源风险定义为水体及其环境和人类水事活动过程中潜在的对社会经济及生态环境构成不利影响或危害的非期望事件；陶涛等（2002）认为，对于一个供水系统来说，所谓失事是主要是指供水量小于需水量，水资源供需风险是指这个失事发生的可能性以及由此造成的破坏程度；刘涛等（2005）将水资源风险定义为：在特定的时空环境条件下，水资源系统中非期望事件的发生概率及其所造成的损失程度；阮本清等（2005）将水资源风险定义为：在特定的环境条件下，由于来水和用水两方面存在不确定性，使区域水资源系统发生供水风险的概率以及由此产生的损失。

概括起来，本文认为韩宇平、刘涛等（韩宇平，2005；刘涛等，2005）对水资源保障风险的定义更适合本文的研究内容和研究目标，即水资源保障风险泛指在特定的时空环境条件下，水资源系统中所发生的非期望事件及其发生的概率并由此产生的损失程度。该定义不仅反映了风险的基本概念，而且将水资源保障风险定量化，为计算水资源保障风险提供了基础。

由于水资源保障风险作为一个系统问题，具有高度的开放性、高维性、关联性、复杂性、动态性、非线性、多因素性、层次不明确性等特点，导致水资源系统总是伴随着各种不确定性因素的困扰，这些不确定性因素的来源可分为以下几个方面（薛年华，1993；张翔，2000；刘涛等，2005；韩宇平，2005）：（1）自然现象或有关随机过程的不确定性（如降雨径流的变化、来水过程、需水量等均具有较大的不确定性）；（2）社会现象的不确定性（如人口变化、经济发展、政策、战争等均具有不确定性）；（3）模型化的不确定性，模型参数估计不准确引起的不确定性（即人类认识客观世界的局限性）；（4）需要、效益和费用不能确切预知及运行后参数的变化引起的不确定性；（5）决策过程的不确定性。正是由于这些不确定性因素的存在，使得水资源系统不可避免地存在一定的风险。

由于存在不确定性因素，所以水资源保障风险的不确定性可以分为客观属性和主观属性两部分（刘培哲，1996；韩宇平，2003；刘昌明，2005）：客观属性是自然界固有的或者人类社会发展所形成的影响水资源风险的不确定因素，这些不确定因素主要包括自然属性、社会属性、空间扩展性、时间延伸性等；主观属性是由于研究者掌握的资料不够完备和分析研究手段的限制，对系统认识的不全

面所造成的，主要表现为数学模型的结构、求解方法及模型中参数存在的不确定性，具体表现在数学模型（模型简化、不正确的模型结构、资料与模型匹配以及计算误差）和参数的建立方面（随机误差、系统误差、抽样误差以及一致性误差）所导致的不确定性。

由于水资源风险同时具有主观和客观两种属性，其客观属性是研究过程中无法避免的，因此我们在研究过程中应尽量避免主观属性的干扰，力求得到误差较小、相对准确的评估模型、参数和结果。

3.3 水资源风险评估的相关理论与方法

3.3.1 水资源风险评估过程及内容

水资源系统风险的分析 and 评估过程，总体可归纳为定义系统问题、风险识别、风险分析、风险处理和风险决策（韩宇平，2003）。风险分析的程序需要经过以下几个步骤。一、问题的提出，风险分析的目标制定，研究区供水保障风险的特点，水资源的环境影响评价等；二、评估区域的水资源系统描述，重点分析来水频率；三、研究区社会经济情况调查与预测，为研究缺水对国民经济造成的损失风险率打下基础，主要包括以下内容：产业结构调查、土地利用方式调查、人均生活用水方式调查、预测经济增长速率、预测各产业在未来对水资源的需求等；四、缺水的风险率计算和缺水经济损失的风险评估。

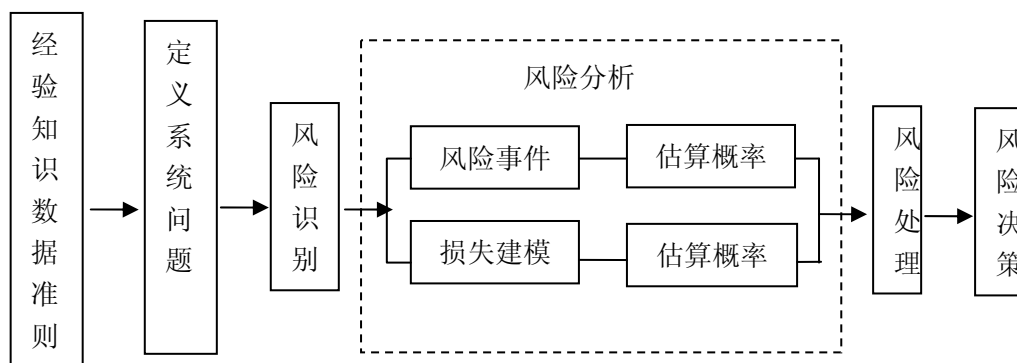


图 3-1 水资源系统风险评估一般过程

风险识别，又称风险辩识，是指通过对大量来源可靠的信息资料进行系统分析，找出风险之所在和引起风险的主要因素，并对其后果作出定性的估计。一般性的风险识别方法有分析方法（包括AHP和风险树）、专家调查方法、幕景分析法及蒙特卡洛方法。

风险估计与评估是风险分析的核心内容。风险估计又称风险衡量或风险计算,是指在风险识别的基础上,通过对所收集的大量的失事资料加以分析,运用概率论和数理统计方法,对风险发生的概率及其损失程度作出定量的估计,一般来说应建立起对系统风险损失的概率描述。风险评估是根据风险估计得出的风险发生概率和损失后果,把这两个因素结合起来考虑,用某一指标或多个指标综合决定风险大小,再根据公认的安全指标衡量风险的等级程度,以便确定风险是否需要处理和处理的程度。

风险处理与控制是根据风险评价的结果,选择风险管理措施和方法,以实现风险分析的目标。

风险决策是在对风险进行了识别、作了风险估计及评价、提出了若干种可行的风险处理方案后,需要由决策者对各种处理方案可能导致的风险后果进行分析并作出决策,即做出采用何种风险处理的对策和方案的决策。

要做好风险分析,需要对未来水资源供需平衡情况作出预测。对未来供需平衡情况作出预测,需要进行水资源供需平衡计算与分析。水资源供需平衡计算与分析是指对水资源的供给与需求,以及它们之间的余缺关系进行计算与分析(吕一河等, 1999; 刘秀屏, 2005)。需水预测就是指采用一定的理论与方法,有条件地预计将来某一阶段的可能需水量。需水预测一般以现状年和过去的资料为依据,以人口趋势、社会经济规划、资源基础、未来用水趋势等为条件,对各种影响用水的条件作出合理的假定,通过一定的理论方法和数学模型,预测未来需水量(吕一河等, 1999)。需水一般来说,主要是国民经济需水,包括生活需水、农业需水和工业需水。生活需水就是指维持城乡人民生活和畜牧业发展所需要的水量,包括城镇生活需水和农村生活需水(农村人口生活需水和牲畜需水),农业需水和工业需水就是进行农业和工业生产活动所需要的水量。

需水预测是水资源供需平衡分析的基础,在水资源研究和管理中占有重要的作用。目前,需水预测方法已多达二百余种,常用的也有二三十种(刘坤, 2005; 王清印, 2000)。总体来说,根据划分的方法不同,需水预测方法可以分为不同类型:(1)根据需水量预测的目的和对象不同,可分为短期预测和中长期预测(樊引琴, 2001; 许迪等, 1997);(2)根据需水量预测结果的特点与属性,通常分为定性预测、定量预测和综合预测三类(刘坤, 2005);(3)根据各种需水量预

测结果的特点，目前国内外所采用的需水预测方法，大致可分为四大类：①基于统计规律的需水预测方法（Penman, 1948；史海滨, 1997），如比较与外延法（趋势法）、经验公式法、增长速度法和回归分析法等（李远华, 1999；孙景生, 1993）；②基于用水机理的需水预测方法；③两者的结合，主要为用水定额预测方法；④基于建立模型的模拟预测法，如灰色模型（GM）预测法、人工神经网络（ANN）模型预测法和系统动力学法（张立明, 1992；王其藩, 1994）。

国民经济各部门的需水预测方法具体介绍如下：

（1）生活需水

生活需水目前普遍采用的是定额法，定额法预测是以现状生活用水量为基础，通过预测年人口规模、畜牧业规模和需水定额，预测生活需水量。例如李刚军在“宁夏水资源承载力研究”、陈俊在“深圳城市用水供需趋势研究”、赵波在“成都市水资源可持续利用的综合论证”等，都利用定额法对生活需水量进行预测（李刚军, 2002；陈俊, 2004；赵波, 2004）。

（2）工业需水

工业需水是指工矿企业在生产过程中，用于制造、加工、冷却、空调、净化、洗涤等方面的需水。工业需水预测的一般方法是在研究历史及现状工业用水的基础上，分析未来工业发展情况及需水水平变化，得出预测规律（刘秀屏, 2005）。

工业需水预测的各种方法中，目前国内专家学者采用较多的是万元产值指标法。如王增发的“中小流域水资源可持续开发利用规划的理论及模型研究”、如武爱华的“泰安市岱岳区水资源可持续利用研究”等、张宏祯的“讨赖河流域水资源利用规划研究”等，都利用这种预测法预测工业需水量（王增发, 2001；张宏祯, 2005；武爱华, 2005）。该种方法的优点是操作简便，涉及的指标少（主要是工业产值和万元产值需水定额），便于计算。但缺点是工业需水主要依赖于工业产值和万元产值需水定额，因工业发展的影响因素较多，有可能受不确定的因素影响而发生波动，因而，预测结果可能和未来实际情况有一定的偏差（陈勇, 2006）。

（3）农业需水

影响农业需水量的两个主要因素是灌溉面积和灌溉定额。目前预测农业需水采用定额法居多，即通过综合分析，对未来预测年的农业灌溉面积和灌溉定额进

行确定。灌溉定额可分为充分灌溉和非充分灌溉两种类型：对于水资源相对丰富的地区，常用充分灌溉定额；而对于水资源相对紧缺的地区，常用非充分灌溉定额（水利部水利水电规划设计总院，2002）。

综上所述，利用定额法对水资源进行需水预测，是基于统计规律和用水机理相结合的方法，预测结果可行，应用也比较广泛。

3.3.2 水资源风险评估的主要理论简介

1. 预测理论

水资源系统预测的主要内容包括水文要素预测、水量需求预测和水环境预测。目前，主要的预报方法有成因分析法、数理统计法、时间序列平滑预测法、灰色系统预测法及其他方法。下面对这些方法目前的研究现状加以概要地总结。

（1）成因分析法。事物的发生与影响因素之间存在着某种因果关系，成因分析法就是通过对事物前期影响因子的分析，来推断事物的未来结果，日常生活中常用该法。数理统计法、模糊数学法和灰色系统预测法等都是以成因分析法为基础的。

（2）数理统计法。数理统计法是一种常用的定量预报方法。它依据大量历史资料，应用概率论与数理统计原理研究预测对象历史变化的统计规律，对对象未来发展进行预测（王本德，1993；丁晶，1988）。数理统计法的主要特点是需要通过大量的资料来分析预测对象的演变规律，对原始资料的可靠性要求较高。

（3）时间序列平滑预测法。时间序列预测法，是将预测目标的历史数据按照时间的顺序排列成为时间序列，然后分析它随时间的变化趋势，外推预测目标的未来值，可分为确定性时间序列预测法和随机性时间序列预测法，在水文水资源领域的时间序列问题上有很多的应用和研究。钟登华等（1998）首次提出水文预报时间序列神经网络模型。胡铁松、丁晶等（1996）提出了用多层径向基函数网络（MRBFN）进行水文时间序列预测的神经网络方法，该方法有较强的非线性处理功能，训练时间短和全局收敛强。Mark 等（2003）将贝叶斯方法引入到马尔可夫链中，进行降雨时间序列的分析。周志军等（1997）进行了水文时间序列与水库优化调度的模拟研究，Chin（1995）将因子分析法引入到多变量时间序列模型中，对美国南佛罗里达地区的越和年降雨进行了有效的预测。郑泽权等

(2001) 阐述了小波变换的原理和小波系数同信号奇异性之间的关系, 以检验非平稳水文时间序列的变异性态。Sivakumar 等 (1999) 利用噪声降低对粗糙水文系列数据进行分析, 可以大大提高预测的精确度。王文均等 (1994) 对长江径流时间序列的混沌特性的进行了定量分析。Mattikalli 等 (1996) 则利用多元回归分析对季和年的时间序列的水质情况进行了有效的模拟和预测。

(4) 灰色系统预测方法。1985 年邓聚龙 (1985) 创立的灰色系统理论衍生出灰色系统预测理论, 该理论认为尽管客观系统表象万千而复杂, 数据杂乱好像没有规律, 但它总是有整体功能的, 必蕴藏某种内在规律。它把观测数据序列看作随时间变化的灰色量或灰色过程, 通过累加生成或累减生成逐步使灰色量白化, 即弱化其随机性, 从而建立相应于微分方程的模型并作出预报 (陈意平, 1992)。张大海等 (2002) 分析了 GM(1,1) 灰色预测公式的理论缺陷, 对原公式进行修正和拓广, 提高预测精度。夏军等 (1995) 概述了应用于洪水径流预测预报的灰色系统方法, 包括灰色系统方法简介、区域水温模式与大气环流模式的耦合、因果序列的灰关联模式预测等, 并对这些方法的发展趋势进行了讨论。王煌等 (1996) 将灰色系统理论运用在需水预测中, 冯强等 (1996) 将灰色灾变预测理论应用在旱涝灾害预测中, 对长江中下游未来几年旱涝状态作了预测试验, 该理论在水质预测等方面也有很多的应用。

(5) 其他方法。其他的预测方法还有马尔可夫预测、模糊预测、混沌预测、粗糙集预测、神经网络等, 其中应用于水资源系统预报问题主要有: 杨荣富等 (1998) 针对短期降雨径流预报问题, 提出了两类降雨径流过程预报模拟网络模型。谢新民等 (1999) 建立了径流实时预报的 BP 神经网络模型, 采用西大洋水库 1975~1995 年的入库径流系列对模型进行了检验。王大正等 (2002) 对流域需水预测方法进行了研究。

2. 多目标评价与决策理论

水资源系统涉及自然、社会、经济、环境等各个方面, 因此, 水资源系统决策或评价是一个复杂的多目标决策过程。从本质上讲, 决策与评价是一回事, 评价实质上是一个多级决策过程的风险决策。

国内外对于水文水资源系统的风险决策研究更多的则集中在防洪系统的风险决策方面。国外研究, Simonovic 等 (1982) 研究了多用途水库管理问题的可

靠度规划问题。Molostvov (1983) 关于多值向量函数的极值点、鞍点和均衡点及其充分条件的理论研究成果具有重要意义。。Goicoechea、Haimes 曾研究过将风险和不确定性集结考虑的多目标规划方法 (Goicoechea, 1979; Haimes, 1985)。国内在水资源风险决策问题研究方面也取得了一些初步成果。郭仲伟等 (1986) 对风险决策原理作过较详细的阐述。传统的优选决策方法有 (谢新民, 1999): 语言化评判方法、直接打分法、区间打分法、选项打分法、层次分析法、主成份分析法、因子分析法和模糊识别与决策等。模糊数学的应用使多目标决策有了新发展。陈守煌等 (1990) 提出可应用于水文水资源优选决策系统的多目标决策系统模糊优选的理论模型。王应明等 (1992) 以权向量的选择能使加权法结果与决策人偏好集的不一致程度最小为目标函数, 建立了基于加权法和线性分配法的有限方案多目标决策新方法。程春田等 (1992) 针对水库防洪调度系统的决策特点, 提出了有冲突的多目标协商模型。多人群决策问题逐渐成为运筹学、系统工程以及决策科学等交叉学科的活跃研究领域 (李登峰, 1985; 史海珊, 1994)。为解决多目标群决策问题, 目前国内外的研究多基于模糊集理论的研究 (陈守煌, 1994; 王应明, 1992), 也有通过概率统计、随机性分析等理论对之进行的研究 (程春田, 1992; 李登峰, 1985)。仲伟俊等 (1992) 根据多人两层多目标决策问题, 提出了一种用等价方法求解多目标决策问题的算法。柴小青等 (1998) 通过计算“多数决策者赞成”的隶属度, 给出一种基于专家偏好集结的群决策方法。很多决策问题, 由于所获信息的不完整性, 由此产生了针对不确定因素和了不确定性信息的群决策方法 (朱俊林, 1994; Lahdelma, 1998)。方道南等、傅湘等和韩宇平等 (方道南等, 1999; 傅湘等, 2001; 韩宇平等, 2008) 基于模糊综合评判的理论和方法对水资源系统的多目标风险决策作了一定研究。

3. 水资源可持续发展理论

从系统的观点来看, 水资源系统寻求人口、资源、环境、经济、社会五个子系统的互相协调的可持续发展。随着供需矛盾的日益突出, 人们越发深刻地认识到水资源区域协调管理的必要性和重要性。1974 年, Bishop (1974) 提出了流域水资源管理的概念, 引起了社会广泛的重视。Haimes (1975) 进一步提出了区域水资源管理机构的概念, 并建立了加利福尼亚水资源工程管理系统协调管理模型。国内方面。高彦春等 (1997) 率先使用 7 个指标和评价模型得出了区域水资

源的开发对策。王士武(1998)提出了承载力分量作为水资源可持续系统的评估指标。邢大韦等(1998)则利用水均衡的方法对干旱地区水资源承载力进行了评价。冯尚友等(1991, 1997)提出了水资源持续利用的基本模式和区域大系统多目标递阶分析的概念、模型和方法。竺士林等(1994)在太原市水资源评价的基础上系统地研究了太原市水资源与国民经济投入产出等模型。朱文彬等(1994)在区域经济与水资源协调发展管理研究的基础上,建立了以石家庄地区为例的水资源开发利用与经济发展协调管理模型。陈守煌等(1996)研究了大连市水资源综合利用与经济发展协调管理模式。阮本清等(1997)提出了解决黄河下游连年缺水、断流等问题的水资源优化配置方案。

4. 风险管理理论

风险管理始于 20 世纪 30 年代, 经过二十年逐渐发展为一门学科。Finne 等(Finne, 2000)如此定义风险管理: 风险管理是指为了使系统收益最大, 损失最小, 而对系统的不确定性事件所进行的识别、评估和控制。风险分析在 70 年代后期才最早应用在美国水资源开发中。在国外, 关于水资源风险管理的研究很多。Molostvov(1983)讨论了不确定性下的多判据优化概念和充分条件, 其中多值向量函数的极值点、鞍点和均衡点及其充分条件的理论研究成果是相当重要的。Colormi(1976)对洪水和干旱两个可靠度约束的单目标优化问题作过讨论。Goicoechea(1979)研究了不确定性下的多个目标情形, 并把折衷法应用到 5 个目标函数和 5 组决策变量问题之中。Simonovic(1982)研究了多用途水库管理问题的可靠度规划问题。Haimes(1985)曾研究过将风险和不确定性集结考虑的多目标规划方法以及分段多目标分析方法与多目标多阶段影响分析法。国内, 程春田等(1994)提出了基于降雨预报的水库防洪调度风险的模型。朱元牲等(1996)通过敏感性分析筛选出 4 个主要风险因子, 在 3 种不同信息条件下建立了长江中游防洪决策风险分析模型。蒋云钟(1996)研究了短期天气预报的灌溉预报调度可靠性问题。田峰巍等(1998)提出了水库放水的风险决策方法。周武光等(1999)结合美国洪水管理的经验, 提出了我国洪水风险管理的模式。熊明(1999)提出了大坝防洪安全风险计算的原则、方法及适用条件。傅湘等(2000)总结了洪灾评估的问题, 构建了具有通用性的洪灾风险评价模型系统。刘新立等(2001)将概率论和可能性理论应用于水灾的区域风险评估模型中。这些都对水资源风险管

理的发展起到了一定的积极作用。

3.3.3 水资源风险评估的主要方法

伴随着风险分析研究的逐步深入以及人们对水资源系统认识的深化,研究者先后提出了极值风险模型、概率风险模型、灰色随机风险模型、模糊数学风险模型和最大熵风险分析模型等。概率风险分析模型中常用的风险分析方法是参数解析法和随机模拟法(刘涛, 2005)。总体来看,可分为单目标评估和系统评估。

1. 单目标评估

(1) Monte-Carlo (蒙特卡罗)法(阮本清等, 2000)

又称为统计实验法。这种方法先制定各影响因素的操作规则和变化模式,然后用随机数生成的办法,人工生成各因素的数值进行计算,从大量的数值计算结果之中找出概率。该法精度高,尤其适用于非线性的不同分布及相关系统。但该方法计算结果易表现出不唯一性。因此,如有其他简单而有效的方法时,一般不使用此法或仅作为对照。

(2) 直接积分法(刘涛, 2005)

也称全概率方法,它是通过对荷载和抗力的概率密度函数进行解析和数值积分得到。当能够求得功能函数的诸影响因素的概率密度函数以及概率关系时,可以直接求出概率。这种方法理论概念强,适用于处理线性的、变量为独立同分布且影响因素个数较少的简单系统,不适于影响因素较多、非线性的变量不同分布的复杂系统,因此在实际应用时限制较多。

(3) MFOSM(均值一次两阶矩)法(德克斯坦等, 1993)

由于影响因素较多且复杂,对有些因素的研究还不够深入,难以用统一的方法确定各随机变量的概率分布及关系。根据线性化点选择的不同,一次两阶矩法分为 MFOSM(均值一次两阶矩)法和 AFOSM(改进一次两阶矩)法。MFOSM 法假设各影响因素相互独立,将线性化点选为均值点。该方法是一种近似分析法,方法比较简单,缺点是精度不高。

(4) AFOSM(进一次两阶矩)法(德克斯坦等, 1993)

这种方法是对 MFOSM 方法的改良。AFOSM 针对 MFOSM 精度不高这一缺点,在泰勒级数展开时,将线性化点选为风险发生的级值点(风险点),其计算

结果是截断误差小, 故比 MFOSM 精度高。为了确保计算精度, 应将非正态分布变量转化为正态分布变量, 即进行变量的正态化处理, 为此将需要用到 JC 法。

(5) JC 法 (王丽萍等, 1999)

JC 法是克拉维茨和菲斯莱等人提出来的, 它适用于随机变量为任意分布的情况。由于为国际安全度联合委员会(JCSS)采用, 所以称为 JC 法。该法对 MFOSM 法和 AFOSM 法的缺点进行了改进, 故其计算精度较高, 但该法的计算精度与模式失效概率的大小、随机变量的变异系数和失效面在设计点附近的局部形状有关, 特别是面对不能显示功能函数的复杂结构的概率设计问题时, 则无法进行计算。

2. 系统评估

(1) 极值统计学方法

极值的通俗概念为稀有、重大、在人们经验范围内很少出现或发生的事件(如百年、千年不遇的地震、干旱、洪水等自然灾害), 它在正常系统情况下很少见。极值统计主要是处理一定样本容量的最大值和最小值, 可能的最大与最小值将组成它们各自的母体, 因此这些值可用具有各自概率分布的随机变量来模拟。极值事件的研究始于 20 世纪 30 年代初(朱国庆等, 2001), Dodd、Frechet、Fisher 和 Tippett 证明的极值极限分布的三大类型定理奠定了理论基石; Gumbel 的著作反映了系统地归纳了一维极值理论, 并对变量的最大值(最小值)分布进行了研究。

(2) 模糊风险分析方法

在水资源系统的风险分析中, 首先要考虑的是系统的不确定性问题。由于事物在其发生、发展及演变过程中受到来自不同方面的诸多因素的共同影响, 使得它的状态始终体现为一种不稳定、模糊、无序或混沌等现象, 这就是系统的不确定性。

由于水资源系统的模糊性, 则水资源系统的不确定性可以分为两类, 一类是上述的随机不确定性, 用随机分析的方法来描述; 而另一类是模糊不确定性, 用模糊数学的方法来描述。在模糊风险分析中, 由于往往描述缺乏系统长期变化的信息, 可将系统变量视为模糊变量, 应用模糊集理论来定量评估系统的不确定性。目前是水资源风险评估中应用较多的方法。

(3) 灰色随机风险分析方法

此方法是在随机风险率的方法基础上（胡国华等，2000），强调对风险率的灰色不确定性的描述和量化。灰色随机风险分析方法代表了风险分析的一个方向，但其理论体系尚待进一步完善。

（4）最大熵风险分析方法（张继国等，2000）

1957年，Jaynes 在统计力学中提出最大熵原理，“最少的偏见的概率分布是这样一种分布，它使熵在已知信息的附加约束条件下最大化”。最大熵方法的基础是信息熵，此熵定义为信息的均值，它是对整个范围内随机变量不确定性的度量。在水资源系统风险分析中，许多风险因子的随机特性都无先验样本，设随机变量 X 为缺水量，设水资源系统的可供水量和需水量是两个相互独立的随机变量 X_1, X_2 ，风险指标 X 和随机变量 X_1, X_2 的关系为 $X = G(X_1, X_2)$ ，则可建立基于最大熵准则的风险估计模型。

综合上述风险分析方法，由于水资源系统作为一个复杂系统，具有多目标性、不确定性和模糊性等特点，因此在本研究中依据水资源系统自身的特点，选用系统评估中的模糊风险分析方法。

3.4 IPCC 关于水资源风险的评估综述

政府间气候变化委员会（IPCC）第四次科学评估报告已于2007年完成，对事关人类生存与发展的水资源问题做出了重要的阐述，现将第四次及前三次关于水资源风险的相关内容简述如下（IPCC，1990；IPCC，1995；IPCC，2001；IPCC2007）。

3.4.1 水资源变化驱动力

水资源变化驱动力可分为气候驱动力和非气候驱动力，二者对于水资源系统的具体影响比较难以界定。

降水、温度和蒸发成为主要的气候驱动力。由于温度对于海平面高度和积雪融化的重要影响，因此在海岸带和融雪供水的盆地地区，温度是影响水资源变化特别重要的驱动力。

水资源变化的非气候驱动力主要有：水库（大坝）建设和退役、废水再利用、海水淡化、污染排放、废水处理、灌溉等水资源利用驱动力。水库和大坝的建设

与拆除导致径流变化。废水再利用和海水淡化技术可能会增加半干旱和干旱地区的水资源供给。但是由于在淡化过程中，产生的高浓缩海洋有机物和其它化学物质所导致的环境问题以及大量能源消耗，所以海水淡化的大范围应用仍面临很多困难。废水处理是对水资源质量的一个重要驱动力。为了改善水资源的质量，发展中国家和发达国家对废水处理的需求都在增长。但目前的废水处理技术仍然存在诸如有机微污染、化学品的大量消耗等技术问题。发展中国家将会面临重金属、富营养化和有机微污染等日益严重的点源污染问题。灌溉区域、作物密度和灌溉效率的范围是未来灌溉水资源利用的重要驱动力。

4.4.2 各区域的水资源脆弱性

IPCC对于全球未来水资源风险的评估有以下几方面：21世纪中叶之前，在高纬和部分热带潮湿地区，年平均河流径流量和可用水量预估会增加10%~40%，而在某些中纬和热带干燥地区，将遭受缺水压力，其径流量和可用水量会减少10%~30%。受冰川和积雪储水量减少的影响，生活在冰川或融雪供水的江河流域世界上六分之一以上的人口可能会经受水资源风险考验。海平面上升将扩大地下水和三角湾盐碱化面积，导致人需要和沿海地区生态系统需要的淡水量下降。根据整个系列的SRES情景，面临日益缺水风险的人口预估分别为：到21世纪20年代达4~17亿，到21世纪50年代达10~20亿，到21世纪80年代达11~32亿。到21世纪50年代(A2情景)，有2.62~9.83亿人口可能加入用水紧张的行列。预估用水压力状况到21世纪50年代会在20%~29%的全球陆地面积上出现缓解但会在62%~76%的全球陆地面积上出现增加。IPCC评估的所有地区表明气候变化对水资源和淡水生态系统总体上造成净负影响。

对于各区域水资源风险评估如下所述。

非洲：气候变化可能加重非洲许多地区的供水压力，导致缺乏更多的安全饮用水。预计在21世纪50年代之前，东非的径流增加；其它地区的径流减少且干旱的风险可能增加（如非洲南部和北部）。非洲到2020年，预估有7500万到2亿5000万人口会因为气候变化而面临加剧的缺水压力。

亚洲：气候变化具有在亚洲大部分区域加剧水资源压力的潜势。亚洲未来20年~30年，冰川的加速融化将导致一些河流水系的流量增加，从而造成更多的洪

水、不稳定山坡的岩石崩塌以及水资源破坏。此后由于冰川的退缩，流量将随之减少。多年冻土层退化可能造成地面沉降，改变排水特性和基础设施的稳定性。气候变化在亚洲引起的最严重的潜在威胁是缺水。在中亚、南亚、东亚和东南亚地区，特别是在大的江河流域，预估可用淡水会减少。到21世纪50年代，伴随着人口增长，以及生活水平日益提高所带来的需求增长，气候变化可对10亿以上的人口造成不利影响。

大洋洲：在澳大利亚南部和东部、新西兰北部和东部的一些地区，到2030年水安全问题可能将更加严重，例如，到2030年维多利亚地区径流将减少0%~45%，到2050年澳大利亚默里—达令流域江河将减少10%~25%。到2030年，澳大利亚西北部和新西兰西南部的降雨较多，澳大利亚南部和东部以及新西兰的东北部降雨较少，澳大利亚的干旱强度均会增加。

欧洲：预估到21世纪70年代，欧洲北部年径流量将增加，而南部将减少36%，夏季将减少80%；在严重的缺水压力下（汲水率/供水率高于0.4）的江河流域面积百分率由当前的19%增加到34%~36%。到21世纪80年代，西欧17个国家中，生活在缺水压力下的人口可能由1600万增加到4400万。风险最大的地区是欧洲南部，以及欧洲中部和东部的部分地区。

