

DOI :10.3969/j.issn.1004-6933.2011.05.008

水资源脆弱性及评价方法国内外研究进展

陈 攀,李 兰,周文财

(武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室,湖北 武汉 430072)

摘要 对国内外水资源脆弱性研究进展进行总结。对研究中出现的水资源脆弱性概念及内涵进行归纳总结,在此基础上进一步明确水资源脆弱性的内涵。给出水资源脆弱性评价指标体系的构建原则,并指出目前指标体系中存在的问题;总结水资源脆弱性评价中常采用的评价方法,并分析其优缺点,提出在评价方法选取时应遵循的原则。指出应注重将水资源脆弱性定量评价结果转换为实际工作中的指导意见。指出目前水资源脆弱性评价所面临的挑战与发展趋势,认为在概念内涵研究、指标体系确定、评价方法探索等方面需进一步开展研究工作。

关键词 水资源 脆弱性 指标体系 评价方法

中图分类号 :TV213 **文献标识码** :A **文章编号** :1004-6933(2011)05-0032-07

Research progress on vulnerability of water resources and assessment methods at home and abroad

CHEN Pan, LI Lan, ZHOU Wen-cai

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

Abstract : Domestic and foreign research on the vulnerability of water resources is reviewed. The concept and connotation of the vulnerability of water resources have been summarized in the research, based on which the connotation is further clarified. The construction principles of the index system of water resources vulnerability assessment are provided, and the problems in the index system are identified. The assessment methods for the vulnerability of water resources are summarized, and their advantages and disadvantages are analyzed. The principles for selecting the assessment methods are proposed. It is very important to change the quantitative assessment results into guidelines in practical work. The challenges and developmental trends are also pointed out. It is believed that more study needs to be done on the aspects of concept and connotation, the index system, and assessment methods.

Key words : waters resources ; vulnerability ; index system ; assessment methods

21 世纪以来,随着社会经济的迅速发展,生产、生活中耗水量不断增加,世界上许多国家与地区都面临着水资源短缺问题;此外由于不合理的人类活动影响,洪水、干旱所造成的经济损失也日益加大。这些都对水资源的取用、防灾减灾及区域可持续发展提出了挑战,在这种背景下开展水资源系统脆弱性的研究显得尤为重要^[1]。未来气候变化将改变水资源空间配置状态,加剧水资源供给压力及脆弱

性,因此气候变化下的水资源脆弱性研究已成为当前的一大热点。通过开展气候变化下水资源脆弱性研究,可以分析气候变化影响下水资源对社会经济的响应规律,并据此提出相应的水资源管理对策,从而提高应对未来气候变化的水资源安全保障能力^[2]。所以开展水资源脆弱性研究是在人类活动和气候变化双重影响下,进行合理的水资源配置与管理,保证水资源安全的一项重要举措。

水资源脆弱性的概念、内涵及评价方法研究是水资源脆弱性研究的重要内容,也是该项研究所面临的一个巨大挑战。由于目前缺少一个通用的水资源脆弱性的概念体系,导致水资源脆弱性研究发展缓慢,进而影响到其在实际工作中的应用。笔者在阅读大量文献的基础上,对水资源脆弱性的国内外研究进展进行总结,对脆弱性概念及其内涵进行深入探讨,分析目前水资源脆弱性评价研究中运用的主要方法及降低水资源脆弱性应采取的合理对策,并指出水资源脆弱性研究中面临的挑战及未来发展趋势。

