

地下水脆弱性评价方法与研究进展

张 昕^{1 2} 蒋晓东² 张 龙³

(1. 中国地质大学 水资源与环境工程北京市重点实验室 北京 100083 ; 2. 天津地质调查研究院 天津 300191 ;
3. 辽宁地质工程职业学院 辽宁 丹东 118008)

摘 要 地下水脆弱性评价是合理开发利用和保护地下水的基础,是环境规划部门的决策依据之一。从地下水脆弱性的概念出发,介绍了国内外地下水脆弱性评价方法、研究进展,并针对国内外地下水脆弱性研究现状,提出了看法。

关键词 地下水脆弱性;评价方法;研究进展

地下水是国民经济、人民生活 and 生态环境不可缺少的宝贵资源,一旦遭到破坏,特别是水质的恶化,对其治理和恢复的难度与代价都是极其巨大的,甚至在短时间内几乎是不可能的。因此,如何保护地下水资源免受污染或尽可能少受污染十分重要^[1]。目前中国地质调查局组织实施的“全国主要城市环境地质问题调查评价和全国地下水污染调查评价”项目,将地下水防污性能评价列为工作内容之一,这其中就涵盖了对地下水脆弱性评价方面的内容。

笔者从地下水脆弱性概念、评价方法以及研究进展进行梳理,并提出自己的看法。

1 地下水脆弱性的概念

1968 年,法国人 Margat^[2]首次提出含水层脆弱性(groundwater vulnerability)概念以来,随着研究的不断深入,其内涵不断丰富。美国国家研究理事会定义地下水脆弱性是“污染物自顶部含水层以上某一位置到达地下水系统中某一特定位置的趋势和可能性”^[3]。比较公认的是美国环保署和国际水文地质学家协会的定义:“地下水脆弱性是地下水系统对人类和(或)自然的敏感性”。截至目前,地下水脆弱性概念仍在逐渐发展和完善之中。地下水脆弱性分为固有脆弱性(intrinsic vulnerability)和特殊脆弱性(specific vulnerability),固有脆弱性是静态、不可变和人为不可控制的,特殊脆弱性是动态、可变和人为可控制的。

2 地下水脆弱性评价方法

地下水脆弱性评价方法多样,早期国外以迭置指

数法应用最多。随着对脆弱性评价研究的深入,陆续出现了模糊数学综合评价法和过程数值模拟法。将计算机技术引入脆弱性评价,形成了基于地理信息系统(GIS)技术的评价方法。还有学者采用多方法综合评价的方式进行地下水脆弱性评价。

迭置指数法的特点是通过定义定义的诸多因子进行分级评分赋值来区分地下水脆弱性的高低。其评价模型很多,如:DRASTIC^[4]、Legrand、GOD、SIGA^[5]、PI、VULK、欧洲(COP)法、局部欧洲(LEA)法^[6]等不一而足。过程模拟法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。模糊数学综合评价法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地下水的脆弱程度。

目前国外地下水脆弱性评价主要应用上述 3 种方法,尤以第一种方法为主。本文选择应用比较多的评价模型方法加以介绍。

(1) DRASTIC 方法:1985 年由美国环保局(USEPA)提出,其命名由所选 7 个因子的英文首字母组成,分别为:含水层埋深(D)、含水层净补给量(R)、含水层介质类型(A)、土壤介质类型(S)、地形坡度(T)、包气带影响(I)和含水层渗透系数(C)。上述 7 个因子构成了 DRASTIC 方法的评价因子体系。根据每个因子的变化范围或其内在属性建立评分体系 r , 又根据评分体系中每个因子对地下水脆弱性影响的重要程度给予固定权值 w , 各因子加权和 V_i 即是 DRASTIC 指数^[7]:

$$V_i=D_iD_w+R_iR_w+A_iA_w+S_iS_w+T_iT_w+I_iI_w+C_iC_w$$

用 V_i 这一指数反映地下水脆弱性. 脆弱性指数越大, 越容易遭受污染. 针对固有脆弱性和农药污染, 分别制定不同的权重系数(见表 1).

表 1 DRASIC 指标体系中各评价参数
Table 1 Evaluation parameters in DRASIC method

评价因子	权重/ w	
	a	b
含水层埋深(D)	5	5
含水层的净补给量(R)	4	4
含水层介质类型(A)	3	3
土壤类型(S)	2	5
地形坡度(T)	1	3
包气带影响(I)	5	4
含水层渗透系数(C)	3	2

a 栏用于评价固有脆弱性, b 栏针对农药污染.

