

水资源脆弱性评价研究进展

马芳冰, 王 烜, 李春晖

(北京师范大学 环境学院, 水沙科学教育部重点实验室, 北京 100875)

摘 要: 水资源是影响区域、国家甚至全球环境可持续发展的关键, 水资源脆弱性是制约水资源安全的基础性问题。本文从水资源脆弱性的概念、评价指标体系和评价方法方面, 综述了国内外水资源脆弱性评价的研究进展, 并对其未来的发展方向进行了展望。

关键词: 水资源脆弱性; 水资源评价; 研究进展

中图分类号: X824

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2012)01-0030-08

Research progress in water resources vulnerability assessment

MA Fangbing, WANG Xuan, LI Chunhui

(Key Laboratory for Water and Sediment Sciences of Ministry of Education, School of Environment,
Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Water resources status is a key factor that influences the sustainable development of regional, national and even the global environment. Water resources vulnerability is one of the basic problems that restrict the safety of water resources. This paper systematically summarized the major progress of conceptions, assessment index systems and evaluation methods for water resources vulnerability both at home and abroad, and then gave an outlook for its development direction of the promising future.

Key words: water resources vulnerability; assessment of water resources; research progress

水资源是人类及一切生物赖以生存的不可替代的物质, 在经济和社会可持续发展中占有非常重要的地位。当前社会经济的不断发展对水资源的需求量日益增加, 以及气候变化对水资源的影响, 使我国的水资源安全受到严重威胁。水资源脆弱性(Water Resources Vulnerability, WRV)是度量水资源安全的重要标准, 作为制约水资源安全的基础性问题, 水资源脆弱性研究日益受到国内外学者们的普遍关注。开展水资源脆弱性研究对预测未来水资源安全变化趋势, 探求水资源安全的关键性要素和过程具有非常重要的意义。

1 水资源脆弱性的概念

自从法国人 Margat 在他的文章中首次提出“地下水脆弱性”的概念后, 许多学者就开始对水资源的脆弱性进行研究。如 Albinet 与 Margat^[1]认为地下水脆弱性是在自然条件下, 污染源从地表渗透与扩散到地下水面的可能性。Villumsen 等^[2]认为地下水脆弱性是应用中的或废弃于地表的化学物质对

地下水的危害性。Palmquist^[3]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。同时指出, 如果没有污染源与人类活动存在, 即使最易污染的地下水也不可能受到污染, 因而脆弱性就无从谈起。Vrba 和 Zaporozec^[4]将时间尺度引入到地下水脆弱性定义中, 认为地下水脆弱性相对人文历史时期来说是地下水系统的一个不变的本质特征, 它依赖于这个系统消化自然演化和人类活动影响的能力。1987年在荷兰举行的“土壤与地下水污染脆弱性”国际会议上, 专家们结合影响地下水脆弱性的内外因素提出了不少定义方式。如 Foster^[5]认为地下水污染是由含水层本身的脆弱性与人类活动产生的污染负荷造成的。在此基础上, 他提出了“含水层脆弱性”这一术语。美国审计署应用“水文地质脆弱性”来表达含水层在自然条件下的易污染性, 而用“总脆弱性”来表达含水层在人类活动影响下的易污染性。随后, 美国国家科学委员会给出了地下水脆弱性的定义: 地下水脆弱性是污染到达最上含水层之上某特定位置的倾向性与

收稿日期: 2011-08-26; 修回日期: 2011-10-15

基金项目: 环境模拟与污染控制国家重点实验室基金资助(10Y04ESPCN); 长江学者和创新团队发展计划(IRT0809)资助

作者简介: 马芳冰(1988-), 女, 河南上蔡人, 硕士研究生, 水力学及河流动力学专业。

通讯作者: 王 烜(1973-), 女, 云南昆明人, 博士, 教授, 主要从事流域水安全研究。

可能性,并将地下水脆弱性分为本质脆弱性(intrinsic vulnerability)与特殊脆弱性(specific vulnerability)。本质脆弱性(即结构型脆弱性)是指在天然状态下含水层对污染所表现出的内部固有的敏感性,它不考虑污染源或污染物的性质和类型,是静态、不可变和人为不可控制的。特殊脆弱性(即胁迫型脆弱性)是含水层对特定的污染物或人类活动所表现的敏感性,它与污染源和人类活动有关,是动态、可变和人为控制的。目前,国内外研究都倾向于美国国家科学研究委员会将地下水脆弱性分为两类的主张。邹君等^[6]定义地表水资源脆弱性为: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,包括三方面:自然脆弱性、人为脆弱性和承载脆弱性。