1 水资源脆弱性国内外研究进展

国外水资源脆弱性研究源于 20 世纪 60 年代法国 Albinet 和 Marget 提出的地下水资源脆弱性概念^[3],随后众多学者及研究机构都对地下水资源脆弱性概念与评价方法进行了深入的研究。如 1985 年美国环保局(USEPA)提出了 DRASTIC 方法的评价因子体系^[4],1993 年美国国家科学研究委员会将“地下水脆弱性”定义为“地下水脆弱性是污染物到达最上层含水层之上某特定位置的倾向性与可能性^[5]”。1999 年 Doerfliger 等^[6]利用 EPIK 法和 GIS 技术对岩溶地区水资源脆弱性进行了评价。2002 年 Daly^[7]等系统阐述了欧洲方法的概念和脆弱性图。至今国外已提出了 30 多种计算脆弱性指数模型,如 Vierhuff, DRASTIC, GOD, SIGA, Legrand, SINTACS, SEPPAGE, EPIK 模型等^[8-10]。近些年,国外研究者多结合 GIS 等高新技术进行脆弱性评价,同时水资源脆弱性制图也是当前国外研究的热点。如 2005 年 Dixon^[11]对地下水资源脆弱性进行了评价,并绘制了相应的脆弱性图。2008 年 Rahman^[12]采用基于 GIS 的 DRASTIC 模型对印度阿里格里地区潜水含水层脆弱性进行了评价。2009 年 Pathak 等^[13]采用同样的方法对加德满都地区脆弱性进行了分析,同时指出建立的脆弱性图将是对地下水资源进行管理的有效工具。此外气候变化下水资源脆弱性研究也引起了国外研究者与研究机构的广泛关注,如 1996 年 Kenneth 等^[14]在气候变化下分析了埃及尼罗河流域水资源的脆弱性。2000 年 Charles 等^[15]在预测 1985—2025 年间气候变化及人口增长条件下,进行了水资源的脆弱性分析。2008 年 IPCC“气候变化与水”的技术报告^[16]提出了加强气候变化下对水资源影响的适应性管理的对策研究的要求,以减缓全球及区域气候变化的影响。总结这些研究成果,可以发现国外研究重点在于地下水资源脆弱性的研究方面,且水质方面的研究多于水量方面的研究;另外一些高新技术如 GIS 也逐渐应用到水资源脆弱性评价

中,脆弱性图的绘制是脆弱性评价的拓展,其对于区域水资源可持续利用及风险管理均具有较好的参照作用。此外气候变化下水资源脆弱性研究已成为一个研究热点。

国内水资源脆弱性研究起步于 20 世纪 90 年代,早期主要是地下水脆弱性方面的研究,如 1996 年刘淑芳等^[17]对河北平原地下水防污性能进行了研究,主要涉及地下水本质脆弱性评价;1997 年郑西来等^[18]研究了西安市潜水的脆弱性,研究过程中考虑了污染源特征,涉及地下水特殊脆弱性评价。21 世纪以后,才逐渐出现了一些地表水资源及区域水资源系统脆弱性方面的研究,如唐国平等^[19]、杨艳舞等^[20]、刘绿柳等^[21]在国外地下水脆弱性研究基础上,给出了宏观水资源脆弱性的概念;2001 年宋承新等^[22]通过对山东省地表水资源脆弱性进行分析研究,找到了水资源可持续利用的有效途径,妥善解决了山东省缺水问题。2006 年以来,邹君等^[23-25]对地表水资源的脆弱性进行了研究,给出了其概念、内涵及评价方法,并在多个地区进行了具体的评价工作。2007 年刘金芳^[26]探讨了沈阳市发展与区域水资源脆弱性的关系,认为这可以预防水资源问题对未来城市发展的不利影响;2008 年陈康宁等^[27]则以河北省水资源系统为研究对象,构建了区域水资源系统脆弱性评价体系,运用分形理论找出了反映系统整体演化趋势的序参量,据此进行了脆弱性评价。国内也有研究者就气候变化下水资源脆弱性进行研究,如 2005 年王国庆等^[28]较为系统地论述了全球气候变化条件下我国淡水资源对气候变化的敏感性和水资源在气候变化情景下的脆弱性的问题。吴素芬等^[29]、伏洋^[30]则论述了气候变化对区域水资源及其脆弱性的影响分析。总体而言,国内水资源脆弱性研究中仍侧重于地下水脆弱性方面,区域水资源及地表水资源脆弱性研究仍处于起步阶段^[31]。研究中气候变化下水资源脆弱性,水资源脆弱性与区域可持续发展以及脆弱性分析基础上的水资源系统的风险分析也逐渐吸引了较多的关注。

2 水资源脆弱性概念及内涵

1968 年,法国的 Marget 首次提出“地下水脆弱性”这一术语^[32]。随后众多研究者对其概念进行了深入的探讨。起初大多研究者给出的概念仅涉及本质脆弱性方面内容,如 Vrana 认为,地下水脆弱性是影响污染物进入含水层的地表与地下条件的复杂性^[33]。1987 年“土壤与地下水脆弱性国际会议”后,研究者们逐渐认识到人类活动与污染源对地下水脆弱性的影响,并据此给出了一系列新的定义,如

Palmquist 认为,地下水脆弱性是人类活动或污染源施加于地下水的一种危险性度量^[33]。发展至今,美国环保署(USEPA)和国际水文地质协会(IAH)对地下水脆弱性给出一个较为合理的概念 地下水系统对人类和(或)自然的有效敏感性,并且将其分为固有(天然)脆弱性和特殊(综合)脆弱性^[34]。