(2) PI 方法 :是一种资源保护评价方法, 选取的评价因子有保护层(P)和渗透条件(I). P 因子描述的是地表水到地下水水面以上的保护层的防污能力, 保护层包括土壤、下层土、非岩溶地层和不饱和的岩溶地层. 保护层的防污性能与降水入渗补给量、表土层的有效田间持水量、土层的性质与厚度、岩层的性质与厚度、含水层是否承压等因素有关. 其防污能力用 P_{TS} 表示, 具体用下式计算:

$$P_{TS}=\left[T+\left(\sum_{i=1}^mS_iM_i+\sum_{j=1}^nB_jM_j\right)\right]\cdot R+A$$

式中: T —表层土的有效田间持水能力;

S_i —第 i 层下层土类型评分值;

M_i —第 i 层下层土厚度;

B_j —第 j 层岩层岩性评分值 L 和其裂隙评分值 F 的乘积, 即 $B_j=L\cdot F$;

M_j —第 j 层岩层厚度;

R —降水入渗补给的评分值;

A —含水层是否承压的参数, 如果是承压含水层, A 取值为 1500, 如果是非承压含水层 A 取值为 0.

根据计算结果将保护层因子分别赋值 1~5, 取值越低, 防污能力越低.

渗透条件(I)是衡量保护层汇流程度的参数, 反映渗透条件的好坏. 主要考虑渗透类型、地表植被、地形坡度、落水洞、地下暗河等岩溶的发育等因素. 评分范围为 0~1, 评分越低, 表示渗透条件越好, 污染物越易进入地下水中.

最终评价结果根据公式 $PI=P_{TS}\cdot I$ 确定, PI 取值范围为 0~5. 防污性能指数 D_i 值越低, 防污性能越差, 含水层越容易遭到污染.

由于篇幅所限, 将部分方法及适用范围一并汇总列于表 2.

V. Francani 与 M. Civita 于 1988 年应用水文地质背景值法研究了描述地下水脆弱性的技术方法^[8]. 2000 年, R. C. Gogu^[9] 用迭置指数法进行脆弱性评价, 并重点介绍了其中的 GOD、DRASTIC、SEEPAGE、SINTACS 方法和评价岩溶区的 EPIK 方法. 2001 年 D. Daly^[10] 等人针对岩溶含水层, 系统地阐述了欧洲方法的概念和脆弱性图. Pedro Martínez-Santos^[11] 于 2008 年在西班牙开展工作时, 选用数学建模的方法取得了较好效果. B. Dixon^[12] 运用基于 GIS 的建模技术进行了脆弱性评价.

近年来国外多有基于 GIS 技术的脆弱性评价研究成果出现. Insaf S. Babiker^[13] 等人在日本岐阜县进行脆弱性评价时就采用此类方法, 对图件的移动敏感性和单因子敏感性进行分析, 最终得出了适合该地区的评价权值分配. X. Wen^[14] 等人在张掖盆地也进行了类似研究. Dhundi Raj Pathak^[15] 在加德满都也进行了敏感度分析.

还有学者采用多方法评价, 如德国 Christoph Neukum^[16] 在德国南部做脆弱性评价的过程中, 采用 GLA、EPIK、DRASTIC、PI 方法分别进行了脆弱性评价和编图, 并对 4 种方法采用标准化分级的方式对脆弱性评价结果进行标准化, 取得了良好的效果. Ibe K M^[5] 用 DRASTIC、Legrand、GOD 等 3 种模型, 对尼日利亚地下水防污性能进行了评价比较.

3 地下水脆弱性研究进展

国外地下水脆弱性评价始于 20 世纪 60 年代中期. 20 世纪 90 年代以前地下水脆弱性评价主要侧重于地下水固有脆弱性方面. 之后由于人类活动造成的污染影响日趋严重, 引发了一系列的环境地质问题, 90 年代以后, 在对地下水固有脆弱性评价同时, 地下水特殊脆弱性评价也逐渐在世界范围内兴起.

美国使用 DRASTIC 方法, 在得克萨斯州、怀俄明州、罗得岛、马萨诸塞州、威斯康星州、内布拉斯加州、特拉华州、南达科他州等地区进行了大区域含水层脆弱性评价, 对俄克拉荷马州的 12 个主要含水层, 也采用了类似的方法进行了含水层脆弱性填图^[17-18].

