

编者按:

气候变化对水资源安全的影响是国际上普遍关心的全球性问题,也是我国可持续发展面临的重大战略问题。我国是世界13个贫水国家之一,尤其在人口稠密的东部季风区,水资源供需矛盾突出,旱涝灾害频繁。在气候变暖背景下,过去30多年中国北方旱情加重,南方极端洪涝灾害增多,加剧了水资源供需矛盾,严重制约经济社会的可持续发展。未来气候变化将极有可能对我国“南涝北旱”的格局和水资源分布产生更为显著的影响,对我国粮食增产工程、南水北调工程、南方江河防洪体系规划等国家重大工程的预期效果产生不利的影响。以我国东部季风区的江河流域为重点,开展气候变化对水资源影响及适应对策的基础研究,是保障我国水资源安全的重大战略需求,也是国际上应对气候变化适应性水资源管理的重要课题。为了使读者比较全面地了解这方面问题与研究进展,我们邀请了参与国家973项目(2010CB428400)“气候变化对我国东部季风区陆地水循环与水资源安全的影响及适应对策”的几位专家撰写相关论文,出版“气候变化与水资源专栏”,系统介绍气候变化背景下我国水资源面临的若干问题与研究进展、应对气候变化的水资源脆弱性与适应性管理的对策与建议。

doi:10.3969/j.issn.1673-1719.2012.06.001

夏军,陈俊旭,翁建武,等.气候变化背景下水资源脆弱性研究与展望[J].气候变化研究进展,2012,8(6):391-396

气候变化背景下水资源脆弱性研究与展望

夏 军^{1,3}, 陈俊旭^{1,2}, 翁建武^{1,2}, 余敦先^{1,2},
邱 冰^{1,2}, 万 龙^{1,2}, 洪 思^{1,2}

1 中国科学院地理科学与资源研究所,北京 100101;

2 中国科学院大学,北京 100049;

3 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室,武汉 430072

摘要:论述了气候变化背景下水资源脆弱性概念、内涵及其与适应性管理的联系;综述了水资源脆弱性定量评估方法,包括指标权重法、函数及综合指标法等;介绍了减少水资源脆弱性的适应对策研究。分析表明,联系水资源供需矛盾的水资源脆弱性既有自然变化脆弱性的一面,又有气候变化影响导致水资源供需关系发生变化以及旱涝灾害影响加剧水资源脆弱性的问题。关键是要识别影响水资源脆弱性变化的主要调控变量,通过应对气候变化的适应性对策研究,最大限度地减少水资源脆弱性。未来气候变化背景下水资源脆弱性研究,将在进一步发展脆弱性影响与评估基础上,逐步转到适应性水资源管理与对策的研究。

关键词:水资源;脆弱性;定量评价方法;适应性管理

引言

水资源脆弱性是国际社会普遍关心的全球性问题,也是中国可持续发展面对的重大战略问题。IPCC技术报告^[1]《气候变化与水》指出:“淡水资源是

脆弱的并可能受到气候变化的强烈影响,同时给人类社会和生态系统带来一系列范围更广的后果。”我国水资源南北分布不均,北方河道干涸,地下水严重超采,南方水质污染严重,旱涝灾害频发,未来气候变化极有可能对我国水资源格局产生显著影响,

收稿日期:2012-06-25;修回日期:2012-09-04

资助项目:国家重点基础研究973项目(2012CB956204,2010CB428406);国家自然科学基金(51279140)

作者简介:夏军,男,研究员,主要从事水文水资源方面的研究;陈俊旭(通信作者),男,博士研究生,chenjunxu07@163.com

导致旱涝灾害进一步增加,水资源供需矛盾更加突出,对国家经济社会发展构成严重威胁。

水资源脆弱性研究是世界水文水资源研究领域的重要前沿课题。梳理水资源脆弱性研究成果有利于相关研究成果的应用并开展薄弱环节的研究。已有成果^[2-4]较好地总结了气候变化下水资源脆弱性及其评估方法,但仍有待完善,本文综述水资源脆弱性研究的进展,关注适应性对策,并对未来研究方向和新技术进行展望。