国内部分学者在国外研究基础上,也根据其理解给出了水资源脆弱性的概念及内涵。总体而言,这些概念基本上都涵盖了本质脆弱性和特殊脆弱性的内容,但又各有侧重。如唐国平等^[19]认为水资源脆弱性是水资源系统在气候变化、人为活动等的作用下,水资源系统的结构发生改变、水资源的数量减少和质量降低,以及由此引发的水资源供给、需求、管理的变化和旱涝等自然灾害的发生。并以此将其分为 3 种类型 水文系统的脆弱性、水利系统及其设计的脆弱性、自然地理环境和社会的脆弱性。这一界定侧重描述了水资源系统遭到破坏后所表现的结果,而忽略了水资源系统遭受外界破坏时的抵抗能力。杨燕舞等^[20]认为水资源脆弱性是指由自然环境和人类社会活动引起的水资源被污染的难易程度。自然环境决定它的自身脆弱性,人类社会活动决定它的外因脆弱性。该提法受早期国外地下水脆弱性概念的影响较大,只涉及水质方面,不够全面。于翠松等^[1]则认为水资源脆弱性是水资源系统在某一特定的环境下,受到气候变化和人类活动等外界因子的扰动和胁迫下,水资源系统正常的结构和功能受到损坏的性质和状态,受损后难以恢复到原来功能和状态的性质。其定义中涉及外部驱动因素较为全面,包括水质、水量,乃至资源、生态、环境经济等各个方面,且既考虑了水资源系统对于外界破坏的敏感性,也考虑了其遭受破坏后的适应性。也有学者^[25,35-36]具体就地表水资源、地下水资源、湿地水资源脆弱性等进行了研究,并提出了相应概念、内涵(表 1),这些研究成果对于指导具体区域的水资源脆弱性评价都起到了十分重要的作用。

综上所述可以看出,国内外学者对水资源脆弱性的

理解与认识在逐步提升。一方面研究范围逐渐扩展,这表现在已有部分针对地表水资源及湿地水资源等方面研究,研究中开始同时考虑水质、水量以及社会、经济、生态等多方面的要求。另一方面认识的程度在加深,逐渐修正了原来仅仅利用相关评价指标的叠加来进行水资源脆弱性评价的现象。

综合不同学者对水资源脆弱性理解后,笔者认为水资源系统脆弱性的内涵应该包括以下内容:①水资源脆弱性是水资源系统自身的客观属性,水资源系统内部特征是其脆弱性的根源;气候变化及人类活动等外部驱动因素的影响是通过引起水资源系统内部特征的变化,而使其脆弱性发生改变的。②水资源脆弱性包含水资源系统对于外部驱动因素的敏感性和适应性 2 个方面内容^[23],其中敏感性指水资源系统遭受破坏后系统所产生的变化,适应性既包括水资源系统对外界驱动的适应能力,也包括系统功能遭受破坏后的恢复能力。③水资源脆弱性包括水质脆弱性和水量脆弱性 2 个方面内容^[25]。④不同区域由于水资源特征、自然条件及社会经济状况不同,导致水资源脆弱性不同,即其具有区域性^[1] 同样不同社会发展阶段,由于社会生产力水平不同,导致水资源脆弱性也有所差异,即其具有阶段性。⑤影响水资源系统的因素具有多层次、多尺度性,水资源系统本身也具有多尺度性,水资源脆弱性也应当具有多尺度性;水资源系统脆弱性还存在着一定的阈值^[1],一旦突破这个值,系统将遭受破坏。

3 水资源脆弱性的评价方法

水资源脆弱性评价主要分为 2 类。一类是定性评价,即对于水资源变化有密切关系的诸多因素进行系统分析,找出水资源脆弱性主要影响因素,提出降低水资源脆弱性的措施。吴青等^[37]对黄河河源区水资源脆弱性进行了分析,指出了影响水资源脆弱的相关因素有:①气候原因及降水时空分布不均;②草地沙化与土地荒漠化;③人口数量增加和人类活动加剧,在此基础上提出了生态建设与保护的建

