

地下水资源脆弱性研究进展

李剑颖¹, 王 烜¹, 戴文育²

(1. 北京师范大学环境学院水环境模拟国家重点实验室, 北京 100875 ;

2. 中国地质大学(北京)水资源与环境学院, 北京 100083)

摘要 阐述地下水资源脆弱性内涵的界定, 指出应从水资源的功能特征角度对其进行研究。在此基础上, 对地下水资源脆弱性的评价进行分析评述, 包括指标体系的建立、评价方法和评价结果表达。指出目前水资源脆弱性研究中亟待解决的几个问题: ①应加强体系研究; ②应加强学科交叉融合; ③应加强理论联系实际研究。

关键词 地下水资源; 水资源脆弱性; 评价指标体系; 评价方法

中图分类号 :TV211.1+2 **文献标识码** :A **文章编号** :1006-764X(2006)S1-0152-04

水资源安全是国家安全的重要内容, 对现代社会的可持续发展具有重要意义。在过去的 50 多年里, 经济的飞速发展及人类其他活动的影响使得水资源(质与量)供需矛盾日趋严重, 对社会发展和人类生存产生了严重的危害, 水资源安全问题逐渐引起了世界各国的高度重视。2003 年 3 月, 21 世纪水委员会在荷兰海牙召开了第二届世界水论坛及部长级会议, 各国部长们在《海牙宣言》中把“水安全”作为重要战略目标, 提出了 21 世纪水安全面临的七大挑战, 并制定了确保水资源安全的相关计划^[1]。

水资源脆弱性是度量水资源安全的标准之一, 是保障水资源安全和持续利用的重要前提。开展水资源脆弱性研究对预测未来水资源安全的变化趋势, 探求水资源安全的关键性要素和过程具有重要意义。1968 年, 法国人 Margat 首次提出了地下水脆弱性这一术语^[2], 揭开了国外水文地质学家对水资源脆弱性研究的帷幕。20 世纪 80 年代以来, 水资源脆弱性成为国际水文地质学家和水资源管理人员研究的热点问题, 世界许多国家和地区都开展过水资源脆弱性评价。进入 21 世纪, 全球变化问题日益突出, 环境变化下的水资源脆弱性受到了国际学者的关注。2001 年 7 月和 2002 年 9 月, 在荷兰阿姆斯特丹和中国北京分别召开了“环境变化的水资源脆弱性系统分析”学术研讨会和“变化环境下水资源脆弱性——关于黄河流域水与气候的对话”国际会议。会议分别针对水循环水资源问题和一般意义上的水

资源、地下水以及气候变化情况下的水资源脆弱性等问题展开了讨论。本文将针对地下水资源的脆弱性研究进展进行阐述。

1 水资源脆弱性内涵的界定

关于地下水资源脆弱性内涵的界定已有近 40 年的研究历史。其中, 1987 年召开的“土壤与地下水脆弱性国际会议”是其发展的转折点。1987 年以前, 主要是从水文地质本身的内部要素(如地下水埋深、地下水的平均流速、表层沉积物的渗透性等)这一角度来界定地下水脆弱性^[2]。例如, Albinet 和 Margat^[3]定义地下水脆弱性是在自然条件下, 污染物从地表渗透与扩散到地下水面的可能性。1987 年以后, 研究者在注重内部因素的同时, 更加注重其外部因素(人类活动、污染源、气候变化等)的影响, 其中较为公认的是美国国家科学研究委员会 1993 年提出的定义: 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, 并把地下水脆弱性分为本质脆弱性(不考虑人类活动和污染源而只考虑水文地质内部因素的脆弱性)和特殊脆弱性(地下水对某一特定污染、污染群体或人类活动的脆弱性)^[4]。

我国对地下水资源脆弱性研究起步较晚, 在定义上多是引用外文资料。但是一些研究者对水资源脆弱性的分类和研究范围有了新的认识。例如, 刘燕华等^[5]将水资源脆弱性按表现方式分为 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。刘绿柳^[6]重新界定了水资源脆弱性的研究范围为地下水系统、地表水系统、与水资源有关的社会系统,涉及水量、水质两个方面。