水资源不但指地下水,还包括地表水,涉及水量和水质两个方面,因此对水资源脆弱性的定义应包括地下水脆弱性和地表水脆弱性。以往有关水资源脆弱性研究多针对地下水,且主要集中于水质方面,对水量的研究则相对较少。然而随着数据信息的可获得性及研究的不断深入,关于地表水脆弱性的研究逐渐受到关注。由于不同专业领域的研究人员对脆弱性的理解不同,因而至今仍未有统一的水资源脆弱性概念。Kulshreshtha^[7]认为水资源脆弱性指水资源易于受到破坏的性质,这种破坏包括四个方面:对水资源系统自身的破坏,对依赖水资源的生态系统的破坏,对人类的破坏和对社会经济的破坏。Perveen 和 James^[8]认为水资源脆弱性是指由于水资源可获得性的限制和集中用水而导致的区域脆弱性。目前,国内的研究普遍认为水资源脆弱性是一种受自身和外在因素影响而导致水资源系统失衡的特性和状态,与系统的承载能力、适应能力密切相关。如唐国平等^[9]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。刘绿柳^[10]重新界定了水资源的研究范围,主要包括地表水系统、地下水系统、与水资源有关的社会系统,涉及水量与水质2个方面。并综合考虑自然和人为双重作用,定义了水资源系统的脆弱性:水资源系统易于遭受人类活动、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。主要体现在地表、地下水资

源数量、质量,水资源循环更新速率、水资源承载力等。杨燕舞和张雁秋^[11]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(即水质恶化难易程度)。刘春蓁^[12]认为气候变化及人类活动导致的水资源脆弱性指该系统容易遭受气候变化(气候变化、极端事件及人类活动)不利影响的程度,取决于水资源对大气变化及人类活动的敏感性和适应性。李剑颖^[13]从承载力、恢复力和持续性等三个方面来探讨水资源脆弱性的内涵,认为水资源的脆弱性可定义为:受自身因素的限制,水资源系统易于遭受其它自然因素和人为活动的破坏,破坏后难以恢复到原来状态,从而导致其自身的发展及长期维持人类社会发展和良好的生态环境的功能难以持续的性质,涉及水量、水质、水能三个方面。冯少辉等^[14]认为水资源脆弱性是指在一定社会历史和科学技术发展阶段,某一地区的水资源在服务于社会经济领域和生态环境领域中易于受到人类活动、自然灾害影响和破坏的性质和状态,受损后缺乏恢复到初始状态的能力的性质。并将其分为自然脆弱性和扰动脆弱性两个方面。

随着对水资源研究的不断深入,水资源脆弱性的概念与内涵得到了丰富和发展。水资源脆弱性的概念经历了从单一的地下水脆弱性或地表水脆弱性到水资源脆弱性综合评价,从单一水质研究到水质水量研究相结合的过程。目前,研究者越来越多地关注气候变化及人类活动对水资源脆弱性的影响,以便为水资源管理提供更加合理的决策依据。

2 水资源脆弱性的评价指标体系

构建指标体系是定量评价水资源脆弱性的基本方法。影响水资源脆弱性的因素很多,在实际应用中,要建立一个包含所有影响因素的评价指标体系是不可能和不现实的。因子太多,不但加大工作量,而且增加因子之间的复杂关系,容易造成因子之间相互关联或包容,同时也会冲淡主要因子的影响,所以需要确定一系列有代表性且容易获得的参数来构建水资源脆弱性评价指标体系,主要包括自然因素指标和人为因素指标。自然因素指标主要包括地形、地貌、地质、水文地质条件以及与污染物运移有关的自然因子等;人为因素指标主要指可能引起水环境污染的各种行为因子。