表 1 不同研究对象水资源脆弱性概念及内涵

研究对象	概念	内涵
地表水资源系统	特定地域天然或人为的地表水资源系统在服务于生态经济系统的生产、生活、生态功能过程中,或者在抵御污染、自然灾害等不良后果出现过程中所表现出来的适用性或敏感性	地表水资源脆弱性将服务于生态经济系统的功能作为主要的外部驱动条件,是系统自身的客观属性;具有动态性和区域性;包括水质脆弱性和水量脆弱性 2 个方面;河分解为 3 部分:自然脆弱性、人为脆弱性、承载脆弱性
地下水水资源系统	地下水在循环过程中,受社会、经济发展和环境变化影响,地下水资源易于遭受人类活动、自然灾害威胁和损失的性质和状态,受损后难于恢复到原来状态和功能的性质	地下水水资源脆弱性影响因素主要分为 3 大类:地下水系统内部结构条件、外部自然因素和社会因素。此外应考虑地下水资源脆弱性的时间效应
湿地水资源系统	湿地水系统不能维系湿地生态系统正常结构和功能的程度和可能性。正常结构包括湿地生物群落层次结构和物质能量传递结构,正常功能主要包括防洪蓄水、调节气候、净化水质及生态保护等	湿地水系统脆弱性实质是以满足湿地存在和演化基本特征为底线的生态价值脆弱性,以湿地水系统能否维持正常的湿地生态系统结构、功能及演化趋势为判断和表征

议。同样,黄友波等^[38]也结合黑河所处的特定地理位置,分析其脆弱性以及生态问题产生的原因,进而提出了保护水资源及生态环境的建议。另一类是定量评价,该评价过程中需引入一个能定量衡量水资源脆弱程度的量。为此常引入脆弱度的概念,其数值越大,抵抗干扰的能力越差,一旦受到破坏,恢复能力也越差;其数值越小,抗干扰能力越强,恢复能力也越强^[21]。此外为计算水资源脆弱度,还需要构建一个科学合理且易于操作的指标体系。

3.1 指标体系构建

3.1.1 指标体系构建原则

构建指标体系之前,必须提出相应的构建原则。尽管不同研究者^[1,25,39]在研究中采用了不同的指标体系构建原则,但其一般都包括这几个方面:① 科学性原则与完备性原则:从水资源脆弱性的内涵出发,采取科学的方法建立指标体系。指标体系要能够全面反映影响水资源系统的脆弱性各项因素,如气候变化、人类活动等。② 主导性原则和相互独立性原则:应选取那些最能反映水资源脆弱性特征的指标,其中应既包括反映内部特征的关键指标,也应包括作为外部驱动的关键指标,往往能反映同一信息的指标会有多个,所以要对指标进行合理选择,尽量做到一个指标反映一个信息。③ 可操作性和可比性原则:指标应简单,容易表达,计算所需数据应易于获得;各指标应采取标准的名称、计算方法及分级准则以确保最终结果的可比性。④ 区域性原则:脆弱性的评价往往是针对一定区域而言的,因此应在充分考虑评价区域水资源系统特点、社会经济条件和自然环境状况后,再建立水资源脆弱性评价指标体系。

3.1.2 指标体系

根据指标体系构建原则,研究者构建了许多相应的指标体系。例如,刘绿柳^[21]将水资源的脆弱度分为本质脆弱度和特殊脆弱度 2 部分,又根据地表水和地下水的性质选择了 17 个指标建立了评价水资源脆弱性的指标体系。邹君等^[25]认为地表水资源脆弱性包括水质脆弱性和水量脆弱性 2 个方面,不同研究区域、不同研究目的其研究的侧重点不一样,但从脆弱性形成因素来看都可以分解为 3 部分:自然脆弱性、人为脆弱性、承载脆弱性,在此基础上选择了 19 个评价指标构建了地表水资源脆弱性评价的指标体系。董四方等^[40]结合 DPSIR 概念模型对水资源系统脆弱性进行了描述,其脆弱性指标体系由驱动力指标、压力指标、状态指标、影响指标和响应指标等 5 部分构成,共 36 个评价因子,将水资源系统脆弱性的各个方面有机地结合在一起。

由于目前对水资源脆弱性的理解尚未达成共

识,因而也没有一个相对统一的指标体系构建原则,这就形成了众多差异较大的指标体系。对于已建成的指标体系往往还存在以下缺点:指标体系难以全面涵盖水资源脆弱性内涵所要求的信息,某些指标计算资料难以获得,一些定性指标定量化困难、各指标体系采取的计算方法与分级标准不统一导致计算结果可比性差等^[41]。因此有必要对现有指标体系进行完善与规范。