针对广泛存在、难以治理与恢复的区域污染, 1995

表 2 部分评价方法及适用条件汇总表
Table 2 Some evaluation methods and their applicable conditions

名称	评价因子	方法描述	应用范围
GOD	地下水类型 G 、盖层岩性 O 、水位埋深 D	防污性能指数 $D_i = G \cdot O \cdot D$, 评价承压水时忽略 O 因子, 即 $D_i = G \cdot D$ 因子取值范围从 0 至 1	多孔介质潜水、承压水
Legrand	水位埋深 D 、包气带介质 S 、渗透系数 C 、水力坡度 G 、固体废物排放场地的水平距离 H	防污性能指数 $D_i = D + S + C + G + H$, D_i 值越高地下水防污性能越好, 反之越差	可能受固体废物排放场地影响的地段
EPIK	岩溶作用带 E 、保护层 P 、入渗条件 I 、岩溶发育特征 K	评价公式: $D_i = (\alpha E) + (\beta P) + (\gamma I) + (\delta K)$ α 、 β 、 γ 、 δ 为因子权值 D_i 值越高, 防污性能越好, 含水层越不容易遭到污染	岩溶水
欧洲法(OCP)	覆盖层 O 、径流特征 C 、降雨 P 、岩溶发育特征 K	评价结果通过各评价因子的耦合得出, 耦合方法根据评价目标区的水文地质特征确定, 可以是求和形式, 也可是乘积形式, 资源防污性能评价时选择 O 、 C 、 P 因子, 水源防污性能评价时选择 O 、 C 、 P 、 K 因子	岩溶水
局部欧洲法(LEA 法)	覆盖层因子 O 、径流因子 C	沿袭了 PI 法的诸多概念, 但较之更简单, 不用数字指标, 最后的脆弱性结果是定性的、相对的分级, 该方法偏向于应用于资源的脆弱性评价	适用于数据量少的地区
VULK	输入数据包括穿过每一子系统的流程长度、流速、分散度、稀释度	用穿透曲线来模拟地表已知点(源)潜在污染物到达目标(源或者资源)的相关信息。资源的脆弱性评价只考虑污染物穿过非饱和带(覆盖层)垂直运移的情况, 源的脆弱性评价还要考虑潜在污染物在饱和带(岩溶含水层)的侧向运移。VULK 只考虑水平流动和扩散, 而延迟和衰减并未考虑其中	岩溶区。输出数据为污染物质的运移时间、浓度和持久性, 也可以用来校正其他固有脆弱性评价方法得出的结果

年美国与匈牙利合作, 在美国中西部和匈牙利喀尔巴拉阡盆地农业主产区, 应用基于 GIS 改进的 DRASTIC 法以及农业除草剂一维渗滤过程模型方法(PRZM-2), 对农业土地政策的可行性以及使用农业化学品(除草剂和化肥等)的替代方案的潜力进行了评估^[19]; 1998 年美国怀俄明州政府配合联邦政府开展了地下水对农业杀虫剂的污染风险评价项目^[20]; 1999 年 R. Michael 等开展了美国中西部地区的地下水对农业面源污染的区域脆弱性研究^[21]; 1998 年英国的 S. Secundas^[22]等开展了对地下水污染风险评价与编图的理论研究和实践探讨; 2001 年以色列 Martin Collin^[23]等人对地下水污染风险评价进行理论研究和实践探讨, 并将评价成果直接应用于水源保护和土地利用规划之中; 2001 年意大利在威尼斯潟湖流域开展了针对农业面源污染的水资源脆弱性评价时, 在 GIS 环境下, 将不同农业化学药品的影响列入选择关键参数, 对地表水和地下水脆弱性进行了评价^[24]。

我国地下水脆弱性方面的研究始于 20 世纪 90 年代, 虽然起步较晚却发展很快。近几年在新一轮国土资源调查项目推动下, 不仅初步查明了分布于长江三角

洲、珠江三角洲、淮河平原、华北平原、东北三江流域等地 12 个省 125 个城市地下水污染、地下水资源衰减、特殊土分布、土壤污染等环境地质问题^[25], 与之同步的主要城市地下水脆弱性评价也随即展开并取得了一批成果。2005 年以后每年都有比较多的地下水脆弱性评价成果发表。纵观国内地下水脆弱性评价研究经历以及取得的成就, 认为具备以下特点。