尽管已有的研究对水资源脆弱性的定义各不相同,但都是从水资源的质量、数量以及结构等方面进行讨论。水资源系统与社会、经济等其他系统的主要区别在于它是一种资源系统,有支撑人类社会经济发展并维持良好生态环境的功能,并且这种功能是其其他系统无法替代的。鉴于此,笔者认为水资源的脆弱性可定义为:在一定社会经济和技术水平下,受到自然因素和人为活动的影响,水资源的结构发生变化,导致其长期维持人类社会发展和良好的生态环境的功能易于退化的性质,涉及水量、水质、水能3个方面。

综合以上讨论,水资源的脆弱性应从以下几个方面理解。

a. 脆弱性是水资源的固有特征^[7]。一是因为水资源系统自身存在一些极不稳定的要素,如水量、水质,当这些要素变化的潜势超过一定阈值时,水资源系统就会变得不稳定且易受到外界压力的影响;二是水资源系统是开放系统,不可避免地要受到自然变化及人类活动的胁迫。这些胁迫是造成水资源脆弱性的主驱动力。一般情况下,当外界胁迫较小,未超过其对社会经济和生态环境的承载力时,水资源系统可通过自身的调节作用保持稳定性,此时水资源的脆弱性非常微弱而不易被察觉。当胁迫增大到一定程度,水资源的自身调节作用已不能使其继续保持稳定时,脆弱性就变得比较明显,易于察觉。

b. 水资源脆弱性是动态的,具有时间和空间差异性。在人类社会-生态环境-水资源系统综合作用的过程中,不同地区胁迫水资源的压力不同,并且在不断地发生着变化,社会经济技术水平提高、开发利用方式改变、周围生态环境演进以及水资源管理措施改善等等都可导致水资源脆弱性随着时间与空间的变化而变化。

c. 水资源的脆弱性是相对的。在不同的社会发展目标下,水资源所要满足的社会发展的功能是不同的,这就会产生不同的脆弱性标准。因此,对于某一研究区域,不能绝对地说它是脆弱的还是不脆弱的,同时,在脆弱性标准不确定的情况下也不能盲目地将两个区域进行比较。

d. 需要从社会经济-水循环-生态环境系统耦合机理上综合考虑地表水系统、地下水系统以及与水资源有关的社会系统的相互关系,以水资源的功能

为依据,从水量、水质、水能3个方面对水资源脆弱性进行研究。

水资源系统极其庞大复杂,影响其脆弱性的因素也非常多,再加上个人的认识论和方法论运用的不同,导致对地下水资源脆弱性内涵的理解千差万别,形成统一的看法比较困难。随着研究的深入,其内涵必将得到不断的丰富和发展。

2 水资源脆弱性评价

2.1 评价指标体系

评价指标体系的建立是地下水资源脆弱性评价的关键步骤,研究者多是从自然因素和人为因素两方面进行划分。其中,自然因素(如土壤类型、包气带岩性、地形坡度、地质构造等)是导致本质脆弱性的主要原因,人为因素是导致特殊脆弱性的驱动力。20世纪80年代以来,许多研究者对人为因素的影响进行了研究。例如,Kulshrshtha^[8]认为人口增长、粮食的自足性、工业发展和气候变化是影响全球水资源脆弱性的4个重要因素。Burkart等^[9]在评价美国中西部地区地下水资源脆弱性时将相关的管理活动和污染物的位置作为影响因素考虑。刘绿柳^[6]认为水资源超采系数、污水处理率、废水回用率、水利工程调节能力是影响水资源脆弱性的主要因素。另外,水资源供需时间上的不匹配可大大降低水资源供给的可靠性,是影响水资源脆弱性的重要方面。水资源承载力体现了目前及未来一段时间内,在一定的经济技术水平与发展目标下人类对水资源的功能要求,与水资源的脆弱性有直接关系,应该作为水资源脆弱性评价的指标之一。综合国内外研究现状分析,水资源脆弱性评价指标如表1。

表1 水资源脆弱性影响因素与指标

因 素		指 标
自然因素	土 壤	结构、成分、厚度、含水量、透水性、吸附力、黏土矿物含量、有机质含量
	包气带	岩性、厚度、渗透系数、水运移时间
	含水层	岩性、厚度、渗透系数、水力坡度、补给量
	地形地质	地形坡度、地质构造
	水文气候	年降雨量、净补给量、时空分布、过境水量、年降水变率、水位、蒸发量
人为因素	土地利用	荒地、农业用地、工业用地、住宅用地、商业用地、森林、草地
	人 口	密度、增长量
	污染负荷	污染物性质、类型、总量、污染源类型、污染源排放条件
	水资源管理	水资源供需平衡、水资源供需时间差异、污水处理率、废水回用率、水资源开采程度、水利工程调节能力、水力发电量
	社会发展	城市化、水资源承载力、粮食自足性、产业结构调整