3.2 评价方法

目前在水资源脆弱性评价中应用最为广泛的是综合指数法,该方法通过分析导致水资源脆弱性的主要因素,构造相应的指标体系,利用数理统计方法综合成脆弱性指数,进行水资源脆弱性评价,具体应用中常使用层次分析法(AHP)^[42]、模糊综合评价法^[43] 2 种方法。张笑天等^[44]根据漳河水库灌区水资源现状,采用 AHP 方法,建立了水资源脆弱性评价指标体系和水资源脆弱度评价阈值,分析了灌区自然脆弱性、人为脆弱性和承载脆弱性等敏感指标,并用 2005 年实际资料对灌区脆弱性水平进行了评价。王明泉等^[45]则根据黑河流域水资源现状,采用了 AHP 法,分析了黑河流域水资源的敏感性、适应性能,并据此对 2010 年黑河水资源的脆弱性水平做出了预测。Dixon^[11]采用 GIS 和模糊评价方法对地下水资源脆弱性进行了评价,作出了脆弱性图。综合指数法方法简单、易于操作,但忽略水资源脆弱性各构成要素间的相互作用机制,与脆弱性内涵之间缺乏相互对应的关系,容易导致评价仅仅是各要素简单的叠加^[46]。

为了避免综合指数法的缺点,一些其他脆弱性评价方法也逐渐应用到水资源脆弱性评价中。如邹君等^[24]为了避免在多指标综合评价时各单项指标的评判结果的不相容现象,采用了基于欧氏贴近度的模糊物元模型对研究区农业水资源脆弱度进行综合评价,取得了较好的评价效果。该方法不需考虑变量间的相关性,可以充分利用原始变量的信息,但是该方法需要选择一个评价的参照单元,且目前还没有较好的方法进行参照单元的选取。董四方等^[40]则利用大样本数据、投影寻踪、遗传算法、插值型曲线,建立了新的评价模型——粒子群投影寻踪插值模型。该模型直接由样本数据驱动,客观决定各评价指标权重,将多因子的评价归结为单目标决策,以定量数值表示评定结果。该方法能较好地避免一般评价方法中存在的指标权重赋值主观性较强等缺点,但同时该法应用较为复杂。

目前常用的地下水资源脆弱性评价方法有 3 类:叠置指数法、过程数学模拟法和统计方法^[47]。

目前国内外应用最为广泛的就是第一类方法, Al-Adamat 等^[48]利用 GIS、RS 及 DRASTIC 指标体系对约旦北部巴迪亚区域进行了地下水脆弱性评价。杨国民等^[49]针对阜新盆地特点,利用 DRASTIC 方法通过选取地下水埋深等 7 项参数作为评价因子,并结合 GIS 地理分析功能对该区地下水脆弱性进行评价。

研究表明在给指标体系权重赋值时,许多的评价方法要么主观性较强,导致评价结果不够客观,要么完全参照已有模型,灵活性不够;另外不同评价方法给出的结果往往差异很大,缺乏可比性^[21]。这就要求今后要不断完善已有的研究方法,以获得既客观、灵活又具有较好可比性的研究成果。随着对水资源脆弱性研究的深入,一方面有许多的新理论、新方法被应用到该项研究中,这些理论方法往往能较好地避免原有方法的缺点;另一方面研究者采用多种方法联合的方式,充分利用各种方法的优点,起到较好的效果。然而这些都导致评价方法的日益复杂化,并对评价方法的合理选择提出了较高的要求。笔者认为在方法选择时应遵循简单适用的准则,即首先应考虑评价方法是否在评价区域适用,其次在满足适用性的条件下,若几种评价方法所获得的最终评价结果是相似的,则应优先选取简单的评价方法。

4 降低水资源脆弱性的措施

水资源脆弱性研究的目的是通过评价某地区水资源脆弱性状况,找到影响该地区水资源脆弱性的主要因素,进而提出适宜的对策以降低水资源的脆弱性。陈崇德等^[50]根据湖北省漳水库灌区水资源开发与利用现状,分析了水资源脆弱性的表现、带来的影响及主要原因后,提出了降低水资源系统脆弱性的措施。措施主要有:开展水资源脆弱性研究,编制水资源利用规划,加强水资源的流域管理,理顺水资源管理中的各种关系,加强宣传教育,强化市场经济手段等。冯少辉等^[39]对云南省滇中地区的水资源脆弱性进行分析评价后,在评价结果基础上找到了一些相关的建议:①加大节水力度,形成全民、全社会共同节水的良好风气,建立节水型社会。②污水处理及回用既是缓解滇中地区水环境恶化的有效措施,还可以解决滇中地区水资源短缺问题。③应该严格控制人口自然增长率,促进经济社会和水资源的可持续发展。

水资源脆弱性定性评价中,在找到影响水资源脆弱性的因素后往往能直接给出降低脆弱性的建议。而水资源脆弱性定量评价一般给出的是评价区域水资源脆弱性程度的一个度量,如何将这种度量结

果转化为指导实践的有用信息传达给决策者,这就要求评价者能对评价结果进行合理的解释,而这一点在水资源脆弱性评价中往往很难做到,因而研究中很少涉及这方面。因此应注重将水资源脆弱性定量评价结果转换为实际工作指导意见方面的研究。