(1) 研究对象涉猎了不同自然地理状况、地质、水文地质条件区域

截至 2007 年, 不仅完成了我国东北部三江流域、华北平原和淮河平原区地下水脆弱性和珠江三角洲、长江三角洲平原区浅层地下水的防污性能评价^[26-32], 而且在西北干旱区、关中盆地洪冲积平原和黄土台垣区、西南岩溶区以及衡阳盆地红壤丘陵区^[33-37]都开展了此项工作。其间还完成部分城市地下水脆弱性评价, 例如: 石家庄、西安、湛江、沧州、松原、吉林市和江西省主要城市(鹰潭、抚州、萍乡、景德镇、赣州、南昌、吉安、上饶、新余、宜春、九江)^[38-44]。不仅如此, 还评价了山东泰安、青岛和江苏徐州^[45-47]供水水源地地下水脆弱性。

(2) 地下水特殊脆弱性与固有脆弱性研究同期进行

国内地下水脆弱性评价不存在先研究固有脆弱性、后研究特殊脆弱性的状况,二者近乎同期开展,并且特殊脆弱性研究受到了更多的关注。

1997 年郑西来^[48]在分析西安地区包气带、含水层等水文地质资料基础上,在地下水脆弱性评价时考虑了污染源的影响,开创了国内地下水特殊脆弱性评价的先河。2000 年付素蓉^[49]在 DRASTIC 模型基础上舍弃了地形、土壤类型和含水层的水力传导系数,增加了污染物及含水层厚度等影响因子。杨晓婷^[50]、姜桂华^[35]等研究关中盆地地下水脆弱性时,考虑了反映人类活动影响的土地利用因子。之后林学钰^[51]编制松嫩盆地地下水环境脆弱程度图时,将地下水脆弱程度进行分区,同时把城市地下水污染源的类型和污染程度加以定量表示。

1996 年刘淑芬^[52]评价了河北平原地下水防污性能。在之后的几年里,杨庆^[53]等研究了大连市潜水含水层的地下水防污性能。浙江大学董亮^[54]应用 DRASTIC 评价了西湖流域地下水污染风险。2003~2004 年雷静^[55]、郑西来^[56]分别对唐山平原区、青岛大沽河地下水库地下水进行了脆弱性评价。以上当属固有脆弱性评价范畴。

(3) 评价方法仍处在探索中

国内多以迭置指数法进行地下水脆弱性评价。其中不乏 DRASTIC 方法应用,如前述完成的江西省主要城市^[44]、吉林^[43]、石家庄^[38]、沧州^[57]等城市和云南丽江盆地^[58]、江汉平原^[31]地下水脆弱性工作即是如此。更多的是在继承 DRASTIC 方法研究思路基础上对其加以改进,这方面的探索很多,焦点主要集中在建立评价体系、确定因子评分和因子权重方面。目前多是借鉴 DRASTIC 方法研究思路,在对自然地理、地质、水文地质背景等研究对象充分了解,根据资料、数据占有程度建立评价指标体系。例如,2005 年评价滦河冲洪积扇地下水脆弱性时,宋峰^[59]考虑了咸淡水界面的空间分布,选择距咸淡水分界线距离作为评价参数。在山东泰安供水水源地、鲁西堆积平原地下水脆弱性研究中,王丽红^[45]、朱恒华^[30]在 DRASTIC 方法基础上舍弃地形因子、选用含水层厚度代替土壤类型建立 DRASTIC 模型;根据杭嘉湖地区自然地理特征及具体水文地质条件,胡万凤^[60]则选择地下水埋深、净补给量、地形坡度、包气带介质、包气带介质厚度 5 项指标作为评价因子。2008 年黄冠星^[32]针对珠江三角洲河网密集、地下水位埋藏浅、地下水与地表水丰、枯期互为补排等特点,选择距河距离(L)、地形坡度(G)以及盖层脆弱性

(C) 因子,建立用于珠江三角洲地区的 DRTALGC 模型。刘仁涛^[26]根据三江平原地势平坦和资料的可获取性,在 DRASTIC 指标体系基础上舍弃了地形坡度、渗流区介质类型,增加土地利用率(L)和人口密度(P)。不惟如此,姚文锋^[29]、章程^[36]、马金珠^[33]、孙艳伟^[34]、邹胜章、邹君、孙丰英、李万刚、严明疆、李辉^[61-66]等在各自研究中,均以此研究思路提出了有针对性的相应指标体系。