1 水资源脆弱性概念及内涵

水资源脆弱性概念起源于20世纪60年代末,Albinet等^[5]提出了地下水资源脆弱性概念,认为其是污染物进入含水层的影响因素的复杂性。随后众多学者对水资源脆弱性概念与评价方法进行了研究。1982年Hashimoto等^[6]提出可靠性、脆弱性、可恢复性3个指标评估供水风险,其中脆弱性用来描述水资源供给不足对系统造成的损失。1987年的“土壤与地下水脆弱性国际会议”^[7]提出地下水资源脆弱性要考虑人类活动的影响。1993年美国国家科学委员会^[8]提出地下水脆弱性是污染物到达含水层之上某特定位置的倾向性与可能性,并将其分为本质和特殊脆弱性。

1996年IPCC^[9]将水资源的脆弱性与气候变化联系起来,认为脆弱性是气候变化可能对水资源系统造成的损害或不利影响的程度。Gogu等^[10]认为地下水系统对人类和(或)自然的有效敏感性是地下水资源脆弱性,并且将其分为天然脆弱性和综合脆弱性。唐国平等^[2]认为水资源的脆弱性是水资源系统改变引发的水资源供给、需求、管理的变化和旱、涝等自然灾害的发生程度。刘绿柳^[11]认为水资源脆弱性是水资源系统易遭受人类活动、自然灾害威胁和损失的性质和状态,受损后难以恢复到原来状态和功能的性质。2011年IPCC特别报告^[12]中将脆弱性与暴露度结合起来,认为脆弱性是人员、生计、环境服务和各种资源、基础设施,以及经济、社会或文化资产受到不利影响的可能性或趋势。

综合已有研究,本文认为气候变化背景下水资

源脆弱性是指气候变化对水资源系统造成不利影响的程度,它不仅包含陆地水循环相关的水资源系统在自然变化条件下表现出的敏感性,也包括气候变化导致水资源系统脆弱性变化的部分,是水资源系统对所处气候的变化特征、幅度、速率及其敏感性、适应能力的函数。气候变化背景下水资源脆弱性具有以下两方面的内涵:

(1) 脆弱性不仅是水资源系统的内在属性,还包括其承载(服务)对象因服务支撑不足受到的影响程度。前者是自然水资源系统受气候变化影响而偏离自身稳态导致的脆弱程度,后者是指因水资源系统供需关系、水量水质不能满足需求,致使其承载的生态环境、社会经济体系难以发挥正常功能或发展预期受限的程度和可能性。

(2) 脆弱性因研究对象的时空差异及评价目的差别而具有不同标准,但基本定性是一致的。对过去和现状的评价侧重于损害程度,对未来的评价侧重于发生的可能性、损害预估和适应能力。而发生的可能性和损害程度评估是提出适应性对策的基础。

2 水资源脆弱性评价

2.1 水资源脆弱性评价进展

气候变化背景下脆弱性评价是水资源脆弱性研究中的主要内容。水资源脆弱性评价不仅包括供需水矛盾导致的脆弱性评价,也包括系统自身脆弱引起社会经济和生态系统的脆弱性评价。

Vorosmarty等^[13]利用气候模式输出的气候情景与水量平衡模型WBM预估2025年全球的水资源脆弱性变化,结果显示水资源脆弱区域差异明显,未来将更脆弱。水资源丰富区域同样存在水资源脆弱性问题,Sharma^[14]指出部分水资源丰富区域因人类干扰加强正变得越来越脆弱。Delpla等^[15]指出气候变化下水质下降导致潜在健康风险增强,但对气候变化的政策选择将直接影响淡水水质^[16]。未来气候变化下,我国北方部分江河径流量可能减少,南方江河径流量可能增加,各流域蒸发量可能增大,旱涝等灾害的出现频率可能增加,进一步加剧水资源的脆弱性与供需矛盾^[17]。另外,我国跨境水资源也

存在脆弱性^[18]。

未来气候变化对淡水系统的负面影响,预计会超过正面影响^[1]。IPCC报告^[1]指出,气候变化对淡水系统的不利影响会加重其他胁迫的影响,如人口增长、经济活动改变、土地利用变化等。Bowes等^[19]指出,气候变化背景下区域收入和产值会下降1%~2%,最大的经济影响来源于农业和用水部门。降水减少等变化还通过环境和社会经济问题影响整个水资源计划及规划工作^[20]。