5 面临的挑战及发展趋势

近年来,受气候变化与人类活动作用的影响,世界上许多地区都出现了一系列水资源问题,因此对水资源脆弱性研究就显得尤为重要。然而目前在水资源脆弱性研究方面还有许多难题需要解决,主要包括以下这几个方面:①概念、内涵的研究。由于各学者研究工作各有侧重,给出的概念与内涵就各有偏重,以至目前对于水资源脆弱性的理解尚未达成共识,这已严重限制了水资源脆弱性研究的进一步发展。②指标体系的构建。指标体系建立的关键在于对水资源脆弱性的理解及指标体系构建原则的确定方面,而这两方面目前都未达成共识。目前已建成的指标体系往往还存在指标体系覆盖面不广、不全面,某些指标计算数据不易获得等缺点,因此在指标体系构建方面还需做大量工作。③评价方法的探索。已有的评价方法大多存在对不同研究区域适用性差、定量方法所获结果难以定性化等一系列问题,此外还缺乏检验各评价方法评价结果好坏的有效手段,这些问题的合理解决都具有较大的困难。④尺度问题与阈值研究。水资源脆弱性具有多尺度性,选择好适宜的尺度进行水资源脆弱性评价是十分重要的;水资源系统存在着一个破坏的阈值,以往水资源脆弱性评价往往只能给出一个评价的大致区间,如不脆弱、脆弱等,但是难以确定其最终破坏的阈值。

结合目前国内外水资源脆弱性的研究现状,笔者认为由于气候变化对于水资源空间配置状态影响大小的不确定性,气候变化下水资源脆弱性研究仍将会引起较大的关注;此外与脆弱性有关的研究工作也将逐渐开展,如水资源脆弱性与区域可持续发展、水资源系统风险分析等,但同时这些也将会促进水资源脆弱性研究的进一步开展。由于当前水资源脆弱性评价多为地下水脆弱性评价,对于流域及湿地、岩溶地区水资源脆弱性的评价工作还较少,今后的研究将会朝这些方向发展。将各种高新技术应用在水资源脆弱性研究中也会是未来一个发展趋势,如利用 3S 技术与各种数学模型的结合进行水资源脆弱性评价。由于可获取的指标数据的数量和质量在很大程度上限制了评价的精度,因此在原始数据的获取方面也将进行大量的工作,如可开展古水文长序列的恢复重建工作。