拉丁美洲：在21世纪20年代之前，由于气候变化的影响，面临水资源风险的人数的净增长可能达700万~7700万人。在21世纪下半叶，处于这种境地的人口数量将增加到6000万~1.5亿。智利南部、阿根廷西南部、秘鲁南部和中美洲西部的降水出现减少的趋势。在阿根廷、智利和巴西的干旱一半干旱地区，未来降水的减少可能导致严重的水资源风险。哥斯达黎加和厄瓜多尔的太平洋沿岸以及拉普拉塔河口可用的饮用水安全受到海平面升高的威胁。

北美洲：到21世纪中叶，预估西部山区变暖会造成积雪减少、夏季径流减少，加剧过度分配的水资源竞争。气候变化很可能制约北美洲已经被密集使用的水资源，并与其它方面的压力相互作用。因温度升高而引起的积雪减少和蒸发量增加很可能影响水的提供时间和可用性，并加剧各种用水的竞争。变暖很可能给地下水可用水量造成额外的压力，给经济发展和人口增长方面的更高要求带来冲击。在五大湖和一些主要的河系中，更低的水位可能使水质、航行、水力发电、分洪和美国与加拿大两国之间的合作等问题恶化。

极地区域：预估到21世纪末，年平均的北极海冰面积将减少22%~33%；预计在两极地区，湖泊冰盖和江河冰盖都将减少。北极冰川和冰帽的厚度和面积以及南极冰盖将显著减少。降水频率、类型和发生时间的变化将会增加污染物的捕获并增加污染物流入北极淡水系统的负荷。北极地区冰雪圈过程的一些变化（积雪和多年冻土层的融化）正在改变河流的路径和季节性。

小岛屿：到21世纪中叶，由于大多数小岛屿的供水有限，气候变化预计会减少许多小岛屿的水资源供给。

3.4.3 水资源风险适应和管理对策

对于水资源管理部门而言，在制定和实施水资源风险的适应和调整策略时应首先考虑技术或制度上程序的可行性。其次要考虑策略和措施的经济承受能力或可行性，措施和策略应在经济可承受范围内。再次是政治或社会因素。最后还应综合考虑水资源管理系统和各管理机构自身的局限性。为实现水资源可持续利用，在水资源管理中还应考虑维持和加强环境保护措施，包括河道生态系统、湿地、不同需求竞争、土地利用、社会经济政策等。

适应水资源可利用性和需求的变化是水资源管理的核心内容。成功的完整的水资源管理方针应该是采纳多方面社会观点，改造计划和过程，协调土地资源和水资源管理，调查清楚水资源量和质量、地表水与地下水联动情况，保护和恢复自然系统，并考虑气候变化可能产生的影响。另外，还应协调水资源使用的利益冲突。适应水资源风险的方法原则可从供给和需求两方面结合起来加以选择和考虑。但是不管是采用供给和需求哪种方法，都会产生各种利弊两方面问题，因此选择具体方式方法还应根据具体情况而定。

从供给方面，可以采取以下措施来应对水资源风险：勘探和抽取地下水；增大水库和大坝的库容；海水淡化；雨水收集储存；调水工程等。需要值得注意的是，过分采用提高供给的方式会增加水资源供需矛盾，并带来不利的环境影响后果。从需求方面考虑有：促进循环水的使用提高水利用效率；通过改变作物轮作制度、采用作物间作和混作、灌溉方式以及作物种植区域调整等方式来减少农业灌溉用水；进口农产品来减少农业灌溉用水；促进水资源本地可持续利用；通过水资源市场来实现水权再分配，以达到分配给使水资源高价值利用的目的；减少

泄漏，通过计量和定价进行需水量管理；土壤保墒，如通过覆盖；通过经济激励手段（计量和定价）来促进水资源保护。在以上供给和需求的种种措施之中，提高农业灌溉用水生产力和水权转让可能是未来较为有效的措施。灌溉取水量分别占全球取水量的70%和全球水消费量的90%。鉴于农业灌溉在全球水资源需求方面的绝对地位，提高农业灌溉用水的生产力（界定作物单位产量耗水量）可以极大增加人类生活和环境需水的供给。水权转让期望能成为适应水资源风险变化的有效手段，在美国已有很多成功案例可以借鉴。

3.5 小结

本章首先在风险定义的基础上概括了水资源风险定义，对水资源系统的风险属性进行了概括。其次介绍了水资源的一般评估过程，指出风险估计与评估是风险分析的核心内容，并对对水资源风险的分析与预测理论和方法进行了介绍，介绍了常规的工业、农业和生活等部门的国民经济需水预测方法，在众多方法中定额预测法被广泛应用。然后对水资源风险理论进行了分类。各理论之间呈层层递进关系，为下面的理论做铺垫。再对水资源风险评估方法进行了介绍。本文认为在多种方法中，模糊数学法是近年来多为采用的方法，并符合水资源风险的特性，因此综合各种研究理论和方法，本研究采用模糊数学法对水资源保障风险进行研究。最后总结了IPCC报告对世界各区域的水资源风险状况和驱动力的分析，IPCC认为气候变化对全球水资源风险具有增大的趋势，并概述了IPCC应对水资源风险的管理对策。

第四章 海河流域水资源基本形势

本研究以海河流域为例研究水资源保障风险，以海河流域水资源公报、《海河流域水资源评价》和海河流域管理委员会等资料为来源，从自然地理、社会经济和水资源和水资源供需平衡等四个方面概述了海河流域的基本形势。

4.1 自然地理概况

海河流域位于东经 $112^{\circ}\sim 120^{\circ}$ ，北纬 $35^{\circ}\sim 43^{\circ}$ ，流域总面积 31.82 万 km^2 ，占全国总面积的 3.3% 。其中，山丘区面积 18.9 万 km^2 ，占 59% ；平原区面积 13.1 万 km^2 ，占 41% 。东部和东南部为广阔平原。流域山地和平原近乎直接相交，丘陵过渡段甚短。全流域总的地势是西北高东南低，大致分高原、山地及平原三种地貌类型。西部为山西高原和太行山区，北部为蒙古高原和燕山山区，面积 18.94 万 km^2 ，占 60% ；东部和东南部为平原，面积 12.84 万 km^2 ，占 40% 。

海河流域包括海河、滦河和徒骇马颊河 3 大水系、7 大河系、10 条骨干河流。其中，海河水系是主要水系，由北部的蓟运河、潮白河、北运河、永定河和南部的大清河、子牙河、漳卫河组成；滦河水系包括滦河及冀东沿海诸河；徒骇马颊河水系位于流域最南部，为单独入海的平原河道。

流域属于温带东亚季风气候区。冬季受西伯利亚大陆性气团控制，寒冷少雪；春季受蒙古大陆性气团影响，气温回升快，风速大，气候干燥，蒸发量大，往往形成干旱天气；夏季受海洋性气团影响，比较湿润，气温高，降雨量多，且多暴雨，但因历年夏季太平洋副热带高压的进退时间、强度、影响范围等很不一致，致使降雨量的变差很大，旱涝时有发生；秋季为夏冬的过渡季节，一般年份秋高气爽，降雨量较少。海河流域年平均气温由南往北和由平原向山地降低，温度变化在 $0\sim 14.5^{\circ}\text{C}$ 。年平均相对湿度 $50\%\sim 70\%$ 。多年平均日照时数为 $2500\sim 3000$ 小时。流域全年大风日数 $10\sim 60$ 天。流域多年平均水面蒸发量 $850\sim 1300\text{mm}$ (E601 蒸发皿)，平原大于山区。干旱指数介于 $1.5\sim 3.0$ 之间。

4.2 社会经济概况

海河流域人口密集，大中城市众多，在我国政治经济中的地位重要。流域内有首都北京、直辖市天津，以及石家庄、唐山、秦皇岛、廊坊、张家口、承德、保定、邯郸、邢台、沧州、衡水、大同、朔州、忻州、阳泉、长治、安阳、新乡、焦作、鹤壁、濮阳、德州、聊城等 25 座大中城市。海河流域行政区划包括北京、天津、河北、山西、河南、山东、内蒙古、辽宁 8 个省（直辖市、自治区），涉及 2 个直辖市和 33 个地级市（盟），256 个县（区），有 26 个地级以上大中城市和 31 个县级市。

2005 年总人口 1.34 亿，占全国的 10.2%，其中城镇人口 5023 万，农村人口 8396 万。城镇化率 37.4%，北京市达 80.5%。流域平均人口密度 419 人/km²，其中平原区 747 人/km²，山丘区（含山间盆地平原）183 人/km²。海河流域 2005 年国内生产总值 25750 亿元，占全国的 14.1%；人均国内生产总值 1.92 万元，是全国平均水平的 1.38 倍。但流域内各地区经济发展很不平衡，北京市人均 GDP 4.43 万元，天津市 3.51 万元，达到中等发达国家水平；河北、山西、河南、山东、内蒙古等省区人均 GDP 只有 1 万多元。平原区经济发达，GDP 占全流域 82%，而山丘区 GDP 只占 18%。

海河流域是我国重要的工业基地和高新技术产业基地，在国家经济发展中占有重要地位。工业门类众多，技术水平高，并形成了以京津唐以及京广、京沪铁路沿线城市为中心的工业生产布局。20 世纪 80 年代以来，海河流域经济社会持续发展。流域总人口从 9721 万人增加到 1.34 亿人，增长了 38%。海河流域 GDP 从 1980 年的 1592 亿元增加到 2005 年的 25750 亿元，增长了 15 倍。人均 GDP 从 1980 年的 1638 元增长至 2004 年的 1.92 万元。灌溉面积基本稳定的基础上，粮食总产量翻了一番，从 1980 年的 2655 万 t 增加到 2005 年的 5592 万 t，人均粮食占有量从 273kg 增加到 417kg，增长 53%。进入二十一世纪以来，海河流域以电子信息、生物技术、新能源、新材料为代表的高新技术产业发展迅速，在流域经济中比重逐年增大。

4.3 水资源概况

海河流域水资源的主要特点是水资源总量少、降水时空分布不均、经常出现连续枯水年和水资源量逐渐衰减。

(1) 降水时空分布不均

海河流域多年平均降水量 539mm，其中山区 527mm，平原 556mm。降水地区差异较大，沿燕山、军都山、太行山迎风坡有一条大于 600mm 的多雨带，降水依次向弧形山脉两侧减少。汛期（6~9 月）降雨量占年降雨总量的 70%~85%，主要集中在 7~8 月份的 1~2 个降雨过程，容易形成洪涝灾害。春季（3~5 月）降雨量只占年降雨量的约 10%，因此流域内春旱频繁发生。流域年降水量变差较大。流域南部与北部，山区与平原之间，年降水时空分布有一定差异。各河山区与平原同时发生枯水的概率在 50%~80%之间。从水资源利用角度讲，各河系之间水量相互调配的空间比较窄小。

(2) 经常出现连续枯水年

1949 年以来的 50 年中，出现了 1951~1952 年、1980~1981 年和 1992~1993 年，以及 1997~2000 年四个连续枯水年段。局部地区出现连续枯水年的机率更多。天津市六十年代以后已出现 5 次连续枯水年，河北省东部地区也发生过连续 9 年的枯水期。1999~2000 年，潮白河上游和滦河上游再次出现连续干旱年，两年降水量均不足 300mm。潘家口水库 2000 年入库水量创有水文记录以来最低点，天津市出现了自 1983 年引滦入津工程通水以来最严重的水资源危机。

(3) 水资源总量少，人均少，并逐渐衰减

总体上属于资源型缺水地区。海河流域多年人均占有水资源量仅 293m³，不足全国平均水平的 1/7，世界平均的 1/27，远低于人均 1000m³ 的国际水资源紧缺标准；耕地每亩占有水资源量 213m³，不足全国平均亩均水资源量的 1/8。在全国各大流域中，海河流域的人均、亩均水资源量最低。

4.4 海河流域水资源供需分析

根据 1998~2007 年《海河流域水资源公报资料》及《海河流域水资源评价》（任宪韶主编，2007）对近年海河流域的水资源和用水情况变化进行分析，对海

河流域水资源状况进行整体辨识。由于近些年来海河流域经济发展迅速，为揭示近年来随着经济社会发展引起的水资源供需问题以及近年来水资源的变化情况，但受制于作者所能搜集的资料所限，因此仅选用了二级区和省区 1998~2007 年的资料，海河流域整体选用了 1990 年以来的资料。

4.4.1 海河流域水资源

水资源总量是指降水形成的地表和地下产水量，即地表径流量与降水入渗补给量之和。为便于对比分析海河流域水资源的丰枯趋势，将海河流域的水资源俩的相关指标时间段主要划分为 6 个年段。以下对海河流域降水量、地表水资源量、地下水资源量、水资源总量进行分析。

4.4.1.1 降水量

降水量就是指从天空降落到地面上的液态和固态（经融化后）降水，没有经过蒸发、渗透和流失而在水平面上积聚的深度。降水是地表水和地下水的补给来源，是影响水资源数量的重要水文因素，因此降水量评估是水资源评估的主要内容之一。变差系数 C_v 值可以表征分区降水量的年际变化幅度， C_v 值越大，表示年际降水量的变化幅度越大，反之则越小。由表 4-1 分析可知， C_v 值分析降水量年际变化，各水资源二级区和省级行政区降水量系列的 C_v 值大多介于 0.20~0.30 之间。在 4 个水资源二级区中，滦河及冀东沿海的 C_v 值最小，为 0.16，海河南系和徒骇马颊河 C_v 值最大，为 0.24。在 8 个省级行政区中，内蒙古自治区 C_v 值最小，为 0.18，河南省 C_v 值最大，为 0.29。海河流域是我国降水量年际变化较大的地区之一。

各分区年代降水量变化，分为 6 个年段，并与多年（1956~2000）平均降水量相比，分析各年段降水量的变化趋势。从整个流域来看，1956~1960 年、1961~1970 年和 1971~1980 年 3 个年段普遍处于偏丰状态，分别偏丰 8.9%、5.5% 和 1.5%，1981~1990 年、1991~2000 年及 2001~2007 年 3 个年段则分别偏枯 5.7%、5.7% 及 12.6%，海河流域平均降水量整体呈现出偏枯的趋势。

表 4-1 海河流域年降水量特征值

分区	年降水 量均值 (mm)	Cv	1956~1960	1961~1970	1971~1980	1981~1990	1991~2000	2001~2007
			年段均值 与多年均 值差 (%)	年段均值 与多年均 值差 (%)	年段均值 与多年均 值差 (%)	年段均值 与多年均 值差 (%)	年段均值 与多年均 值差 (%)	年段均值 与多年均 值差 (%)
滦河及 冀东 沿海	549	0.16	5.5	2.0	2.9	-4.9	-2.8	-14.7
海河 北系	489	0.19	15.5	1.9	1.4	-5.7	-5.4	-15.4
海河 南系	549	0.24	10.2	7.2	0.2	-5.2	-7.3	-10.5
徒骇马 颊河	564	0.24	-6.1	11.1	5.3	-9.7	-3.6	-10.5
北京	585	0.26	25.3	0.6	-1.9	-6.0	-5.4	-22.8
天津	575	0.27	0.0	4.3	4.8	1.4	-10.5	-18.3
河北	543	0.21	9.4	4.9	1.4	-5.6	-5.5	-15.5
山西	489	0.21	11.7	5.0	0.3	-4.0	-7.1	-0.9
河南	610	0.29	11.1	9.2	-1.1	-8.8	-4.8	-0.1
山东	565	0.26	-6.9	11.1	5.7	-9.7	-3.6	-13.7
内蒙古	369	0.18	16.7	2.8	2.4	-8.7	-4.9	-18.3
辽宁	566	0.27	-4.4	2.1	2.0	-4.7	2.8	-11.6
海河 流域	535	0.19	8.9	5.5	1.5	-5.7	-5.7	-12.6

在 4 个水资源二级区中, 1956~1960 年段, 徒骇马颊河偏枯 6.1%, 其他分区则普遍偏丰, 偏丰幅度在 5.5%~10.2%。1961~1970 年段, 普遍偏丰, 幅度为 1.9%~11.1%。1971~1980 年段, 海河南系与多年平均降水量基本持平, 其他分区均偏丰, 偏丰幅度为 1.4%~5.3%。1981~1990 年、1991~2000 年及 2001~2007 年 3 个年段, 各分区普遍偏枯, 偏枯幅度为 2.8%~15.4%。水资源二级各分区近年呈现出偏枯的趋势。

在 8 个省级行政区中, 1956~1960 年段, 辽宁和山东两省分别偏枯 4.4%和 6.9, 天津与多年平均降水量持平, 其他省区市则普遍偏丰, 偏丰幅度为 9.4%~25.3%。1961~1970 年段, 北京与多年平均降水量基本持平, 其他省市则偏丰, 偏丰幅度为 2.1%~11.1%。1971~1980 年段, 山西省与多年平均降水量基本持平, 北京市和河南省则分别偏枯 1.9%和 1.1%, 其他省市普遍偏丰, 幅度为 1.4%~5.7%。1981~1990 年、1991~2000 年及 2001~2007 年 3 个年段, 天津市在 1981~1990 年段偏丰 1.4%, 辽宁省在 1991~2000 年段偏丰 2.8%, 河南省在

2001~2007 年段与多年平均降水量基本持平, 其他省市在各年段则普遍偏枯, 偏枯幅度为 0.9%~22.8%。各省区自 1981 年以来, 呈现出愈加偏枯的趋势, 并且自 2001 年以来偏枯幅度大幅增大。

由表 4-2 可知, 海河流域 2001~2007 年降水总体上偏少, 7 年平均降水量仅为 468mm。按 1956~2000 年水文系列分析, 全流域 2001、2002、2005、2006、2007 年均属枯水年, 2003 年属偏丰年, 2004 年属平水年。降水在流域内分布不均匀, 综合来看, 南部地区降水相对偏多, 徒骇马颊河出现了 2003~2004 年连续两个偏丰水年和平水年, 河南省在 2003~2004 年也连续出现连续两个丰水年和偏丰水年; 北部地区降水相对偏少, 滦河及冀东沿海 7 年出现了 4 个枯水年或偏枯水年。

表 4-2 海河流域 2001~2007 年降水量丰枯分析

分区	2001 年	2002 年	2003 年	2004 年	2005 年	2006 年	2007 年
滦河及冀东沿海	偏枯	枯	平	偏枯	偏枯	偏枯	偏枯
海河北系	枯	枯	平	平	偏枯	偏枯	偏枯
海河南系	偏枯	偏枯	偏丰	平	偏枯	偏枯	平
徒骇马颊河	偏枯	枯	丰	偏丰	平	偏枯	平
北京	偏枯	偏枯	偏枯	偏枯	偏枯	偏枯	偏枯
天津	枯	枯	平	偏枯	偏枯	偏枯	偏枯
河北	枯	枯	平	偏枯	偏枯	偏枯	偏枯
山西	偏枯	偏枯	偏枯	偏枯	偏枯	偏枯	平
河南	平	枯	丰	偏丰	偏枯	偏枯	偏枯
山东	枯	枯	偏丰	偏枯	平	偏枯	偏枯
内蒙古	偏枯	偏枯	偏枯	枯	偏枯	枯	枯
辽宁	偏枯	偏枯	平	平	偏丰	平	偏枯
海河流域	枯	偏枯	偏丰	平	偏枯	偏枯	偏枯

4.4.1.2 地表水资源

地表水资源是指河流、湖泊、冰川等地表水体中由当地降水形成的、可以逐年更新的动态水量, 用天然河川径流量来表示。地表水资源是实现社会经济可持续发展和维系健康生态环境的重要资源, 地表水资源分析在水资源分析中占有重要的地位。

由表 4-3 可知, 从区域地表水资源量分析, 海河流域年径流量系列的 C_v 值为 0.41, 各水资源二级区和省级行政区年径流量的 C_v 值大多介于 0.40~1.0 之间。在 4 个水资源二级区中, 海河北系的 C_v 值最小, 为 0.44, 年际变化较小, 徒骇

马颊河 C_v 值最大, 为 0.90, 年际变化较大。在 8 个省级行政区中, 内蒙古自治区的 C_v 值最小, 为 0.30, 年际变化较小, 山东省的 C_v 值变化最大, 为 1.20, 年际变化较大。

全流域 1956~1960 年、1961~1970 年和 1971~1980 年 3 个年段普遍偏丰, 偏丰幅度为 39.4%、15.8%及 4.8%, 1981~1990 年、1991~2000 年及 2001~2007 年 3 个年段则偏枯, 偏枯幅度为 25.1%、15.3%及 51.0%。总体规律来看, 进入 20 世纪 80 年代后, 偏枯趋势越加明显。

表 4-3 海河流域地表水资源特征值

分区	年平均 径流量 (亿 m^3)	C_v	1956~1960	1961~1970	1971~1980	1981~1990	1991~2000	2001~2007
			年段均值 与多年均 值差 (%)	年段均值 与多年均 值差 (%)	年段均值 与多年均 值差 (%)	年段均值 与多年均 值差 (%)	年段均值 与多年均 值差 (%)	年段均值 与多年均 值差 (%)
滦河及 冀东 沿海	53.1	0.53	39.8	4.0	11.1	-30.0	-4.9	-60.1
海河 北系	50.2	0.44	59.1	1.0	3.8	-19.1	-15.2	-55.2
海河 南系	98.7	0.49	46.5	24.6	-1.5	-25.0	-21.3	-48.3
徒骇马 颊河	14.0	0.90	-82.6	52.0	29.6	-28.6	-11.8	-19.9
北京	17.7	0.72	103.2	-4.7	-7.8	-23.8	-15.2	-60.4
天津	10.7	0.62	-8.0	2.4	16.8	2.1	-17.4	-44.0
河北	116	0.60	50.8	13.7	4.0	-30.2	-13.0	-61.8
山西	35.9	0.40	34.8	15.2	-0.3	-12.4	-19.9	-33.1
河南	16.3	0.64	41.3	35.5	2.3	-31.8	-26.7	-27.9
山东	13.5	1.20	-85.6	51.4	32.4	-28.9	-12.0	-29.7
内蒙古	4.0	0.30	37.4	4.0	8.4	-19.4	-11.8	-43.3
辽宁	2.1	0.72	-11.7	20.0	17.1	-43.3	12.0	-53.2
海河 流域	216.1	0.41	39.4	15.8	4.8	-25.1	-15.3	-51.0

4 个水资源二级区中, 1956~1960 年段, 除徒骇马颊河分区偏枯 82.6%外, 其它分区均偏丰, 偏丰幅度为 39.8%~59.1%; 1961~1970 年段, 4 个水资源二级区均偏丰, 偏丰幅度为 1.0%~52.0%, 4 个分区差异较大, 北部区域偏丰幅度较小, 南部地区偏丰幅度较大, 反映了该年段年径流量地区分布差异; 1971~1980 年段, 海河南系稍偏枯, 偏枯幅度为 1.5%, 其它地区均偏丰, 偏丰幅度为 3.8%~29.6%; 1981~1990 年、1991~2000 年及 2001~2007 年 3 个年段, 4 个水资

源二级区均在各年度偏枯，偏枯幅度呈增大趋势，偏枯幅度为 4.9%~60.4。自 1981 年代后，各水资源二级区进入普遍偏枯时期，并呈偏枯幅度增大趋势。

在 8 个省级行政区中，1956~1960 年段，辽宁、山东及天津偏枯，偏枯幅度为 8.0%~85.6%，其它省市则均偏丰，偏丰幅度为 34.8%~103.2%；1961~1970 年段，北京市偏枯 4.7%，其它省市则普遍偏丰，偏丰幅度为 2.4%~51.4%；1971~1980 年段，北京市和山西省偏枯，偏枯幅度为 7.8%和 0.3%，其它省市则普遍偏丰，偏丰幅度为 2.3%~32.4%；1981~1990 年、1991~2000 年及 2001~2007 年 3 个年段，除天津在 1981~1990 年偏丰 2.1%和和辽宁 1991~2000 年偏丰 12.0%外，其他省市均偏枯，偏枯幅度为 11.8%~61.8。8 个省市总体表现为在 1981 年后，呈现偏枯的趋势，偏枯幅度有增大趋势。

表 4-4 海河流域 2001~2007 年地表水资源量丰枯

分区	2001 年	2002 年	2003 年	2004 年	2005 年	2006 年	2007 年
滦河及冀东沿海	偏枯	枯	枯	枯	偏枯	偏枯	偏枯
海河北系	枯	枯	枯	枯	枯	偏枯	偏枯
海河南系	偏枯	枯	偏枯	偏枯	偏枯	偏枯	偏枯
徒骇马颊河	偏枯	枯	偏丰	偏丰	平	偏枯	偏枯
北京	偏枯	偏枯	偏枯	偏枯	偏枯	偏枯	偏枯
天津	枯	枯	枯	偏枯	偏枯	偏枯	偏枯
河北	枯	枯	枯	偏枯	偏枯	偏枯	偏枯
山西	偏枯	偏枯	枯	偏枯	偏枯	偏枯	偏枯
河南	偏枯	枯	偏丰	偏丰	偏枯	偏枯	偏枯
山东	偏枯	枯	偏丰	偏丰	平	偏枯	偏枯
内蒙古	枯	偏枯	偏枯	枯	偏枯	枯	枯
辽宁	平	偏枯	偏枯	偏枯	偏丰	偏枯	偏枯
海河流域	枯	枯	偏枯	偏枯	枯	偏枯	偏枯

由表 4-4 可知，海河流域 2001~2007 年天然径流量明显偏少，与多年平均径流量相比较，7 年均属偏枯水年或枯水年，其中 2001 年、2002 年、2005 年属于枯水年，2002 年全流域地表水资源量 63.3 亿 m^3 ，相当于多年平均地表水资源量的 29%，是 1956~2007 年以来天然来水最枯的一年；尽管从降水量来分析，2003 年、2004 年属偏丰年和平水年，但可能由于连续枯水年和偏枯水年造成下垫面产流能力下降，因而从地表水资源的径流频率分析来看，导致仍然出现了枯水年或偏枯水年。流域内地表水资源量分布不均匀，总的状况是南多北少，南部地区径流量相对较多，其中徒骇马颊河出现了 2003~2005 年 3 个连续偏丰水年或平水年；北部地区径流量相对较少，3 个水资源二级区均出现连续 7 个偏枯水年或枯

水年。从省级行政区分析来看,除河南出现 2003~2004 年连续 2 个偏丰水年、山东出现 2003~2005 年连续 3 个偏丰水年或平水年、辽宁间或在 2001 年出现平水年、2005 年出现偏丰年外,其他省市 2001~2007 年多为枯水年或偏枯水年,反映了近年来海河流域各省级行政区地表水资源面临严峻形势。

4.4.1.3 地下水资源

地下水资源是指浅层地下水中参与水循环且可以逐年更新的动态水量。地下水资源是水资源的重要组成部分,可为社会经济和人民生活提供较为可靠、安全的水资源保障,并是保持良好生态环境的重要资源。目前,据统计,海河流域地下水供水量占总供水量的 60%,在一些如北京、天津等地表水缺乏的地区,地下水起到支撑水资源保障安全的作用。

地下水资源开采利用情况可用地下水超采率来表示。地下水超采率指一年或多年平均区域地下水开发利用量超过可采地下水资源总量的比例。如果未有超采情况发生,超采量和超采率均定为 0,即年开采地下水总量未超过可开采量。

表 4-5 2001~2007 年海河流域地下水资源

分区	2001~2007 年	1980~2000 年	年平均超采量 (亿 m ³)	超采率 (%)
	平均地下水供水 量 (亿 m ³)	多年平均地下水可开采 量 (亿 m ³)		
滦河及冀东沿海	24.4	14.6	9.8	67.2
海河北系	52.8	46.6	6.2	13.3
海河南系	152.7	96.9	55.8	57.6
徒骇马颊河	27.2	26.3	0.9	3.5
北京	25.0	23.8	1.2	5.0
天津	7.3	4.5	2.8	61.6
河北	163.9	94.7	69.2	73.1
山西	11.4	19.8	0.0	0.0
河南	26.7	15.4	11.3	73.4
山东	22.5	24.5	0.0	0.0
内蒙古	1.2	1.4	0.0	0.0
辽宁	0.2	0.2	0.0	0.0
海河流域	258.2	184.1	74.1	40.3

从上表 4-5 可知,海河流域的 4 个水资源二级区中,滦河及冀东沿海和海河南系地下水资源开采较为严重,分别达到 57.6%和 67.2%,其次是海河北系,达到 13.3%,徒骇马颊河较轻,仅为 3.5%;8 个省市级行政区中,天津市、河北省和河南省超采严重,分别达到 61.6%、73.1%和 73.4%,北京超采率较低,仅为

5.0%，未超采的4个省市分别为山西省、山东省、内蒙古自治区和辽宁省；整个海河流域地下水超采情况较为严重，超采率达到40.3%，对地下水生态环境的安全构成严重威胁。

4.4.1.4 人均水资源

水资源总量是指降水形成的地表和地下产水量，即地表径流量与降水入渗补给量之和。人均水资源量是指区域内人均占有的水资源量，用水资源总量除以总人口数计算。国际上多以人均水资源量来衡量地区和区域水资源安全程度。表4-6 是人均紧缺指标评价，表4-7 是不同保证率下的人均水资源量，人口数量以2005 年为标准。

表4-6 水资源人均紧缺指标评价

人均水资源量 (m ³ /人/年)	缺水程度	缺水表现
>3000	不缺水	
1700-3000	轻度缺水	局部地区、个别时段出现水问题
1000-1700	中度缺水	将出现周期性和规律性用水紧张
500-1000	重度缺水	将受持续性缺水，经济发展受损，人体健康受影响
<500	极度缺水	将经受极其严重的缺水，需要调水

来源：1993年国际人口行动提出的“持续水—人口和可更新水的供给前景报告所确定的水资源紧缺评价指标标准

表4-7 海河流域不同保证率的人均水资源量

分区	20% (m ³ /人/年)	50% (m ³ /人/年)	75% (m ³ /人/年)	95% (m ³ /人/年)	多年平均 (m ³ /人/年)
滦河及冀东沿海	798	549	400	255	598
海河北系	361	270	217	166	289
海河南系	304	216	167	126	237
徒骇马颊河	314	202	139	84	228
北京	313	228	176	120	243
天津	210	138	92	47	150
河北	390	257	186	128	291
山西	498	395	333	270	415
河南	290	208	157	106	223
山东	351	215	137	62	244
内蒙古	538	442	375	308	462
辽宁	1348	739	435	261	930
海河流域	349	259	205	151	276