同样是借助数学手段解决评分体系、因子权重问题,刘仁涛^[26]、姜蕊云^[67]采用了熵权法,孙才志^[27]、孙艳伟^[34]、陈南祥、杨维、杨旭东、肖长来、陈浩^[68-72]等是基于层次分析(AHP)的模糊综合评价。在唐山平原区地下水脆弱性评价中,姚文峰^[73]选择 Monte-Carlo 随机模拟结合过程模拟模型 LEACHM 评价包气带的脆弱性,运用三维数值模型 MODFLOW 结合 BP 神经网络的方式评价饱和带地下水脆弱性;贺新春^[74]采用 DRASTIC 模型、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,对河南省宁陵县地下水脆弱性进行对比评价。还出现了依据掌握资料对评价结果进行验证的做法,如章程^[36]选用示踪实验和微生物测试分析数据验证了脆弱性评价结果,李辉^[66]、姚文峰^[29,73]应用实测的地下水硝酸盐浓度分布状况对评价结果验证,认为取得了比较符合实际的评价成果。

4 几点认识

(1) 迭置指数法具有低成本、数据易获取、结果表达直观的优点,可以很好地刻划评价目标脆弱性分区趋势。实际工作中应注重与模糊数学综合评价结合,以避免该方法过于依赖主观认识的问题。

(2) 比较而言,过程数值模拟法的精度较高,但是需要大量数据支撑,因而限制了其发展。在未来的研究中,应寻求建立一套对数据依赖性较低的模型,以提高该类方法的推广程度。

(3) 地下水系统是一个非常复杂的综合体,带有明显的随机性与模糊性。同一地区采用多种方法给予评价,通过对比来印证评价结果的准确性。这一做法虽然繁琐,却有利于获得更加符合实际的评价结果,值得尝试。

参考文献:

- [1] 杨旭东,孙建平,魏玉梅. 地下水系统脆弱性评价探讨[J]. 安全与环境工程, 2006, 13(1): 1—4.
- [2] Jaroslav V, Zaporozec A. Guidebook on mapping groundwater vulnerabilit