参考文献：

- [1] 于翠松,郝振纯. 变化环境下水资源系统脆弱性评价研究[J]//任立良. 环境变化与水安全. 第五届中国水论坛论文集. 北京: 中国水利水电出版社, 2007: 651-658.
- [2] 夏军,刘春葵,任国玉. 气候变化对我国水资源影响研究面临的机遇与挑战[J]. 地球科学进展, 2011, 26(1): 1-11.
- [3] 姜桂华. 地下水脆弱性研究进展[J]. 世界地质, 2002, 21(1): 33-38.
- [4] 张昕,蒋晓东,张龙. 地下水脆弱性评价方法与研究进展[J]. 地质与资源, 2010, 19(3): 253-257.
- [5] National Research Council (U S). Ground water vulnerability assessment-predicting relative contamination potential under conditions of uncertainty [M]. Washington D C: National Academy Press, 1993: 204.
- [6] DOERFLIGER N J, EANNIN P Y, ZWAHLEN F. Water vulnerability assessment in karst environments: a new method of defining protection areas using a multi-attribute approach and GIS tools[J]. Environmental Geology, 1999, 39(2): 165-176.
- [7] DALY F D, DASSARGUES A, DREW D. Main concepts of the “European approach” to karst - groundwater - vulnerability assessment and mapping[J]. Hydrogeology Journal, 2002(10): 340-345.
- [8] 邢立亭,吕华,高赞东,等. 岩溶含水层脆弱性评价的COP法及其应用[J]. 有色金属, 2009, 61(3): 138-142.
- [9] FU Su-rong, WANG Yan-xin, CAI He-sheng, et al. Vulnerability to contamination of groundwater in urban regions [J]. Earth Science, 2000, 25(5): 482-486.
- [10] IBE K M, COLLIN M L, MELLOULA J. Assessment of ground water vulnerability and its application to the development of protection strategy for the water supply aquifer in Owerri southern Nigeria [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2001, 67(6): 323-336.
- [11] DIXON B. Groundwater vulnerability mapping: a GIS and fuzzy rule based integrated tool [J]. Applied Geography, 2005, 25(4): 327-347.
- [12] 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.
- [13] PATHAK D R, HIRATAUKA A, AWATA I, et al. Groundwater vulnerability assessment in shallow aquifer Kathmandu Valley using GIS-based DRASTIC model[J]. Environmental Geology, 2009, 57(7): 1569-1578.
- [14] STRZEPEK K M, YATES D N, EI QUOSY D E D. Vulnerability assessment of water resources in Egypt to climatic change in the Nile Basin[J]. Climate Research, 1996, 6: 89-95.
- [15] VÖRÖSMARTY C J, GREEN P, SALISBURY J. Global water resources: vulnerability from climate change and population growth[J]. Science, 2000, 289(5477): 284-288.
- [16] BATES B C, KUNDZEWICZ Z W, WU S, et al. Climate Change and Water[M]. Geneva: IPCC Secretariat, 2008.
- [17] 刘淑芳,郭永海. 区域地下水防污性能评价方法及其在河北平原的应用[J]. 河北地质学院学报, 1996(1): 41-45.
- [18] 郑西来,吴新利,荆静. 西安市潜水污染的潜在性分析与评价[J]. 工程勘察, 1997(4): 22-24.
- [19] 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.
- [20] 杨燕舞,张雁秋. 水资源的脆弱性及区域可持续发展[J]. 苏州城建环保学院学报, 2002, 15(4): 85-88.
- [21] 刘绿柳. 水资源脆弱性及其定量评价[J]. 水土保持通报, 2002, 22(2): 41-44.
- [22] 宋承新,邹连文. 山东省地表水资源特点及可持续开发分析[J]. 水文, 2001, 21(4): 38-40.
- [23] 邹君,傅双同,毛德华. 中国南方湿润区水资源脆弱度评价及其管理:以湖南省衡阳市为例[J]. 水土保持通报, 2008, 28(2): 76-80.
- [24] 邹君,杨玉蓉,田亚平,等. 南方丘陵区农业水资源脆弱性概念与评价[J]. 自然资源学报, 2007, 22(2): 302-310.
- [25] 邹君,杨玉蓉,谢小立. 地表水资源脆弱性:概念、内涵及定量评价[J]. 水土保持通报, 2007, 27(2): 132-135.
- [26] 刘金芳. 沈阳市水资源可持续开发利用影响因素分析[J]. 现代农业科技, 2007(15): 192-195.
- [27] 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, 24(3): 24-26.
- [28] 王国庆,张建云,章四龙. 全球气候变化对中国淡水水资源及脆弱性影响研究综述[J]. 水资源与水工程学报, 2005, 16(2): 7-15.
- [29] 吴素芬,刘志辉,韩萍. 气候变化对乌鲁木齐河流域水资源的影响[J]. 冰川冻土, 2006, 28(5): 703-706.
- [30] 伏洋. 气候变化对柴达木盆地水资源的影响:以克鲁克湖流域为例[J]. 冰川冻土, 2008, 30(6): 998-1006.
- [31] 邹君,杨玉蓉,毛德华,等. 湖南省农业生态水资源库脆弱性评价[J]. 冰川冻土, 2010, 32(1): 196-202.
- [32] 孙才志,潘俊. 地下水脆弱性的概念、评价方法与研究前景[J]. 水科学进展, 1999, 10(4): 1-7.
- [33] VRBA J, ZAPOROZEC A. Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability [J]. International Contributions to Hydrogeology, 1994, 16: 131.
- [34] 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.
- [35] 严明疆,申建梅,张光辉,等. 漳滙平原地下水资源脆弱性时变分析[J]. 水土保持通报, 2006, 26(5): 46-48.
- [36] 郭跃东,何岩,邓伟,等. 扎龙河滨湿地水系统脆弱性特征及影响因素分析[J]. 湿地科学, 2004, 2(1): 47-53.
- [37] 吴青,周艳丽. 黄河河源区生态环境变化及水资源脆弱性分析[J]. 水资源保护, 2002(4): 21-24.