在筛选评价指标时,为克服以往人为选择的主观性,一些研究者利用主成分分析和因子分析等多元统计分析方法提高各指标之间的独立性^[2]。还有一些研究者利用地图移植法(the map removal sensitivity analyses)等方法对参数的敏感性进行分析^[10-11]。

目前,地下水资源脆弱性评价主要是从自然因素考虑,研究其本质脆弱性。外界因素考虑较多的是土地利用变化及污染负荷。其他外部因素如人口、水资源管理、社会发展引起的特殊脆弱性研究较少,尤其是缺少对水资源供需时间上不匹配及水资源时空分布不均一引起的水资源脆弱性研究^[4]。随着人类活动的加剧,下垫面状况不断地发生变化,导致地下水与人类活动等外部因素的关系愈来愈密切、复杂,因而地下水资源特殊脆弱性评价必将愈来愈引起人们的重视。

2.2 评价方法

地下水资源脆弱性评价大致可分为定性评价和定量评价。定量评价客观性较强,用数字差异解释被评价对象的差异,简单明了,再加上 GIS 等具有海量数据处理功能的计算机软件的飞速发展,定量或半定量评价成为采用较多的一种方法。常用的有叠置指数法、过程数学模拟法、统计法和模糊数学评判法。

2.2.1 迭置指数法

迭置指数法是指对不同的物理性质采用加权评分,然后对地下水脆弱性进行主观分级。该法又分为水文地质背景值法和参数系统法。其中,应用较广泛的是参数系统法,其典型代表是 DRASTIC 法。该方法主要考虑了地下水埋深(D)、含水层的净补给(R)、含水层的岩性(A)、土壤类型(S)、地形(T)、包气带的影响(I)及含水层水力传导系数(C)等 7 个评价指标。计算公式如下:

$$DI = D_W D_R + R_W R_R + A_W A_R + S_W S_R + T_W T_R + I_W I_R + C_W C_R \quad (1)$$

下标 R 表示指标值, W 表示权重。

一些国家和地区在应用过程中结合当地的具体情况对该法作了相应的修正。例如, Evans 等^[12]以土地利用/土地覆盖和化粪池系统密度取代含水层的净补给、包气带的影响及含水层的岩性,研究了美国特拉华州南部的地下水易污性。Secunda 等^[13]综合土地利用情况和 DRASTIC 模型,对以色列一沿海含水层对污染物的脆弱性进行了评价。计算方法如下:

$$CDI = DI + L_W L_R \quad (2)$$

式中: CDI 为综合 DRASTIC 指数; DI 为 DRASTIC 指数; L_R 为土地利用类型指标值; L_W 为权重。 CDI 指数反映了土地的长期使用对地下水对污染物脆弱性

的影响(结果是增加脆弱性),反映了人类活动和自然因素的共同作用,有利于定位那些受水文地质和人类活动影响而导致对地下水污染物的高风险地区。

其他参数系统法还有 GOD, AVI, SINTACS, EPIK, PI, IAWQ 法等^[14-15], 它们的优点在于成本低、直接、采用的数据易于获得,获得的成果易于为决策者利用,但是由于评价指标的分级标准和评分以及脆弱性分级没有统一的标准,具有很大的主观随意性,所以脆弱性评价结果难以在不同的地区进行比较,缺乏可比性。

2.2.2 过程数学模拟法

过程数学模拟法是在水分和污染质运移模型基础上建立一个脆弱性评价数学公式,将各评价因子量化后放在公式中求解得出一个可评价脆弱性的综合指数^[16]。这种方法与其他方法的最大不同点在于可以估计污染质的时空分布情况^[17]。缺点在于需要的参数较多,资料 and 数据的获得比较困难,因此目前还没有更多地用在区域地下水脆弱性的评价中。已有的研究有 Rao^[3]等从土壤及包气带的衰减能力方面提出了衰减因素指数模型 AF。Chatupote 等^[18]采用 AF 模型模拟了不同的灌溉补给速率下几种杀虫剂在研究流域内的淋滤潜力,又用 LEACHN 模型和 LEACHP 模型分别模拟了硝酸盐和 metolachlor 的淋滤潜力,并结合 GIS 技术绘制了该区域的脆弱性图。