根据水资源人均紧缺指标评价可知（表 4-6），由表 4-7 分析可得，海河流域 4 个水资源二级区中，在水资源 20%保证率下，仅滦河及冀东沿海达到严重缺水程度，其他 3 个水资源二级区缺水程度均属极度缺水；在 50%保证率下，滦河及冀东沿海属严重缺水，其他区域属极度缺水；75%和 95%保证率下，4 个水资源二级区均属极度缺水；多年平均水资源量情况下，滦河及冀东沿海属严重缺水，其他区域均属极度缺水。

8 个省级行政区中的缺水程度，20%保证率下，辽宁属中度缺水，内蒙古属严重缺水，其他省市均属极度缺水；50%保证率下，辽宁达到重度缺水程度，其他省市均达到极度缺水程度；75%和 95%保证率下，8 个省级行政区均达到极度缺水程度；多年平均水资源量下，辽宁属重度缺水程度，其他省市均达到极度缺水程度。

整个流域来看，海河流域在 20%、50%、75% 和 95%保证率下，人均水资源量分别为 349m^3 、 259m^3 、 205m^3 和 151m^3 ，均属极度缺水程度，多年人均水资源量仅为 276m^3 ，属严重缺水程度，并且按 2005 年人口计算，只相当于全国平均水平的 13%。海河流域的水资源总量和人均占有量在全国的水资源一级区中，位列最低，并远低于国际标准的人均 1000m^3 严重紧缺标准和 500m^3 极度紧缺标准，海河流域整体是严重的资源性缺水地区。

4 个水资源二级区中，20%保证率下，海河南系人均水资源量最低；50%保证率下，徒骇马颊河人均水资源量最低；75%和 95%保证率以及多年平均水资源量下，徒骇马颊河人均水资源量最低；滦河及冀东沿海在各保证率和多年平均水资源量下，人均水资源量均为最高。考虑到徒骇马颊河有引黄河水的便利，可改善水资源状况，因此海河南系在 4 个水资源二级区中，是海河流域水资源最为紧缺的地区。

8 个省级行政区中，天津市在各个保证率和多年水平下，均是最低的人均水资源量，是省级行政区中水资源最为紧缺的地区；辽宁省在 20%、50%、75%和多年平均水平下，人均水资源量均列各省市最高，内蒙古自治区在 95%保证率下，人均水资源量最高，但各省市在不同保证率下，均可能达到中度、重度和极度缺水的程度。

4.4.2 供用水分析

4.4.2.1 供水分析

(1) 现状供水量

供水量是指各类水资源工程为用户提供的包括输水损失在内的毛供水量,按取水水源分为地表水、地下水、其他(指污水处理再利用量、集雨工程供水量和海水淡化水量)三种水源。供水分析以海河流域 2007 年水资源公报为主,对地表水、地下水和其他水的供水构成进行分析,见表 4-8。

表 4-8 海河流域 2007 年供水量

分区	地表水 供水量 (亿 m ³)	供水比重 (%)	地下水 供水量 (亿 m ³)	供水比重 (%)	其他 供水量 (亿 m ³)	供水比重 (%)	总供水量 (亿 m ³)
滦河及 冀东沿海	13.1	34.0	25.3	65.6	0.1	0.4	38.5
海河北系	24.5	30.0	52.2	63.9	5.0	6.1	81.6
海河南系	44.7	23.1	148.2	76.7	0.5	0.2	193.3
徒骇马 颊河	46.4	65.3	24.4	34.3	0.3	0.4	71.0
北京	5.7	16.3	24.2	69.5	5.0	14.2	34.8
天津	16.5	70.5	6.8	29.1	0.1	0.3	23.4
河北	39.0	19.6	159.5	80.1	0.5	0.3	199.1
山西	8.2	42.1	11.3	57.9	0.0	0.0	19.6
河南	15.6	37.3	26.2	62.7	0.0	0.0	41.8
山东	43.0	68.1	19.9	31.5	0.3	0.4	63.2
内蒙古	0.6	25.1	1.8	74.9	0.0	0.0	2.4
辽宁	0.1	14.7	0.3	85.3	0.0	0.0	0.3
海河流域	128.6	33.5	250.0	65.0	5.8	1.5	384.5

由表 4-8 可知,海河流域 2007 年总供水量为 384.5 亿 m³,其中地表水供水量为 128.6 亿 m³,占总供水量的 33.5%,地下水供水量 250.0,占总供水量的 65.0%,说明海河流域主要供水水源是地下水资源。4 个水资源二级区中,仅徒骇马颊河以地表水供水为主,供水量 46.4 亿 m³,占总供水量的 65.3%,但地下水供水比重也达到 34.3%,其他区域均以地下水供水为主要供水来源,地下水供水比重均在 63.0%以上,其中海河南系地下水供水比重高达 76.7%,海河北系其他供水比重达 6.1%,较为突出。8 个省级行政区中,天津市和山东省以地表水供水为主,

地表水供水比重分别为 70.5%和 68.1%，其他省市均以地下水为主要供水来源，其中河北省最高，地下水供水比重高达 80.1%，北京市其他供水来源比重较高，占到总供水量的 14.2%。

(2) 供水分析

表 4-9 海河流域 1990~2007 年供水量

年份	供水量 (亿 m ³)								供水比重 (%)			
	当地 地表 水	引黄水	地下水				非常 规水	供水 总量	当地 地表 水	引 黄 水	地 下 水	非 常 规 水
			浅层 地下 水	深层 承压 水	微咸 水	小计						
1990	111.6	32.9	188.1	32.0	3.1	223.2	0.0	367.7	30.3	8.9	60.7	0.0
1991	117.8	52.4	196.6	28.5	1.6	226.7	2.9	399.7	29.5	13.1	56.7	0.7
1992	117.9	57.3	211.8	30.9	3.2	245.9	2.7	423.8	27.8	13.5	58.0	0.6
1993	100.6	64.5	211.5	31.3	2.3	245.0	2.4	412.5	24.4	15.6	59.4	0.6
1994	101.0	57.1	210.4	32.5	2.1	245.0	1.2	404.3	25.0	14.1	60.6	0.3
1995	110.9	44.8	198.5	35.5	3.1	237.1	2.4	395.2	28.1	11.3	60.0	0.6
1996	117.0	47.4	204.4	34.0	2.0	240.5	11.1	416.0	28.1	11.4	57.8	2.7
1997	113.0	53.3	224.8	37.8	2.5	265.1	8.5	439.9	25.7	12.1	60.3	1.9
1998	106.9	53.7	220.1	38.7	3.1	261.9	1.4	424.0	25.2	12.7	61.8	0.3
1999	100.2	61.2	225.0	41.0	2.8	268.7	1.4	431.5	23.2	14.2	62.3	0.3
2000	99.1	37.4	223.5	37.4	2.7	263.6	2.3	402.3	24.6	9.3	65.5	0.6
2001	84.2	38.6	224.8	40.8	2.3	267.9	1.3	392.0	21.5	9.9	68.3	0.3
2002	81.6	46.4	225.9	41.7	2.6	270.2	1.7	399.8	20.4	11.6	67.6	0.4
2003	77.5	36.1	219.1	38.7	3.6	261.4	2.0	377.1	20.6	9.6	69.3	0.5
2004	75.9	42.3	207.4	36.2	3.3	247.0	2.8	368.0	20.6	11.5	67.1	0.8
2005	87.7	37.3	213.0	36.9	3.1	253.0	5.3	383.2	22.9	9.7	66.0	1.4
2006	87.9	46.3	181.3	67.2	3.3	251.9	6.9	392.9	22.4	11.8	64.1	1.7
2007	85.8	42.8	179.0	68.5	2.5	250.0	5.8	384.5	22.3	11.1	65.0	1.5
多年 平均	98.7	47.3	209.2	39.4	2.7	251.3	3.5	400.8	24.6	11.7	62.8	0.9

由表 4-9、图 4-1、图 4-2、图 4-3、图 4-4、图 4-5 分析可知，1990~2007 年海河流域总供水量在 368~440 亿 m³ 之间变化，多年平均总量为 400 亿 m³。1990 年供水总量为 367.7 亿 m³，至 1995 年降为 395.2 亿 m³，此后呈稳定增长趋势。至 1997 年达到 440 亿 m³，之后又有所下降。20 世纪 90 年代以来，地下水成为海河流域主要的供水水资源，供水量逐年呈上升趋势，供水比重也由 1990 年的 61% 上升至 2007 年的 65%，多年平均地下水供水比重也达到了 62%，可见地下水供水量和供水比重均比 1990 年有所上升。与之相对应的是当地地表水供水量

由1990年的116.1亿 m^3 下降至2007年的85.8亿 m^3 ，供水比重也由30.3%下降至22.3%，基本呈下降趋势。浅层地下水开采量由1990年的188亿 m^3 达到2002年的高峰225亿 m^3 ，之后有所下降，至2007年为179亿 m^3 ，平均开采量为209亿 m^3 ；深层承压水开采量由1990年的32亿 m^3 上升至2007年的69亿 m^3 ，尤其2006年、2007年增加较为明显，多年平均为39亿 m^3 ，多数年份稳定在31亿~42亿 m^3 之间。非常规水供水比重近年来自2005年以后有增加趋势，2005年、2006年和2007年连续为1.4%、1.7%和1.5%，较之前的2004年的0.8%有较为明显的上升，反映了近些年来对水资源利用途径的多样化趋势。

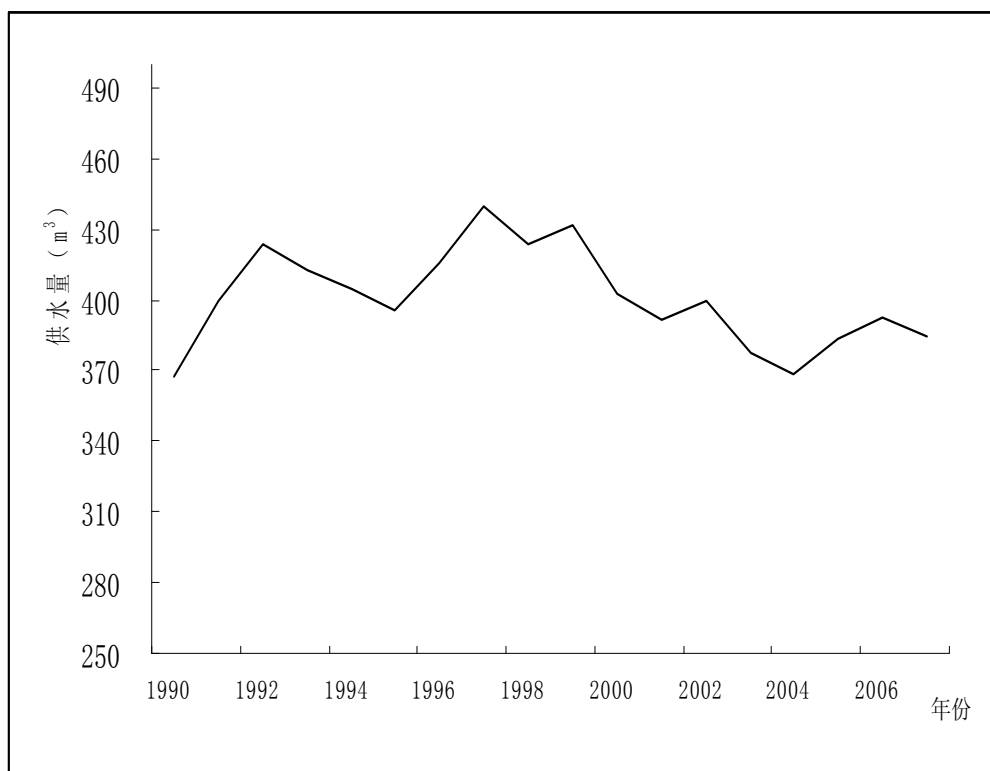


图 4-1 海河流域 1990~2007 年总供水量趋势

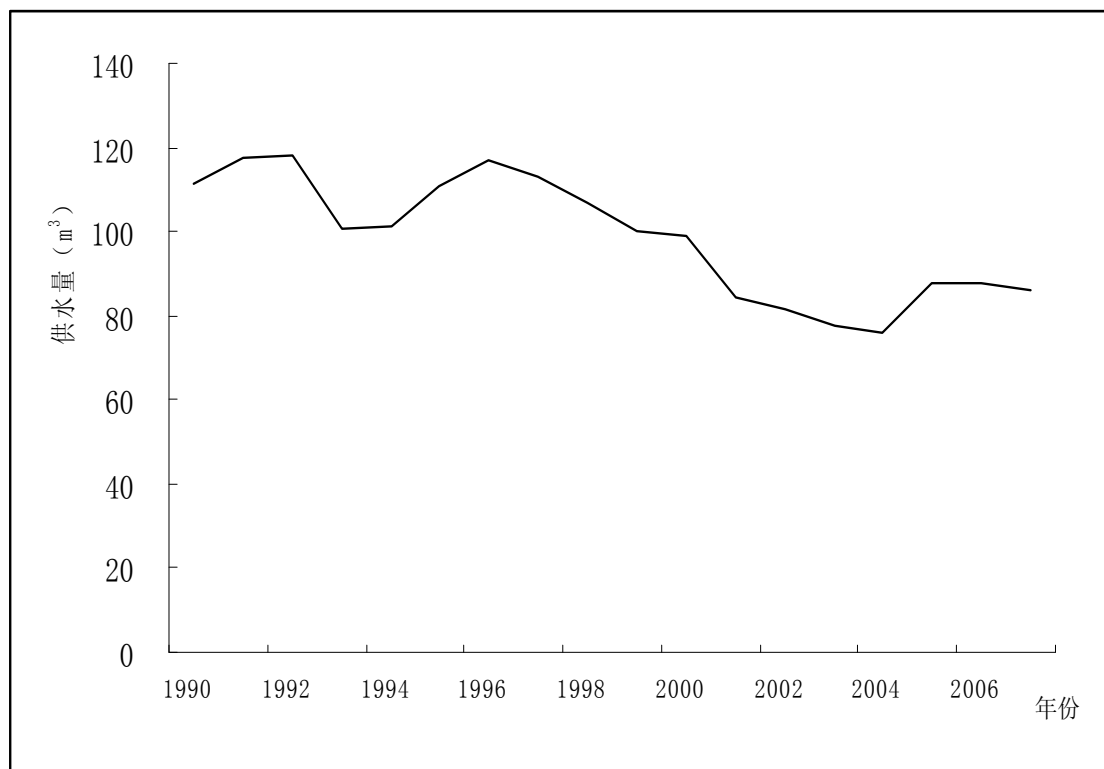


图 4-2 海河流域 1990~2007 年地表水供水量趋势

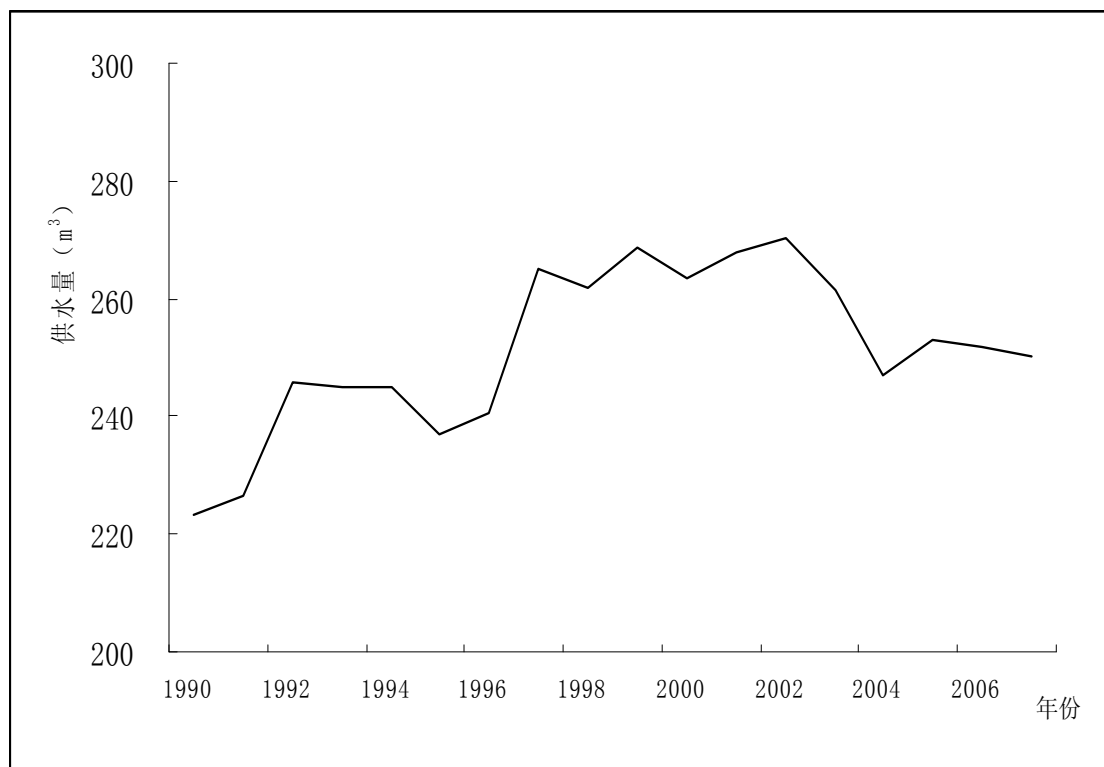


图 4-3 海河流域 1990~2007 年地下水供水量趋势

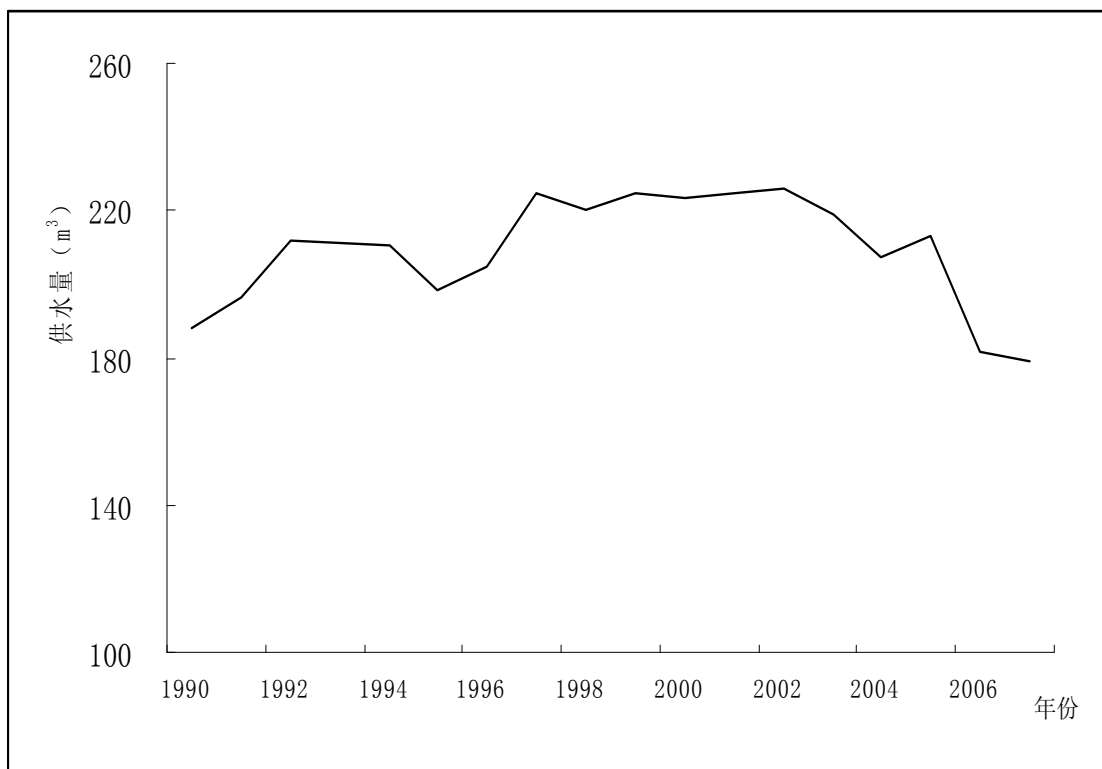


图 4-4 海河流域 1990~2007 年浅层地下水供水量趋势

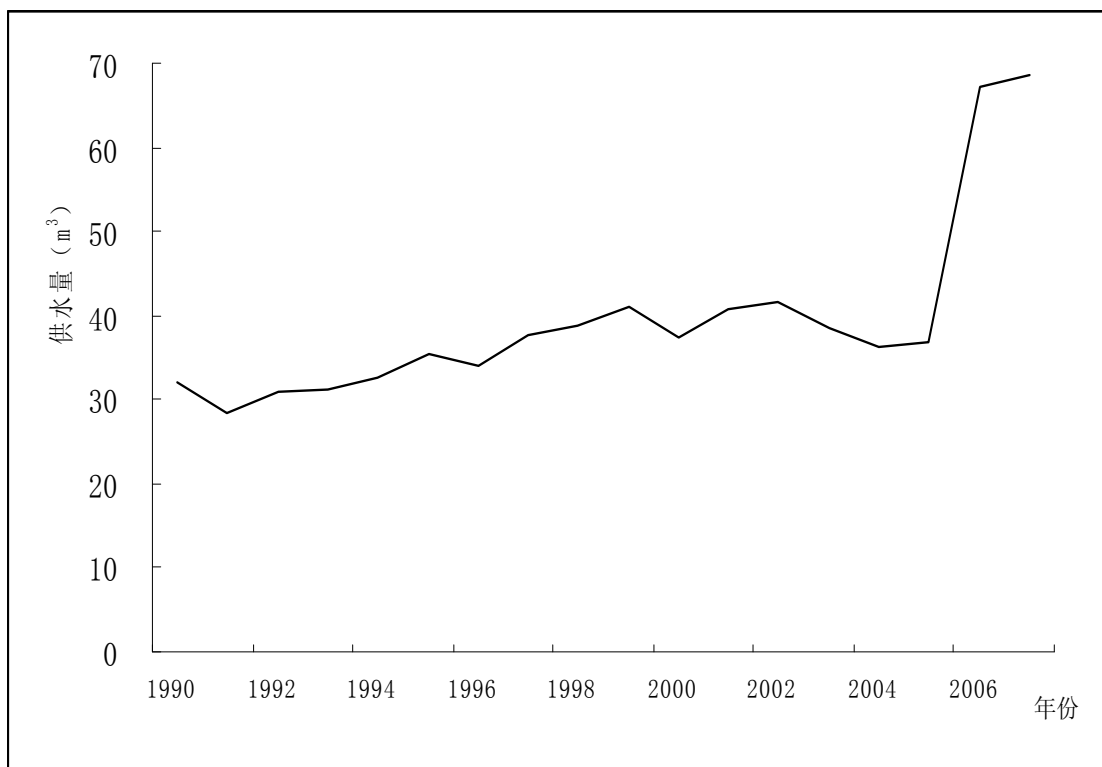


图 4-5 海河流域 1990~2007 年深层承压水供水量趋势

4.4.2.2 用水分析

(1) 用水比重

表 4-10 海河流域 2005 年用水比重

分区	农业 (%)	工业 (%)	生活 (%)	生态 (%)
滦河及冀东沿海	67.7	19.7	12.2	0.3
海河北系	57.4	16.2	24.1	2.4
海河南系	70.6	15.6	12.9	0.9
徒骇马颊河	83.1	7.0	8.9	1.0
北京	35.1	18.1	42.1	4.7
天津	58.5	19.3	20.1	2.1
河北	74.6	13.0	11.8	0.6
山西	50.6	35.1	13.8	0.6
河南	67.9	19.5	10.8	1.8
山东	85.5	5.4	8.5	0.6
内蒙古	62.3	20.8	16.2	0.6
辽宁	61.5	15.4	23.1	0.0
海河流域	70.0	14.5	14.4	1.2

由上表 4-10 可知，海河流域整体从用水比重分析，整个流域以农业用水为主，占到 70%，工业和生活用水基本持平，分别占 14.5% 和 14.4%。4 个水资源二级区中，基本以农业用水比重较大，其中徒骇马颊河农业用水比重最大，达到 83.1%。8 个省级行政区中，北京市以生活用水比重较大，达到 42.1%，其他省区以农业用水为主，其中山东省农业用水比重最大，达到 85.5%。

(2) 用水水平分析

由下面的表 4-11 可知，海河流域 2005 年人均用水量为 283m^3 ，在全国水资源一级区中处于较低水平，仅相当于全国平均水平的 63%。海河流域万元 GDP 用水量为 147m^3 ，仅相当于全国平均水平的 48%，也处于较低水平。受人口密度、经济发展布局、节水水平、水资源条件等多种因素的影响，各水资源二级区和省区人均生活用水指标差别较为明显。4 个水资源二级区中，以农业灌溉用水为主的徒骇马颊河人均用水量高达 405m^3 。8 个省级行政区中，以农业灌溉为主的山东省人均用水量高达 411m^3 ；农业、工业用水较为均衡的河南、河北为 306m^3 、 293m^3 ；城市用水较多的天津、北京为 224m^3 、 221m^3 ；用水效率低、经济相对落后的山西、内蒙古和辽宁分别为 185m^3 、 156m^3 和 89m^3 。海河流域万元 GDP 用水量，4 个水资源二级区中，海河北系用水效率最高，万元 GDP 用水量仅为 91m^3 ；8 个省级行政区中，用水效率较高的天津和北京仅有 63m^3 和 51m^3 ，

农业灌溉用水量较高的山东为 302 m³。

表 4-11 海河流域 2005 年用水指标

分区	人均用水量 (m ³)	万元 GDP 用水量 (m ³)	城镇人均生活用水量 (L/d)	农村人均生活用水量 (L/d)	工业增加值用水量 (m ³ /万元)	农田灌溉亩均用水量 (m ³)
滦河及冀东沿海	344	200	170	104	85	375
海河北系	262	91	220	100	54	330
海河南系	255	152	145	65	72	225
徒骇马颊河	405	294	143	92	54	260
北京	224	51	269	161	38	386
天津	221	63	136	90	24	306
河北	293	199	150	74	57	236
山西	185	145	102	53	122	215
河南	306	233	162	70	96	310
山东	411	302	131	92	46	257
内蒙古	156	143	161	40	59	135
辽宁	89	169	93	63	152	70
海河流域	283	147	173	78	66	256

生活用水方面，海河流域城市和农村人均生活用水量分别为 173 L/d 和 78 L/d，处于全国平均水平。生活用水指标的高低与居民生活水平、水资源条件、生活习惯和节水水平等因素密切相关，通常情况，生活水平高、水资源充沛的地区居民用水水平较高。4 个水资源二级区中，海河北系城镇人均生活用水量最高，农村人均生活中，用水滦河及冀东沿海和海河北系较高，海河南系最低，徒骇马颊河也较低。各省市相差比较悬殊，最高为北京，城镇和农村人均生活用水分别高达 269 L/d 和 161 L/d，城镇人均生活用水最低的是辽宁，只有 93 L/d，农村人均生活用水最低的是内蒙古，仅有 40 L/d。

工业用水水平可用工业万元增加值用水量表达，其用水量为工业取用的新鲜水量，不包括重复利用的水量。海河流域 2005 年工业万元增加值用水量为 66m³，仅相当于全国平均水平的 40%，在全国位居前列，处于先进水平。分水资源二级区看，海河北系和徒骇马颊河较低，滦河及冀东沿海和海河南系较高。分省级行政区看，山西、内蒙古、辽宁可能由于火电、化工等高耗水工业所占比例较大，工业万元增加值用水量较高，天津、北京由于电子信息技术等高科技产业较发达，

低耗水工业比重较大，用水指标较低，仅为 24m^3 和 38m^3 。

(3) 用水趋势变化

表 4-12 海河流域 1990~2007 年用水比重

年份	工业 (%)	农业 (%)	生活 (%)	生态 (%)
1990	14.7	76.4	8.6	0.4
1991	15.6	76.3	8.0	0.2
1992	16.6	75.9	7.4	0.2
1993	16.9	75.1	7.9	0.2
1994	17.4	74.0	8.5	0.2
1995	15.8	74.4	9.4	0.4
1996	17.2	73.2	9.4	0.3
1997	15.8	74.9	9.0	0.3
1998	15.9	73.8	10.2	0.1
1999	16.1	73.2	10.4	0.3
2000	17.2	71.1	11.3	0.4
2001	15.9	72.5	11.4	0.2
2002	15.5	73.1	11.3	0.1
2003	15.8	71.5	12.2	0.5
2004	15.4	71.7	12.2	0.7
2005	15.1	70.8	13.0	1.0
2006	14.7	71.0	14.4	1.2
2007	13.7	71.0	14.7	1.8
多年平均	15.8	73.3	10.5	0.5

特别注明：为尽量保证数据连续性和可靠性，表 4-12、表 4-13 的 1990~2005 年数据整理计算自《海河流域水资源评价》（任宪韶主编，2007），2006~2007 年数据整理计算自《海河流域水资源公报》，同。而表 5-1 数据全部整理自《海河流域水资源公报》，因来源不同，故数据并不完全一致。

由上表 4-12 及图 4-6 可知，工业用水比重变化可分成 2 个阶段，1990~2000 年呈上升趋势，2000~2007 年呈下降趋势。农业用水比重趋势则比较简单，总体呈下降趋势，生活用水比重总的趋势呈上升趋势，生态用水比重在 2002 年前变化趋势比较稳定，但自 2002 年后总体呈增加趋势，尤其 2005~2007 年上升趋势较为明显，说明海河流域的水生态环境在逐步改善。多年平均水平来看，海河流域农业用水比重较大，开展农业节水工作对于有效利用水资源，节约用水具有重要意义，生活用水比重逐年提高，所以也应在不影响人民生活水平的前提下，加强生活节水技术和意识的提高。