- [38] 黄友波,郑冬燕,夏军,等.黑河地区水资源脆弱性及其生态问题分析[J].水资源与水工程学报,2004,15(1):32-37.
- [39] 冯少辉,李靖,朱振峰.云南省滇中地区水资源脆弱性评价[J].水资源保护,2010,26(1):13-16.
- [40] 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,2010,26(4):1-3.
- [41] 李凤霞,郭建平.水资源脆弱性的研究进展[J].气象科技,2006,34(6):731-734.
- [42] 杨青,王丽燕.层次分析法与功能评价[J].价值工程,1995,15(4):28-29.
- [43] MARTINO F D, SESSA S, LOIA V. A fuzzy-based tool for modelization and analysis of the vulnerability of aquifers: a case study [J]. International Journal of Approximate Reasoning, 2005, 38(1): 99-111.
- [44] 张笑天,陈崇德.漳河水库灌区水资源脆弱性评价研究[J].华北水利水电学院学报,2010,31(2):12-15.
- [45] 王明泉,张济世,程中山.黑河流域水资源脆弱性评价及可持续发展研究[J].水利科技与经济,2007,13(2):114-116.
- [46] 李鹤,张平宇,程叶青.脆弱性的概念及其评价方法[J].地理科学进展,2008,27(2):18-25.
- [47] 王勇.基于 GIS 对祁县东观地下水水资源脆弱性评价[D].太原:太原理工大学,2006.
- [48] AL-ADAMAT R A N, FOSTER I D L, BABAN S M J. Groundwater vulnerability and risk mapping for the Basaltic aquifer of the Azraq basin of Jordan using GIS, Remote sensing and DRASTIC[J]. Applied Geography, 2003, 23(4): 303-324.
- [49] 杨国民,祁福利. DRASTIC 地下水脆弱性评价方法及其应用:以阜新盆地为例[J].黑龙江水专学报,2010,37(2):45-47.
- [50] 陈崇德,李云峰.漳河水库灌区水资源脆弱性分析[J].长江工程职业技术学院学报,2009,26(4):1-4.

(收稿日期 2011-06-29 编辑 徐 娟)

(上接第 31 页)

f. 水生态分区及水生态保护修复技术措施体系。综合考虑区域水文水资源特征、河流生态环境功能,研究水生态分区体系,针对水生态分区和功能定位分析其保护和修复方向和重点,研究水生态保护和修复措施体系和技术方法。

g. 湖泊水资源保护关键技术。针对湖泊水资源及水生态系统特点,分析湖泊自然演变规律和污染变化趋势,从水资源、水环境和水生态方面研究湖泊水资源和水生态保护的关键技术。

h. 地下水保护水位控制标准及其恢复技术。通过对不同类型地区地下水系统补给、径流、排泄条件综合分析,研究制定不同类型区的地下水水位控制标准,提出地下水水位恢复技术。

i. 兼顾生态保护的闸坝调度关键技术研究。在综合考虑防洪、供水、发电等工程调度方案基础上,研究兼顾闸坝生态需水保障、污染应急管理要求的多目标调度运用关键技术。

j. 水资源保护补偿机制研究。根据水功能区和入河排污口监测考核、重要水生态保护要求,研究包括水质、水量、水生态等方面的水资源保护综合补偿机制。

5 结 语

水是生命之源,生产之要,生态之基,是生态系统能量流动和物质循环的载体。随着水资源保护和河流健康保障体系建设的不断推进和最严格的水资源管理制度的贯彻实施,水资源保护工作的理念、内

涵和外延将不断丰富和拓展。为反映水资源保护工作的新理念和新要求,水资源保护规划编制工作应在总结以往经验基础上,进行理念和技术等方面的不断拓展和创新,建立并完善水资源保护规划体系。

基于水质、水量、水生态并重的现代水资源保护规划体系强调,以维护流域生态系统的良性循环为基本出发点,以保障生活、生产和生态用水安全为目标,以流域为对象,以水功能区为单元,统筹地表水和地下水,统一规划、分区保护、协同管理,对指导和完善我国流域水资源保护规划编制工作具有重要意义。

参考文献:

- [1] 国家发展和改革委员会,水利部.全国水资源综合规划[R].北京:水利部水利水电规划设计总院,2010.
- [2] 朱党生,王超,程晓冰.水资源保护规划理论与技术[M].北京:中国水利水电出版社,2001:30-80.
- [3] 张建永,朱党生,曾肇京,等.我国城市饮用水水源地区安全评价与措施[J].水资源保护,2011,27(1):1-5.
- [4] 王忠静,郑吉林,刘明藏.现代水资源规划若干问题及解决途径与技术方法(二) 水资源规划的尺度效应[J].海河水利,2003(2):16-18.
- [5] 朱党生,张建永,廖文根,等.水工程规划设计关键生态指标体系[J].水科学进展,2010(4):136-142.
- [6] 史晓新,朱党生,张建永.现代水资源保护规划[M].北京:化学工业出版社,2005:20-25.
- [7] 朱党生.中国城市饮用水安全保障方略[M].北京:科学出版社,2008,15-69.

(收稿日期 2011-08-01 编辑 高渭文)