由于研究者对水资源脆弱性概念和内涵的理解

不同,以及研究区域、获取资料的不同,评价时选择的指标的性质及数量也存在很大差异。如 Masetti^[15]根据影响水资源脆弱性的自然和人为因素选取了 7 个指标评价了地下水对硝酸盐浓度的脆弱性影响。Kattaa^[16]根据叙利亚沿海班亚斯流域的水文地质环境,选择了 5 个环境参数,并采用结合 GIS 技术的 RISKE 模型对含水层的脆弱性进行了评价。唐国平等^[9]根据水资源脆弱性的主要表现将其分为水文系统的脆弱性、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等三种类型,根据不同类型性质选择了 23 个指标,建立了气候变化下水资源脆弱性评估指标体系框架。刘绿柳^[10]将水资源的脆弱度分为本质脆弱度和特殊脆弱度两部分,又根据地表水和地下水的性质选择了 17 个指标建立了易于操作、可比性强、综合全面的水资源脆弱性评价指标体系。孙才志等^[17]根据影响地下水脆弱性的主要因素和次要因素,选择了 28 个因子作为评价地下水脆弱性的主要参数和 19 个因子作为次要参数,建立了比较详细的评价地下水脆弱性的指标体系。陈守煜等^[18]根据研究区的水文地质情况,选取含水层埋深、渗流区介质类型、含水层净补给量、含水层介质类型、含水层的水力传导系数、土壤介质类型及地形坡度等 7 个参数确定评价标准,并提出了语气算子比较法来确定指标权重,对大连市区及金州地区进行了地下水脆弱性评价。王国庆等^[19]以区域人均径流量和缺水率为脆弱性评价指标,结合人口预测、气候影响分析结果,对比分析了中国不同区域水资源脆弱性对气候变化的响应。李剑颖^[13]按照水资源脆弱性的表现形式,将其分为水文系统的脆弱性、社会经济系统的脆弱性、生态环境系统的脆弱性和水利系统的脆弱性四种,共包含 21 个评价指标,并采用三种模型对官厅水库流域张家口地区的水资源脆弱性现状进行了评价对比。邹君等^[20]从自然脆弱性、人为脆弱性、承载脆弱性 3 个方面选取 11 个评价指标,构建了湖南省衡阳市水资源脆弱度评价指标体系。陈康宁等^[21]选取了可分别反映水资源条件、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,构建了河北省水资源系统脆弱性评价指标体系。姜桂华等^[22]分析了地下水本质因素、人为因素及污染物特殊因素等对脆弱性的影响,并从中选取 13 个评价因子,对关中盆地的地下水特殊脆弱性进行了评价。董四方等^[23]构建了基于 DPSIR 的水资源系统广义脆弱性指标体系,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。

由于对各研究区域选取指标的角度和侧重点不同,对水资源脆弱性评价尚未形成一个统一的指标体系,评价结果之间缺乏可比性。因此建立完整和具有共性的评价指标体系是研究水资源脆弱性的重要工作。

3 水资源脆弱性评价方法

评价水资源脆弱性的主要方法有迭置指数法、过程模拟法、统计方法、模糊数学综合评价法和其他方法等,每种方法有自己的特点和应用范围。

3.1 迭置指数法

迭置指数法(Overlay and Index Methods)是最简单、应用最广泛的水资源脆弱性评价方法,是定性、半定量的方法。该方法首先选择对脆弱性影响最大的因素,通过将选取的各评价指数进行叠加形成一个反映脆弱性程度的指数,根据该指数进行脆弱性评价。这种方法主要依靠数据的有效性和专家的判断。一般的评价结果为脆弱性图,通过数值或颜色显示不同的含水层脆弱性,又可分为水文地质背景参数法和参数系统法。

迭置指数法目前较多地用于地下水脆弱性评价中,其中普遍采用 1987 年美国国家环境署提出的 DRASTIC 模型^[24]。如曲文斌等^[25]采用 DRASTIC 模型,选取 7 个因子对石家庄城市区地下水进行了评价,结果与实际情况相符。孙才志等^[26]在参照 DRASTIC 方法的基础上,根据下辽河平原的具体状况选择 11 个参数作为该地区地下水脆弱性评价因子,利用模糊模式识别技术对下辽河平原地区的地下水脆弱性进行评价,评价结果与该地区地下水污染情况的拟合度较好。于翠松^[27]从水资源系统恢复力影响因素的角度出发,建立了水资源系统恢复力定量评价的指标体系;并采用层次分析法计算各指标权重,运用综合评价方法对水资源系统的恢复力进行评价,计算出各地水资源系统恢复度。进而对山西省各地市 2004 年水资源系统恢复力进行了评价实例研究,并对结果的合理性进行了分析。王红旗等^[28]采用 DRASTIC 模型对北京顺义地区地下水源地进行固有脆弱性评价,取得了较好的结果。Yu 等^[29]用 DRASTIC 模型来定量评价山东湟水流域地下水脆弱性。Ibe 等^[30]分别用 DRASTIC 模型、Legrand 模型、GOD 模型和 SIGA 四种模型对尼日利亚奥韦里里地区的地下水防污性能进行了评价比较。Martínez - Bastida 等^[31]分别用 DRASTIC 模型和