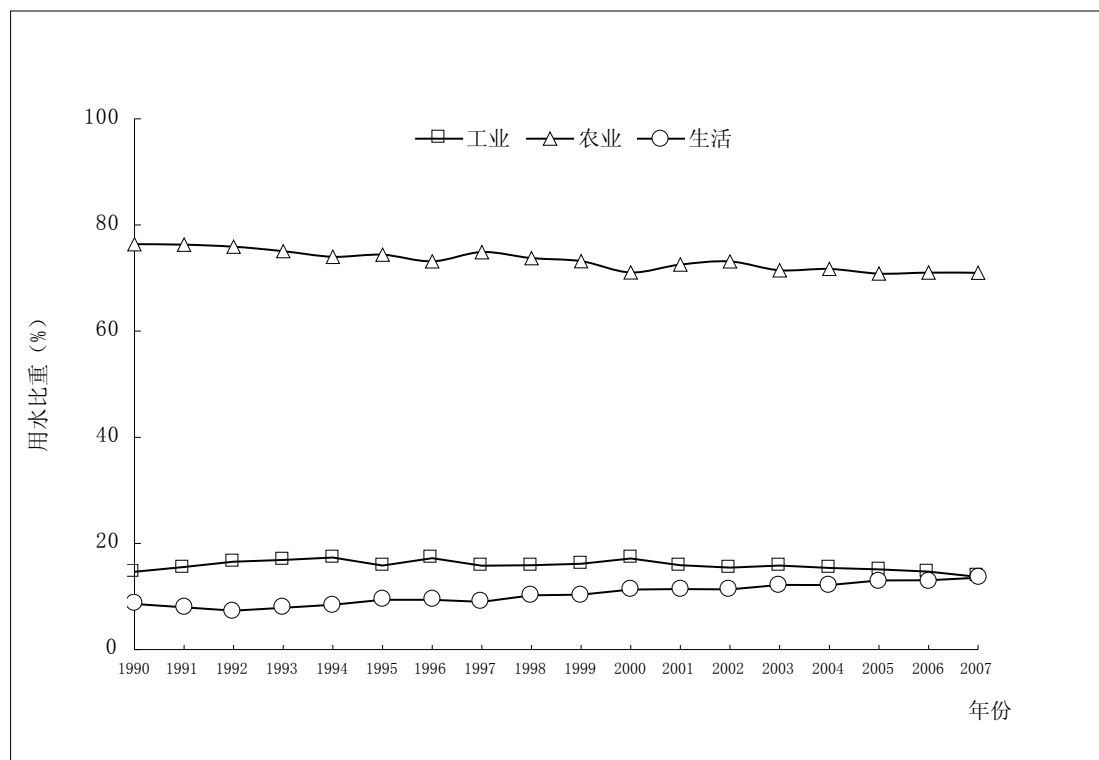


图 4-6 海河流域 1990~2007 年用水比重趋势

表 4-13 海河流域 1990~2007 年用水量

年份	工业 (亿 m ³)	农业 (亿 m ³)	生活 (亿 m ³)	生态 (亿 m ³)	总用水量 (亿 m ³)
1990	54.04	281.55	31.68	1.45	368.72
1991	61.67	302.07	31.48	0.73	395.95
1992	69.88	320.43	31.03	0.73	422.07
1993	69.65	309.70	32.49	0.74	412.58
1994	70.12	299.03	34.23	0.74	404.12
1995	62.49	294.06	37.09	1.55	395.19
1996	71.22	302.90	38.78	1.17	414.07
1997	68.81	326.28	39.14	1.47	435.70
1998	67.39	312.53	43.33	0.50	423.75
1999	69.09	313.07	44.38	1.29	427.83
2000	69.13	285.87	45.51	1.81	402.32
2001	62.28	284.34	44.74	0.63	391.99
2002	61.79	292.34	45.37	0.30	399.80
2003	59.66	269.41	46.04	1.90	377.01
2004	56.58	263.93	44.72	2.75	367.98
2005	57.96	271.46	49.98	3.85	383.25
2006	56.84	274.72	56.55	4.58	392.69
2007	52.06	269.37	56.33	6.71	384.47
多年平均	63.37	292.95	41.83	1.83	399.97

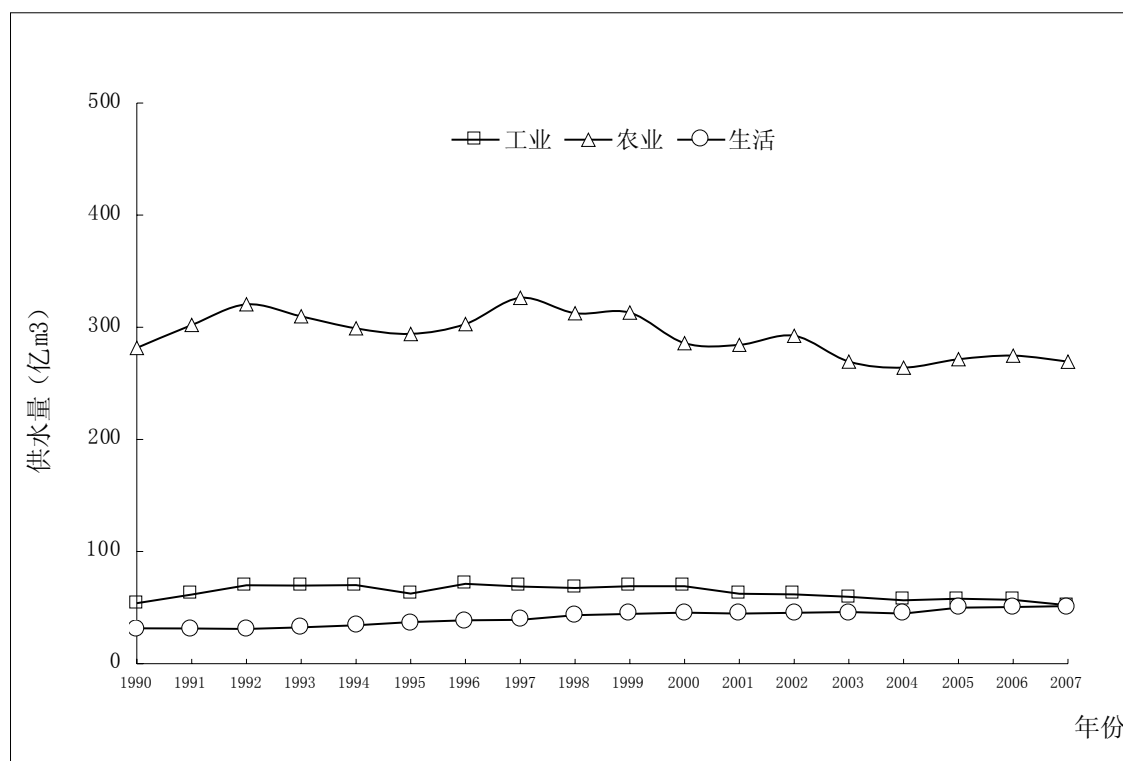


图 4-7 海河流域 1990~2007 年用水量趋势

由表 4-13、图 4-7 可知，1990~2007 年，海河流域总用水量总体呈上升态势，在工业、农业、生活用水方面趋势不尽相同。

工业用水量变化可分为三个阶段，1990~1992 年呈增长趋势，1992~2000 年，随着产业结构的调整和节水措施的加强，工业用水量大致维持在 70 亿 m^3 左右；2000~2007 年，工业用水量的趋势转变为下降趋势，由 2000 年的 69 亿 m^3 下降至 2007 年的 52 亿 m^3 。2000 年后出现的下降趋势可能与节水技术和政策的开展有关。

农业用水量除受到降水和径流丰枯影响外，还受种植结构和节水水平等多种因素影响，用水量呈现波动，总体趋势是稳中有降，尤其自 2000 年以后下降趋势较为明显。

生活用水量总体上呈现逐年增加趋势。随着城市化进程的加快和人民生活水平的提高，生活用水量一直保持增长的势头，生活用水量已由 1990 年的 31 亿 m^3 增长至 2007 年的 56 亿 m^3 。

生态用水量自 2003 年来呈现增长的趋势，已由 1990 年的 1.45 亿 m^3 增长至 2007 年的 6.71 亿 m^3 。

4.4.3 水资源开发利用程度

水资源开发利用程度可用用水量占水资源总量的百分比来表示其严重程度，下表 4-14 是国际上对水资源利用程度达成的共识。

表 4-14 国际上对水资源利用程度及其水问题的共识

紧张程度	用水量占水资源总量比例 (%)	水问题
用水紧张	5~10	个别月份可能出现用水紧张
用水中度紧张	10~20	出现周期性用水紧张
用水中高度紧张	20~40	经受持续性缺水
用水高度紧张	>40	出现严重水荒

表 4-15 海河流域 2001~2007 年水资源开发利用程度

分区	地表水开发利用程度 (%)	地下水开发利用程度 (%)	水资源总体开发程度 (%)
滦河及冀东沿海	59.3	107.8	105
海河北系	111.9	146.5	152
海河南系	115.6	191.4	166
徒骇马颊河	395.1	184.7	230
北京	113.4	238.7	187.1
天津	240.7	174.8	235.3
河北	84.6	263.2	185.0
山西	39.6	45.1	61.4
河南	112.0	151.7	142.9
山东	140.2	140.6	228.7
内蒙古	20.2	52.8	60.9
辽宁	8.0	31.4	29.8
海河流域	117.9	194.3	168.2

根据表 4-14 标准，由表 4-15 可知，海河流域从地表水开发利用程度、地下水开发利用程度和水资源总体利用开发程度均达到高度开发利用程度，达到高度用水紧张程度的标准。其中地下水开发利用程度最高，地下水资源面临严峻的形式。

从地表水开发利用程度来看，4 个水资源二级区均达到用水高度紧张程度，

滦河及冀东沿海开发利用程度较低；8个省级行政区中，辽宁达到用水紧张程度，山西和内蒙古达到用水中度紧张，其他省区均达到用水高度紧张程度。

从地下水开发利用程度来看，4个水资源二级区均达到用水高度紧张程度；8个省级行政区中，除辽宁达到用水中高度紧张程度外，其他省区均达到用水高度紧张程度。

从水资源总体开发程度来看，除辽宁仅达到用水中高度紧张程度外，其他省市均达到用水高度紧张程度。

4.4.4 供需分析

以多年平均需水量的需水水平作为需水分析的基础，可直接采用多年的实际用水量作为计算所需的需水量。在供水方面，以现状供水能力并考虑多年平均水资源量的衰减，在需水方面是以现状用水水平且不考虑新增节水措施的前提下，来分析供需平衡的水资源矛盾。其目的是充分展示现状已有和可能发生的缺口，为合理配置节水、挖潜、加强污水治理和回收利用及其他新增节水措施的分析工作提供定量或定性的研究基础。不同水平年的供水能力将因为供水工程变化、人类对产水能力影响等有所变化，因此以现状为基础的供需缺口，该缺口清晰地表现了在无直接供水和节水工程增加的情景下的区域水资源供需状况，充分揭示现状中的水资源供需矛盾，从而对无水资源投入的现阶段水资源供需情势有一个清醒的定量认识。

供需平衡分析通常要从当地地表水中将最小生态需水量扣除后作为其社会经济和生活的水资源可利用量，对超标污水利用，从现状供水量中予以扣除，对过境水量，按水资源使用权的界定量或现状开发利用量计算。一般对于地下水可利用量，首先在供需分析中除特殊情况外不再考虑深层承压水的开采利用，其次在多年平均采补平衡的原则下确定浅层地下水的可开采量。

表 4-16 海河流域现状年不同频率的缺水分布

分区	缺水量 (亿 m ³)				缺水率 (%)			
	50%	75%	95%	多年平均	50%	75%	95%	多年平均
滦河及冀东沿海	4.43	5.42	8.46	5.26	10.1	12.4	19.3	12.0
海河北系	6.81	8.97	15.62	8.62	7.3	9.7	16.8	9.3
海河南系	59.69	64.02	77.30	63.32	25.8	27.6	33.4	27.3
徒骇马颊河	13.20	15.00	20.52	14.71	15.6	17.7	24.2	17.4
北京	0.00	0.63	3.80	0.46	0.0	1.5	9.3	1.1
天津	4.61	5.23	7.13	5.13	15.8	17.9	24.4	17.6
河北	60.41	64.87	78.58	64.15	25.4	27.3	33.0	27.0
山西	0.00	0.49	2.41	0.39	0.0	2.0	9.7	1.6
河南	8.95	9.74	12.16	9.61	22.2	24.2	30.2	23.9
山东	10.48	12.16	17.31	11.89	13.6	15.8	22.4	15.4
内蒙古	0.57	0.62	0.78	0.61	20.9	22.9	29.0	22.6
辽宁	0.00	0.00	0.03	0.00	0.0	0.4	8.3	0.0
海河流域	84.44	93.70	122.17	92.21	18.6	20.7	27.0	20.4

由表 4-16 分析可得,海河流域现状需水量的条件下,在不同频率 50%、75%、95%下,缺水率分别为 18.6%、20.7%、27.0%,多年平均缺水率为 20.4%。按 4 个水资源二级区统计,海河南系为海河流域最缺水的地区,缺水率在 50%、75%、95%频率下分别为 25.8%、27.6%、33.4%,多年平均的缺水率为 27.3%,多年平均缺水量约占流域平均缺水总量的 70%。其次为徒骇马颊河,多年平均缺水量约占总缺水量的 16%,多年平均缺水率达到 17.4%。再次是滦河及冀东沿海,缺水率最低的是海河北系,多年平均缺水率多年平均为 9.3%。按 8 个省行政区中,在 50%频率下,北京、山西和辽宁水资源供需基本平衡,多年平均和 75%频率下,辽宁水资源供需基本平衡。75%、95%频率及多年平均下,河北是缺水最严重的省区,其多年平均缺水率为 27.0%,以下以缺水严重程度大小排列依次是河南、内蒙古、天津、山东、山西。

4.4.5 水环境质量

4.4.5.1 污染源

海河流域的水污染可分为点污染源和非点源污染(面污染)。点污染主要是工业和城镇生活的污染排放,非点源污染源主要是城镇地表径流、化肥农药、农

村生活污水及固体废弃物、水土流失、分散式饲料禽畜废水排放等。

表 4-17 海河流域污染贡献率

分区	点污染源贡献率 (%)				非点污染源贡献率 (%)			
	COD	氨氮	总氮	总磷	COD	氨氮	总氮	总磷
滦河及冀东沿海	74.9	63.0	0.0	0.0	25.1	37.0	100.0	100.0
海河北系	80.5	75.2	65.2	38.0	19.5	24.8	34.8	62.0
海河南系	79.6	68.7	25.8	6.3	20.4	31.3	74.2	93.7
徒骇马颊河	77.6	94.7	13.8	8.7	22.4	5.3	86.2	91.3
北京	92.9	86.7	88.9	69.6	7.1	13.3	11.1	30.4
天津	92.5	96.9	0.0	0.0	7.5	3.1	100.0	100.0
河北	71.5	60.2	0.0	0.0	28.5	39.8	100.0	100.0
山西	58.8	62.3	37.4	24.0	41.2	37.7	62.6	76.0
河南	92.0	96.2	76.0	55.0	8.0	3.8	24.0	45.0
山东	77.5	95.1	0.0	0.0	22.5	4.9	100.0	100.0
内蒙古	27.8	51.9	14.5	15.8	72.2	48.1	85.5	84.2
海河流域	79.0	74.7	34.0	13.2	21.0	25.3	66.0	86.8

由上表 4-17 可知，海河流域 2000 年现状 COD 污染物中，点源污染贡献率占到 79%，非点源污染贡献率 21%，污染以点源污染为主；氨氮污染物中，点源占 74.7%，非点源占 25.3%，以点源污染为主。总氮污染中，点源贡献率占 34%，非点源占 66%，以非点源为主；总磷污染中，点源占 13.2%，非点源占 86.8%，以非点源为主。以上说明海河流域 COD 和氨氮主要来源于点源排放污染，总氮和总磷主要来源于非点源污染，因此应针对不同污染物类型采取不同的防治重点。

4 个水资源二级区中，各二级区 COD 和氨氮主要来源于点源排放污染；总氮污染物的排放，除海河北系以点源污染为主，达到 65.2%，其他区域均以非点源污染为主；总磷污染物的排放，各区域主要来源于非点源污染。

8 个省级行政区中，COD 污染物排放，除内蒙古主要来源于非点源污染，达 72.2%，其他省区均主要来源于点源污染；氨氮排放中，内蒙古来源点源和非点源各占 51.9%和 48.1%，接近平衡水平，其他省区均主要来源于点源污染。总氮污染中，北京和河南主要来源于点源污染，其他省区来源于非点源污染。总磷污染中，北京和河南以点源污染为主，其他省区以非点源污染为主。

4.4.5.2 地表水水质

河流、水库水质分全年期、汛期、非汛期三个时段评价。根据污染情况水质可分为：未受污染水质（包括 I、II、III类）、受污染水质（包括IV、V及劣V类）和严重污染水质（劣V类）。评价基准年为 2005 年，评价河长为 11808km，该次评价的评价标准采用 GB3838-2002《地表水环境质量标准》，评价方法采用单指标法，评价项目包括水温、pH、溶解氧、高锰酸盐指数、化学需氧量、五日生化需氧量、氨氮、总氮、总磷、铜、锌、氟化物、砷、汞、镍、镉、铬（六价）、铅、氰化物、挥发酚、石油类、硫化物和大肠杆菌群 22 个项目。集中式地表水源地增加硫酸盐、氯化物、硝酸盐、铁、锰等 5 项。海河流域的地表水质评价结果表明（见表 5-18），海河流域河流水质污染主要超标指标是氨氮、化学需氧量、高锰酸盐指数、五日生化需氧量、挥发酚、总磷和溶解氧等，部分河段氟化物、石油类、镉、铅、汞等也存在超标现象。在污染物中，有机污染严重与无机污染，尤其是氨氮，污染河长占评价河长的 60.4%；高锰酸盐和化学需氧量污染也较为严重，分别占评价河长的 30.5%和 39.8%；氟化物和重金属污染相对较轻。

表 4-18 海河流域 2005 年河流水质综合评价

分区	I类占评价	II类占评价	III类占评价	IV类占评价	V类占评价	劣V类占评
	河长 (%)	河长 (%)	河长 (%)	河长 (%)	河长 (%)	价河长 (%)
滦河及冀东沿海	2.7	22.7	34.2	9.5	4.6	26.3
海河北系	0.0	33.7	16.2	0.1	5.5	44.5
海河南系	2.7	17.4	13.4	3.2	0.5	62.8
徒骇马颊河	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0
北京	0.0	55.6	25.0	0.8	4.5	14.1
天津	0.0	12.6	0.0	0.0	0.0	87.4
河北	2.6	28.0	25.2	0.2	3.3	40.7
山西	0.0	0.0	22.6	14.8	6.4	56.1
河南	3.3	7.2	0.0	8.5	0.0	80.9
山东	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0
内蒙古	0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0
海河流域	1.8	20.8	17.6	3.6	2.5	53.6

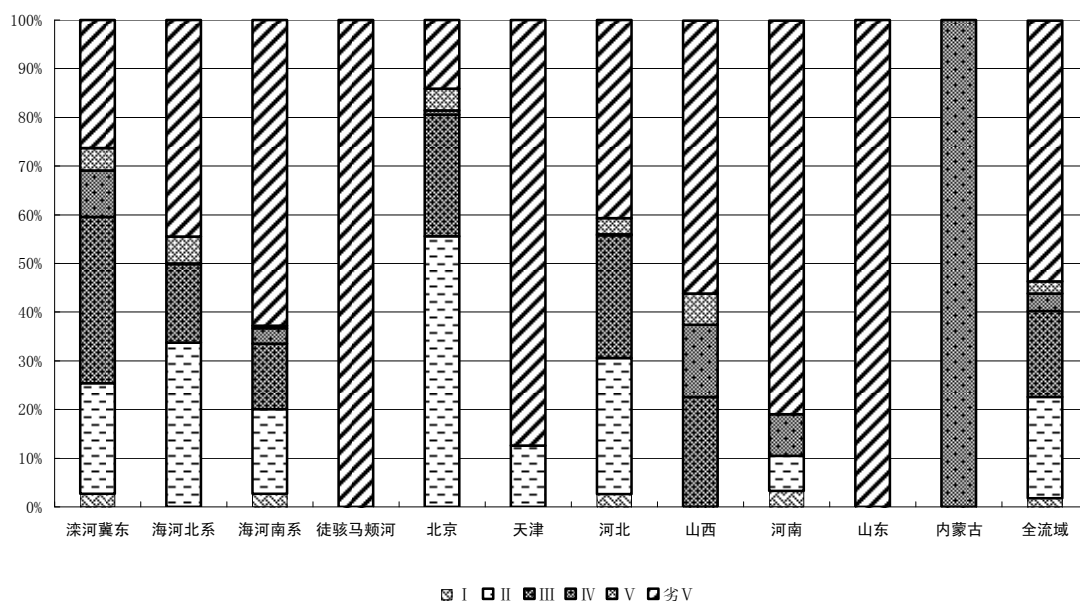


图 4-8 海河流域 2005 年河流水质比例

由图 4-8 可知，河流水质综合评价表明，在 11808km 的评价河长中，全年优于和达到优质 III 类水质标准的河长达到评价河长的 40.2%，受污染河长则达到评价河长的 59.8%，其中严重污染的河长比例达 53.7%，海河流域污染较为严重。

4 个水资源二级区中，海河流域的滦河及冀东沿海诸河和海河北系的水质状况相对较好，优于或达到 III 类水质标准的河长达到评价河长的比例分别为 59.6% 和 49.9%；海河南系次之，劣于 III 类水质标准的河长比例高达 66.5%，劣于 V 类水质标准的河长比例为 62.8%；徒骇马颊河流域全部劣于 III 类水质标准，基本都属于劣 V 类水质，在二级区中属水质最差区域。

7 个省级行政区中，北京市水质状况最好，有 80.6% 的评价河长优于或达到 III 类水质标准；河北省河流水质状况次之，55.8% 的评价河长优于或达到 III 类水质标准；河南和山西劣于 V 类水质标准河长均超过评价河长的 50%；天津市劣于 V 类水质标准的河长占评价河长的 87.4%；山东省全部劣于 V 类水质标准，水质状况最差。

4.4.5.3 地下水水质

地下水水质是指地下水的物理、化学和生物学特征和性质，评价内容包括地下水化学分类、地下水水质现状、近期地下水水质变化趋势、地下水污染分析等方面。

表 4-19 海河流域 2005 年地下水水质分类面积比

分区	II类占评价	III类占评价	IV类占评价	V类占评价
	面积 (%)	面积 (%)	面积 (%)	面积 (%)
滦河及冀东沿海	0.0	0.0	69.5	30.5
海河北系	2.6	29.9	40.4	28.6
海河南系	0.0	31.7	23.4	44.9
徒骇马颊河	0.0	1.2	13.8	85.0
北京	9.6	37.8	47.8	4.8
天津	0.0	0.0	14.9	85.1
河北	0.0	29.4	30.7	39.8
山西	1.3	62.4	34.5	1.8
河南	0.0	10.3	33.3	56.4
山东	0.0	1.3	11.6	87.1
海河流域	0.5	23.0	26.8	49.6

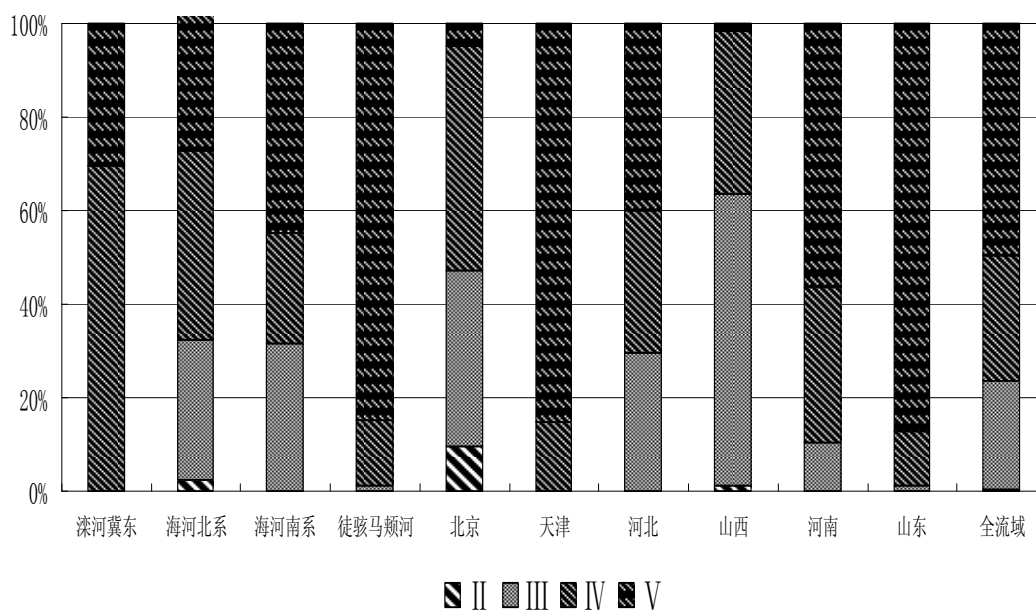


图 4-9 海河流域地下水水质比例图

从表 4-19、图 4-9 中可看出，海河流域整体的地下水水质较差。其中，III 以上类水质仅占评价面积的 23.6%，IV 类和 V 类水质占总评价面积的 76.4%。

4 个水资源二级区中，滦河及冀东沿海和徒骇马颊河水水质较差，海河南系和海河北系相对较好，但 4 个分区地下水水质相差不大。6 个省级行政区中，北京和山西地下水水质较好，其中山西水质最好，其他省区均比较差。

表 4-20 海河流域 2005 年地下水水质污染程度

分区	未污染区 (%)	轻度污染区 (%)	重度污染区 (%)
滦河及冀东沿海	61.7	28.9	9.4
海河北系	65.6	11.1	23.4
海河南系	50.8	26.5	22.7
徒骇马颊河	68.3	25.0	6.8
北京	95.8	3.4	0.8
天津	12.8	12.9	74.3
河北	51.0	28.2	20.8
山西	96.6	0.4	3.0
河南	61.5	30.3	8.2
山东	70.7	23.6	5.7
海河流域	58.3	23.1	18.6

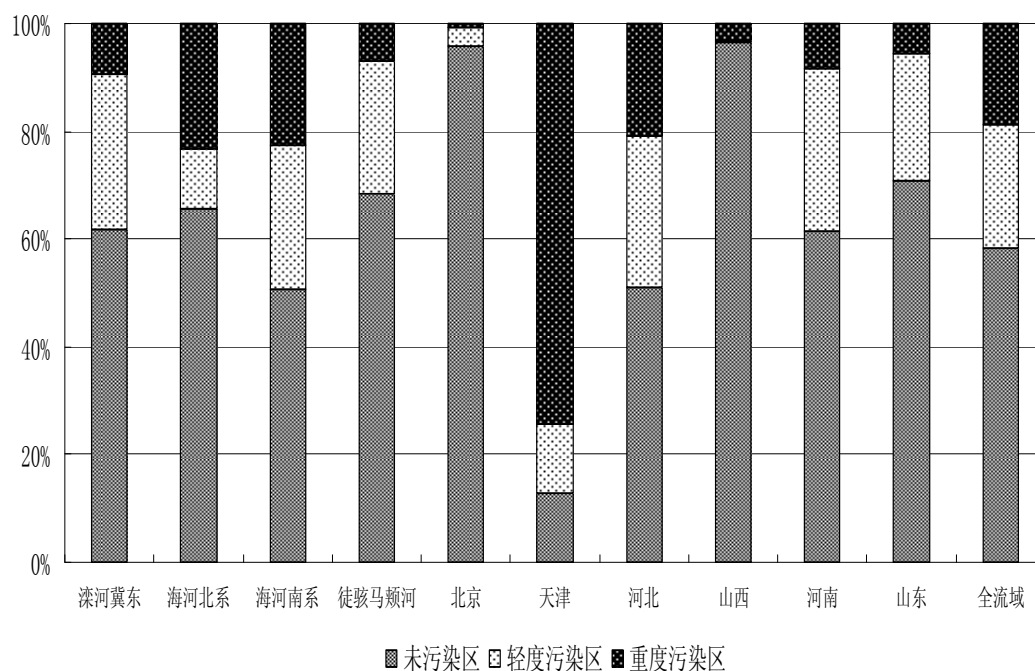


图 4-10 海河流域 2005 年污染比例

对于地下水水质污染的评估，一般选用挥发酚、氨氮、高锰酸盐、硝酸盐、亚硝酸盐、砷、镉、铬、大肠杆菌等 9 项指标作为污染指标。IV 类水定义为轻度污染区，V 类和劣 V 类水的区域定义为重度污染区。

由表 4-20 可知，从海河流域整体来看，地下水的污染情况比较严重。未污染区仅占评价面积的 58.3%，而轻度污染区占 23.1%，重度污染区占 18.6%，污染区域接近了评价面积的一半，达到 41.7%。

从图 4-10 可知, 4 个水资源二级区中, 徒骇马颊河污染面积最小, 但 4 个区域污染面积相差不大, 比较接近。6 个省区中, 北京和山西污染面积较小, 未污染面积比分别达到 95.8%和 96.8%, 天津市污染情况最严重, 地下水未污染面积比仅为 12.8%, 污染面积比达到评价面积的 87.2%, 其中重度污染面积达到 74.3%, 其他省区均存在不同程度的地下水污染。

4.4.6 需水预测与供需分析

以中国可持续发展水资源战略研究项目组的“水资源现状评价和供需发展趋势分析”和王浩等的“黄淮海流域水资源合理配置”等课题研究为基础(中国工程院, 2000; 王浩等, 2003), 结合 1980~2005 年中国统计年鉴口径, 并根据现实的发展情况做了微调, 从而对海河流域的人口和经济发展水平做了预测。经与上述的研究对比, 预测结果与上述的结果基本接近, 基本可靠。根据预测结果, 对未来情景年 2020、2030、2040 的人口、人均需水量、GDP 和万元 GDP 用水量进行预测, 进而预测出 2020 年、2030 年、2040 年的需水状况。

4.4.6.1 人口与人均需水量预测

表 4-21 海河流域人口预测与人均需水量预测

分区	人口 (万人)			人均需水量 (m ³)		
	2020	2030	2040	2020	2030	2040
滦河及冀东沿海	1079	1167	1199	433	430	430
海河北系	3166	3424	3517	313	311	310
海河南系	7733	8363	8588	320	317	317
徒骇马颊河	1762	1905	1956	513	509	508
北京	1580	1709	1755	275	273	273
天津	1072	1159	1190	291	289	288
河北	6939	7504	7706	366	363	363
山西	1195	1293	1328	221	219	219
河南	1264	1367	1404	340	337	337
山东	1553	1679	1724	531	526	526
内蒙古	106	115	118	271	268	268
辽宁	24	25	26	145	144	144
海河流域	13740	14860	15260	352	349	349