- [M]. Hanorer: Heise, 1994: 131.
- [3] National Research Council. Ground water vulnerability assessment, contamination potential under conditions of uncertainty [M]. Washington DC: National Academy Press, 1993: 210.
- [4] 钟佐燊. 地下水防污性能评价方法探讨[J]. 地学前缘, 2005, 12 (特刊) 3—11.
- [5] 李志萍, 许可. 地下水脆弱性评价方法研究进展[J]. 人民黄河, 2008, 30(6): 52—54.
- [6] 王松, 章程, 裴建国. 岩溶地下水脆弱性评价研究[J]. 地下水, 2008, 30(6): 14—18.
- [7] Rupert M G. Calibration of the DRASTIC ground water vulnerability mapping method[J]. Ground Water, 2001, 39(4): 625—630.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Daly 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.
- [11] Martinez-Santos P, Llamas M R, Martinez-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.
- [12] Dixon B. Applicability of neuro-fuzzy techniques in predicting groundwater vulnerability: A GIS-based sensitivity analysis[J]. Journal of Hydrology, 2005: 17—38.
- [13] Insaf S Babiker, Mohamed A, Tetsuya Hiyama, 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: 127—140.
- [14] Wen Xiaohu, Wu Jun, Si Jianhua. A GIS-based DRASTIC model for assessing shallow groundwater vulnerability in the Zhangye Basin, northwestern China[J]. Environ Geol, 2009: 1435—1442.
- [15] Pathak D R, Hiratsuka A, Awata I, et al. Groundwater vulnerability assessment in shallow aquifer of Kathmandu Valley using GIS-based DRASTIC model[J]. Environ Geol, 2009: 1569—1578.
- [16] Neukum C, Hotzl H. Standardization of vulnerability maps [J]. Environ Geol, 2007(51): 689—694.
- [17] Collin M L, Melloul A J. Combined land use and environmental factors for sustainable groundwater management [J]. Urban Water, 2001 (3): 229—237.
- [18] Kimura Y. Evaluating migration potential of contaminants through unsaturated subsurface in Texas [M/O]. The University of Texas at Austin, 1997. <http://www.ce.ustexas.edu/stu/kimuray/gis/progress.html>, 2006-05-02.
- [19] Navulur K C S, Engel B A, Mamillapalli S. Groundwater vulnerability evaluation to nitrate pollution on a regional scale using GIS [A]. Applications of GIS to the modeling of non-point source pollutants in the vadose zone, ASA-CSSA-SSSA Conference, 1995.
- [20] SDVC. Wyoming Groundwater Vulnerability Assessment Handbook [M]. Laramie: Wyoming Geographic Information Science Center, 1998.
- [21] Burkart M R, Kolpin D W, James D E. Assessing groundwater vulnerability to agricultural contamination in the midwest US [J]. Wat Sci Tech, 1999.
- [22] Secunda S, Collin M L. 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.
- [23] Collin M L, Melloul A J. Combined land-use and environmental factors for sustainable groundwater management [J]. Urban Water, 2001, 3: 229—237.
- [24] Sappa G, Vitale S. Groundwater protection: Contribution from Italian experience [R]. Polish: Ministry of the Environment, 2001.
- [25] 中国地质调查局. 中国地质调查局年鉴(2007)[M]. 北京: 地质出版社, 2008.
- [26] 刘仁涛, 付强, 张艳梅, 等. 三江平原地下水脆弱性评价的熵权系数法模型[J]. 水土保持研究, 2007, 14(6): 20—22.
- [27] 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.
- [28] 方樟, 肖长来, 梁秀娟, 等. 松嫩平原地下水脆弱性模糊综合评价[J]. 吉林大学学报 地球科学版, 2007, 37(3): 546—550.
- [29] 姚文锋, 张思聪, 唐莉华, 等. 海河流域平原区地下水脆弱性评价[J]. 水力发电学报, 2009, 28(1): 113—118.
- [30] 朱恒华, 徐华, 徐建国. 山东省南四湖流域平原区地下水防污性能评价[J]. 勘查科学技术, 2007(6): 40—43.
- [31] 赵德君, 刘正平, 熊启华. 江汉平原浅层地下水污染脆弱性评价[J]. 资源环境与工程, 2007, 21(增刊): 63—67.
- [32] 黄冠星, 孙继朝, 荆继红, 等. 珠江三角洲地区浅层地下水天然防污性能评价方法探讨[J]. 工程勘察, 2008(11): 44—49.
- [33] 马金珠, 高前兆. 干旱区地下水脆弱性特征及评价方法探讨[J]. 干旱区地理, 2003, 26(1): 44—49.
- [34] 孙艳伟, 魏晓妹, 毕文涛. 干旱区地下水脆弱性机理及评价指标体系的探讨[J]. 灌溉排水学报, 2007, 26(2): 41—44.
- [35] 姜桂华, 王文科, 杨泽元. 关中盆地潜水含水层脆弱性评价[J]. 西北农林科技大学学报, 2004, 32(10): 111—115.
- [36] 章程, 蒋勇军, Michele Lettingue, 等. 岩溶地下水脆弱性评价“二元法”及其在重庆金佛山的应用[J]. 中国岩溶, 2007, 26(4): 334—340.
- [37] 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, 29(1): 92—97.
- [38] 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(6): 8—9.
- [39] 吴晓娟, 孙根年. 西安市地下水污染广义/狭义脆弱性对比研究[J]. 地球学报, 2007, 28(5): 475—481.
- [40] 李辉, 陈鸿汉, 何江涛. 湛江市浅层地下水防污性能评价[J]. 华北水利水电学院学报, 2006, 27(4): 98—100.
- [41] 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.
- [42] 李立军. 松原市地下水防污性能评价[J]. 吉林地质, 2008, 27(2): 110—113.
- [43] 辛欣, 邵文彬, 杜超. 吉林市城区地下水脆弱性评价与编图[J]. 中国环境管理, 2006, 2(2): 12—14.