GOD 模型评价了西班牙中部地下水遭受硝酸盐污染的本质脆弱性和特殊脆弱性。

由于有关参数的相关资料和数据不易获得,且在不同的地区每个参数的评分范围也不完全一样,所以研究者在经典 DRASTIC 模型的基础上,对 DRASTIC 模型进行改进,以使其适用于不同地区的环境状况。如 Guo 等^[32]利用基于 DRASTIC 模型改进的 DRARCH 模型来评价太原盆地地下水对砷污染的特殊脆弱性。Bojórquez - Tapia 等^[33]运用 V - DRASTIC 对墨西哥和莱尔马两个城市流域进行了地下水资源的脆弱性评价,结果表明 V - DRASTIC 生成的空间模式解译比 DRASTIC 和 F - DRASTIC 的结果偏差小。Zhou 等^[34]用 DRAV 模型对塔里木流域进行了地下水脆弱性评价,结果表明用 DRAV 模型进行干旱区地下水本质脆弱性评价是可行的。近年来也多有基于 GIS 技术的脆弱性评价研究成果出现。如范弢等^[35]采用 DRASTIC 模型,结合 GIS 技术,对丽江盆地地下水脆弱性从自然和人类影响两方面进行了评价。Almasri^[36]结合 GIS 技术的空间分析功能,利用 DRASTIC 方法评价了加沙沿海含水层对污染的本质脆弱性。Wen 等^[37]采用基于 GIS 的 DRASTIC 模型对张掖盆地的浅层地下水脆弱性进行了评价。朱丽霞等^[38]在传统 DRASTIC 模型基础上,结合 GIS 空间分析功能,对河南省项城市浅层地下水固有脆弱性进行评价。其他方法还有 PI 法^[39, 40]、EPIK 法^[39]、欧洲 (COP) 法^[41]、局部欧洲 (LEA)^[42]法等。

迭置指数法采用的是一种经典的加权评分法,简单易行,结果明了,但它是一种经验性的方法,没有严格的理论依据。在评价指标权重的确定上多采用主观性较强的专家经验评分法,且不能反映出各评价因素指标值的连续变化对水资源脆弱性的影响,对于评价因素具有模糊性、不确定性的问题,不能很好地反映实际情况,在实际应用中应注重与模糊数学综合评价法结合。对于脆弱性指标权重赋值多采用主成分 - 因子分析法、灰色关联度法、层次分析法、证据权法、BP 神经网络及熵权系数法等,可以解决权重主观色彩较重的问题。

3.2 过程模拟法

过程模拟法 (Process - Based Simulation Models) 是在对水分和污染质运移过程分析和模型模拟的基础上,通过构建脆弱性评价数学公式,将各评价因子定量化后求解得出一个可评价脆弱性的综合指数。该方法可以描述污染物迁移运输的物理、化学

和生物等过程,只适用于小范围的水资源脆弱性定量评价^[36]。如朝伦巴根等^[43]应用均衡模拟法对通辽地区地下水、地表水资源及其地表水 - 地下水相互转化资源进行系统评价。Nobre 等^[44]在巴西某城市沿海含水层进行了脆弱性评价,研究中利用 MODFLOW 和 MODPATH 模型刻画了水井捕获区,评估了地下水污染风险。Martínez - Santos 等^[45]运用基于有限差分法的地下水数值模拟对 Mancha Occidental 含水层进行了地下水资源的脆弱性评价。Butscher 和 Huggenberger^[46]结合脆弱性绘图和数值模拟流动,对瑞士西北的一个研究区进行地下水脆弱性评价,结果表明脆弱性绘图和数值模拟的结合能鉴别补给水和排放水区脆弱性的分布,同时也能评价岩溶区地下水脆弱性对时间的依赖性。姚文峰等^[47]选择 Monte - Carlo 随机模拟结合过程模拟模型 LEACHM 进行包气带范围内的脆弱性评价,采用三维数值模型 MODFLOW 结合 BP 神经网络的方式进行饱和带范围内的地下水脆弱性评价。最后将二者联合起来,建立了基于过程模拟的唐山平原区地下水脆弱性评价系统。

过程模拟法能描述影响水资源脆弱性的物理、化学及生物过程,精度较高,可以估计污染物的时空分布情况,但是它需要足够的地质数据和长系列污染物运移数据的支撑,因而限制了其发展。

3.3 统计方法

统计方法 (Statistical Methods) 是通过对已有的水污染信息进行数理统计分析,确定脆弱性量值和不同参数的联系,得出水资源脆弱性评价因子并建立模型,它将已赋值的各评价因子输入至模型中,根据结果进行脆弱性评价。该法不依赖于专家意见或污染物传输模型,而是依赖大量的监测数据,对数据的精度要求较高,应用实例较少。主要包括地理统计方法、Kriging 方法、线性回归分析法、逻辑回归分析法、实证权重法等。如 Nolan 等^[48]用逻辑回归分析法预测硝酸盐浓度大于 4mg/L 时美国的补给地下水遭受污染的可能性。陈玲飞和王红亚^[49]考虑到水资源系统与气候变化的非线性关系,用多元回归方法建立径流深与降水量、平均气温的非线性回归模型,来探讨全国范围内径流深对气候变化的响应。Worrall 和 Besien^[50]用贝叶斯法计算英格兰南部的主要含水层单元对农药污染的脆弱性,生成了一个脆弱性地图。Antonakos 和 Lambrakis^[51]运用逻辑回归分析法和实证权重法评价了希腊某地区含水层对硝酸盐影响的脆弱性。Masetti 等^[15]运用统计