4.4.6.2 GDP 与万元 GDP 需水量预测

根据 2000~2007 年海河流域经济统计年鉴和《海河流域水资源公报》对未来情景年 2020、2030、2040，对 GDP 和万元 GDP 用水量进行了预测，均以海河流域 2020 年万元 GDP 用水量达到顶峰，呈下降趋势为前提，见表 4-22。

表 4-22 GDP 与万元 GDP 用水量预测

分区	GDP (万人)			万元 GDP 用水量 (m ³)		
	2020	2030	2040	2020	2030	2040
滦河及冀东沿海	2627	4126	5717	178	122	90
海河北系	12963	20360	28207	76	52	39
海河南系	18456	28988	40160	134	91	68
徒骇马颊河	3454	5426	7517	261	179	132
北京	9938	15609	21624	44	30	22
天津	5325	8364	11587	59	40	30
河北	14475	22735	31498	175	120	89
山西	2175	3416	4733	121	83	61
河南	2363	3711	5141	182	124	92
山东	3038	4771	6610	271	185	137
内蒙古	165	258	358	175	120	89
辽宁	17	27	38	195	133	99
海河流域	37500	58900	81600	129	88	65

4.4.6.3 供需平衡分析

根据人均需水量和人口以及万元 GDP 用水量和 GDP 预测，计算预测出海河流域 2020 年、2030 年、2040 年的需水量，见表 4-23。

根据上表 4-23 的结果，以目前海河流域供水能力为基础，假设供水能力不变的前提，对未来年份 2020 年、2030 年和 2040 年按不同保证率（50%、75%、95%）的供需情况的缺水量和缺水率进行了预测分析，结果见表 4-24、表 4-25。

表 4-23 需水预测结果

分区	需水量 (亿 m ³)		
	2020 年	2030 年	2040 年
滦河及冀东沿海	46.77	50.16	51.50
海河北系	99.15	106.35	109.18
海河南系	247.26	265.21	272.26
徒骇马颊河	90.33	96.88	99.46
北京	43.44	46.59	47.83
天津	31.18	33.44	34.33
河北	253.94	272.37	279.62
山西	26.39	28.30	29.06
河南	42.97	46.09	47.32
山东	82.38	88.36	90.71
内蒙古	2.88	3.09	3.17
辽宁	0.34	0.37	0.38
海河流域	483.50	518.60	532.40

表 4-24 海河流域未来供需平衡（缺水量 亿 m³）分析

分区	2020 年				2030 年				2040 年			
	50%	75%	95%	多年平均	50%	75%	95%	多年平均	50%	75%	95%	多年平均
滦河及冀东	7.37	8.36	11.40	8.20	10.76	11.75	14.80	11.59	12.10	13.09	16.13	12.93
海河北系	13.04	15.20	21.85	14.85	20.23	22.40	29.05	22.05	23.06	25.23	31.88	24.88
海河南系	75.23	79.56	92.84	78.86	93.18	97.50	110.78	96.81	100.24	104.56	117.84	103.86
徒骇	18.88	20.68	26.20	20.39	25.44	27.23	32.75	26.94	28.02	29.81	35.33	29.52
马颊河	2.32	3.36	6.53	3.19	5.48	6.51	9.68	6.34	6.72	7.75	10.92	7.58
北京	6.57	7.19	9.09	7.09	8.83	9.45	11.35	9.35	9.72	10.34	12.24	10.24
天津	76.36	80.82	94.54	80.11	94.80	99.26	112.97	98.54	102.05	106.51	120.22	105.79
河北	1.52	2.15	4.07	2.05	3.44	4.06	5.98	3.96	4.19	4.82	6.74	4.72
山西	11.65	12.44	14.86	12.31	14.77	15.56	17.97	15.43	16.00	16.78	19.20	16.66
河南	15.66	17.34	22.49	17.07	21.64	23.32	28.47	23.05	23.99	25.67	30.82	25.40
山东	0.75	0.80	0.96	0.79	0.96	1.01	1.17	1.00	1.04	1.09	1.26	1.08
内蒙古	0.01	0.02	0.05	0.02	0.04	0.05	0.07	0.05	0.05	0.06	0.08	0.06
辽宁	114.82	124.08	152.55	122.59	149.92	159.18	187.65	157.69	163.72	172.98	201.45	171.49
海河流域												

表 4-25 海河流域未来平衡（缺水率 %）分析

分区	2020 年				2030 年				2040 年			
	50%	75%	95%	多年平均	50%	75%	95%	多年平均	50%	75%	95%	多年平均
滦河及冀东	18.70	21.76	32.24	21.26	27.32	30.60	41.83	30.06	30.71	34.07	45.61	33.52
海河北系	15.14	18.10	28.26	17.62	23.50	26.68	37.57	26.15	26.78	30.05	41.24	29.51
海河南系	43.73	47.44	60.12	46.83	54.17	58.14	71.74	57.49	58.27	62.35	76.31	61.68
徒骇	26.43	29.69	40.85	29.15	35.60	39.10	51.06	38.52	39.21	42.80	55.08	42.21
马颊河	5.65	8.37	17.69	7.92	13.32	16.24	26.24	15.76	16.33	19.33	29.60	18.84
北京	26.70	29.96	41.14	29.43	35.90	39.40	51.39	38.82	39.51	43.11	55.42	42.52
天津	43.00	46.69	59.31	46.08	53.39	57.34	70.87	56.69	57.47	61.52	75.42	60.86
河北	6.13	8.86	18.23	8.41	13.83	16.77	26.81	16.28	16.86	19.87	30.19	19.38
山西	37.20	40.73	52.84	40.15	47.16	50.95	63.93	50.32	51.07	54.96	68.29	54.32
河南	23.47	26.65	37.55	26.13	32.44	35.85	47.53	35.29	35.96	39.46	51.46	38.89
山东	34.94	38.42	50.33	37.85	44.74	48.47	61.24	47.86	48.59	52.42	65.53	51.79
内蒙古	4.46	7.15	16.36	6.70	12.04	14.93	24.81	14.45	15.02	17.98	28.13	17.50
辽宁	31.14	34.52	46.09	33.97	40.66	44.29	56.70	43.69	44.41	48.13	60.87	47.52
海河流域												

由表 4-24、表 4-25 可知,在不考虑南水北调、以现状供水能力为前提条件下,预测海河流域到 2020 年,遇到不同保证率(平水年)50%、75%、95%和多年平均的供水情况下,缺水量分别达到 114.82 亿 m^3 、124.08 亿 m^3 、152.55 亿 m^3 和 122.59 亿 m^3 ,缺水率分别达到 31.14%、34.52%、46.09%和 33.97%,2030 年和 2040 年有不同程度的增长,但 2030 年至 2040 年增长幅度较小,趋于稳定。总体来看,海河流域整体缺水形势相当严峻。

海河流域分地区来看,4 个水资源二级区中,海河南系缺水情况最为严重,缺水率在平水年(50%)达到 43.73%,其次是徒骇马颊河,再次是滦河及冀东沿海,缺水相对较轻的是海河北系。

海河流域分省级行政区来看,8 个省级行政区中,以缺水率来进行衡量,缺水最为严重的是河北省,下面依次是河南省、内蒙古自治区、天津市、山东省、山西省、北京市、辽宁省,其中北京市和辽宁省缺水率较小,缺水程度相对较轻。

海河流域内各缺水地区的缺水程度不一致,缺水性质也不尽相同,主要原因可能是缺水地区供需情况不同造成的。

海河流域山前平原区是水资源相对丰富的地区,地下水较为丰富,水质良好,且为全淡水区,开采条件也较为便利,山区径流经水库调节也主要供本区。山前平原同时是海河流域经济发达的地区,已由 20 世纪 80 年代的丰水区转为目前的缺水区。缺水率在 20%以上,可通过从外地调水和水源优化配置、提升水的回用率来加以解决。徒骇马颊河二级水资源区,虽然当地水资源缺乏,即使充分得到利用,也不能完全满足现状及未来情景下对水资源的需求。但该区具有南临黄河,区内具有山、潘庄等大型引黄灌区,自 1984 年以来,年均引黄 45~55 亿 m^3 ,从而成为海河流域水资源相对丰裕的地区。海河流域内土地资源最丰富的河北中东部平原,地表水仅有当地涝水、山前平原剩余少量的弃水和排污水,浅层地下水含水层薄,可开采量少,故难以作为城镇集中供水水源,只能采取超采深层地下水维持需求和生计,因此造成不仅农业生产上缺水,而且城镇生活和工业用水也供给不足。

4.5 小结

本章概述了海河流域自然地理、社会经济、水资源概况的情况,海河流域属

于社会经济发达地区,但从水资源总体上说,海河流域属于资源性严重缺水地区。本章分析了海河流域各分区供需状况,并预测了未来年份水资源供需状况和缺水率。

从降水量来看,海河流域是我国降水量变化年际变化较大的区域,二级区中,滦河及冀东沿海的 C_v 值最小,海河南系和徒骇马颊河 C_v 值最大。在 8 个省级行政区中,内蒙古自治区 C_v 值最小,河南省 C_v 值最大。海河流域平均降水量近年来呈现出偏枯的趋势。各省市自 1981 年以来,呈现出愈加偏枯的趋势,并且自 2001 年以来偏枯幅度大幅增大。

从地表水资源来看,海河北系的 C_v 值年际变化较小,徒骇马颊河 C_v 值年际变化较大。内蒙古自治区的 C_v 值年际变化较小,山东省的 C_v 值年际变化较大。地表水资源的区域 C_v 值差异与降水量的区域 C_v 值差异基本一致。自 1981 年代后,各区域进入普遍偏枯阶段且偏枯幅度呈增大趋势。

从地下水资源来看,滦河及冀东沿海和海河南系地下水资源开采较为严重,分别达到 57.6%和 67.2%,其次是海河北系,达到 13.3%,徒骇马颊河较轻,仅为 3.5%;天津市、河北省和河南省超采严重,北京超采率较低未超采的 4 个省市分别为山西省、山东省、内蒙古自治区和辽宁省。整个海河流域地下水超采率达到 40.3%的严重程度。

从人均水资源来看,根据水资源人均紧缺指标评价等级表可知,海河流域二级区在各水资源保证率情况下均达到严重缺水程度以上,8 个省级行政区中的缺水程度,在各保证率下,各省区均达到中度缺水程度以上。整个流域来看,海河流域在 20%、50%、75% 和 95%保证率下,人均水资源量分别为 349m^3 、 259m^3 、 205m^3 和 151m^3 ,均属极度缺水程度,多年人均水资源量仅为 276m^3 ,属严重缺水程度,水资源总量和人均占有量在全国的水资源一级区中,位列最低。海河南系和天津人均水资源量最低,各省市在不同保证率下,均可能达到中度、重度和极度缺水的程度。

供水方面,地下水供水量占总供水量的 65.0%,为主要供水水源。二级区中,仅徒骇马颊河以地表水供水为主,省区中,天津市和山东省以地表水供水为主,河北省地下水供水比重高达 80.1%,为各省地下水供水比例最高,北京其他水源供水较多,说明北京市供水水源的途径较多。地下水供水量自 1990 年以来

呈增加趋势，非常规水供水比重近年来自 2005 年以后有增加趋势，反映了近些年来对水资源利用途径的多样化趋势。

从用水来看，海河流域整体从用水比重分析，整个流域以农业用水为主，占到 70%，工业和生活用水基本持平，徒骇马颊河农业用水比重最大，达到 83.1%。省级行政区中，北京市以生活用水比重较大，达到 42.1%，其他省区以农业用水为主，其中山东省农业用水比重最大。海河流域人均用水量和万元 GDP 用水量在全国水资源一级区中处于较低水平。工业用水比重和用水量呈两阶段变化，近年呈下降趋势，农业用水一直呈下降趋势。生活用水比重则一直呈上升趋势。

从水资源开发利用程度来看，海河流域总体上从地表水开发利用程度、地下水开发利用程度和水资源总体利用开发程度均达到用水高度紧张程度，其中地下水开发利用程度最高，地下水资源面临严峻的形式。

在进行了海河流域供用水分析后，本章以 2005 年为水平年，对海河流域进行了总体供需平衡分析。海河南系为二级区中最缺水的地区，河北是省区中缺水最严重的地区。

海河流域的 2000 年现状 COD 污染物和氨氮污染物均以点源污染为主，总磷污染以非点源污染为主。河流水质和地下水水质综合评价表明，海河流域污染较为严重。

本章还根据人口、人均需水量、GDP 和万元 GDP 用水量的预测结果，对未来年份 2020 年、2030 年、2040 年的供需状况做了预测，并计算了未来年份的缺水率。在未来年，海河南系和河北省缺水最严重，这与现状年评价结果一致。

第五章 海河流域水资源保障风险评估

自 20 世纪 80 年代“风险社会”与“风险管理”等概念提出以来，风险问题已日益得到国际社会及学术界的密切关注。其中，水资源作为人类社会可持续发展的重要基础，成为风险研究中的热点，2003 年成立的国际综合风险防范理事会（IRGC）将水资源保障风险作为其关注的焦点之一。从区域尺度开展水资源保障风险研究，可以为区域内部及区域间水资源政策、决策提供基础，对于加强区域水资源安全保障具有重要意义。本章提供了两种方法对海河流域水资源保障风险提供了评估，并对两种模型进行了比较研究。

在进行风险评价过程中要充分考虑风险的特点以及水资源系统的复杂性，要把存在风险的概率、风险出现的时间、风险造成的损失有多少、风险解除的时间、缺水量的分散程度等一系列因素考虑在内。因此难以用某一种指标对其进行全面地描述和评价，必须从多方面的指标综合考虑评估指标（黄明聪等，2007）。选择的原则是：（1）能集中反映缺水地区的缺水风险；（2）能集中反映缺水风险的程度；（3）能反映水资源保障风险发生后水资源系统的承受能力；（4）代表性好，针对性强，易于量化。依据上述原则，本研究选取水资源风险率、脆弱性、可恢复性、事故周期（重现期）、风险度作为水资源系统水资源保障风险的评估指标。以下对各个指标的意义和相互关系进行表述。

5.1 水资源保障风险评估指标构建

5.1.1 风险率

风险率是水资源系统处于失事状态（发生缺水状况）的概率，表示缺水时间的严重程度。如果把水资源系统的缺水状态记为 $F \in (\lambda > \rho)$ ，不缺水的正常状态记为 $S \in (\lambda < \rho)$ ，那么水资源系统的风险率为（冯平，1998）：

$$r = P(\lambda > \rho) = P\{X_t \in F\} \quad (5-1)$$

式中： X_t 为水资源系统状态变量，即缺水状态或正常状态

风险率在本研究中将其定义为水资源系统缺水的时间（年数）与整个研究时间（年数）之比，即

$$a = \frac{F}{T} \quad (5-2)$$

式中： T 为水资源系统工作的总历时（整个研究时间）； F 是缺水时间的总和。则可靠性可以定义为 $R=1-a$ ，与风险率的和为1。

5.1.2 脆弱性

脆弱性是描述水资源系统失事损失严重程度的重要指标。在风险分析中，可以用缺水量来描述系统缺水失事的损失程度，即

$$v = \frac{\sum_{i=1}^F E_i}{\sum_{i=1}^F D_i} \quad (5-3)$$

式中： F 为缺水事件的总次数（缺水年数）， E_i 为第 i 次缺水的缺水量， D_i 是第 i 次缺水期的需水量。

5.1.3 重现期（重现周期）

事故周期是两次进入失事模式（缺水状态） F 之间的时间间隔，也叫平均重现期。用 $d(\mu, n)$ 表示第 n 间隔时间的历时，即两次缺水年之间的间隔时间，则平均重现期为（德克斯坦，1993）：

$$w = \frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^{N-1} d(\mu, n) \quad (5-4)$$

式中： $N=N(\mu)$ 是0到 t 时段内（年）属于缺水状态 F 的数目。

5.1.4 可恢复性

可恢复性是描述系统从缺水状态恢复到到正常供水状态的概率。系统的可恢复性越高，表明该系统能更快地从事故状态转变为正常运行状态。风险的可恢复性是一个重要指标，如果风险不可恢复，损失将无法弥补和挽回，将长期存在。它可以由如下的条件概率来定义（Kenji Jinno, et al, 1995）

$$\beta = P(X_t \in S | X_{t-1} \in F) \quad (5-5)$$

上式亦可用全概率公式改写为

$$\beta = \frac{P\{X_{t-1} \subset F, X_t \subset S\}}{P\{X_{t-1} \subset F\}} \quad (5-6)$$

在本研究中则有

$$\beta = \begin{cases} T_S / T_F, & T_F \neq 0 \\ 1, & T_F = 0 \end{cases} \quad (5-7)$$

式中, T_S 是发生从缺水状态恢复到正常状态的事件次数, T_F 是发生缺水状态的事件数目 (在本研究中可以认为是缺水的总年数)

从上面的公式中可以看出, 水资源系统的可恢复性 β 是表示前一年的可用水量 X_{t-1} 处于缺水状态时, 下一年的可用水量 X_t 可恢复到正常状态的概率或能力。显然, 当 $T_F=0$, 即水资源系统在整个历时一直处于正常工作状态, 则 $\beta=1$; 而当 $T_S=0$, 即水资源系统一直处于失事状态, 则 $\beta=0$ 。一般来讲, $0 < \beta < 1$ 。这表明水资源系统有时会处于失事状态, 但有可能恢复正常状态, 而且失事的历时越长, 恢复性越小, 也就是说水资源系统在经历了一个较长时期的失事之后, 转为正常状态是比较困难的。

5.1.5 风险度

用概率分布的数学特征, 如标准差 σ 或半标准差 σ_- , 可以说明风险的大小。 σ 和 σ_- 越大, 则风险越大, 反之越小。这是因为概率分布越分散, 实际结果远离期望值的概率就越大 (黄德等, 1999)。

$$\sigma = (D(X))^{1/2} = \left(\sum_{i=1}^n (X_i - E(X))^2 / (n-1) \right)^{1/2} \quad (5-8)$$

用 σ 、 σ_- 比较风险大小虽简单, 概念明确, 但 σ_- 为某一物理量的绝对量, 当两个比较方案的期望值相差很大时, 则可比性差, 同时比较结果可能不准确。为了弥补 σ_- 作为风险度可比性差的不足, 可用其相对量作为比较参数, 即标准差与期望值的比值 (也称变差系数)

$$CV = \sigma / E(X) = \sigma / \mu \quad (5-9)$$

式中, σ 为多年缺水量的标准差, $E(X)$ 、 μ 为多年缺水量的期望值, 一般可用多年缺水量的平均值来代替。

风险度和风险率尽管字面上比较相近,但二者存在一定的区别。首先二者的取值范围不同。风险度不同于风险率,前者的值可大于1,而后者只能小于或等于1。风险度指标越大,表示概率分布越分散,实际结果偏离期望值的概率就越大。其次,二者的定义和意义存在区别。风险率是水资源系统处于失事状态的概率,表示缺水时间的严重程度;风险度是标准差和期望值的比值,反映的是方案综合风险程度的高低,以概率分布的数学特征,如指标分布的标准差来说明风险大小的变异特征。

5.1.6 风险指标计算结果

以海河水资源公报 1998~2007 年数据为基础,从而计算出各区域缺水量,基础数据见表 5-1、表 5-2, 缺水量见表 5-3。

表 5-1 海河流域 1998~2007 年各区域总用水量 (亿 m³)

年份 区域	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
滦河及冀东沿海	42.00	41.26	39.90	35.80	39.42	35.08	34.08	36.30	38.51	38.51
海河北系	87.54	89.38	84.50	81.30	77.28	78.13	79.13	81.02	81.64	81.59
海河南系	216.04	218.66	202.60	197.33	206.10	193.47	192.47	192.60	197.33	193.34
徒骇马颊河	78.19	78.53	71.40	69.20	76.99	70.33	71.33	69.88	75.20	71.04
北京	40.50	41.71	40.40	38.90	34.62	35.00	34.55	34.50	34.30	34.81
天津	21.50	25.52	22.60	19.10	19.96	20.53	19.06	23.10	22.96	23.38
河北	224.70	223.00	210.40	209.60	209.74	198.15	200.40	198.16	201.42	199.06
山西	21.70	20.87	20.70	20.70	20.72	20.50	20.90	21.70	22.61	19.55
河南	41.40	42.44	37.70	39.20	43.31	36.86	36.90	37.90	42.00	41.76
山东	72.30	72.42	64.90	62.90	69.61	63.67	63.37	62.62	67.60	63.24
内蒙古	1.40	1.53	1.30	1.10	1.29	2.06	1.54	1.61	1.54	2.35
辽宁	0.30	0.33	0.30	0.40	0.24	0.24	0.28	0.20	0.26	0.34
海河流域	423.96	427.82	398.30	392.00	399.79	377.00	377.00	379.79	392.69	384.48

特别注明:为尽量保证数据连续性和可靠性,表 5-1 数据全部整理自《海河流域水资源公报》,而同表 4-12、表 4-13 的 1990~2005 年数据整理计算自《海河流域水资源评价》(任宪韶主编,2007),2006~2007 年数据整理计算自《海河流域水资源公报》。因来源不同,故数据并不完全一致。

表 5-2 海河流域 1998~2007 年各区域水资源量 (亿 m³)

年份 区域	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
滦河及冀东沿海	75.00	33.65	30.30	36.90	24.17	36.34	41.20	46.63	30.93	33.35
海河北系	96.40	46.15	47.60	51.60	41.74	54.35	61.82	56.58	54.00	56.96
海河南系	126.70	95.79	149.00	94.00	85.17	161.70	149.82	124.60	111.60	127.26
徒骇马颊河	56.60	18.21	41.80	17.60	6.79	67.78	46.99	39.66	23.23	30.29
北京	39.50	14.22	16.90	19.20	3.83	18.40	21.35	23.18	22.07	23.81
天津	13.60	2.60	3.10	5.70	0.27	10.60	14.31	10.63	10.11	11.31
河北	176.90	103.36	140.40	106.00	18.97	145.26	148.69	127.67	102.98	116.16
山西	35.00	31.20	34.50	29.70	14.33	46.31	38.14	35.49	34.37	40.62
河南	31.60	23.57	34.30	21.00	17.86	32.04	43.61	31.03	24.95	24.05
山东	52.50	15.59	37.00	15.40	5.07	63.37	29.42	34.95	21.64	28.24
内蒙古	3.20	2.15	2.20	1.80	2.39	2.39	3.45	3.02	3.00	2.83
辽宁	2.30	1.11	0.40	1.40	0.66	0.66	0.85	1.50	0.65	0.86
海河流域	354.60	193.79	268.70	200.10	51.32	320.18	299.82	267.47	219.76	247.88

表 5-3 海河流域 1998~2007 年各区域缺水量 (亿 m³)

年份 区域	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
滦河及冀东沿海	0.00	-7.61	-9.60	0.00	-15.25	0.00	0.00	0.00	-7.58	-5.16
海河北系	0.00	-43.23	-36.90	-29.70	-35.54	-23.78	-17.31	-24.44	-27.64	-24.63
海河南系	-89.34	-122.87	-53.60	-103.33	-120.93	-31.77	-42.65	-68.00	-85.73	-66.08
徒骇马颊河	-21.59	-60.32	-29.60	-51.60	-70.20	-2.55	-24.34	-30.22	-51.97	-40.75
北京	-1.00	-27.49	-23.50	-19.70	-30.79	-16.60	-13.20	-11.32	-12.23	-11.00
天津	-7.90	-22.92	-19.50	-13.40	-19.69	-9.93	-4.75	-12.47	-12.85	-12.07
河北	-47.80	-119.64	-70.00	-103.60	-190.77	-52.89	-51.71	-70.49	-98.44	-82.90
山西	0.00	0.00	0.00	0.00	-6.39	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
河南	-9.80	-18.87	-3.40	-18.20	-25.45	-4.82	0.00	-6.87	-17.05	-17.71
山东	-19.80	-56.83	-27.90	-47.50	-64.54	-0.30	-33.95	-27.67	-45.96	-35.00
内蒙古	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
辽宁	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
海河流域	-69.36	-234.03	-129.60	-191.90	-348.47	-56.82	-77.18	-112.32	-172.93	-136.60

以缺水量数据为基础,运用公式 5-9 计算得到海河流域各区域的风险度,结果见表 5-4。

表 5-4 海河流域 1998~2007 年各区域缺水量系列概率分布 (亿 m³)

指标 区域	标准差	期望值	样本数	风险度
滦河及冀东沿海	3.81	9.04	10	0.422
海河北系	8.01	-29.24	10	0.274
海河南系	31.46	78.43	10	0.401
徒骇马颊河	20.45	38.31	10	0.534
北京	8.88	16.68	10	0.533
天津	5.65	13.55	10	0.417
河北	43.12	88.82	10	0.485
山西	0.00	6.39	10	0.000
河南	9.60	11.55	10	0.831
山东	18.73	35.95	10	0.521
内蒙古	0.00	0.00	10	0.000
辽宁	0.00	0.00	10	0.000
海河流域	88.91	152.92	10	0.581

参考《海河流域水资源评价》(任宪韶主编, 2007)、《黄淮海流域水资源水资源合理配置》(王浩等, 2003), 以上面的表 5-1~表 5-4 数据为基础, 采用上述计算公式与方法(公式 5-1~5-9), 对海河流域二级水资源区和省级行政区进行风险评估, 结果见表 5-5。

表 5-5 海河流域保障风险评估指标

指标 区域	风险率	脆弱性	可恢复性	重现期	风险度
滦河及冀东沿海	0.500	0.229	0.400	2.000	0.422
海河北系	0.900	0.359	0.000	1.000	0.274
海河南系	1.000	0.390	0.000	1.000	0.401
徒骇马颊河	1.000	0.523	0.000	1.000	0.534
北京	1.000	0.452	0.000	1.000	0.533
天津	1.000	0.622	0.000	1.000	0.417
河北	1.000	0.428	0.000	1.000	0.485
山西	0.100	0.308	1.000	0.000	0.000
河南	0.900	0.337	0.111	1.000	0.831
山东	1.000	0.542	0.000	1.000	0.521
内蒙古	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000
辽宁	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000
海河流域	1.000	0.387	0.000	1.000	0.581

5.2 水资源保障风险评估方法与模型

风险评价是在风险识别和风险分析的基础上,把损失概率、损失程度以及其它因素综合起来考虑,分析该风险的影响,寻求风险对策并分析该对策的影响,为风险决策创造条件。本文采用风险率、脆弱性、可恢复性、重现期、风险度作为水资源保障风险的评价指标,采用模糊综合评判方法对水资源保障风险进行评价,以下对许有鹏、阮本清等建立的评估公式进行介绍(许有鹏,1993;阮本清等,2005)。

设给定2个有限论域 $U=\{u_1, u_2, u_3, \dots, u_m\}$ 和 $V=\{v_1, v_2, v_3, \dots, v_n\}$, 其中, U 代表综合评判的因素所组成的集合; V 代表评语所组成的集合。则模糊综合评判即表示下列的模糊变换 $B=A \times R$, 式中 A 为 U 上的模糊子集。而评判结果 B 是 V 上的模糊子集, 并且可表示为 $A=(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m)$, $0 \leq \lambda_i \leq 1$; $B=(b_1, b_2, \dots, b_n)$, $0 \leq b_j \leq 1$ 。其中 λ_i 表示单因素 u_i 在总评定因素中所起作用大小的变量, 也在一定程度上代表根据单因素 u_i 评定等级的能力, 而 b_j 为等级 v_j 对综合评定所得模糊子集 B 的隶属度, 它们表示综合评判的结果。

而评判矩阵 R 为

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (5-10)$$

式中: r_{ij} 表示因素 u_i 的评价对等级 v_j 的隶属度, 因而矩阵 R 中第 i 行 $R_i=(r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{in})$ 即为对第 i 个因素 u_i 的单因素评判结果。

在评估计算中 $A=(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m)$ 代表了各个因素对综合评判重要性的权系数, 因此满足 $\sum \lambda_i=1$, ($i=1, 2, \dots, m$); 同时, 模糊变换 $A \times R$ 也即退化为普通矩阵计算, 即 $b_j = \min[1, \sum \lambda_i \cdot r_{ij}]$, $i=1, 2, \dots, m$, $j=1, 2, \dots, n$ 。上述权系数的确定可用层次分析法(AHP)分析得出(许有鹏,1993)。

由上述分析可以看出, 评价因素集 $U=\{u_1, u_2, u_3, \dots, u_m\}$ 对应评语集 $V=\{v_1, v_2, v_3, \dots, v_n\}$, 而评判矩阵中 r_{ij} 即为某因素 u_i 对应等级 v_j 的隶属度, 其值可根据各评价因素的实际数值对照各因素的分级指标推求。将评语级分为5个级别, 各评价因素分级指标见表5-6。

表5-6 各评价因素分级指标

水资源风险	风险	u_1	u_2	u_3	u_4	u_5
评价等级	级别	(风险率)	(脆弱性)	(可恢复性)	(重现期)	(风险度)
v_1	安全	≤ 0.200	≤ 0.200	≥ 0.800	≥ 9.000	≤ 0.200
v_2	预警	0.200~0.400	0.200~0.400	0.601~0.800	6.001~9.000	0.201~0.600
v_3	低危	0.401~0.600	0.401~0.600	0.401~0.600	3.001~6.000	0.601~1.000
v_4	中危	0.601~0.800	0.6.1~0.800	0.200~0.400	1.000~3.000	1.001~2.000
v_5	高危	≥ 0.800	≥ 0.800	≤ 0.200	≤ 1.000	≥ 2.000

数据来源：阮本清等，2005.