- [44]刘细元,游玮,黄迅.江西省主要城市地下水系统防污性能分析评价[J].资源调查与环境,2008,29(1):42—47.
- [45]王丽红,王开章,李晓,等.地下水源地脆弱性评价研究[J].中国农村水利水电,2008(11):22—25.
- [46]韩志勇,王瑛,李涛.大沽河地下水库的脆弱性评价[J].兰州理工大学学报,2005,31(6):78—81.
- [47]张雪刚,毛媛媛,李致家,等.张集地区地下水易污性及污染风险评价[J].水文地质工程地质,2009(1):51—55.
- [48]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.
- [49]付素蓉,王焰新,蔡鹤生,等.城市地下水污染敏感性分析[J].地球科学——中国地质大学学报,2000,25(5):477—481.
- [50]杨晓婷,王文科.关中盆地地下水脆弱性评价指标体系的探讨[J].西安工程学院学报,2001,23(2):46—49.
- [51]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.
- [52]刘淑芬.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.
- [53]杨庆,周集体.DRASTIC 指标体系法在大连市地下水易污性评价中的应用[J].大连理工大学学报,1999,39(5):684—688.
- [54]董亮,小仓纪雄.应用 DRASTIC 模型评价西湖流域地下水污染风险[J].应用生态学报,2002,13(2):217—220.
- [55]雷静,张思聪.唐山市平原区地下水脆弱性评价研究[J].环境科学学报,2003,23(1):94—99.
- [56]郑西来,李涛,贾丽华.基于 MapInfo 的大沽河地下水库脆弱性评价[J].中国海洋大学学报,2004,34(6):1023—1028.
- [57]王秀明.DRASTIC 方法在地下水脆弱性编图中的应用[J].安全与环境工程,2008,15(2):40—42.
- [58]范玟,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—556.
- [59]宋峰,折书群,刘新社.滦河冲洪积扇地下水脆弱性评价体系研究[J].环境科学与技术,2005,28(增刊):116—118.
- [60]胡万凤,唐仲华,姜月华.杭嘉湖地区浅层地下水防污性能评价方法及应用研究[J].湖南环境生物职业技术学院学报,2008,14(2):1—5.
- [61]邹胜章,张文慧,梁彬,等.西南岩溶区表层岩溶带水脆弱性评价指标体系的探讨[J].地质前缘,2005,12(特刊):152—158.
- [62]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,2007,29(1):92—97.
- [63]孙丰英,徐卫东.DRASTIC 指标体系法在溥潼平原地下水脆弱性评价中的应用[J].地下水,2006,28(2):39—42.
- [64]李万刚,康宏.乌鲁木齐河流域浅层地下水防污性能评价[J].干旱环境监测,2008,22(4):199—202.
- [65]严明疆,张光辉,徐卫东.石家庄市地下水脆弱性评价[J].西北地质,2005,38(3):105—110.
- [66]李辉,陈鸿汉,何江涛.湛江市浅层地下水防污性能评价[J].华北水利水电学院学报,2006,27(4):98—100.
- [67]姜蕊云,赵庆超,苗永宏.基于熵权的 DRASTIC 模型在地下水脆弱性评价中的应用[J].黑龙江水专学报,2008,35(3):63—65.
- [68]陈南祥,董贵明,贺新春.基于 AHP 的地下水环境脆弱性模糊综合评价[J].华北水利水电学院学报,2005,26(3):63—66.
- [69]杨维,王虎,李宝兰,等.应用 DRASTIC、AHP 对地下水脆弱性的评价比较[J].沈阳建筑大学学报:自然科学版,2007,23(3):489—492.
- [70]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.
- [71]肖长来,方樟,梁秀娟,等.基于 DRASTIC 的松嫩平原地下水脆弱性模糊综合评价[J].干旱区资源与环境,2007,21(5):94—98.
- [72]陈浩,王贵玲,侯新伟,等.城市周边地下水系统脆弱性评价——以栾城县为例[J].水文地质工程地质,2006(5):103—105.
- [73]姚文锋,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.
- [74]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.

METHODS AND RESEARCH PROGRESS OF GROUNDWATER VULNERABILITY ASSESSMENT

ZHANG Xin^{1,2}, Jiang Xiao-dong²

(1. Beijing Key Laboratory of Water Resources and Environment Engineering, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. Tianjin Institute of Geological Survey, Tianjin 300191, China)

Abstract: As the foundation of rational exploitation, utilization and protection of groundwater, the assessment of vulnerability for groundwater is the basis for the decision-making of environmental planning authorities. With the concept of groundwater vulnerability, this paper introduces to the assessment methods and research progress of groundwater vulnerability both in China and worldwide. The domestic study status for the groundwater vulnerability is reviewed.

Key words: groundwater vulnerability; assessment method; research progress

作者简介:张昕(1982—),男,中国地质大学(北京)水资源与环境学院硕士研究生,从事地下水环境科学方向的研究,通信地址天津市南开区迎水道20号天津市地质调查研究院,邮政编码300191,E-mail//baalzxlm@163.com