方法来评价意大利北部的米兰市地下水对硝酸盐污染的脆弱性,结果表明统计方法在鉴别不同脆弱性程度的空间分布时效果较好。Gardner 和 Vogel^[52]综合利用探索性资料分析方法、极大似然估计和逻辑回归分析法评价了土地利用对美国楠塔基特岛地下水水质的影响,是管理者评价土地利用对地下水水质影响的有用工具。

统计方法使得研究者能合理的选择与研究区特征有关的因素,并检查这些因素的空间分布对影响污染的重要性,它能描述水资源对某一污染物的脆弱性,但需要足够的长系列污染监测资料,对数据精度要求较高,应用较少。

3.4 模糊数学法

模糊数学法(Fuzzy Mathematics Methods)主要用于确定因子评分体系和评价因子权值,经过单因子模糊评判和模糊综合评判来划分水资源的脆弱程度,将一些定性与非定性指标通过隶属函数来刻画非确定性参数及其指标分级界限,使指标定额的确定更具科学性。如郭永海等^[53]用模糊数学法研究了河北平原浅层地下水的有机氯污染,评价了区域地下水防污性能。林学钰和陈梦熊^[54]用模糊数学评判法评价了松嫩平原地下水的脆弱性。沈珍瑶与杨志峰^[55]利用主成分赋权法进行了 19 个评价指标权重的确定工作。最后利用灰关联分析方法与模糊综合评判法对黄河流域 9 个行政分区、19 个流域二级分区的水资源可再生性进行了评价,总的结论为黄河流域水资源总体上可再生能力较弱。李剑颖^[13]采用模糊优选模型对官厅水库流域张家口地区的水资源脆弱性进行了评价研究,客观性较好。陈鸿起等^[56]利用物元分析的基本理论和方法,结合模糊集合理论和欧式贴近度概念建立了基于欧式贴近度的模糊物元模型,利用各地区与最优参照状态的贴近度对区域水安全进行了评价。邹君等^[57]运用基于欧氏贴近度的模糊物元模型对衡阳盆地 7 个县(市)农业水资源脆弱度进行评判。冯少辉等^[14]以云南滇中为例,构建滇中地区在水循环、社会经济和生态环境领域内的水资源脆弱性评价指标体系,运用模糊数学中的相对偏差距离最小法对水资源脆弱度进行分析评价,评价结果合理可信。祝慧娜等^[58]运用模糊语言,将脆弱性分为 6 个等级,并根据 f 统计法和专家咨询法确定脆弱性的模糊隶属函数,对湘江的 14 个断面进行脆弱性评价。

模糊数学法通过隶属函数来描述非确定性参数及其指标,考虑了评价指标的连续变化对水资源脆

弱性的影响,可以预测污染物在空间和时间上的迁移情况,但是在评价因素权重的确定和隶属度函数的构建上存在着不足,同时由于参数较多,需要大量的地质数据和长序列污染质运移数据,且资料和数据获得比较困难,花费多,只适用于小范围的水资源脆弱性评价。

3.5 其他方法

就上述各类方法的应用而言,已有的研究多用单一的数学方法或模型对水资源进行脆弱性评价。由于水资源系统是复杂的综合体,具有明显的随机性和模糊性,可获取指标数据的数量和质量不够、以及对水资源系统确定性和非确定性信息表征方法的欠缺,均会导致评价结果缺乏全面性,而多种方法的耦合能够使水资源脆弱性评价结果更全面、更客观。如姜桂华^[59]用模糊综合评判法和模糊迭代自组织数据分析技术对关中盆地地下水的固有脆弱性进行了评价,又结合“三氮”迁移转化过程模型对关中盆地地下水的特殊脆弱性进行了评价。贺新春等^[60]尝试将模糊数学和人工神经网络理论应用于地下水环境脆弱性评价,建立了基于层次分析(AHP)的模糊综合评价模型和人工神经网络模型,并对河南省宁陵县的浅层地下水脆弱性进行了分区。杨旭东等^[61]将模糊分析评价法与 DRASTIC 相结合,建立的地下水系统脆弱性模糊综合评价方法,并成功应用于沧州市区地下水系统脆弱性评价,评价结果与地下水污染现状较为吻合。将 GIS 指数方法、模拟方法和统计方法等多种方法相结合的集成方法研究已逐渐成为水资源脆弱性评价方法的发展趋势。此外,考虑到水资源具有随机性、模糊性和不确定性,研究复杂系统的诸多数学理论,如灰色系统理论、层次分析法(AHP)、改进的 BP 神经网络、分形理论、投影寻踪、集对分析和可拓理论等,也越来越地被引入水资源脆弱性评价中。这些数学理论在评价水资源脆弱性时有自己独特的优点,如灰色系统理论可以解决信息不完全的问题;层次分析法(AHP)可以运用模糊集识别优化理论对水资源脆弱性进行识别;改进的 BP 神经网络能较好地解决非线性模式鉴别的问题;投影寻踪是处理高维数据,尤其是非正态数据的新统计方法;可拓理论的应用,能够解决分级标准中人为因素的干扰问题等。如王明泉等^[62]采用 AHP 法分析了黑河流域水资源的敏感性、适应性能力及脆弱性。张笑天和陈崇德^[63]应用 AHP 法对漳河灌区 2005 年水资源脆弱性状况进行综合评价分析,结果表明,水资源脆弱性综合状况评价较