2.2.3 统计方法

统计方法是通过对已有的脆弱性影响因素和污染状况等信息和资料进行统计分析,确定脆弱性评价因子并建立统计模型,把已赋值的各评价因子放入模型中计算,并根据其结果进行脆弱性分析^[3]。已有的研究主要有 Tesoriero 等^[19]和 Sophocleous^[17]等分别用逻辑回归方法研究了硝酸盐污染地下水及海水入侵的脆弱性。Barber 等和 Alberti 等利用基于贝叶斯条件概率定理的实证权重法分别对澳大利亚 Peel 流域和意大利北部一个地区的地下水脆弱性进行了评价^[3]。

2.2.4 模糊数学评判法

模糊数学评判法是在确定评价因子、因子的分级标准以及因子赋权的基础上,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性程度^[20]。该方法可考虑各指标的连续变化,能真实地反映不同样本指标之间的差异。另外,水资源系统极其庞大复杂,其影响因素具有一定的模糊性和不确定性。因此,模糊数学评判法在近几年的研究中受到了我国研究者的青睐。例如,郭永海等^[21]、林学钰等^[22]用此方法评价了河北平原和松内平原地下水的脆弱

性。陈守煜等^[23]研究了模糊优选迭代法在含水层脆弱性评价中的应用。姜桂华^[20]应用模糊自组织迭代法和模糊综合评判法评价了关中盆地地下水的固有脆弱性。

另外,基于人工神经网络大规模的并行处理和分布式的信息存储能力,能解决具有一定内在规律(且这个规律不是很明确,有一定的模糊性)的问题,一些研究者尝试用该法进行水资源的脆弱性评价。例如,贺新春等^[24]利用建立的基于 AHP 的人工神经网络模型评价了河南省宁陵县的浅层地下水的脆弱性,并与 DRASTIC 法和模糊综合评价法进行了比较。

上述方法各有特点,单独使用难免会有不足。在区域研究中,如何将两种或两种以上方法结合起来,克服单独使用的缺点,是当前水资源脆弱性研究的主要方向之一。在国外广泛开展的地下水污染脆弱性评价中,研究者多是以 DRASTIC 法为基础,结合地下水模型、污染质运移模型、统计模型等数学手段来进行研究。我国则主要是应用 DRASTIC 方法进行评价或对 DRASTIC 方法进行若干改进。由于水资源脆弱性评价模型大多比较复杂,牵涉因素也较多,如何实现它们之间的无缝耦合是值得关注的问题之一。另外,如何避免模型选择和建立时的主观随意性,也是今后研究的重点。

2.3 评价结果表达

水资源脆弱性图是水资源脆弱性评价结果的表达形式,它能够将高度复杂的信息以简单的形式直观地表现出来,是非常有价值的环境管理工具。早在 20 世纪 60 年代,Margat 和 Albinet 就先后通过图件来描述地下水对污染的脆弱程度,60 年代末到 70 年代,美国和欧洲一些国家编制了一些小比例尺的地下水脆弱性图^[16];从 80 年代后期开始,在国际水文协会和联合国教科文组织的推动下,欧美国家陆续开展了地下水脆弱性调查评价与填图,并出版了许多大、中比例尺地下水脆弱性图。例如,1987~1989 年美、意、荷、德、英等国家相继出版了 1/10 000、1/1 000 000 等不同比例尺地下水脆弱性图,为识别地下水污染难易程度和制定地下水保护政策提供依据。20 世纪 90 年代中期,国际水文地质学家协会出版的《水文地质图编图指南与标准图则》及 Vrba 和 Zaporazec 编著的《地下水脆弱性编图指南》,在很大程度上推动了水资源脆弱性编图工作的全面发展,在国际上具有极高权威。我国在此方面的研究起步较晚,有关反映水资源脆弱性的图件较少。主要有郭永海等^[21]编制的河北平原浅层地下水防污性能分区图,郑西来等^[25]编制的西安市潜水脆弱性图,杨庆等^[26]编制的大连市潜水含水层的