2.2 水资源脆弱性评价方法

定量评价水资源脆弱性主要从水资源脆弱性的影响因素出发,方法主要包括指标权重法、综合指标法和函数法等。

指标权重法是水资源脆弱性研究中的基本方法,该方法可以较全面反映水资源脆弱性特点和属性,评价结果能客观表征水资源脆弱性实质,且易与GIS叠置配合进行作图,在国内外得到较为广泛的应用。Sullivan^[21-22]提出水资源贫困指数,并细分为资源、途径、能力、利用、环境5个分指数,后提出基于供给和需求驱动指标的脆弱性评价指标体系。Hamouda等^[23]构建缺水量、水质标准和灌溉效率等共31个指标的脆弱性评价体系。唐国平等^[2]提出从水文/水利系统及其设计、自然地理环境及社会脆弱性3个类别共11个方面构建指标体系。刘绿柳^[11]根据地表水和地下水的性质选择了17个指标建立评价指标体系。邹君等^[24]从水质、水量脆弱性两个方面选择19个评价指标构建了地表水资源脆弱性评价指标体系。陈康宁等^[25]选取反映水资源条件、水资源开发利用、生态环境状况和水资源合理配置状况的14个代表性指标,使用分形理论评价了河北省水资源系统的脆弱性。董四方等^[26]结合DPSIR概念模型构建了由驱动力、压力、状态、影响和响应等5方面共36个评价因子的评价指标体系。采用GIS叠置和指标综合的识别技术得到发展,并被认为是必要的和有效的^[10],如基于GIS平台的DRASTIC模型在阿里戈尔浅层地下水评价中的应用^[27]。

综合指标及函数方法也是水资源脆弱性评价的重要方法。Falkenmark等^[28]提出水资源压力指数来

表征水资源脆弱性,并进一步提出以百万方水承载的人口数作为水文资源压力指数来反映社会适应能力对水资源短缺的响应^[29]。Ohlsson^[30]以水资源压力指数与人类发展指数的比值作为社会化水资源短缺指数。Raskin等^[31]将取水量占可利用水资源量的比例定义为水资源脆弱性指数。Smit等^[32]提出综合脆弱性指标,并评价了国家、区域和公众的脆弱性分数。Alcamo等^[33]提出水资源开发利用率指标,评价全球尺度的水资源短缺问题,但该指数在计算中会超出100%;为便于比较,Alamara等^[34]提出对水资源可利用指数进行改进。夏军等^[35]发展了耦合气候变化对水资源影响的敏感性、抗压性以及联系适应性对策与调控的水资源脆弱性理论与方法。

3 应对气候变化的水资源适应性管理对策

Oki等^[36]指出,应对气候变化下水资源压力的第一步是减少系统脆弱性。IPCC^[1,37]指出要在合理评估气候变化对水循环影响的基础上,提出人类响应策略,如采用协同工作和减灾措施等。已有研究多从现实角度出发,从管理理论、管理方法与管理机制等方面进行了探讨。

(1) 实现供水管理向需水管理的转变。现行水资源管理政策多以供水管理为主,IPCC技术报告^[1]指出现有水管理行为可能不足以应对气候变化的影响。Frederick^[38]指出水资源越来越短缺并更易受到气候波动及变化的影响,对于平衡供需关系,进行需水管理是至关重要的。

(2) 整合多种管理手段,引入市场机制,优化水资源配置效率。从具体的管理手段来看,水资源管理应该整合多种管理手段,包括水储备、水价、规划管理等^[39],考虑市场机制,发挥水资源的优化配置效率。例如,对于加拿大大草原未来的干旱造成的脆弱性有必要采取以下措施:持续执行小尺度水资源工程和通过雨雪管理增加水存储;整合现有水资源系统;推进农业用水实践、水价和水计量措施^[40]。为应对气候变化的影响,加拿大水利部门认为管理选择和规划适应措施需要优先考虑安大略湖格兰德河流域的城市水供给、南亚伯达省灌溉用水和五大

湖的商业航行^[39]。

(3) 考虑未来规划, 构建风险防范与适应性管理机制。在应对气候变化下水资源脆弱性问题上, 应该在考虑未来规划、预报预警能力、风险管理及防范水平基础上构建适应性机制。Dessai 等^[41]提出了应对气候变化适应性措施的评价框架, 应用于英格兰东部25年水资源服务规划。跨境水资源脆弱性应对上, Feng等^[18]认为加强科学交流、构建分享机制、建立早期预警和完善协商机制将能减少脆弱性。Smit等^[32]认为不仅要在应对已存在的风险问题上关注适应性措施, 在未来项目或管理中同样要强化风险防范与适应性管理机制。适应性能力显著受到政府、公民、政治和文化的影响^[42], 适应性机制的构建需要因地、因时制宜, 提高适用性。