好,符合灌区的实际现状。陈康宁等^[21]应用分形理论构建了河北省水资源系统脆弱性评价模型。董四方等^[23]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,结合河北省南水北调受水区水资源系统的现状,从驱动力、压力、状态、影响、响应等5个方面分析了该系统的脆弱性,评定结果可以直观地反映出各区域水资源脆弱性。潘争伟^[64]根据安徽省水环境现状,应用集对分析方法对安徽省水环境系统脆弱性进行综合评价,得出区域水环境系统脆弱性状况。胡胜祥等^[65]利用联系数建立了水资源脆弱性评价的集对分析模型,并应用于漳河水库灌区水资源脆弱性评价,结果表明该模型原理简单,评价结果准确。Mirauda 和 Ostoich^[66]根据欧盟水框架指令提出的完整性策略模型对意大利北部的 Bacchiglione 流域进行了地表水脆弱性评价,评价结果为水资源管理和保护、水质提高提供决策支持。在水资源管理的实践中,结合研究区水资源系统的现状和水资源管理的目标,选择适合的水资源脆弱性评价理论和方法,可为保障区域水资源安全提供重要的技术支持。

4 研究展望

近年来,国内外在水资源脆弱性研究方面开展了大量的工作,取得了许多研究成果。然而,水资源系统是复杂的非线性系统,具有明显的随机性和模糊性,随着自然和人为因素对水资源系统扰动的不断加剧,水资源脆弱性的特质和表象将变得更加复杂,因此对水资源脆弱性的评价研究有待于进一步研究和完善,主要有:

(1) 由于对水资源脆弱性研究的目标和角度不同,至今尚无明确的、统一的定义。在水资源脆弱性研究中纳入气候变化及人类活动的影响,丰富和拓展水资源脆弱性的概念和内涵是水资源脆弱性评价研究的基础性工作。

(2) 现有的水资源脆弱性的评价研究多针对地下水,而地表水则相对较少,且主要集中于水质方面,对水量的研究较少。由于研究区域及获取资料的不同,在评价水资源脆弱性的过程中所选取指标的性质及数量存在较大的差异,因而仍然没有建立完整和具有共性的评价指标体系。在以后的水资源脆弱性研究中,需进一步加强地表水和地下水、水质水量的联合评价研究,建立完整和具有共性的评价指标体系。

(3) 现有的评价方法多采用单一的数学方法和模型对水资源进行脆弱性评价,并且对水资源系统的非线性和不确定性考虑较少。根据水资源脆弱性评价指标和数据的可获得性,综合运用灰色系统理论、模糊理论、分形理论和可拓理论等多种复杂系统分析理论,以及 GIS 指数方法、过程模拟方法和统计方法等多种方法,可以较好地处理水资源脆弱性评价的非线性和不确定性,确保评价结果更加全面、客观。

参考文献:

- [1] Albinet M, Margat J. Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraine [C] // . Orléans, France, Bull BRGM 2 ème série, 1970:13 - 22.
- [2] V(illumsen A, Jacobsen O S, Sonderskov C. Mapping the vulnerability of groundwater reservoirs with regard to surface pollution [M]. Geologic Survey of Denmark, Yearbook, 1982:17 - 38.
- [3] Palmquist R. C. Groundwater vulnerability: a DRASTIC approach [C] // . Washington Department of Ecology, Olympia, WA 98504. Unpublished paper presented at the 84th Annual Meeting, Air and Waste Management Association, Vancouver, BC, Canada, 1991:16 - 21.
- [4] Vrba J, Zaporozec A. Guidebook on mapping groundwater vulnerability [M]. International Association Hydrogeologists (International Contributions to Hydrogeology 16), Verlag Heinz Heinz Heise, Hannover, 1994:1 - 120.
- [5] Foster S S D. Vulnerability of soil and groundwater to pollutions [J]. Hydrological Proceedings and Information, 1987,20(17):116 - 121.
- [6] 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 + 145.
- [7] Kulshreshtha S N. A global outlook for water resources to the year 2025 [J]. Water Resources Management, 1998, 12(3):167 - 184.
- [8] Perveen S, James L A. Scale invariance of water stress and scarcity indicators: Facilitating cross - scale comparisons of water resources vulnerability [J]. Applied Geography, 2011,31(1):321 - 328.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Liu C Z. The vulnerability of water resources in Northwest