由于水资源风险率、脆弱性、风险度是越小越优性指标，因此可对 u_1, u_2, u_5 各评语级构造如下隶属函数 r (阮本清等，2005)：

$$\mu_{v1}(\phi) = \begin{cases} 1, & \phi \leq a_{i1} \\ \frac{a_{i2} - \phi}{a_{i2} - a_{i1}}, & a_{i1} < \phi \leq a_{i2} \\ 0, & \phi > a_{i2} \end{cases} \quad \mu_{v2}(\phi) = \begin{cases} \frac{\phi}{a_{i1}}, & \phi < a_{i1} \\ 1, & a_{i1} < \phi \leq a_{i2} \\ \frac{a_{i3} - \phi}{a_{i3} - a_{i2}}, & a_{i2} < \phi \leq a_{i3} \\ 0, & \phi > a_{i3} \end{cases} \quad (5-11)$$

$$\mu_{v3}(\phi) = \begin{cases} 0, & \phi \geq a_{i1} \\ \frac{a_{i2}}{\phi}, & a_{i2} \leq \phi < a_{i1} \\ 1, & a_{i3} \leq \phi < a_{i2} \\ 0, & \phi < a_{i4} \end{cases} \quad \mu_{v4}(\phi) = \begin{cases} 0, & \phi \geq a_{i1} \\ \frac{a_{i2}}{\phi}, & a_{i2} \leq \phi < a_{i1} \\ 1, & a_{i3} \leq \phi < a_{i2} \\ 0, & \phi < a_{i4} \end{cases} \quad \mu_{v5}(\phi) = \begin{cases} 0, & \phi \geq a_{i3} \\ \frac{a_{i4}}{\phi}, & a_{i4} \leq \phi < a_{i3} \\ 1, & \phi < a_{i4} \end{cases}$$

由于水资源可恢复性和重现期是越大越优性指标，因此可对 u_3, u_4 各评语级构造如下隶属函数 r ：

$$\mu_{v1}(\phi) = \begin{cases} 1, & \phi \geq a_{i1} \\ \frac{a_{i2} - \phi}{a_{i2} - a_{i1}}, & a_{i2} \leq \phi < a_{i1} \\ 0, & \phi < a_{i2} \end{cases} \quad \mu_{v2}(\phi) = \begin{cases} \frac{a_{i1}}{\phi}, & \phi \geq a_{i1} \\ 1, & a_{i2} < \phi \leq a_{i1} \\ \frac{a_{i3} - \phi}{a_{i3} - a_{i2}}, & a_{i3} \leq \phi < a_{i2} \\ 0, & \phi < a_{i3} \end{cases}$$

$$\mu_{v3}(\phi) = \begin{cases} 0, & \phi \geq a_{i1} \\ \frac{a_{i2}}{\phi}, & a_{i2} \leq \phi < a_{i1} \\ 1, & a_{i3} \leq \phi < a_{i2} \\ \frac{a_{i3} - \phi}{a_{i3} - a_{i4}}, & a_{i4} \leq \phi < a_{i3} \\ 0, & \phi < a_{i4} \end{cases} \quad \mu_{v4}(\phi) = \begin{cases} 0, & \phi \geq a_{i2} \\ \frac{a_{i3}}{\phi}, & a_{i3} \leq \phi < a_{i2} \\ 1, & a_{i4} \leq \phi < a_{i3} \\ \frac{\phi}{a_{i4}}, & \phi < a_{i4} \end{cases} \quad \mu_{v5}(\phi) = \begin{cases} 0, & \phi \geq a_{i3} \\ \frac{a_{i4}}{\phi}, & a_{i4} \leq \phi < a_{i3} \\ 1, & \phi < a_{i4} \end{cases} \quad (5-12)$$

公式 5-11、5-12 中 ϕ 即为实际计算得出的风险率、脆弱性、可恢复性、重现

期、风险度的值(见表 5-5), $a_{ij}(j=1,2,3,4)$ 即为各评估等级对应的分级指标值(表 5-6)。运用公式 5-11、5-12 和表 5-6 的分类计算表 5-6 的数据, 结果见表 5-7。

表 5-7 各评价因素分级值

分区 等级与指标	滦河及 冀东沿海	海河 北系	海河 南系	徒骇 马颊河	北京	天津	河北	山西	河南	山东	内蒙古	辽宁	海河 流域
风险率	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	1.000	1.000	0.773
脆弱性	0.856	0.207	0.049	0.000	0.000	0.000	0.000	0.458	0.315	0.000	1.000	1.000	0.066
v_1 可恢复性	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	1.000	1.000	0.000
重现期	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
风险度	0.000	0.815	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	1.000	1.000	0.000
风险率	0.500	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.500	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
脆弱性	1.000	1.000	1.000	0.383	0.741	0.000	0.859	1.000	1.000	0.288	0.000	0.000	1.000
v_2 可恢复性	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.250	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
重现期	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
风险度	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	1.000
风险率	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
脆弱性	0.572	0.896	0.976	1.000	1.000	0.889	1.000	0.771	0.842	1.000	0.000	0.000	0.967
v_3 可恢复性	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
重现期	0.500	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.000	1.000	1.000	0.000	0.000	1.000
风险度	0.703	0.457	0.669	0.890	0.888	0.695	0.809	0.000	1.000	0.868	0.000	0.000	0.969
风险率	0.833	0.500	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.000	0.500	1.000	0.000	0.000	1.000
脆弱性	0.000	0.000	0.000	0.872	0.753	1.000	0.714	0.000	0.000	0.904	0.000	0.000	0.000
v_4 可恢复性	0.400	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.111	0.000	0.000	0.000	0.000
重现期	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.000	1.000	1.000	0.000	0.000	1.000
风险度	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.831	0.000	0.000	0.000	0.000
风险率	0.833	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.167	1.000	1.000	0.000	0.000	1.000
脆弱性	0.381	0.598	0.650	0.872	0.753	0.111	0.714	0.000	0.000	0.904	0.000	0.000	0.645
v_5 可恢复性	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
重现期	0.500	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.000	1.000	1.000	0.000	0.000	1.000
风险度	0.422	0.274	0.401	0.534	0.533	0.417	0.485	0.000	0.831	0.521	0.000	0.000	0.581

对于水资源保障风险评价的因素集 U 而言，对应一个测定指标向量 $Y = (\phi_{11}, \phi_{12}, \phi_{13}, \phi_{14}, \phi_{15})$ 。其中， ϕ_{ij} 是 U 相对于 u_{ij} 的测定值。这样 $\mu_{ij}(\phi_j)$ 便表示相对于因素 μ_i 而言属于 v_i 的程度。对于因素集 U ，便有下面的模糊关系矩阵

$$R_U = \begin{bmatrix} \mu_{v1}(\phi_{11}) & \mu_{v2}(\phi_{11}) & \mu_{v3}(\phi_{11}) & \mu_{v4}(\phi_{11}) & \mu_{v5}(\phi_{11}) \\ \mu_{v1}(\phi_{12}) & \mu_{v2}(\phi_{12}) & \mu_{v3}(\phi_{12}) & \mu_{v4}(\phi_{12}) & \mu_{v5}(\phi_{12}) \\ \mu_{v1}(\phi_{13}) & \mu_{v2}(\phi_{13}) & \mu_{v3}(\phi_{13}) & \mu_{v4}(\phi_{13}) & \mu_{v5}(\phi_{13}) \\ \mu_{v1}(\phi_{14}) & \mu_{v2}(\phi_{14}) & \mu_{v3}(\phi_{14}) & \mu_{v4}(\phi_{14}) & \mu_{v5}(\phi_{14}) \\ \mu_{v1}(\phi_{15}) & \mu_{v2}(\phi_{15}) & \mu_{v3}(\phi_{15}) & \mu_{v4}(\phi_{15}) & \mu_{v5}(\phi_{15}) \end{bmatrix} \quad (5-13)$$

水资源保障风险评价各因素的权重确定采用层次分析法(AHP)，设权重计算结果为 $A = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_5)$ ，于是可得出综合评判向量

$$B = A \circ R_U = \left((\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5) \circ \begin{bmatrix} \mu_{v1}(\phi_{11}) & \mu_{v2}(\phi_{11}) & \mu_{v3}(\phi_{11}) & \mu_{v4}(\phi_{11}) & \mu_{v5}(\phi_{11}) \\ \mu_{v1}(\phi_{12}) & \mu_{v2}(\phi_{12}) & \mu_{v3}(\phi_{12}) & \mu_{v4}(\phi_{12}) & \mu_{v5}(\phi_{12}) \\ \mu_{v1}(\phi_{13}) & \mu_{v2}(\phi_{13}) & \mu_{v3}(\phi_{13}) & \mu_{v4}(\phi_{13}) & \mu_{v5}(\phi_{13}) \\ \mu_{v1}(\phi_{14}) & \mu_{v2}(\phi_{14}) & \mu_{v3}(\phi_{14}) & \mu_{v4}(\phi_{14}) & \mu_{v5}(\phi_{14}) \\ \mu_{v1}(\phi_{15}) & \mu_{v2}(\phi_{15}) & \mu_{v3}(\phi_{15}) & \mu_{v4}(\phi_{15}) & \mu_{v5}(\phi_{15}) \end{bmatrix} \right) \quad (5-14)$$

在综合评判中，选取了“加权平均型”的 $M(\otimes, \oplus)$ 模型，即

$$b_{ij} = \min \left\{ 1, \sum_{i=1}^n \lambda_i r_{ij} \right\} \quad (5-15)$$

由于

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i r_{ij} \leq 1$$

该模型实际上蜕化为一般的实数加法，即

$$b_{ij} = \sum_{i=1}^n \lambda_i r_{ij} \quad (j = 1, 2, \dots, m) \quad (5-16)$$

选取与 $\max\{b_{ij}\}$ 对应的评语为区域水资源保障风险的评判结果。公式 5-11 至 5-16 来自阮本清等于 2005 年建立的模糊评估公式（阮本清等，2005）。

为了比较直观的说明风险程度，我们将其分成 5 级，分别称为低风险、较低风险、中风险、较高风险和高风险，风险各级别按综合分值评判，其评判标准和各级别风险的特征见表 5-8。

表5-8 水资源保障风险级别评价

水资源风险评价等级	风险级别	水资源系统风险特征
v_1	低风险（安全）	可以忽略的风险
v_2	较低风险（预警）	可以接受的风险
v_3	中风险（低危）	边缘风险
v_4	较高风险（中危）	不可接受风险
v_5	极高风险（高危）	灾变风险，系统受到严重破坏

一般的水资源保障风险评估仅是对风险率的统计，而此模型则引用了多个评价指标对区域水资源保障风险进行描述；在对单个水资源保障风险评估指标计算的基础上，更进一步采用综合评价方法对区域水资源保障情况进行判别，基于多个指标评价的模糊综合评判方法用于区域水资源保障情况评价具有一定的可操作性和实用性（阮本清等，2005）。

采用表 5-7 的数据和 AHP 法对海河流域各评估指标的权重计算结果为 $A=(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5) = (0.321, 0.200, 0.127, 0.102, 0.223)$ ，利用水资源保障风险模糊综合评估公式 5-16 对海河流域各区域的水资源保障风险进行综合评判，结果见表 5-9。

表 5-9 海河流域区域水资源保障风险综合评分值

区域	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	综合评估
滦河及冀东沿海	0.180	0.601	0.791	0.432	0.503	中风险
海河北系	0.227	0.435	0.396	0.271	0.623	高风险
海河南系	0.010	0.435	0.460	0.436	0.663	高风险
徒骇马颊河	0.000	0.305	0.515	0.619	0.739	高风险
北京	0.000	0.381	0.515	0.594	0.714	高风险
天津	0.000	0.225	0.448	0.646	0.553	较高风险
河北	0.000	0.405	0.497	0.586	0.695	高风险
山西	0.781	0.537	0.162	0.000	0.055	低风险
河南	0.066	0.210	0.507	0.472	0.623	高风险
山东	0.000	0.285	0.510	0.626	0.743	高风险
内蒙古	0.895	0.000	0.000	0.000	0.000	低风险
辽宁	0.895	0.000	0.000	0.000	0.000	低风险
海河流域	0.270	0.435	0.526	0.436	0.702	高风险

由上表的综合评判结果可以得出,根据最大隶属评判原则,海河流域除山西省、辽宁省、内蒙古自治区处于低风险等级以及滦河及冀东沿海二级区处于中风险等级、天津市处于较高风险等级外,其他行政区域和二级水资源区均处于高风险等级,可见水资源供需状况极其危险,尤其在 2008~2009 年冬季发生的旱灾为例,对海河流域冬小麦的生长发育造成很大的影响,因此对水资源采取有效的风险管理措施已日渐紧迫。

5.3 现状年与远景年水资源保障风险简化评估

F. Martin-Carrasco 等 (F J Martin-Carrasco, L Garrote, 2006) 在对西班牙埃布罗河流域的有关研究,建立了需水保障率、需水保障可靠性、水资源利用率、供水能力随保障率的变化率共 4 个指标,评估干旱因素驱动的水资源保障风险评价指标体系。

5.3.1 水资源供给保障率指标

水资源供给保障率指标用来描述区域供水保障能力,按照下面公式计算:

$$I_s = \frac{S}{D} \quad (5-17)$$

式中, S 是正常水平下 (多年平均、P=50%来水保证率) 的区域可供水量, D 是对应来水条件下的区域水资源需求总量。Is<1, 保障能力不足; Is≥1, 则保障能

力满足需求。

5.3.2 水资源保障可靠性指标

水资源保障可靠性指标用于描述在一定的保证率条件下，水资源需求是否能够得到满足，计算公式如下：

$$I_R = \frac{S_r}{D} \quad (5-18)$$

式中， S_r 是在 $r\%$ 来水保证率时的区域可供水量， D 是对应水平下的水资源需求量。

r 的取值需要根据区域经济结构等因素来确定，如农业为主的地区，可取 80%；而城市为主的地区可取 95%。枯水条件下，可供水量小于多年平均水平，同时由于灌溉需水的增加，需水量则会大于多年平均水平，所以 I_R 指标要小于 I_S 。如果该项指标小于 1，则代表区域出现缺水的概率大于可接受的水平。

5.3.3 水资源利用率指标

水资源利用率是在评估区域水资源保障状况时经常被采用的一个指标，具体计算公式如下：

$$I_U = \frac{S}{Y} \quad (5-19)$$

式中， S 是多年平均水平下的区域可供水量， Y 是包括可利用入境水资源量在内的区域水资源总量。

该项指标用于描述区域用水对水资源系统的影响程度，也代表水资源可供进一步开发利用的潜力。在对全球水资源的评估中的研究中认为 (J Alcamo, 2000)，该项指标低于 20% 时，水资源保障受到的影响较小；而当该参数大于 40% 时，区域的水资源保障可能出现严重问题。但实际上，很多严重缺水地区的指标值远大于 40%，个别的甚至超过 100%。因此应根据区域实际情况来具体确定该指标的等级高低。

5.3.4 水资源利用效率指标

该项指标用于描述区域节水的水平。用水户分为农业、工业、生活与环境，

其中前两者用水量通常占绝大部分。同时考虑到数据的可获取性，采用农业、工业两大系统的用水水平来代表整体水平，具体计算公式如下（李九一，2009）：

$$I_E = \frac{\alpha P_A + \beta P_I}{P_A + P_I} \quad (5-20)$$

式中， α 是农业用水有效利用系数； β 是工业用水重复利用率； P_A 、 P_I 分别为农业用水、工业用水占总用水量的比例。

经济发达而水资源紧缺的区域， I_E 指标通常会比较高。 I_E 指标如偏低，表明区域节水措施和工作需要强化。

5.3.5 水资源保障风险评估与决策体系

根据如上 4 个指标，建立区域尺度水资源保障风险分析、评估与决策框架，如表 5-10 所示。表 5-10 简明的阐述了如何根据 4 项指标的大小，分析区域风险问题，划定风险等级，并提出主要策略。

表 5-10 区域尺度水资源保障风险评估与决策体系表

			I _U -		I _U =		I _U +	
			I _E +	I _E -	I _E +	I _E -	I _E +	I _E -
I _R +	I _S +	问题					2	2-3
		措施					A-C2	A-C2
I _R =	I _S +	问题	1A	1A	1A	1A-3	1A-2	1A-2-3
		措施	B1	A	B1	A	A-C2	A-C2
	I _S =	问题	1B	1B	1B	1B-3	1B-2	1B-2-3
		措施	B1	A-B1	B1	A	A-C2	A-C2
I _R -	I _S +	问题	1B	1B	1B	1B-3	1B-2	1B-2-3
		措施	B2	A-B2	B2-C1	A-B2	A-B2-C2	A-C2
	I _S =	问题	1C	1C	1C	1C-3	1C-2	1C-2-3
		措施	B2	A-B2	B2-C1	A-B2-C1	A-B3-C2	A-B3-C2
	I _S -	问题	1C	1C	1C	1C-3	1C-2	1C-2-3
		措施	B2	A-B2	B2-C1	A-B2-C1	A-B3-C2-D	A-B3-C2-D

指标分级：
+ 高 = 中 - 低

问题分析：

1. 供水可靠性低于可接受水平，容易出现水资源保障：A. 轻度；B. 中度；C. 重度。
2. 水资源利用率过高，容易引发生态与环境问题。
3. 用水浪费，用水效率与水资源紧缺程度不相匹配。

风险等级：

低风险	中风险	高风险
-----	-----	-----

解决措施：

- A. 节约用水，控制水资源需求。
- B. 加强水源建设：1. 建设供水工程，增加供水能力；2. 加强多年调节能力（建设多年调节水利工程、开发地下水等）；3. 在此基础上，积极开发雨水、微咸水、回用水等非常规水源。
- C. 加强水资源管理与区域协调：1. 区域内部的管理；2. 相邻区域间的水资源调配。
- D. 改变经济结构适应水资源条件，或建设跨区域（流域）调水工程。

5.3.6 海河流域水资源保障风险简化评估

20 世纪 90 年代末期以来，海河流域的用水量逐渐趋于稳定（张士锋，贾绍凤，2003）。但由于供水不足，用水受到限制，用水量不能反映实际的水资源需求，未来用水量可能会进一步增加（任宪韶等，2007）。有关研究预测，海河流域的用水量将于 2020 年前后达到峰值（刘昌明，陈志恺 2001），因此研究选取 2005 年为现状年，2020 年为远景年，做风险评估。

采用海河水资源公报、《海河水资源评价》以及《黄淮海水资源合理配置研究》等资料的数据，海河流域需水量与可供水量数据见表 5-11、表 5-12，并在这

些工作基础上重新预测了 2020 年各行政区与二级区需水量，来计算上述 4 个指标，如表 5-6 所示。其中指标选取与等级划分标准如表 5-10 所示，具体说明如下： $r\%$ 根据区域经济结构确定，通常城市、工业用水比重越高，此项取值越大； I_S 与 I_R 两项指标判断为“高”的下限，按照区域供水管理能力选取，管理能力越强，区域内部调节水资源的能力越强，下限可适当取低； I_U 取值根据区域水资源利用现状，预留合理的生态用水，确定等级划分阈值，因为海河流域水资源保障问题比较严重，此项取值偏高； I_E 根据行政区的水资源紧缺程度与经济能力来选取，对于 2005 年、2020 年两种情景，分别选取了不同的阈值，实际计算中，因部分行政区缺少数据，采用了节水灌溉面积比例、灌溉定额、单位工业产值用水量等指标进行替代。

表 5-11 海河流域现状情景（2005 年）需水量与可供水量（亿 m^3 ）

地区	需水量					可供水量			水资源总量 (含入境水)
	农业	工业	生活	生态	总计	平均	$r\%$	$r\%$ 供水	
滦河及冀东沿海	29.69	8.64	5.35	0.15	43.83	43.17	90%	32.65	47.94
海河北系	53.31	15.02	22.39	2.20	92.92	82.79	95%	63.37	100.55
海河南系	163.56	36.18	29.93	2.05	231.72	191.17	95%	174.49	206.21
徒骇马颊河	70.34	5.90	7.53	0.87	84.65	68.47	90%	61.37	64.37
北京	14.30	7.36	17.13	1.92	40.71	40.18	95%	34.60	47.61
天津	17.09	5.64	5.87	0.62	29.22	27.29	95%	21.01	29.25
河北	177.65	30.83	28.11	1.38	237.98	193.75	85%	160.16	103.91
山西	12.50	8.68	3.40	0.14	24.73	26.14	90%	25.13	51.97
河南	27.34	7.85	4.34	0.74	40.27	35.20	95%	33.63	51.53
山东	66.02	4.15	6.59	0.45	77.2	59.75	85%	56.74	66.28
内蒙古	1.68	0.56	0.44	0.02	2.7	2.99	80%	2.77	4.91
辽宁	0.20	0.05	0.07	0.00	0.32	0.30	80%	0.22	0.44
海河流域	317.00	65.59	65.25	5.28	453.12	385.61	85%	354.79	429.88

表 5-12 海河流域现状情景（2020 年）需水量与可供水量（亿 m³）

地区	需水量					可供水量			水资源总量 (含入境水)
	农业	工业	生活	生态	总计	平均	r%	r% 供水	
滦河及 冀东沿海	31.69	9.22	5.71	0.16	46.77	53.50	90%	39.99	34.92
海河北系	56.89	16.03	23.89	2.34	99.15	110.25	95%	74.26	133.00
海河南系	174.53	38.61	31.94	2.19	247.26	243.72	95%	206.46	304.67
徒骇马颊 河	75.06	6.29	8.04	0.92	90.33	82.79	90%	69.10	91.58
北京	15.26	7.85	18.28	2.05	43.44	54.39	95%	43.14	67.46
天津	18.24	6.02	6.26	0.67	31.18	37.20	95%	29.68	58.19
河北	189.57	32.89	29.99	1.48	253.94	254.95	85%	218.64	255.46
山西	13.34	9.27	3.63	0.15	26.39	29.13	90%	24.86	41.33
河南	29.17	8.38	4.63	0.79	42.97	41.81	95%	41.85	48.64
山东	70.45	4.42	7.03	0.48	82.38	69.28	85%	63.84	88.01
内蒙古	1.80	0.60	0.47	0.02	2.88	3.18	80%	2.74	4.62
辽宁	0.21	0.05	0.08	0.00	0.34	0.33	80%	0.25	0.46
海河流域	338.25	69.98	69.63	5.64	483.50	490.27	85%	454.01	564.18

表 5-13 水资源保障风险评估指标计算

地区	现状情景 (2005 年)				远期情景 (2020 年)			
	I _S	I _R	I _U	I _E	I _S	I _R	I _U	I _E
滦河及冀东沿海	0.985	0.745	0.864	0.68	1.144	0.855	1.532	0.73
海河北系	0.891	0.682	0.694	0.61	1.112	0.749	0.829	0.70
海河南系	0.825	0.753	0.772	0.60	0.986	0.835	0.800	0.70
徒骇马颊河	0.809	0.725	0.885	0.60	0.917	0.765	0.904	0.71
北京	0.987	0.850	0.844	0.76	1.252	0.993	0.806	0.84
天津	0.934	0.719	0.933	0.75	1.193	0.952	0.639	0.82
河北	0.814	0.673	1.736	0.71	1.004	0.861	0.998	0.75
山西	1.057	1.016	0.503	0.63	1.104	0.942	0.705	0.70
河南	0.874	0.835	0.683	0.63	0.973	0.974	0.860	0.70
山东	0.774	0.735	0.785	0.60	0.841	0.775	0.787	0.70
内蒙古	1.107	1.026	0.603	0.62	1.104	0.953	0.688	0.70
辽宁	0.950	0.673	0.697	0.60	0.969	0.739	0.719	0.70
海河流域	0.851	0.783	0.897	0.75	1.014	0.939	0.869	0.80

表 5-14 指标选取与等级划分表

	r%	I _S + / I _R +	I _S = / I _R =	I _S - / I _R -	I _U +	I _U =	I _U -	I _E +(2005)	I _E +(2020)
滦河及冀东沿海	90%	>1.1	0.95-1.1	<0.95	>0.7	0.4-0.7	<0.4	>0.65	>0.70
海河北系	95%	>1.1	0.95-1.1	<0.95	>0.7	0.4-0.7	<0.4	>0.75	>0.80
海河南系	95%	>1.1	0.95-1.1	<0.95	>0.7	0.4-0.7	<0.4	>0.75	>0.80
徒骇马颊河	90%	>1.1	0.95-1.1	<0.95	>0.7	0.4-0.7	<0.4	>0.70	>0.75
北京	95%	>1.1	0.95-1.1	<0.95	>0.7	0.4-0.7	<0.4	>0.75	>0.80
天津	95%	>1.1	0.95-1.1	<0.95	>0.7	0.4-0.7	<0.4	>0.75	>0.80
河北	85%	>1.1	0.95-1.1	<0.95	>0.7	0.4-0.7	<0.4	>0.68	>0.72
山西	90%	>1.1	0.95-1.1	<0.95	>0.7	0.4-0.7	<0.4	>0.70	>0.75
河南	95%	>1.1	0.95-1.1	<0.95	>0.7	0.4-0.7	<0.4	>0.75	>0.80
山东	85%	>1.1	0.95-1.1	<0.95	>0.7	0.4-0.7	<0.4	>0.68	>0.72
内蒙古	80%	>1.1	0.95-1.1	<0.95	>0.7	0.4-0.7	<0.4	>0.60	>0.65
辽宁	80%	>1.15	0.95-1.15	<0.95	>0.7	0.4-0.7	<0.4	>0.60	>0.65
海河流域	85%	>1.1	0.95-1.15	<0.95	>0.7	0.4-0.7	<0.4	>0.60	>0.65

根据计算结果表 5-13 与表 5-10 所示的体系以及表 5-14 的等级划分, 确定海河流域水资源保障风险评估与决策框架如表 5-15 所示。因为各区域具有不同的特点, 表 5-10 并不能涵盖所有内容, 具体操作中需要根据区域特点合理调整。

表 5-15 海河流域水资源保障风险评估与决策表

地区	现状情景 (2005 年)		远期情景 (2020 年)	
	存在问题	解决措施	存在问题	解决措施
滦河及冀东沿海	1C	B2-C2	1C	B2-C2
海河北系	1C-2	A-B3-C2	1A-2	A-B3-C2
海河南系	1C-2	A-B3-C2-D	1B-2	A-B3-C2
徒骇马颊河	1C	B2-C2	1C	B2-C2
北京	1C-2	A-B3-C2	1A-2	A-B3-C2
天津	1C-2	A-B3-C2-D	1B-2	A-B3-C2
河北	1C-2	A-B3-C2	1C-2	A-B3-C2
山西	1C	B2-C2	1C	B2-C2
河南	1C	B2-C2	1C	B2-C2
山东	1C	B2-C2	1C	B2-C2
内蒙古	1B	B1-C1	1B	C2
辽宁	1A	A	1A	A-B2
海河流域	1C-2	A-B3-C2	1A-2	A-B3-C2

注：1. 2020 年情景中计入南水北调水量；

2. 表中数字、字母以及背景颜色含义同表 1。

由表 5-15 可见，海河流域在现状情景处于高风险，在远期情景下由于南水北调的作用下，处于低风险水平下；2005 年现状情景下，各二级区均处于高风险下，省级行政区中，除辽宁处于低风险、内蒙处于中风险外，其他省区均处于高风险；在 2020 年远景，海河北系、海河南系在二级区中处于低风险等级，北京、天津；辽宁处于低风险等级，内蒙仍处于中风险，其他省区与现状情景基本一致。以上二级区和省区水资源保障风险等级的变化是由于南水北调影响导致的。

5.4 小结

模糊综合评判法评估结果表明，海河流域除山西省、辽宁省、内蒙古处于低风险等级以及滦河及冀东沿海二级区处于中风险、天津市处于较高风险等级外，其他行政区域和二级水资源区均处于高风险等级；而据 F. Martin-Carrasco 等建立的方法评估的结果是内蒙古处于中风险等级，除山西省、内蒙古和天津市以及滦河及冀东沿海二级区外，其余省区和二级区评估结果与上述结论相同。之所以导致风险等级评估结果不一致，可能是由于风险等级的划分不同造成的。F. Martin-Carrasco 等建立的方法与模糊综合评判法对于海河流域水资源保障风险评估的结果基本一致，其中北京和天津的水资源保障风险均处于高风险等级的评估结果与韩宇平、张士峰等的评估结果（韩宇平，2003，2008；张士峰，2008）

基本相符，表明本文对海河流域的水资源保障风险评估结果基本可靠。

自 1982 年 Hashimoto 发展了可靠性、易损性、可恢复性三个指标评估水资源系统的风险问题（Hashimoto, 1982）以来，基于以上指标的模糊模糊综合评判法取得了广泛的应用。但该法应用于区域尺度水资源保障风险评估时由于数据的限制以及空间尺度增大带来的复杂性增加，区域尺度上难以实现以日、周为时间尺度的分析，一般采用年数据进行分析，导致系统的复杂性和不确定性增加，Hashimoto 定义的可靠性、易损性指标在区域尺度上难以精确计算，而可恢复性指标因为时间尺度的增大而失去意义。另一方面，由于依靠建设工程来满足人类用水需求的模式受到普遍怀疑，而更注重提高水资源利用效率的“软途径”（如制定合理水价、建立水市场等非工程措施）愈加受到重视。因此，公众参与水资源相关问题的决策逐步成为大趋势。F. Martin-Carrasco 等建立的法易于理解，利于在实践中把握，并能根据不同的风险等级和状况，提出了相应的管理对策，更加方便决策部门在相关决策中应用。但模糊综合评判法对于水资源保障风险的评估较 Martin-Carrasco 等建立的法更准确，风险等级划分更加细致。总之，两种方法各有特点，模糊综合评判法更具科学性，但未能提供管理措施，Martin-Carrasco 等建立的法具有易用性并能决策部门提供风险管理对策。

第六章 海河流域风险管理的初步建议

海河流域供用水特点是：供水工程众多，水源复杂，以地下水为主，占 61%。由于社会经济发展和人口增加以及城市化进程的加快，导致水资源需求不断上升，但是海河流域水资源天然条件先天不足，致使供给量长期未有增长，甚至有些地区停滞不前，从而易于出现长期的、深度的、大范围的水资源保障风险，在经济与生态、城市与农村、工业与农业之间造成了紧张的用水矛盾。海河流域缺水形势严重复杂，本文前面的水资源供需分析表明，海河流域水资源供求状况的变化明显，缺水和水污染突出，主要表现在地下水超采和超量引黄。经济社会发展对水资源的需求超过了流域水资源的承载能力，加上水资源管理工作与形势不相适应，产生了一系列问题。具体表现在地下水严重超采、水污染严重、生态环境恶化、行业与地区之间争水矛盾突出、水资源管理薄弱和水价不合理等六个方面，还在一定范围内存在水资源浪费现象。鉴于海河流域目前和未来都面临严峻的水资源保障的严峻形势，水资源二级区和省级行政区都处于较高的风险等级，因此，加强海河流域水资源管理，加强风险预防和采取相应的管理措施是紧迫的任务和目标。