4 水资源脆弱性研究需注意的几个关键问题

水资源脆弱性研究仍然存在许多不足, 主要包括以下3个方面。

(1) 水资源脆弱性机理研究亟待加强。水资源脆弱性从其内涵上来看, 不仅反映水资源短缺, 还反映水支撑社会经济发展和生态需求属性, 在不同的空间尺度和不同的生态生理过程上反映不一样, 而这些机理的研究仍有待加强。水资源脆弱性的内涵及外延都未能进行科学的界定, 而更深入的水资源脆弱性与社会经济系统之间的耦合关系、水资源脆弱性的经济损害、社会经济系统需用水造成的二次或多次水资源系统损害等的研究也就难以顺利展开。

(2) 评价方法以指标体系为主, 缺乏能够动态评估水资源脆弱性过去、现状和未来的方法。水资源脆弱性评价的指标中, 以单一指标和指标体系为主, 单指标直观性强, 数据易于获得, 但往往只关注脆弱性的一个方面, 覆盖面窄, 不能充分反映水资源系统的脆弱状况; 指标体系从多角度考虑水资源脆弱性, 涉及面过多, 存在资料不足、在不同尺度上推广困难的问题。综合来看, 还没有形成一套成熟的、具有代表性的、有清晰水资源管理与调控概念的指标体系。

在气候变化背景下, 动态且能够联系水资源与

社会经济和生态系统的方法更能及时反映水资源脆弱性。然而, 目前仍缺乏能够进行动态评估的方法。

(3) 需加强核心指标的甄选, 寻求能表征水资源脆弱性不同属性、支撑脆弱性调控及应对的关键性控制指标。评价水资源脆弱性, 要能抓住水资源脆弱性的实质, 科学把握水量水质、自然社会、供需矛盾等多种复杂性在水资源系统的风险暴露, 就要从复杂指标、多层次体系中辨识出核心指标。在不同时段, 影响水资源脆弱性的因素有别; 同样, 不同地域因人类活动的差异而表现出不同的水资源脆弱性。面对不同的时空尺度, 不同水资源脆弱性属性, 不同管理目标、措施及能力差异, 更需加强核心指标的甄选, 发掘水资源管理关键性控制指标。

5 水资源脆弱性研究展望

在进一步的研究中, 水资源脆弱性理论将深化, 量化方法将更为多样, 适应性对策研究及智能化、数字化、信息化模拟与表达等方面将获得进展。

(1) 社会经济及生态层面研究应得到加强, 水资源脆弱性理论将深化与系统化。水资源脆弱性的概念、内涵有待进一步挖掘。在对脆弱性的认识上, 自然、社会经济及生态方面的属性需要得到充分、有区别的对待, 随着研究的深入, 不仅在综合脆弱性方面取得进展, 脆弱性分层面也将获得进展, 并形成各个属性相应的研究方法。形成辨识—归因—评价—应对的水资源脆弱性研究理论体系。

(2) 函数评价方法应更多应用于水资源脆弱性精确量化研究。寻找能精确定量脆弱性、具有物理基础的方法一直是水资源脆弱性研究领域探求的重要内容。发展一套易于计算、综合考虑数据获取及研究区域的函数方法, 更利于水资源脆弱性评价的运用与普及, 也有利于完善水资源脆弱性理论。另外, 评价尺度是水资源脆弱性评价面临的重要问题。在现有方法中, 适用于全球或大尺度区域的指标往往难以在流域、城市及社区尺度上应用, 而从小尺度发展的指标在大尺度上因数据等问题难以收到效果, 而函数法具有可设置不同的参数及易于调控的优点, 在未来的发展中将得到重视。

(3) 应对策略应更具针对性。现有适应性措施显得空洞而宽泛,制定具有针对性、便于操作、易于普及的适应性对策显得尤为急迫。多角度、多层次的水资源适应性对策将能更加全面、深入和准确地反映水资源脆弱性属性和特点,并更利于管理部门进行操作和实施。

(4) 多学科交叉,智能化、数字化、信息化模拟与表达得到加强。随着科学技术的发展,智能化、数字化、信息化的技术将加快水资源脆弱性的研究,而经济学、资源学、社会学与水文学科的交叉将完善水资源脆弱性评价的理论与方法。信息化技术如GIS、遥感等将完善水资源脆弱性的评价与制图;二维、三维等多维技术的应用将从空间上完善水资源脆弱性表达、显示及模拟;空间分析、空间寻优及模型化技术将促进水资源脆弱性评价流程的发展和规范化;经济学、社会学等学科的交叉发展将细化水资源脆弱性的研究,并深化水资源脆弱性在社会、经济方面的表征。