- China[J]. 冰川冻土, 2003, 25(3): 309–314.
- [13] 李剑颖. 官厅水库流域水资源脆弱性评价研究[D]. 北京师范大学, 2007.
- [14] 冯少辉, 李靖, 朱振峰, 等. 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.
- [15] Masetti M, Sterlacchini S, Ballabio C, et al. Influence of threshold value in the use of statistical methods for groundwater vulnerability assessment[J]. Science of The Total Environment, 2009, 407(12): 3836–3846.
- [16] Kattaa B, Al-Fares W, Al Charideh A R. Groundwater vulnerability assessment for the Banyas Catchment of the Syrian coastal area using GIS and the RISKE method[J]. Journal of Environmental Management, 2010, 91(5): 1103–1110.
- [17] 孙才志, 林山杉. 地下水脆弱性概念的发展过程与评价现状及研究前景[J]. 吉林地质, 2000, 19(1): 30–36.
- [18] 陈守煜, 伏广涛, 周惠成, 等. 含水层脆弱性模糊分析评价模型与方法[J]. 水利学报, 2002, 33(7): 23–30.
- [19] 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[J]. 水资源与水工程学报, 2005, 16(2): 7–10.
- [20] 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.
- [21] 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+34.
- [22] 姜桂华, 王文科, 乔小英, 等. 关中盆地地下水特殊脆弱性及其评价[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2009, 39(6): 1106–1110.
- [23] 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+25.
- [24] Aller L, Bennet T, Lehr J H, et al. DRASTIC: a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrologic settings[J]. Journal of the Geological Society of India, 1987, 29(1): 38–57.
- [25] 曲文斌, 王欣宝, 钱龙, 等. 石家庄城市区地下水脆弱性评价研究[J]. 水文地质工程地质, 2007, 34(6): 6–9.
- [26] 孙才志, 左海军, 栾天新. 下辽河平原地下水脆弱性研究[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2007, 37(5): 943–948.
- [27] 于翠松. 山西省水资源系统恢复力定量评价研究[J]. 水文, 2008, 28(2): 13–17, 66.
- [28] 王红旗, 陈美阳, 李仙波. 顺义区地下水水源地脆弱性评价[J]. 环境工程学报, 2009, 3(4): 755–758.
- [29] Yu C, Yao Y Y, Hayes G, et al. Quantitative assessment of groundwater vulnerability using index system and transport simulation, Huangshuihe catchment, China[J]. Science of The Total Environment, 2010, 408(24): 6108–6116.
- [30] Ibe K M, Nwankwor G I, Onyekuru S O. Assessment of ground water vulnerability and its application to the development of protection strategy for the water supply aquifer in Owerri, Southeastern Nigeria[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2001, 67(3): 323–360.
- [31] Martínez-Bastida J, Arauzo M, Valladolid M. Intrinsic and specific vulnerability of groundwater in central Spain: the risk of nitrate pollution[J]. Hydrogeology Journal, 2010, 18(3): 681–698.
- [32] Guo Q H, Wang Y X, Gao X B, et al. A new model (DRARCH) for assessing groundwater vulnerability to arsenic contamination at basin scale: a case study in Taiyuan basin, northern China[J]. Environmental Geology, 2007, 52(5): 923–932.
- [33] Bojórquez-Tapia L, Cruz-Bello G, Luna-González L, et al. V-DRASTIC: Using visualization to engage policy-makers in groundwater vulnerability assessment[J]. Journal of Hydrology, 2009, 373: 242–255.
- [34] Zhou J L, Li G M, Liu F, et al. DRAV model and its application in assessing groundwater vulnerability in arid area: a case study of pore phreatic water in Tarim Basin, Xinjiang, Northwest China[J]. Environmental Earth Sciences, 2010, 60(5): 1055–1063.
- [35] 范弢, 杨世瑜. 云南丽江盆地地下水脆弱性评价[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2007, 37(3): 551–563.
- [36] Almasri M N. Assessment of intrinsic vulnerability to contamination for Gaza coastal aquifer, Palestine[J]. Journal of Environmental Management, 2008, 88(4): 577–593.
- [37] Wen X H, Wu J, and Si J H. A GIS-based DRASTIC model for assessing shallow groundwater vulnerability in the Zhangye Basin, northwestern China[J]. Environmental Geology, 2009, 57(6): 1435–1442.
- [38] 朱利霞, 刘运涛, 张东. 淮河中上游农业区浅层地下水固有脆弱性评价[J]. 安全与环境学报, 2010, 10(4): 64–68.
- [39] Goldscheider N. Karst groundwater vulnerability mapping: application of a new method in the Swabian Alb, Germany[J]. Hydrogeology Journal, 2005, 13(4): 555–564.
- [40] Mimi Z A, Assi A. Intrinsic vulnerability, hazard and risk mapping for karst aquifers: A case study[J]. Journal of Hydrology, 2009, 364: 298–310.
- [41] Vías J, Andreo B, Perles M, et al. Proposed method for groundwater vulnerability mapping in carbonate (karstic) aquifers: the COP method[J]. Hydrogeology Journal,