易污性图,以及林学钰等^[22]编制的松嫩盆地地下水环境脆弱程度图。2001 年 8 月,地质出版社出版了由陈梦熊主编的《地下水资源图编图方法指南》,该指南概略阐明了地下水脆弱程度图的基本内容与编图方法,代表了国内先进水平^[27]。

目前,水资源脆弱性制图多是选定某些评价指标,按照划分的脆弱性等级对某一地区进行水资源脆弱性的静态分区。这可以说是给定时段的情景图片的分类。但是脆弱性图中的某些与人类活动有关的特征(例如土地利用情况)随时间呈突发性变化,有时呈偶然性变化,这就要求脆弱性图进行持续的更新。因此,建立可信的实时动态的水资源脆弱性图件具有良好的应用前景。

3 结 语

地下水资源的脆弱性研究虽然已受到了国内外研究者的关注,并在内涵的界定、评价指标体系的建立、评价方法的研究及脆弱性制图等方面有了诸多研究成果,但仍有许多问题亟待解决:①研究内容不全面。目前地下水脆弱性研究主要是地下水水质的易污染性评价,并没有切实与水量、水能结合起来;②研究范围具有局限性。已有的研究多是针对较小的流域展开的水资源脆弱性现状评价,如何从大系统的角度研究全球变化下水资源脆弱性的响应及发展趋势值得进一步探讨;③缺少脆弱性判定标准。

参考文献:

- [1] 邱德华.区域水安全战略的研究进展[J].水科学进展,2005,16(2):305-312.
- [2] 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):444-449.
- [3] 雷静.地下水环境脆弱性的研究[D].北京:清华大学,2002.
- [4] 沈珍瑶,杨志峰,曹瑜.环境脆弱性研究评述[J].地质科技情报,2003,22(3):91-94.
- [5] 刘燕华,李秀彬.脆弱生态环境可持续发展[M].北京:商务印书馆,2001:1-471.
- [6] 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.
- [7] 刘昌明.二十一世纪中国水问题若干问题的讨论[J].水利水电技术,2002,33(1):15-19.
- [8] KULSHRISHA S N. A global outlook for water resources to the year 2025[J]. Water Resources Management,1998,12:167-184.
- [9] BURKART M R,FEHER J. Regional estimation of groundwater vulnerability to nonpoint sources of agricultural chemicals[J]. Water Science Technology,1996,33(4/5):241-247.

(下转第 178 页)

- [9] 丁威 崔国惠. 大气条件下混凝土中钢筋锈蚀程度发展对保护层开裂和钢筋力学性能影响的试验研究: 重点工程混凝土耐久性研究与工程应用[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2000: 36-48.
- [10] 费尔拜奇. 钢筋混凝土结构中钢筋腐蚀与保护[M]. 黄可信, 吴兴祖, 蒋仁敏, 等译. 北京: 建筑工业出版社, 1983: 19-120.
- [11] 夏宁, 于孝民, 任青文. 混凝土结构耐久性研究现状[J]. 水利水电科技进展, 2005, 25(8): 63-66.
- [12] NISHI T. Testing of concrete[J]. Journal of the Structural Division, 1992(6): 485-489.
- [13] 朱安民. 混凝土碳化与钢筋混凝土耐久性[J]. 混凝土, 1992(6): 23-25.
- [14] 许丽萍, 黄士元. 预测混凝土中碳化深度的数学模型[J]. 上海建材学院学报, 1991(4): 10-15.
- [15] 龚洛书, 苏曼青. 混凝土多系数碳化方程及其应用[J]. 混凝土及加筋混凝土, 1985(6): 12-18.
- [16] 邱小坛, 周燕. 旧建筑物的检测加固与维护[M]. 北京: 地震出版社, 1994: 18-35.
- [17] NAGATAKIS. Effect of curing conditions on the carbonation of concrete with fly ash and the corrosion of reinforcement in long-term test[J]. ACI Material Journal, 1986, 18(1): 521-540.
- [18] SMOLCZYK H G. Predicting the service life of concrete[C]// Proceedings of 5th International Symposium on Chemistry of Cement. Tokyo, 1968: 343-368.
- [19] 牛荻涛, 石玉钗, 雷怡生. 混凝土碳化的概率模型及碳化可靠性分析[J]. 西北建筑科技大学学报, 1995(2): 252-256.
- [20] 袁群, 赵国藩. 混凝土碳化深度随机时间序列预报模型[J]. 大连理工大学学报, 2000, 40(3): 344-347.
- [21] 金伟良, 张亮, 鄢飞. 函数型神经网络法在混凝土碳化分析中的应用[J]. 浙江大学学报, 1998, 32(5): 519-525.
- [22] 张喜德, 韦树英, 彭修宁. 混凝土碳化深度的灰色预测[J]. 广西大学学报: 自然科学版, 2002(2): 44-47.
- [23] 陈志红, 尹红宇, 陈川亮. 混凝土碳化深度灰色关联分析[J]. 广西大学学报: 自然科学版, 2005(2): 38-42.
- [24] 张仲先, 张灵, 张耀庭. 基于 BP 网络的混凝土碳化深度预测与分析[J]. 华中理工大学学报, 2000(10): 97-99.
- [25] 张誉, 蒋利学. 基于碳化机理的混凝土碳化深度的实用数学模型[J]. 工业建筑, 1998, 28: 16-19.
- [26] 章国成, 杨利伟, 王天稳. 混凝土碳化深度预测模型的对比分析[J]. 建筑技术开发, 2005(3): 81-83.