为了实现未来水资源的可持续利用，降低水资源保障风险，水资源风险管理应从宏观管理、供需管理两方面出发，从而构建水资源供给、防洪减灾、水生态安全和综合管理的四大保障体系。

6.1 宏观管理

目前海河流域水资源行政管理的重点在于明晰事权、加强沟通、创新管理手段和完善监督机制，以精简、高效的水资源管理体制保障实现水资源的可持续利用，进而促进整个社会的和谐发展。具体措施包括：

(1) 明晰、确认各部门权责，建立有效沟通机制

明确流域组织权责，并赋予相应的权力。在行政组织上，建立中央、地方和用户代表参与的委员会形式，是流域组织在决策、执行过程中能够充分采纳各利益相关方的意见，以有效沟通，协调解决各方冲突。在管理权力和手段上，流域

组织应拥有与履行职能相匹配的法定权力和强制性手段,但对于具体水事活动的直接管理,以及土地利用、产业规划、经济发展等领域的管理,则视地区自然、社会、经济发展具体情况予以具体对待。如在水资源极度紧缺、生态环境敏感、经济发展水平低的地区,需要建立职能覆盖面广、管理权力强的流域组织以遏制地区间分散管理带来的水资源乃至整个生态环境不断恶化的趋势,实现水资源、其他自然资源和全区域社会经济的协调发展;而在水资源相对丰富、市场经济发达的地区,流域组织主要进行地区间的协调和重大问题的控制,对微观活动的管理可以交由地方政府甚至市场进行。总之,流域管理与区域管理相结合的模式应因时间、地区的差异而有所差异,在实践中探讨最佳运行模式。

(2) 完善水资源行政管理手段

行政管理手段需要通过立法来进一步完善,一方面通过立法加强行政手段的权威性和法律效力;另一方面则是对其进行加强控制,避免权力滥用,防止行政手段的过度使用。探讨行政与市场相结合的方式,提高行政手段的激励效果。适应社会主义市场建设需求,将水资源管理由单独的行政管理改革为政府宏观调控、民主协商和市场调节有机结合的管道上来

毋庸置疑,在过去的水利发展过程中,我们注重水利工程建设,而相应的管理却薄弱得多,特别是通过经济手段调控水利更不擅长。产权明晰是市场经济社会发展的基本要求,长期以来,我国的水权制度尚未完全建立,未能形成水交易市场,导致水资源配置低效率和缺乏内在动力,为了促进水资源的有效配置和高效利用,逐步实现水资源产权的合理流动,建立适合我国国情的水市场,这是现代社会发展必然的要求,必将对我国水资源配置产生深远的影响。

(3) 提高公众参与程度

高效的行政管理离不开高效的监督机制。公众参与水资源管理的含义及其发展情况公众参与水资源管理是公众采用各种方式,通过各种途径,根据有关环境政策、环境法规,按环境保护的目标、任务和要求,对一切造成或可能造成水环境污染或破坏的行为提出意见、要求和建议,施加影响,进行监督管理的活动。公众参与是对水资源行政管理实施监督的重要方式,但也是我国水资源管理的薄弱环节之一。为此,应采取多种方式提高公众参与程度。从制定政策之初就应通过规范的渠道向社会公众公布所面临的水资源问题和政策的目标、计划;通过在

管委会中吸纳公众代表、召开听证会等方式，使公众能及时发表意见，并确保意见的采纳；在决策形成、执行过程中若有变化也应及时向公众公布和作出解释。可通过立法的方式提高公众参与的公开、公正、规范化和制度化。

（4）完善城乡水务一体化管理机制

城乡水务一体化管理即对涉及的水务事务的统一管理，就是指对水资源的开发、利用、治理、配置、节约、保护实行全方位、全领域、全过程的统一管理。其核心是水行政管理部门代表国家对水资源所有权的统一管理，其根本目的是实现水资源的优化配置和可持续利用。城乡水务一体化管理，就是要实行水行政管理部门对所辖区域内城市和农村所有涉水事务（包括防洪、水资源、供水、用水、节水、排水、污水处理与回用以及农田水利、水土保持等）进行统一管理的管理体制。它是城市与农村、流域与区域等水问题的统筹兼顾，是自然资源系统、社会经济系统的统筹兼顾，这种管理体制同传统水务管理模式不同，其权力维数是多元的、平行的，而不是单一的和自上而下的。在管理的组织结构，管理的范围、特点、权力特定、决策模式等方面也有很大不同，比如从组织结构上看，传统的水务管理一般是传统的金字塔结构，而城乡水务一体化管理多是扁平化的结构，层级减少，提高了行政效率，减少了行政成本。城乡水务一体化的主要方向是组建县、市一级的水务局，明确水务局的管理职能。水务局作为一级行政主管部门，其主要职能是在辖区内对与水资源有关的公共事务进行管理，如制定和贯彻执行相关法律法规、制定政策、编制地方水资源规划、规范市场行为、协调水事冲突和矛盾等。对涉水企业逐步进行市场化改革，水务局主要负责宏观调控。

（5）制定合理的节水与产业发展政策

海河流域大部分地区属严重缺水，因海河流域缺水的现实，制定合理的产业发展政策，严格限制高耗水、高污染产业的发展，积极推进清洁生产，鼓励推广先进的节水措施，对排污不达标的企业与行业进行惩处，建立有效的节水管理和运行机制，壮大节水产业。并制定节水奖励政策，实行用水总量控制和定额管理相结合的制度，实施建设项目的节水措施必须与主体工程“三同时”（同时设计、同时施工、同时投产）制度，可根据工业不同行业、农业种植业结构、第三产业各部门用水标准，建立用水计量、超计划用水累进加价制度，对节水、增产、增效取得显著成效的单位和企业予以奖励，有计划地关、停、转一批耗水量大、污

染严重的企业。要严格限制高耗水工业项目建设。

6.2 水资源保障风险管理技术方法

对于区域面临的水资源保障风险威胁,由于水资源保障是在区域需水和供相互作用的基础上形成的,所以在技术层面上对其进行风险管理应该包括需水管理和供水管理两个方面,也就是从节流和开源两个方面入手,实现供需平衡。

6.2.1 需水管理

水资源需求管理是为抑制对水资源的过度需求、防止生态系统的破坏与水环境容量的衰减,决策者、规划者、用水户、受有利或不利影响的群体、对问题关注的公众等所有利害相关者采取的系统性行动,包括综合利用法律、行政、经济、科技、宣传等一系列手段,以促进水资源的公平、合理配置和高效、可持续利用。由水资源需求管理的定义可以看出,对区域进行水资源需求管理包括较为丰富的内容,但其核心是抑制水资源的需求过度膨胀,促进水资源的可持续利用。

1. 农业节水措施

(1) 加大对节水建设的资金投入。把节水高效农业建设列为重点,国家在资金投入上给以扶持,充分挖掘现有投资潜力,拓宽投资渠道。

(2) 采取综合措施做好农业节水。目前,有关农业节水技术很多,包括农业水资源合理开发利用技术、节水灌溉工程技术、农业节水技术、节水管理技术等。继续进行原有灌区的更新改造;加强土壤墒情监测,采用适宜的灌溉技术;选用抗旱和水分利用效率高的良种;推行秸秆覆盖、减少无效蒸发;机械蓄水保墒,主要有深耕、耙耱、雨后锄耘、少耕和免耕等;合理调整种植结构,在保证粮食安全的前提下,适当减少灌溉面积,应适当减少水田面积,保持小麦和玉米的种植面积,可以适当增加棉花种植面积;冬小麦采用垄作栽培方式,既可减少减少灌溉用水,提高水分利用效率,还可防止小麦的倒伏发生,有利于小麦的稳产、高产。

(3) 积极利用多种水源发展农业节水。根据作物的生长机理充分利用降水和土壤水,减少灌溉用水;积极开发浅层地下水资源,发展井灌,推行井渠结合的灌溉方式;污水资源化,利用地下微咸水,增加灌溉水源。

2. 工业和生活节水措施

(1) 工业节水措施

工业节水主要为产业结构的调整、用水装置的更新换代、生产工艺的改进、节水器具的推广、管理水平的提高等方面。工业节水要抓四个方面：全面调整工业结构，有计划、有重点的限制和压缩高耗水工业项目的建设；通过各种行政手段加强用水管理，计划用水和严格控制废污水的排放，可获得明显的节水效果；通过抓工业内部循环用水，提高水的重复利用率，可以收到投资少、见效快、效益高的节水效果；通过改造工业设备和生产工艺实现节水，这一方面节水难度大、投资高，但随着水资源获得难度的加大和工业水价的提高，节水的经济效益也会随之提高。

(2) 城市水利用应实施“节流优先，治污为本，多渠道开源”战略对策

要实现建设部提出的城市未来新增用水量的一半要靠节水来解决的目标，力争将城市人均综合需水量指标控制在 $160\text{m}^3/\text{a}$ 以内，使我国城市总用水量在城市人口达到最大值后得到稳定，必须加大产业结构和工业布局的优化调整力度，大力研制开发和推广应用先进的节水型用水器具、用水设备和先进的节水工艺，加强用水管理以减少无效用水和浪费用水，杜绝各种跑、冒、滴、漏，建立节水型工业和节水型城市。为了建立节水型的体制，不仅需要提高公众认识，还需要采取必要的法制、行政和经济等综合措施，同时还必须将“节流优先”的战略落实到实处，即投入相应的资金和高新技术。必须加大城市污水处理和水污染防治的力度，增加建设资金和运行费用的投入，污水处理设施能力的增加速度必须高于供水设施，使城市污水处理率不断得到提高，并采取有效措施修复已经受到污染的城市水环境。在加强节水和治污的同时，开发水资源也不容忽视。除了合理开发地表水和地下水等传统水资源外，还应通过工程设施收集和利用雨水，同时要重视微咸水的利用。每个城市在制定供水规划时，应对传统水资源和非传统水资源进行技术经济比较，以效益优先的原则组合供水方案。

(3) 深化改革，加强城市水市场监管

加强相关政策引导，并抓紧制定和完善相关的法律法规，规范市场行为，为相关企业创造一个公平、公正、公开的竞争环境，鼓励各种所有制企业在政府的特许范围内从事水市场的经营活动，为消费者提供安全、可靠、优质、合理的服

务。加强对城市水价的监审，在重点缺水城市如北京、天津等地可逐步推广阶梯水价。政府除对水价进行监管外，对市场的水质加强监管，督查的范围包括于供水水质、原水水质、再生水质及排水水质等。

（4）加强管理，努力创建节水型城市

加强城市用水管理，以提高用水效率为核心，以促进城市水系统的良性循环为目标，综合运用行政、经济和技术等各种管理手段，提高城市节水水平，发展节水型工业，创建节水型城市。完善关于城市节水的法规体系，科学制定城市节水计划，并列入本地国民经济和社会发展规划，组织制定和逐步完善城市用水定额、节水型用水器具技术标准、城市供水管网漏失率控制指标等标准，加强城市节水的标准化管理，强化节水标准的执行力度，促进节水型器具的推广应用工作，提高工业和生活用水的效率，加强城市供水管网改造，节约水资源。严格执行城市节水管理制度，继续坚持计划用水和超计划用水累进加价制度，加大水价对节水的引导力度。要根据国家的有关规定，严格限制新建高耗水项目，禁止引进高耗水、高污染的工业项目，限制和淘汰落后的高耗水工艺和高耗水设备，提高工业用水效率。对新建、改建和扩建工业项目，要严格执行“三同时四到位”制度，节水设施必须与主体工程同时设计、同时施工、同时投入运行；用水单位必须做到用水计划到位、节水目标到位、节水措施到位、管水制度到位。按照《建设工程质量管理条例》的有关规定，积极推广应用节水型用水器具，严格禁止新建、改建和扩建房屋中使用国家明令淘汰的卫生洁具和配件，限期更换改造现有公共建筑和各单位房屋建筑中不符合节水的用水器具，鼓励和引导居民住宅使用节水型用水器具。要建立和实行节约用水的考核制度，有计划、有步骤、有重点地开展对工业企业、用水单位和节水型城市节水的监督考核，加大节水奖励的力度。加大节水的科技投入、发展节水技术，鼓励采用先进的节水技术、节水工艺、节水方法、节水设备和节水器具，以科学进步推动城市节水工作。

（5）强化公众的节水意识

水资源的可持续利用是攸关民族生存和发展的大事，城市节水不仅是有关部门的责任，也是全社会的义务，要广泛动员社会各界，积极引导公众参与。要继续坚持城市节水宣传周活动，同时还要利用新闻媒体、公益性广告、宣传专栏、中小学教材等一切有利形势进行广泛、深入、持久的宣传教育，让公众了解水情，

清醒地认识潜在的水危机，理解水资源可持续利用的重要性，强化公众的水患意识和节约用水的自觉性。要还公众对城市水资源开发利用的知情权、发言权和参与权，充分调动全社会的一切积极因素共同战胜水危机，实现城市水资源的可持续发展。

6.2.2 供水管理

对于水资源保障的供水管理措施包括：通过提高汛限水位来研究获得的供水效益和由此造成的防洪风险之间的平衡点；在水资源供需平衡中追求区域缺水均化来使得缺水的破坏减到最低程度；对现有水利工程的分水比例进行实时调整使得水资源高效利用；通过提高污水处理率和污水回用率增加区域可供水量；对当地水资源进行挖潜提高可供水量；在可行的情况下可以通过跨流域调水来解决区域根本的水资源保障问题等。针对可能出现的水资源风险，建立预警机制，并采取相应的应急对策。

应急对策包括流域内水资源内部调配；有条件地挤占生态用水；保证重点行业用水的基础上，非常规地压缩用水需求；挖掘潜力，增加临时供水量；发挥南水北调作用，首要维持生活及必要部门的基本供水。可重点采取的具体措施如充分利用南水北调工程，预计南水北调工程建成后，2010年和2030年向受水去供水量分别为58亿 m^3 和87亿 m^3 ，基本可以保障受水区的生活用水需求。在黄河未出现同枯条件下，考虑加大引黄量；根据相应的工程设施安排，各区相应采取应急供水预案。如北京可紧急启用怀柔县雁栖河及怀河一带地下水应急备用水源，另外还可启用密云水库在丰水年和平水年预留的11亿 m^3 备用库容。天津市除启用地下水后备水源—宝坻地下水水源和部分自备井，还可利用“引黄济津”工程在冬季11月和12月期间利用山东省位山三干渠的输水能力。保定、石家庄、邢台、邯郸、安阳等山前平原的城市则只能采取继续加大地下水超采量应急（王浩等，2003）。

另外，为增强供水能力，还可加强对非常规水源的利用，如加强雨水收集、洪水资源化以及海水直接利用等。

雨水直接利用和洪水资源化通过对天然降水和径流的收集、存储从而加以利用，一方面能避免过度降水和过量的径流形成的洪涝灾害，另一方面又使其成为可利用的资源，具体表现为人畜生活用水供给、城市雨水生态利用和我国传统农

业常采用的、在美国等水资源较为丰富国家较为普遍采用的雨养农业等。美日等发达国家多采用收集城市雨水用于绿化、回补地下水等生态方面的用水。

海水直接利用和淡化也是增加供给的方式。海水直接利用一般是工业冷却水和冲厕等方面。美国和日本在这方面有比较多的应用。如日本、美国和欧洲年利用海水量在 1500 亿~3000 亿 m^3 的量。而我国 2006 年仅为 269 亿 m^3 ，且仅作为于火电、核电冷却水，与美日欧相比，还有广阔的应用前景。海河流域拥有较长的海岸线，秦皇岛、天津等城市都位于海滨，尤其是天津作为工业城市用水总量多，利用海水代替淡水作为工业冷却水，可有效缓解沿海城市用水紧张问题。一般城市冲厕用水占城市生活用水的 35%。香港从上世纪 50 年代开始利用海水冲厕，至今利用海水冲厕人口已占总人口的 78.5%，而海河流域仅有天津的少数居民小区采用海水冲厕。如果如香港一样，节约的淡水将是很可观的。另外，随着技术的进步，海水淡化成本逐渐降低，比如以色列的海水淡化成本已达到 0.52 美元/ m^3 ，而我国可以达到 5 元/ m^3 ，相当于南水北调的调水成本。天津预期于 2010 年建成日淡化能力达 10 万 m^3 的海水淡化厂，这将有效缓解甚至解决天津市的用水紧张问题，并为海河流域的沿海地区提供良好的示范作用。

6.3 小结

本章首先总结了水资源保障风险的宏观管理对策，然后从水资源需水管理和供水管理两方面对海河流域的水资源保障风险提出了具体管理对策，并介绍了供水管理中应对严重缺水时可采取的应急对策。

第七章 结论与展望

7.1 研究结论与建议

由于水资源问题是关系国计民生的重要问题之一，因此水资源风险评估与管理一直是国内外经济社会、资源安全等领域研究的热点。以水资源供需平衡及风险评估为主线，本文针对流域水资源保障风险概述了风险识别、风险分析、风险评估、风险管理等理论体系和措施，提出了具有可操作性的两种模型及方法，并对两种模型进行了对比分析研究；剖析了水资源风险研究的发展历程，揭示了水资源风险评估的理论体系；在对流域水资源保障风险进行了系统性的分析和评估基础上，提出了解决水资源保障风险问题的较优措施和方案，为水资源规划和国家的社会经济和生态安全决策服务。本文利用搜集的社会经济数据，分析了现状水平年的水资源供需平衡状况和缺水严重程度，并对未来年份的水资源供需进行了预测。本文用定量化手段和借鉴国外的流域水资源风险评估模型来分析解决流域水资源保障风险的评估，做了一定的工作，并以海河流域为实例，评估了海河流域 8 个省级行政区和 4 个水资源二级区的水资源保障风险，实现了理论与实践的结合。研究的主要结论包括以下几方面：

(1) 由风险的定义：某个客体遭受某种伤害、损失、毁灭或不利影响的可能性以及造成的可能损失以及公式 $R=f(H \times V/C)$ (H 为事件发生的概率， V 为事件发生的后果， C 为能力，即风险事件的可恢复性) 可得到水资源风险的定义：在特定的时空环境条件下，水资源系统中所发生的非期望事件及其发生的概率并由此产生的损失程度。该定义比较全面地反映了水资源系统所面临的风险事件及其风险事件的后果。水资源风险具有客观属性和主观属性，并且可以从不同的角度和标准将水资源风险分为多种类别。本研究对水资源风险理论进行了分类，认为水资源风险理论由预测理论方法理论、多目标评价与决策理论和水资源可持续发展理论等构成；对水资源进行需水预测一般采用预测结果相对可靠、应用广泛的定额法概率；风险分析模型可分为单目标评估和系统评估两类。

(2) 从世界和中国水资源状况分析来看，都面临严重的水资源危机。根据 IPCC 报告对世界各区域的水资源风险状况和驱动力的分析，得出了气候变化对

全球水资源具有增大其风险的趋势，叙述了 IPCC 针对水资源风险提出的国际通用的风险管理措施。

(3) 分析了海河流域各分区供需状况，并预测了未来年份水资源供需状况和缺水率。从降水量来看，海河流域是我国降水量变化年际变化较大的区域，滦河及冀东沿海的 C_v 值最小，海河南系和徒骇马颊河 C_v 值最大。在 8 个省级行政区中，内蒙古自治区 C_v 值最小，河南省 C_v 值最大。海河流域平均降水量近年来呈现出偏枯的趋势。各省市自 1981 年以来，呈现出愈加偏枯的趋势，并且自 2001 年以来偏枯幅度大幅增大。从地表水资源来看，海河北系的 C_v 值年际变化较小，徒骇马颊河 C_v 值年际变化较大。内蒙古自治区的 C_v 值年际变化较小，山东省的 C_v 值年际变化较大。地表水资源的区域 C_v 值差异与降水量的区域 C_v 值差异基本一致。自 1981 年代后，各区域进入普遍偏枯阶段且偏枯幅度呈增大趋势。从地下水资源来看，滦河及冀东沿海和海河南系地下水资源开采较为严重，分别达到 57.6% 和 67.2%，天津、河北和河南超采严重，北京超采率较低，未超采的 4 个省市分别为山西、山东省、内蒙古自治区和辽宁省。整个海河流域地下水超采率达到 40.3% 的严重程度。从根据水资源人均紧缺指标评价等级，海河流域二级区在各水资源保证率情况下均达到严重缺水程度以上，各省区均达到中度缺水程度以上。整个流域来看，海河流域属极度缺水程度，海河南系和天津人均水资源量最低。供水方面，地下水供水量占总供水量的 65.0%，为主要供水水源。从用水来看，海河流域整体从用水比重分析，整个流域以农业用水为主，占到 70%，工业和生活用水基本持平，徒骇马颊河农业用水比重最大，达到 83.1%。省级行政区中，北京市以生活用水比重较大，达到 42.1%，其他省区以农业用水为主，其中山东省农业用水比重最大。工业用水比重和用水量呈两阶段变化，近年呈下降趋势，农业用水一直呈下降趋势。生活用水比重则一直呈上升趋势。从水资源开发利用程度来看，海河流域总体上从地表水开发利用程度、地下水开发利用程度和水资源总体利用开发程度均达到用水高度紧张程度，其中地下水开发利用程度最高，地下水资源面临严峻的形式。在进行了海河流域供用水分析后，以 2005 年为水平年，对海河流域进行了总体供需平衡分析。海河南系为二级区中最缺水的地区，河北是省区中缺水最严重的地区。根据人口、人均需水量、GDP 和万元 GDP 用水量的预测结果，对未来年份 2020 年、2030 年、2040 年的

供需状况做了预测,并计算了未来年份的缺水率。海河南系和河北省缺水最严重,这与现状年评估结果基本一致。

(4) 本研究选取水资源风险率、脆弱性、可恢复性、事故周期(重现期)、风险度作为水资源系统水资源保障风险的评估指标,采用模糊综合评判方法的方法和模型对海河流域水资源保障风险进行了综合评估。根据最大隶属评判原则,海河流域除山西省、辽宁省、内蒙古自治区处于低风险等级以及滦河及冀东沿海二级区处于中风险等级、天津市处于较高风险等级外,其他行政区域和二级水资源区均处于高风险等级。为了对不同模型进行比较研究,本文运用 F. Martin-Carrasco 等(F J Martin-Carrasco, L Garrote, 2006)在对西班牙埃布罗河流域的有关研究,建立了需水保障率、需水保障可靠性、水资源利用率、供水能力随保障率的变化率共 4 个指标及模型,对海河流域的现状年与远景年的水资源保障风险进行了简化评估,并提出了相应的管理对策。评估结果表明海河流域在现状情景处于高风险,在远期情景下处于低风险水平下;2005 年现状情景下,各二级区均处于高风险下,省级行政区中,除辽宁处于低风险、内蒙处于中风险外,其他省区均处于高风险;在 2020 年远景,海河北系、海河南系在二级区中处于低风险水平,北京、天津、辽宁处于低风险水平,内蒙仍处于中风险,其他省区与现状情景基本一致。以上二级区和省区水资源保障风险水平的变化是由于南水北调影响导致的。F. Martin-Carrasco 等建立的法与模糊综合评判法对于海河流域水资源保障风险评估的结果基本一致,表明本文对海河流域的水资源保障风险评估结果基本可靠。两种水资源保障风险评估方法对比,模糊综合评判法更具科学性,但未能提供管理措施, Martin-Carrasco 等建立的法具有易用性并可作为决策部门提供风险管理对策。

(5) 针对海河流域水资源保障风险,可从宏观管理入手,明晰、确认各部门权责,建立有效沟通机制,完善水资源行政管理手段,加强水管理立法,提高公众参与程度,使政令公开、公正、规范化和制度化,完善城乡水务一体化机制,并制定合理的节水与产业发展政策。具体到水资源,可从需水管理和供水管理进行风险管理,在农业、工业、生活采取节水措施和节水技术,城市水利利用应实施“节流优先,治污为本,多渠道开源”战略对策。而供水管理可分为一般管理措施和应急对策两方面。一般管理措施包括提高汛限水位、平衡中寻求区域缺水均

化、实时调整水利工程分水比例、提高污水处理率、当地挖潜、跨流域调水等。应急对策包括流域内部调配、有限挤占生态水、压缩用水需求、利用南水北调等。对于流域内不同区域和城市应采取相应的紧急供水措施。

7.2 论文创新点

论文的主要创新点包括以下几方面：

(1) 在介绍各种水资源风险评估理论和方法的基础上，参考前人研究结果，选取了适合流域尺度的水资源保障风险的评估理论和方法。

(2) 以水资源供需平衡分析为基础，运用模糊综合评判方法和 F. Martin-Carrasco 等建立的方法，组建了流域的省级行政区和二级区的水资源保障风险评估指标和模型，并进行了流域保障风险等级评估。

(3) 运用 F. Martin-Carrasco 等建立的方法和专家建议，提出了应对海河流域水资源保障风险的对策和具体的风险管理措施。

7.3 研究展望

本文虽然对水资源保障风险问题进行了比较系统的研究，但是受数据、方法以及笔者知识水平和能力的限制，对一些问题没有进行深度的剖析。笔者认为本文存在以下不足之处，需要在以后的工作中进一步研究和解决：

(1) 本文虽采用时间序列和典型年的水资源供需平衡进行了水资源保障风险的研究，但时间序列相对较短，并且未考虑水文衰减规律对区域来水的影响，需要以后的研究采用更详尽的数据，最好能运用逐月、逐日的数据来逐步完善充实研究。

(2) 限于知识水平所限，未能采用更为先进和科学的计算机结合数学模型对水资源保障风险进行研究。

(3) 在对未来水资源供需和保障风险进行预测时，考虑的因素较为简单，应综合社会、经济、技术发展等多因素今后做更为精确的预测研究。

(4) 不管模糊综合评判方法还是 F. Martin-Carrasco 等建立的方法均涉及到一定的主观认定过程，因此，预测过程中的数据处理、参数设置、风险等级划分等细节问题需要在以后的工作和学习中进一步做深入研究，减少人为干扰因素，完善模型，使风险评估更加客观、科学，提高结果的准确性。

参考文献

- A H~S Ang, Tang W H. Probability concepts in engineering planning and design [M]. New York: John Wiley and Sons, 1984.
- A Iglesias, L Garrote, F Flores, et al. Challenges to Manage the Risk of Water Scarcity and Climate Change in the Mediterranean [J]. *Water Resources Management*, 2007, 21:775~788.
- A Iglesias, M Moneo, L Garrote, et al. Drought and water scarcity: current and future vulnerability and risk [M]. In: A Garrido, M R Llamas (eds.). *Water policy in Spain, resources for the future* Washington, DC, 2006.
- A Kawamura, T Merabtene, K Jinno. Development of Integrated Decision Support System for the Water Supply System in Fukuoka, Japan [J]. In: *Water 99 Joint Congress. 25th Hydrology & Water Resources Symposium, 2nd International Conference on Water Resources & Environment Research*; Barton, ACT: Institution of Engineers, Australia, 1999, 341~347.
- Beck, U. *Risk society: towards a new modernity Theory. culture & society*. London: Sage[M], 1992.
- Bishop, A. B, Fullerton, H. H, Crawford, A. B, Chambers, M. D, and McKee, M. *Carrying Capacity In Regional Environmental Management* Washington[M], D.C. Office of Research and Development, .S Environmental Protection Agency, 1974
- Biswas AK. Water for sustainable development in the 21st century [J]. *Water International*, 1991, 16(4): 125~130.
- Chen Jiaqi. The study on the relationship of water resources research and hydrology[R]. *The Forum of Water Problem*, 1993.
- Chin D A. A scale model of multivariate rainfall time series [J]. *Journal of Hydrology* , 1995, 168: 1~15.
- Cochrane J L. *Multiple Criteria Decision Making* [M]. Columbia: The University of South Carolina Press, 1973.
- Colorni A, Fronza G. Reservoir management via reliability programming[J]. *Water Resources Research*, 1976, 12 (1): 85~88.
- F J Martin-Carrasco, L Garrote. Drought-induced Water Scarcity in Water Resources Systems [A]. O.F. Vasiliev et al. (eds.). *Extreme Hydrological Events: New Concepts for Security* [C]. 2006,

301 - 311.

Fine L L. Thomas F. Information Systems Risk management: Key Concepts and Business Process [M]. Computer and Security, 2000, 19: 234~242.

Goicoechea A, Duckstein L. Multiple objective under uncertainty:an illustrative application of protrude [J]. Water Resources Research,1979,15(2):203~210.

Haimes Y Y. Rick~benefit analtsis in multiobjective[M]. Framwork New York: McGraw~Hill, 1985.

Haimes Y,Y. 水资源系统分析(上、下) [M], 陈益秋译. 中国环境问题研究会, 1975.

Hashimoto, T Stedinger, JR Loucks, DP. Reliability, Resiliency, and Vulnerability Criteria for Water Resource System Performance Evaluation [J]. Water Resources Research, 1982, 18(1):14-20.

Hasson, S, O. Philosophical Perspectives on Risk[M]. Volume, DOI, 2000.

HJ Fowler, C G Kilsby, P E O'Connell. Modeling the impacts of climatic change and variability on the reliability, resilience, and vulnerability of a water resource system [J]. Water Resources Research, 2003, 39(8):1222~1232.

Howard R Oliver, Sylvia A Oliver. The Role of Water and Hydrological Cycle in Glodal Change[J]. Berlin:Springer2 Verlag .1995: 129~147.

IPCC. Climate Change 1990: The IPCC Impacts Assessment [M].Canberra, Australia: Australian Government Publishing Service, 1990.

IPCC. Climate Change 1995: Impacts, Adaptations and Mitigation ofClimate Change: Scientific-Technical Analyses [M]. Contribution of Working Group II to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press, 1996.

IPCC. Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press, 2001.

IPCC. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Forth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press, 2007.