- 2006, 14(6):912-925.
- [42] Daly D, Dassargues A, Drew D, et al. Main concepts of the "European approach" to karst groundwater vulnerability assessment and mapping[J]. *Hydrogeology Journal*, 2002, 10(2):340-345.
- [43] 朝伦巴根,刘廷玺,史小红,等. 通辽地区水资源综合评价[J]. *内蒙古农业大学学报*, 2002, 23(2):104-109.
- [44] Nobre R C M, Rotunno Filho O C, Mansur W J, et al. Groundwater vulnerability and risk mapping using GIS, modeling and a fuzzy logic tool[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2007, 94(3-4):277-292.
- [45] Martínez-Santos P, Llamas M R, Martínez-Alfaro P E. Vulnerability assessment of groundwater resources: A modelling-based approach to the Mancha Occidental aquifer, Spain[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2008, 23(9):1145-1162.
- [46] Butscher C, Huguenberger P. Enhanced vulnerability assessment in karst areas by combining mapping with modelling approaches[J]. *Science of The Total Environment*, 2009, 407(3):1153-1163.
- [47] 姚文峰,唐莉华,张思聪. 过程模拟法及其在唐山平原区地下水脆弱性评价中的应用[J]. *水力发电学报*, 2009, 28(1):119-123.
- [48] Nolan B T, Hitt K J, Ruddy B C. Probability of nitrate contamination of recently recharged groundwaters in the conterminous united states[J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, 36(10):2138-2145.
- [49] 陈玲飞,王红亚. 中国小流域径流对气候变化的敏感性分析[J]. *资源科学*, 2004, 26(6):62-68.
- [50] Worrall F, Besien T. The vulnerability of groundwater to pesticide contamination estimated directly from observations of presence or absence in wells[J]. *Journal of Hydrology*, 2005, 303(1-4):92-107.
- [51] Antonakos A K, Lambrakis N J. Development and testing of three hybrid methods for the assessment of aquifer vulnerability to nitrates, based on the drastic model, an example from NE Korinthia, Greece[J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 333:288-304.
- [52] Gardner K K, Vogel R M. Predicting ground water nitrate concentration from land use[J]. *Ground Water*, 2005, 43(3):343-352.
- [53] 郭永海,沈照理,钟佐桑,等. 河北平原地下水有机氯污染及其与防污性能的关系[J]. *水文地质工程地质*, 1996, 23(21):40-42.
- [54] 林学钰,陈梦熊. 松嫩盆地地下水资源与可持续发展研究[M]. 北京:地震出版社,2000.
- [55] 沈珍瑶,杨志峰. 黄河流域水资源可再生性评价指标体系与评价方法[J]. *自然资源学报*, 2002, 17(2):188-197.
- [56] 陈鸿起,汪妮,申毅荣,等. 基于欧式贴近度的模糊物元模型在水安全评价中的应用[J]. *西安理工大学学报*, 2007, 23(1):37-42.
- [57] 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.
- [58] 祝慧娜,袁兴中,梁婕,等. 河流水环境污染风险模糊综合评价模型[J]. *中国环境科学* 2011, 31(3):516-521.
- [59] 姜桂华. 关中盆地地下水脆弱性研究[D]. 西安:长安大学,2002.
- [60] 贺新春,邵东国,陈南祥,等. 几种评价地下水环境脆弱性方法之比较[J]. *长江科学院院报*, 2005, 22(3):17-20.
- [61] 杨旭东,李伟,马学军. 模糊评价法在沧州市区地下水脆弱性评价中的应用[J]. *安全与环境工程*, 2006, 13(2):9-12.
- [62] 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.
- [63] 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.
- [64] 潘争伟. 区域水环境系统脆弱性评价的集对分析方法研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2010.
- [65] 胡胜祥,潘争伟,赵明. 水资源脆弱性评价的集对分析方法研究[J]. *治淮*, 2011(7):21-22.
- [66] Mirauda D, Ostoich M. Surface water vulnerability assessment applying the integrity model as a decision support system for quality improvement[J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2011, 31(3):161-171.