(收稿日期 2006-04-11 编辑 熊水斌)

(上接第 155 页)

- [10] GOGU R C, DASSARGUES A. Sensitivity analysis for the EPIK method of vulnerability assessment in a small karstic aquifer, southern Belgium[J]. Hydrogeology Journal, 2000, 8: 337-345.
- [11] BABIKER I S, MOHAMED M A A, HIYAMA T, et al. A GIS-based DRASTIC model for assessing aquifer vulnerability in Kakamigahara Heights, Gifu Prefecture, central Japan[J]. Science of the Total Environment, 2005, 345: 127-140.
- [12] EVANS B M, MAYERS W L. A GIS-based approach to evaluating regional groundwater pollution potential with DRASTIC[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1990, 45: 242-245.
- [13] SECUNDA S, COLLIN M L, MELLOUL A J. Groundwater vulnerability assessment using a composite model combining DRASTIC with extensive agricultural land use in Israel's Sharon region[J]. Journal of Environmental Management, 1998, 54: 39-57.
- [14] VIAS J M, ANDREO B, PERLES M J, et al. A comparative study of four schemes for groundwater vulnerability mapping in a diffuse flow carbonate aquifer under Mediterranean climatic conditions[J]. Environmental Geology, 2005, 47: 586-595.
- [15] MELLOUL A J, COLLIN M. A proposed index for aquifer water quality assessment: the case of Israel's Sharon region[J]. Journal of Environmental Management, 1998, 54: 131-142.
- [16] 姜桂华. 地下水脆弱性研究进展[J]. 世界地质, 2002, 21(1): 33-38.
- [17] SOPHOCLEOUS. 地下水的污染脆弱性评价[J]. 何雪洲摘译.
- [18] CHATUPOTE W, PANAPITUKKUL N. Regional assessment of nutrient and pesticide leaching in the vegetable area of Rattaphum catchment, Thailand[J]. Water, Air, and Soil Pollution: Focus, 2005, 5: 165-173.
- [19] TESORIERO A J, VOSS F D. Predicting the probability of elevated nitrate concentrations in the Puget Sound Basin: Implication for aquifer susceptibility and vulnerability[J]. Ground Water, 1997, 36(5): 1029-1039.
- [20] 姜桂华. 关中盆地地下水脆弱性研究[D]. 陕西: 长安大学, 2002.
- [21] 郭永海, 沈照理, 钟佐荣, 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(1): 40-42.
- [22] 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: 1-157.
- [23] 陈守煜, 王国利. 含水层脆弱性的模糊优选迭代评价模型及应用[J]. 大连理工大学学报, 1999, 39(6): 811-815.
- [24] 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.
- [25] 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): 22-25.
- [26] 杨庆, 栾茂田. 地下水易污性评价方法——DRASTIC 指标体系[J]. 水文地质工程地质, 1999, 26(2): 4-9.
- [27] 陈梦熊. 地下水资源图编图方法指南[M]. 北京: 地质出版社, 2001: 1-86.

(收稿日期 2006-04-04 编辑 高建群)