[26] J Alcamo, T Henrichs, T Rosch. World water in 2025: global modeling and scenario analysis

- [A]. In: F R Rijsberman (Eds.). World Water Scenarios Analyses [C]. London, UK: Earthscan Publications, 2000.
- K Jinno, Xu Zongxue, A Kawamura, et al. Risk Assessment of a water supply System during Drought [J]. Water Resources Development, 1995, 11(2):185~204.
- Kenji Jinno, Xu Zongxue, Akira Kawamura, Kaname Tajiri. Risk assessment of water supply system during drought[J]. Water Resources Development, 1995,11(2):189~205.
- Lahdelma R, Hokkanen J, Salminen P. SMAA~Stochastic multiobjective acceptability analysis[J]. European Journal of Operational Research, 1998, 106: 137~143.
- Li H, Yu C. A fuzzy multiobjective program with quasiconcave membership functions and fuzzy coefficients[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2000, 109: 59~81.
- Lowrance W W. Of acceptable risk[M]. Los Altos Calif: William Kaufmann, 1976.
- Mahmoud A, Abu~Zeid. Water and sustainable development: the vision for world water, life and the environment [J]. Water Policy, 1998, (1): 9~19.
- Mangasarian O L. Nonlinear Programming[M]. New York: McGraw~Hill, 1979.
- Mark T, George K. A hidden Markov model for modelling long~term persistence in multi~site rainfall time series 1. Model calibration using a Bayesian approach[J]. Journal of Hydrology, 2003, 275: 12~26.
- Mark T, George K. A hidden Markov model for modelling long~term persistence in multi~site rainfall time series 2. Real data analysis[J]. Journal of Hydrology, 2003, 275: 27~48.
- Mattikalli N M. Time Series Analysis of Historical Surface Water Quality Data of the River Glen Catchment[J]. U.K. Journal of Environmental Management, 1996, 46: 149~172.
- Molostvov V S. Multiple~criteria optimization under uncertainty: concept of optimality and sufficient conditions[J]. In: Theory and Practice of Multiple Criteria Decision Making. New York: North~Holland, 1983, 91~105.
- Pelletier J D, Turcotte D L. Long~range persistence in climatological and hydrological time series: analysis, modeling and application to drought hazard assessment[J]. Journal of Hydrology, 1997, 203: 198~208.
- Penman H.L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proc. Roy. Soc. London, 1948, A193, 120~146.
- RN Jones, A B Pittock. Climate change and water resources in an arid continent: Managing

- uncertainty and risk in Australia [J]. In: M Beniston (eds.). *Climatic Change—Implications for the Hydrological Cycle and for Water Management*. Amsterdam, Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2002, 465~501.
- RN Jones, C M Page, N Herron, et al. Climate change and the risk to long-term water supply in the Murray-Darling Basin [M]. In: Australian Water Association. *Proceeding of 2001 A Water Odyssey*, 2001.
- RN Jones, C M Page. Assessing the Risk of Climate Change on the Water Resources of the Macquarie River Catchment [J]. In: F Ghassemi, P Whetton, R Little, et.al(eds.). *Integrating Models for Natural Resources Management across Disciplines, issues and scales (Part 2)*. Modsim 2001 International Congress on Modelling and Simulation, Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand, Canberra, 2001, 673~678.
- Robert Engelman, Pamela LeRoy. *Sustaining Water Population and the Future of Renewable Water Supplies*[M]. Population and Environment Program, Population Action International, 1993.
- Shiklomanov, I. A., J.Rodda, etl. *World Water Resources at the Begin-ning of the 21st Century*.Cambridge[M]. UK: Cambridge University Press, 2003.
- Simonovic S I. Marino M A. Reliability programming in reservoir manage[J]. *Water Resources Research*, 1982, 18(4): 735~743.
- Sivakumar B, Phoon K K, Liong S Y, Liaw C Y A systematic approach to noise reduction in chaotic hydrological time series[J]. *Journal of Hydrology*, 1999, 219: 103~135.
- T Merabtene, A Kawamura, K Jinno, et al. Risk assessment for optimal drought management of an integrated water resources system using a genetic algorithm [J]. *Hydrological Processes*, 2002, 16:2189~2208.
- UNESCO. *Water--in a shared responsibility*. The United Nations World Water Development Report 2[R], 2006. <http://unesdoc.unesco.org/images/0014/001454/145405E.pdf>.
- Varis O, Vakkilainen P. China's 8 challenges to water resources management in the first quarter of the 21st Century [J]. *Geomorphology*, 2001, (41): 93~104.
- Xia Jun, K Tackeuchi. Barriers to sustainable management of water quantity and quality[J]. *Hydrological Science Journal*, 44 (4): 503~505.
- Xu Zongxue, K Jinno, A Kawamura, et al. Performance Risk Analysis for Fukuoka Water Supply System [J]. *Water Resources Management*, 1998, 12:13~30.

- Zou S, Yu Y. A. dynamic factor model for multivariate water quality time series with trends[J]. Journal of Hydrology, 1996, 178: 381~400.
- 北京市南水北调工程建设委员会办公室. 北京市南水北调配套工程总体规划 [M]. 北京:中国水利水电出版社, 2008.
- 蔡云华. 云南滇中地区水资源可持续利用评价研究[D]. 成都: 四川大学出版社, 2005.
- 柴小青. 一种基于专家模糊偏好集结的群决策方法[J]. 系统工程与电子技术, 1998, 3: 32~35.
- 陈雷. 实行最严格的水资源管理制度 保障经济社会可持续发展——在全国水资源工作会议上的讲话(2009年2月14日) [J]. 中国水利报, 2009, 1:1~11.
- 陈家琦, 王浩. 水资源学概论[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996.
- 陈家琦, 王浩等. 水资源学[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- 陈家琦. 中国的水资源. 见:钱正英主编,中国水利[M]. 北京: 水利电力出版社, 1991
- 陈俊. 深圳城市用水供需趋势研究[D]. 河海大学, 2004.
- 陈梦熊. 城市水资源问题与对策研究[J]. 水文地质工程地质, 1992, 19 (1):1~3.
- 陈守煌. 多阶段多目标决策系统模糊优选理论[J]. 水利学报, 1990, 1: 1~10.
- 陈守煌. 系统模糊决策理论与应用[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 1994.
- 陈守煌等. 大连市水资源综合利用与经济发展协调管理模式[M]. 大连理工大学科研报告, 1996.
- 陈意平, 曲谦隆等. 灰色系统理论在水资源工程中的应用[M]. 山西科学技术出版社, 1992.
- 陈勇. 陕北农牧交错区水资源利用评价及供需趋势研究. 陕西杨陵: 西北农林科技大学硕士论文, 2006.
- 程春田, 王本德. 短期气象预报在水库防洪调度中的可行性分析[J]. 大自然探索, 1994, 4: 86~92.
- 程春田. 水库防洪预报调度系统研究及应用[D]. 大连理工大学博士学位论文, 1992.
- 崔建国. 一种地下水水质灰色预测方法[J]. 水文, 1997, 1: 42~44.
- 戴慎志, 陈践. 城市给水排水工程规划[M]. 合肥:安徽科学技术出版社, 2001.
- 德克斯坦[美], E.J 波兰特[德]编.水资源工程可靠性与风险[M].吴媚玲,王俊德译.北京:水利水电出版社,1993.
- 邓聚龙. 灰色控制系统[M]. 武汉: 华中工学院出版社, 1985.
- 邓聚龙. 灰色系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 1985.
- 丁晶, 邓育仁. 随机水文学[M]. 成都科技大学出版社, 1988.

- 董旭. 昌平区水资源评价与预测研究[D]. 中国农业大学, 2005.
- 董曾南. 淡水资源的可持续利用[J]. 水利发展研究, 2002, 1: 15~16.
- 方道南, 叶秉如. 基于概率分布未知的多目标风险决策[J]. 四川水力发电, 1999, (2):9-12.
- 樊引琴. 作物蒸发蒸腾量的测定与作物需水量计算方法的研究[D]. 西北农林科技大学, 2001.
- 冯宝平. 区域水资源可持续利用理论与应用研究[D]. 河海大学, 2004.
- 冯平. 供水系统干旱期的水资源风险管理[J]. 自然资源学报, 1998, 13(2):139-144
- 冯强, 王昂生, 李吉顺. 灰色灾变预测理论在旱涝灾害预测中的应用[J]. 中国减灾, 1996, 6 (2): 24~29.
- 冯尚友. 多目标决策理论方法与应用[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1990.
- 冯尚友. 水资源系统工程[M]. 湖北科学技术出版社, 1991.
- 冯尚友等. 水资源持续利用的框架[J]. 水科学进展, 1997, 8 (4): 301~307.
- 傅湘, 王丽萍, 纪昌明. 洪灾风险评价通用模型系统的研究[J]. 长江流域资源与环境, 2000, 9 (4): 518~524.
- 傅湘, 王丽萍, 纪昌明. 防洪减灾中的多目标风险决策优化模型[J]. 水电能源科学, 2001, (1): 36-39.
- 高彦春, 刘昌明. 区域水资源开发利用的阈限分析[J]. 水利学报, 1997, 8: 73~79.
- 葛全胜, 方修琦, 郑景云. 中国历史时期温度变化特征的新认识[J]. 地理科学进展, 2002, 21(4): 311~317.
- 国家统计局. 从十六大到十七大经济社会发展回顾系列报告. <http://www.stats.gov.cn/tjfx/ztfx/sqd/index.htm>.
- 郭元裕. 农田水文学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1997.
- 郭仲伟. 风险分析与决策[M]. 北京: 机械工业出版社, 1986.
- 海河流域管理委员会. <http://www.hwcc.gov.cn/pub/hwcc/static/lygk/lyzs.htm>.
- 韩宇平, 李志杰, 赵庆民. 区域水资源保障风险决策研究 [J]. 华北水利水电学院学报, 2008, 29(1):1-3.
- 韩宇平, 阮本清, 汪党献. 区域水资源保障的多目标风险决策模型研究 [J]. 水利学报, 2008, 39(6):667-673.
- 韩宇平, 阮本清. 水资源保障风险经济损失评估研究 [J]. 水利学报, 2007, 38(10):1253-1257.
- 韩宇平, 许拯民. 区域水资源保障风险调控研究 [J]. 河北工业大学学报, 2007, 24(4):81-84.

- 韩宇平. 水资源保障风险管理研究[D]. 西安: 西安理工大学博士学位论文, 2003.
- 贺北方, 刘正才. 灰色系统理论方法与应用[M]. 北京: 气象出版社, 1995.
- 贺伟程. 世界水资源[M]. 见: 中国水利大百科全书·水利. 北京: 中国大百科全书出版社, 1992.
- 何德功. 世界水资源现状. 新华网, 2003-03-16.
- 胡国华, 夏军. 风险分析的灰色随机风险率方法研究[J]. 水利学报, 2001 (4): 125.
- 胡庆和. 流域水资源冲突集成管理研究[D]. 河海大学, 2007.
- 胡铁松, 郭元裕, 丁晶. 水文时间序列预测的径向基函数网络方法[J]. 武汉水利电力大学学报, 1996, 29 (6): 1~5.
- 华士乾. 水资源系统分析指南[M]. 北京: 水利电力出版社, 1988.
- 黄崇福. 自然灾害风险分析[M]. 北京: 北京师范大学出版社, 2001.
- 黄崇福. 自然灾害风险评价[M]: 理论与实践, 北京: 科学出版社, 2005.
- 黄君礼, 王丽, 杨士林等. 我国水资源可持续利用的探讨[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 2002, 35 (5): 49~51.
- 黄明聪, 解建仓, 阮本清等. 基于支持向量机的水资源保障风险评价模型及应用[J]. 水利科学, 2007, 38(3): 255~259.
- 黄强, 沈晋, 李文芳, 等. 水库调度的风险管理模式[J]. 西安理工大学学报, 1998, 14 (3): 220~225.
- 黄强, 苗隆德, 王增发, 水库调度中的风险分析及决策方法[J]. 西安理工大学学报, 1999, 15(4): 6-10.
- 黄渝祥, 杨宗跃; 邵颖红. 灾害间接经济损失的计量[J]. 灾害学, 1994, 9 (3): 7~11.
- 姜文来, 唐曲, 雷波, 等著. 水资源管理学导论[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- 姜文来. 水资源价值论[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- 蒋云钟. 水资源系统的模糊可靠性分析与应用研究[D]. 大连理工大学博士学位论文, 1996.
- 金千瑜, 欧阳由男, 禹盛苗等. 中国农业可持续发展中的水危机及其对策[J]. 农业现代化研究, 2003, 24 (1): 21~23.
- 康绍忠, 蔡焕杰. 农业水管理学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1996.
- 康绍忠, 马孝义. 对我国发展节水农业几个问题的思考[J]. 中国农业资源与区划, 1999, 20 (2): 30~32.
- 李九一. 中国水资源短缺及其风险评价与管理对策研究[D]. 中国科学院地理科学与资源研究所, 2009.

- 李登峰, 徐亚范. 一类大系统模糊随机多目标决策的建模与求解方法[J]. 应用数学, 1995, 12 (2): 69~75.
- 李登峰. 复杂模糊系统多层次多目标多人决策理论模型方法与应用研究[D]. 大连理工大学博士学位论文, 1985.
- 李刚军. 宁夏水资源承载力研究[D]. 西安理工大学, 2002.
- 李贤彬, 丁晶, 李后强. 水文时间序列的子波分析法[J]. 水科学进展, 1996, 10 (2): 144~149.
- 李远华. 节水灌溉理论与技术[M]. 武汉: 武汉水利电力大学出版社, 1999.
- 李雪松. 中国水资源制度研究[D]. 武汉大学, 2005.
- 刘昌明, 陈志恺. 中国水资源现状评价和供需发展趋势分析 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.
- 刘昌明, 何希吾. 中国 21 世纪水问题方略[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- 刘俊民, 余新晓. 水文与水资源学[M]. 北京: 中国林业出版社, 1999.
- 刘坤. 干旱内陆河流域农业需水预测研究~以玛纳斯河流域为例[D]. 石河子大学, 2005.
- 刘培哲. 可持续发展概念与《中国 21 世纪议程》 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1996.
- 刘少华, 毛红梅. 一种水文时间序列预报的新方法[J]. 武汉大学学报(工学版), 2002, 35 (4): 52~55.
- 刘涛; 邵东国. 水资源系统风险评估方法研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2005, 38 (6): 66~71.
- 刘新立, 史培军. 区域水灾风险评估模型研究的理论与实践[J]. 自然灾害学报, 2001, 10 (2): 66~72.
- 刘秀屏. 区域水资源合理配置研究[D]. 河海大学, 2005.
- 刘燕华, 葛全胜, 吴文祥. 风险管理—新世纪的挑战[M]. 北京: 气象出版社, 2005.
- 吕一河, 惠泱河, 李菲. 水资源灰色供需协调分析方法浅说[J]. 西北大学学报(自然科学版), 1999, 29 (6): 629~632.
- 罗高荣. 水利工程经济评价风险分析方法[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1989.
- 马光文, 王宏伟. 非线性灰色模型载城市用水量预测中的应用[J]. 系统工程, 1993, 11 (1): 12~16.
- 马宗晋, 郑功成. 中国灾害研究丛书之灾害经济学[M]. 长沙: 湖南人民出版社, 1998.
- 马宗晋. 中国重大自然灾害与社会图集[M]. 广州: 广州科技出版社, 2004.
- 牟海省, 刘昌明. 我国城市设置与区域水资源承载力协调研究刍议[J]. 地理学报, 1994, 49

(1): 338~344.

任宪韶, 户作亮, 曹寅白, 等. 海河流域水资源评价[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2007.

阮本清. 黄河下游沿黄地区水资源优化配置及可持续利用战略研究[D]. 西安理工大学, 1997.

阮本清, 韩宇平, 王浩, 等. 水资源保障风险的模糊综合评价[J]. 水利学报, 2005, 36(8):906-912.

阮本清; 韩宇平; 王浩, 等. 水资源保障风险的模糊综合评价. 水利学报, 2005, 36 (8): 906~912.

施嘉场. 水资源综合利用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996.

史海滨, 何京丽, 郭克贞, 等. 参考作物腾发量计算方法及其适用性评价[J]. 灌溉排水, 1997, 16 (2): 50~54.

史海珊, 何似龙. 水电工程建设系统综合评判方法[M]. 水利电力出版社, 1994.

史培军. 中国自然灾害系统地图集(中英文对照) [M]. 北京: 科学出版社, 2003.

《水科学进展》编辑部. 笔谈: 水资源的定义和内涵[J]. 水科学进展, 1991, 2(3): 206~215.

水利部水利水电规划设计总院. 全国水资源综合规划技术大纲细则[R]. 水利部水利水电规划设计总院, 2002.

水利电力部水文局. 中国水资源评价[M]. 北京: 水利电力出版社, 1987.

孙景生, 熊运章, 康绍忠. 农田蒸发蒸腾的研究方法与进展[J]. 灌溉排水, 1993, 13 (4) :36~38.

陶涛; 付湘; 纪昌明. 区域水资源供需风险分析的应用研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2002, 35 (3): 9~12.

田峰巍, 黄强, 解建仓. 水库实施调度及风险决策[J]. 水利学报, 1998, 3: 57~62.

王本德. 水文中长期预报模糊数学方法[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 1993.

王大正, 赵建世, 蒋慕川, 翁文斌. 多目标多层次流域需水预测系统开发与应用[J]. 水科学进展, 2002, 13 (1): 49~54.

王海燕, 盛昭瀚, 张进. 多变量时间序列复杂系统的相空间重构[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2003, 33 (1): 115~118.

王浩, 秦大庸, 王建华, 等. 黄淮海流域水资源合理配置[M]. 北京: 科学出版社, 2003.

王浩, 秦大庸, 陈晓军, 等. 水资源评价准则及其计算口径[J]. 水利水电技术, 2004, 35(2): 1~4.

- 王红瑞, 钱龙霞, 许新宜, 等. 基于模糊概率的水资源短缺风险评价模型及其应用[J]. 水利学报, 2009, 40(7): 813~821.
- 王焯. 灰色系统理论在蓄水预测中的应用[J]. 系统工程, 1996, 14 (1): 60~64.
- 王建群. 水资源系统不确定型决策研究综述[J]. 河海科技进展, 1994, (6): 21~28.
- 王劲峰, 刘昌明, 等. 区际调水时空优化配置理论模型探讨[J]. 水利学报, 2001, (4): 7~14.
- 王丽萍, 傅湘. 洪灾风险及经济分析[M]. 武汉: 武汉水利电力大学出版社, 1999.
- 王其藩. 系统动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1994.
- 王清印. 预测与决策的不确定性数学模型[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2000.
- 王士武, 阎深荣, 柴玲. 水资源承载能力及其定量衡量[J]. 黑龙江水专学报, 1998, 2: 24~26.
- 王文均, 叶敏, 陈显维. 长江径流时间序列的混沌特性的定量分析[J]. 水科学进展, 1994, 6: 21~25.
- 王应明. 基于加权法和线性分配法的有限方案多目标决策新方法[J]. 控制与决策, 1992, 7 (4): 259~264.
- 王增发. 中小流域水资源可持续开发利用规划的理论与模型研究[D]. 西安理工大学, 2001.
- 王忠静, 翁文斌, 马宏志. 干旱内陆区水资源可持续利用规划方法研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1998, 38 (1): 33~36.
- 汪党献, 王浩, 马静. 中国区域发展的水资源支撑能力[J]. 水利学报, 2000, 31 (11): 21~27.
- 马黎, 汪党献. 我国缺水风险分布状况及其对策[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2008, 6(2): 131~135-143.
- 魏文秋, 孙春鹏. 灰色神经网络水质预测模型[M]. 武汉水利电力大学学报, 1998, 31 (4): 26~28.
- 吴世伟. 结构可靠度分析[M]. 北京: 人民交通出版社, 1990.
- 吴舜泽, 王金南, 逯元堂等. 中国环境政策专题研究报告[M]. 中国环境规划院, 2006, 7 (2): 1~19.
- 吴泽宁, 王敬, 赵南. 水资源系统灰色风险计算模型[J]. 郑州大学学报(工学版), 2002, 23 (3): 22~24.
- 武爱华. 泰安市岱岳区水资源可持续利用研究[D]. 中国农业大学学报, 2005.
- 夏军, 叶守泽. 灰色系统方法在洪水径流预测中的应用研究与展望[J]. 水电能源科学, 1995, 13 (3): 197~205.
- 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, 2005, 19 (3):

262~269.

夏军. 水文科学发展与思考[J]. 中国科学基金, 2000, 14 (5): 293~297.

肖四汉 樊治平, 王梦光. 群决策中两类判断矩阵的一种集成方法[J]. 控制与决策, 2001, 16 (5): 569~572.

谢新民, 石玉波 等. 基于人工神经网络的河川径流实时预报研究[J]. 水利水电技术, 1999, 30 (9): 1~4.

谢新民, 岳春芳, 阮本清, 等. 珠海市优化配置的水资源安全保障体系综合规划[R]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2003.

谢新民, 赵文骏, 裴源生, 等. 宁夏水资源优化配置与可持续利用战略研究[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2002.

邢大韦. 干旱地区水资源承载力评价[R]. 98 国际水资源量与质可持续管理问题研讨会, 1998.

熊明. 三峡水库防洪安全风险研究[J]. 水利水电技术, 1999, 30 (2): 39~42.

徐宗学, 叶守泽. 洪水风险率 CSPPC 模型及其应用[J]. 水利学报, 1988, (9): 1~8.

许迪, 刘钰. 测定和估算田间作物腾发量方法研究综述[J]. 灌溉排水, 1997, 16 (4): 54~59.

许谨良, 周江雄. 风险管理[M]. 北京: 中国金融出版社, 1998: 1~10.

许有鹏. 干旱地区水资源承载能力综合评价研究[J]. 自然资源学报, 1993, 8(3):230~234.

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.

薛年华, 纪昌明. 水资源系统风险分析研究动态[J]. 水利电力科技, 1993, 20 (2): 33~36.

言茂松. 贝叶斯风险决策工程[M]. 北京: 清华大学出版社, 1989.

杨建锋, 万书勤, 陈兴华. 中国地下水资源对区域经济社会发展的支撑作用评价. 资源科学, 2007, 29(5): 97~104.

杨荣富, 丁晶, 刘国东. 具有水文基础的人工神经网络初探[J]. 水利学报, 1998, 8: 23~27.

杨荣富, 丁晶, 刘国东. 神经网络模拟径流过程[J]. 水利学报, 1998, 10: 69~73.

杨树清. 21 世纪中国和世界水危机及对策[M]. 天津大学出版社, 2004.

杨雪冬. 全球化、风险社会与复合治理[J]. 马克思主义与现实, 2004, 4: 59~75.

叶永毅. 中国大百科全书·大气科学·海洋科学·水文科学卷[M]. 北京: 中国大百科全书出版社, 1987.

易丹辉. 统计预测[M]. 中国人民大学出版社, 1990.

尹明万, 甘泓, 汪党献, 等. 智能型水供需平衡模型及其应用[J]. 水利学报, 2000, (10):

71~76.

尹明万, 谢新民, 王浩, 等. 安阳市水资源配置系统方案研究[J]. 中国水利, 2003, 488 (7): 14~16.

于蕙春. 风险的定量化及决策准则[J]. 数量经济技术研究, 1999, (2): 66~67.

于蕙春. 风险的内涵与企业的风险防范[J]. 数量经济技术研究, 2000, (9): 66~67.

于义彬, 王本德. 水资源系统风险分析的研究[J]. 人民黄河, 2002, 24 (7): 18~20.

泽涵, 封锡强, 李艳丽. 水资源问题应引起关注[J]. 古地理学报, 2000, 2 (4): 84~85.

翟浩辉. 关于水利现代化问题[J]. 中国水利, 2002, 7: 8~16.

张大海, 江世芳, 史开泉. 灰色预测公式的理论缺陷及改进[J]. 系统工程理论与实践, 2002, 8: 140~142.

张宏祯. 讨赖河流域水资源利用规划研究[D]. 西安理工大学, 2005.

张继国, 刘新仁. 水文水资源中不确定性的信息熵分析方法综述[J]. 河海大学学报, 2000, 28(6): 32~36.

张立明. 人工神经网络的模型及应用[M]. 上海: 复旦大学出版社, 1992.

张丽. 水资源承载能力与生态需水量理论及应用[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2005.

张士锋, 贾绍凤. 海河流域水量平衡与水资源安全问题研究[J]. 自然资源学报, 2003, 18(6): 684~691.

张士锋, 陈俊旭. 华北地区缺水风险研究. 自然资源学报, 2009, 24(7): 1192~1199.

张天曾. 中国水利与环境[M]. 北京: 科学出版社, 1990.

张翔, 夏军, 史晓新, 等. 可持续水资源管理的风险分析研究[J]. 武汉水利电力大学学报, 2000, 33 (1): 80~83.

赵波. 成都市水资源可持续利用的综合论证[D]. 重庆大学, 2004.

郑泽权, 谢平, 蔡伟. 小波变换在非平稳水文时间序列分析中的初步应用[J]. 水电能源科学, 2001, 19 (3):49~51.

中国可持续发展水资源战略研究项目组. 中国可持续发展水资源战略研究综合报告[R]. 中国的水文题报告摘要, 2000.

钟登华, 石明华. 水文时间序列长期相关性的识别[J]. 天津大学学报, 1998, 31 (4): 433~438.

钟登华, 王仁超, 皮钧. 水文预报时间序列神经网络模型[J]. 水利学报, 1995 2: 69~75.

仲伟俊, 盛昭瀚, 徐南荣. 多人两层多目标决策问题的交互式优化方法[J]. 控制与决策, 1992, 7 (2):113~118.

- 周武光, 史培军. 洪水风险管理研究进展与中国洪水风险管理模式初步探讨[J]. 自然灾害学报, 1999, 8 (4): 62~72.
- 周志军, 锥文生. 水文时间序列与水库优化调度的模拟研究[J]. 武汉水利电力大学学报, 1997, 30 (4): 34~38.
- 朱国庆, 张维, 张小薇, 等. 极值理论应用研究进展评析[J]. 系统工程学报, 2001 (1) :72-73.
- 朱俊林. 多目标水资源系统的统计决策方法[J]. 湖北大学学报(自然科学版).1994, 16 (4): 455~460
- 朱文彬. 区域经济发展与水资源开发利用协调管理—理论、方法及其应用研究[D]. 河海大学博士学位论文, 1994.
- 朱元甦, 沈福新. 长江防洪决策支持系统—决策风险分析[J]. 水科学进展, 1996, 7(4): 295~304.
- 朱元甦. 防洪减灾的研究动态[J]. 河海科技进展, 1992, (1): 11~27.
- 朱元甦. 洪泛区洪灾风险的分析和管理的[J]. 水利经济, 1990, 8 (2): 55~62.
- 竺士林. 城市发展与水资源[M]. 山西科学技术出版社, 1994.

致 谢

论文几经修改，终于到了答辩这一步。能够迈出这一步，得到了很多老师的精心指导，我的师兄师弟以及同学也给予了我莫大的鼓励和帮助，同时家人给了我坚强的支持。值此论文完成之际，谨向所有指导、帮助和关心过我的各位老师、同学、朋友及家人致以最衷心的感谢。

能够顺利完成毕业论文，首先要感谢我的导师葛全胜研究员。论文从选题、修改直至最后定稿，都离不开葛老师的精心指导。葛老师实事求是的科学态度、勤奋的工作精神、开拓的科学思路和严谨的治学态度使我受益匪浅，同时葛老师还在生活中给了我莫大的帮助，在此谨向葛老师致以我最诚挚的感谢。我的另一位导师郑景云研究员不仅在学业中给我指明了正确的研究方向，而且教会了我很多做人的道理和科学的精神。郑老师严谨的治学态度，勤奋踏实的工作作风，和蔼亲切的行事为人，严密认真的科研精神，诲人不倦的长者风范更让我铭记在心，深深激励着我，永远值得我去用心学习。两位老师在我迷茫时一直坚持鼓励我，给予了我最大的精神支撑，让我一路走了过来，得以完成自己的学业，这一切我将永生难忘。

在博士学习期间，吴绍洪、邵雪梅、何凡能、戴君虎、吴文祥、戴尔阜、马翔、张学霞、杨晓燕、郝志新、席建超、郝志新等老师提供了很多的帮助，水文室的李九一同学为我提供了很多水文学方面的知识和建议，遗传所的齐永青师兄一直在学习和生活上帮助我，在此表示万分感谢！

衷心感谢我的同门师兄师姐、师弟师妹：刘浩龙、郭熙凤、齐晓波、吴普、王强、付辉、刘敬华、胡传东、白洁、李明启、贺山峰、丁玲玲、徐新创、刘光旭、万智巍、付东杰、李超等。感谢贾文臣、宋伟、蔡红、苏现波等舍友在生活上的无私帮助和鼓励。

最后感谢我的家人和妻儿，感谢他们无私的奉献和支持，一直支撑着我完成学业，今后他们将是我不懈努力的动力源泉。祝愿他们永远健康快乐！

刘奇勇

2010年5月于地理所

作者简介

一、个人简历

刘奇勇，男，1978年4月，山东莒南人，1997~2001年就读于沈阳农业大学农学院农学专业，获农学学士学位。2001~2004年就读于河北农业大学农学院作物栽培学与耕作学专业，获农学硕士学位。2004~2006年工作于山东省农业科学院作物研究所。2006~2010年就读于中国科学院地理科学与资源研究所，攻读自然地理学博士学位。

二、学术论文

1. 刘奇勇, 李雁鸣, 张建平, 等. 强筋冬小麦品种藁 8901 的优化施肥技术[J]. 麦类作物学报, 2006, 26(2):139~143.
2. 刘奇勇, 葛全胜, 郑景云. IPCC 关于水资源风险的评估综述[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(32):14267~14270.
3. Liu Qiyong, Ge Quansheng, Zheng Jingyun. Effects of global climate change on China' s agriculture[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2009, 24(12):447~453.
4. 杨晴, 刘奇勇, 李雁鸣. 冬小麦不同叶层叶绿素和可溶性蛋白对氮磷肥的响应[J]. 麦类作物学报, 2009, 29(1):128~133.

三、科研项目

1. 综合能源与综合水资源保障风险防范关键技术示范， 国家科技支撑计划课题， 参与水资源保障风险的研究；
2. 中德合作项目—国际可持续土地利用与水资源管理， 并编写会议论文摘要。