(5) 由于我国季风区气候和地理分异特性,水资源脆弱性既包含有自然变异脆弱性,又有气候变化影响导致水资源供需关系发生变异以及旱涝灾害影响加剧水资源系统脆弱性的问题。水资源脆弱性研究的关键是要识别影响水资源系统脆弱性变化的关键调控变量。

未来水资源脆弱性的研究,将在进一步发展脆弱性影响与评估研究基础上,逐步转到适应性水资源管理与对策的研究。■

参考文献

- [1] Bates B C, Kundzewicz Z W, Wu S H, *et al.* Climate change and water [R]. Technical paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva: IPCC Secretariat, 2008: 3-10
- [2] 唐国平, 李秀彬, 刘燕华. 全球气候变化下水资源脆弱性及其评估方法[J]. 地球科学进展, 2000, 15 (3): 313-317
- [3] 王国庆, 张建云, 章四龙. 全球气候变化对中国淡水资源及其脆弱性影响研究综述 [J]. 水资源与水工程学报, 2005, 16 (2): 7-10
- [4] 陈攀, 李兰, 周文财. 水资源脆弱性及评价方法国内外研究进展[J]. 水资源保护, 2011, 27 (5): 32-38
- [5] Albinet M, Margat J. Cartographie de la vulnerabilite a la pollution des nappes d'eau souterraine [J]. Bull BRGM, 2eme serie, 1970, 3 (4): 13-22
- [6] Hashimoto T, Loucks D, Stedinger J. Reliability, resiliency and vulnerability criteria for water resources systems [J]. Water Resources Research, 1982, 18 (1): 14-20
- [7] Duijvenbooden W, Waegeningh H G. Vulnerability of soil and groundwater to pollutants: international conference Noordwijk aan Zee, The Netherlands, March 30-April 3, 1987 [C]. The Hague: TNO Committee on Hydrological Research, 1987: 2-5
- [8] National Research Council (US). Ground water vulnerability assessment: predicting relative contamination potential under conditions of uncertainty [M]. Washington DC: National Academy Press, 1993: 1-204
- [9] IPCC. Climate change 1995: the science of climate change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1996: 1-572
- [10] Gogu R C, Dassargues A. Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overlay and index methods [J]. Environmental Geology, 2000, 39 (6): 549-559
- [11] 刘绿柳. 水资源脆弱性及其定量评价[J]. 水土保持通报, 2002 (2): 41-44
- [12] IPCC. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation: a special report of working groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2012: 42-43
- [13] Vörösmarty C J, Green P, Salisbury J, *et al.* Global water resources: vulnerability from climate change and population growth [J]. Science, 2000, 289 (5477): 284-288
- [14] Sharma U C. Impact of population growth and climate change on the quantity and quality of water resources in the northeast of India [M]// Blöschl G, Franks S, Kunagai M, *et al.* Water resources systems: hydrological risk, management and development. Wallingford: IAHS Press, 2003: 349-357
- [15] Delpla I, Jung A V, Baures E, *et al.* Impacts of climate change on surface water quality in relation to drinking water production [J]. Environment International, 2009, 35 (8): 1225-1233
- [16] Whitehead P G, Wilby R L, Battarbee R W, *et al.* A review of the potential impacts of climate change on surface water quality [J]. Hydrological Sciences Journal, 2009, 54 (1): 101-123
- [17] 林而达, 许吟隆, 蒋金荷, 等. 气候变化国家评估报告(II): 气候变化的影响与适应[J]. 气候变化研究进展, 2006, 2 (2): 51-56
- [18] Feng Yan, He Daming. Transboundary water vulnerability and its drivers in China [J]. Journal of Geographical Sciences, 2009, 19 (2): 189-199
- [19] Bowes M D, Crosson P R. Consequences of climate change for the mink economy: impacts and responses [J]. Climatic Change, 1993, 24 (1-2): 131-158
- [20] Mimikou M A, Baltas E, Varanou E, *et al.* Impacts of climate change on the water resources quantity and quality [M]. Littleton: Water Resources Publications, 1999: 223-234
- [21] Sullivan C A. Calculating a water poverty index [J]. World Development, 2002, 30 (7): 1195-1210
- [22] Sullivan C A. Quantifying water vulnerability: a multi-dimensional approach [J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2011, 25 (4): 627-640
- [23] Hamouda M A, Nour El-Din M M, Moursy F I. Vulnerability assessment of water resources systems in the Eastern Nile basin [J]. Water Resources

- Management, 2009, 23 (13): 2697-2725
- [24] 邹君, 刘兰芳, 田亚平, 等. 地表水资源的脆弱性及其评价初探[J]. 资源科学, 2007 (1): 92-98
- [25] 陈康宁, 董增川, 崔志清. 基于分形理论的区域水资源系统脆弱性评价[J]. 水资源保护, 2008 (3): 24-26
- [26] 董四方, 董增川, 陈康宁. 基于 DPSIR 概念模型的水资源系统脆弱性分析[J]. 水资源保护, 2010 (4): 1-3
- [27] Rahman A. A GIS based DRASTIC model for assessing groundwater vulnerability in shallow aquifer in Aligarh, India [J]. Applied Geography, 2008, 28 (1): 32-53
- [28] Falkenmark M, Lundqvist J, Widstrand C. Macro-scale water scarcity requires micro-scale approaches [J]. Natural Resources Forum, 1989, 13 (4): 258-267
- [29] Falkenmark M, Widstrand C. Population and water resources: a delicate balance [J]. Population Bulletin, 1992, 47 (3): 1-36
- [30] Ohlsson L. Water conflicts and social resource scarcity [J]. Physics and Chemistry of the Earth Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere, 2000, 25 (3): 213-220
- [31] Raskin P, Gleick P, Kirshen P. Water futures: assessment of long-range patterns and prospects [M]. Stockholm: SEI, 1997: 1-50
- [32] Smit B, Wandel J. Adaptation, adaptive capacity and vulnerability [J]. Glob Environ Change: Human Policy Dimens, 2006, 16 (3): 282-292
- [33] Alcamo J, Doll P, Kaspar F, *et al.* Global change and global scenarios of water use and availability: an application of Water GAP 1.0 [R]. Center for Environmental Systems Research (CESR), University of Kassel, Germany, 1997: 17-20
- [34] Alamarah A, Isayed A, Mughli M. Using socio-economic indicators for integrated water resources management: case study of Palestine. Water resources in the Middle East Israeli-Palestinian water issues: from conflict to cooperation [M]. Springer, 2007: 331-339
- [35] 夏军, 邱冰, 潘兴瑶, 等. 气候变化影响下水资源脆弱性评估方法及其应用[J]. 地球科学进展, 2012, 27(4): 443-451
- [36] Oki T, Kanae S. Global hydrological cycles and world water resources [J]. Science, 2006, 313 (5790): 1068-1072
- [37] IPCC. Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability: contribution of working group II to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007: 79-779
- [38] Frederick K D. Adapting to climate impacts on the supply and demand for water [J]. Climatic Change, 1997, 37 (1): 141-156
- [39] de Loe R, Kreutzwiser R, Moraru L. Adaptation options for the near term: climate change and the Canadian water sector [J]. Glob Environ Change: Human Policy Dimens, 2001, 11 (3): 231-245
- [40] Gan T Y. Reducing vulnerability of water resources of Canadian prairies to potential droughts and possible climatic warming [J]. Water Resources Management, 2000, 14 (2): 111-135
- [41] Dessai S, Hulme M. Assessing the robustness of adaptation decisions to climate change uncertainties: a case study on water resources management in the east of England [J]. Glob Environ Change: Human Policy Dimens, 2007, 17 (1): 59-72
- [42] Brooks N, Adger W N, Kelly P M. The determinants of vulnerability and adaptive capacity at the national level and the implications for adaptation [J]. Glob Environ Change: Human Policy Dimens, 2005, 15 (2): 151-163

Advances and Future Prospects of Research in Water Resources Vulnerability Under Climate Change

Xia Jun^{1,3}, Chen Junxu^{1,2}, Weng Jianwu^{1,2}, She Dunxian^{1,2},
Qiu Bing^{1,2}, Wan Long^{1,2}, Hong Si^{1,2}

1 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China ;

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3 State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China

Abstract: This paper addresses issues on water resources vulnerability under climate change. The concept and connotation of water resources vulnerability and the corresponding adaptive management are presented. The quantitative evaluation methods of water resources vulnerability, mainly include the index weight method, function and integrated indicator methods. The water resources vulnerability not only has natural variability but also is affected by changes in relationship between water supply and demand resulted from climate change and the impacts of droughts and floods. The key issue is to identify the governing variables which have main influence on water resources vulnerability. For future perspective, study on water resources vulnerability will go to adaptive management.

Key words: water resources; vulnerability; quantitative assessment method; adaptive management