

城市地下水污染敏感性分析

付素蓉 王焰新 蔡鹤生 李义连

(中国地质大学工程学院, 武汉 430074)

摘要: 地下水污染敏感性分析与制图是目前国际上水文地质工作的热点. 总结了过去所用的评价方法, 在 GIS 平台上根据我国城市的实际情况, 对原有的 *DRASTIC* 模型加以开发改进, 提出了 *DRAMIC* 模型并加以解释, 以作为我国统一的城市地下水污染敏感性分析的通用指标. 最后介绍了如何用 GIS 来作地下水污染敏感性分区图.

关键词: 地下水; 敏感性; *DRASTIC* 模型; *DRAMIC* 模型.

中图分类号: P641.12; X53 **文献标识码:** A

文章编号: 1000-2383(2000)05-0482-05

作者简介: 付素蓉, 女, 1974 年生, 现为在读硕士研究生, 主要从事地下水污染研究.

污染问题是目前社会最为关心的问题之一, 随着工业化和都市化进程的加快以及“三废”排放问题的加剧, 导致地下水污染日趋严重. 已有监测资料表明, 我国大多数城市的地下水已受到不同程度的污染, 而污染的形成与分布规律还不十分清楚. 地下水污染敏感性分析及其制图是目前国际水文地质研究的热点和前沿课题, 也是防治地下水污染问题工作的前导, 其成果可为自然环境、社会经济等方面提供管理决策的重要依据^[1]. 我国在此领域的研究刚刚起步. 本文对国际及国内地下水污染敏感性分析的方法作了简要回顾, 提出一个新的 *DRAMIC* 模型, 以适合我国实际情况的城市地下水污染评价体系, 以便于制定我国统一的城市地下水环境保护措施与法规, 为制订和实施我国社会可持续发展战略作出贡献.

1 地下水污染敏感性的含义

地下水污染敏感性可以理解为地下水对有碍于其使用价值的人为活动的敏感性, 即抵御人为污染的能力. 它由众多因素决定, 包括地质、水文地质、污染物排放条件及物理化学性质等. 地质、水文地质因素主要指包气带特征(岩性、厚度)和含水层特征(含

水层类型、含水层介质、厚度). 显然, 包气带厚度越大, 物质颗粒越细, 含水层封闭条件越好, 厚度越大, 地下水污染的敏感性就越低, 而污染物种类、排放强度及排放方式, 对含水层的敏感性有很大的影响. 污染物的物理化学性质影响了它在迁移过程中发生的对流、弥散、吸附反应、降解反应等, 因此, 地下水对不稳定的、易降解的污染物敏感性低, 对于稳定的不易降解的污染物敏感性高. 因此, 导致地下水污染的因素很多, 不仅包括包气带、含水层的特征, 也包括地形、气候、污染物特征等^[2].

近年来国内主要采用模糊数学来评价地下水污染敏感性. 国外所采用的地下水污染敏感性评价方法主要有以下几种方法: (1) *GOD* 指标; (2) *DI-VERSITY* 指标^[3]; (3) *DRASTIC* 指标^[2].

2 地下水污染敏感性分析方法

2.1 模糊数学方法

在国内主要采用模糊数学方法进行综合评判^[4,5], 一般可分为两步: (1) 对各指标进行单因素模糊评判, 包括建立因素集、评价集和权重集, 以及单因素模糊评判. (2) 模糊综合评判, 由单因素评判矩阵和权重矩阵通过复合运算来进行敏感性分析. 用模糊数学方法进行评判, 由于各地方所取的因子不同, 因此不同地方的地下水污染敏感性分区图缺乏可比性, 而且不便于制定全国统一的地下水保护

政策.

2.2 GOD 指标

它是由 Foster 于 1987 年提出(据文献[2]),它考虑了以下 3 个因素:G 指地下水状况,即非承压水、半承压水和承压水;O 指整个含水层的固结、岩性特征;D 指地下水埋深.GOD 指标为以上 3 个评分值的乘积,最大值为 1,代表含水层敏感性高,最小值为 0.016,代表含水层的污染敏感性最低(GOD 为 0 时表示无含水层).

2.3 DIVERSITY 方法

该方法认为对地下水污染敏感性的评价就是对某个含水层通过土壤和包气带垂直入渗(补给)的潜在自由程度和速度的评价,同时也是衡量在进入主要的或最上部的含水层后最大的潜在流速和分散潜力的尺度.也就是说,地下水污染敏感性评价就是评价地下水的最大可能补给潜力、流速和流动方向,这些特征取决于当地地质条件和水力梯度.这 3 种要素的水文地质评价可称为“按分散潜力和流速分级的敏感度法”.其英文缩写形式即为 DIVERSITY^[3].

显然,GOD 指标未考虑含水层厚度、地貌、气候以及不同污染物特征对含水层敏感性的影响.DIVERSITY 方法也忽略了含水层厚度及污染物的影响.显然,含水层厚度决定了地下水资源量的多少,从而反映了地下水稀释能力的强弱,在很大程度上决定了地下水污染敏感性大小,而气候决定了降雨量的大小,降雨量越大,地下水污染的潜势越大.而污染物的种类离含水层的距离以及污染物本身的物理化学性质则影响着地下水对某特定污染物的敏感性强弱.故以上两种方法考虑的因素都不够全面.

2.4 DRASTIC 指标

此指标对应的是 7 项水文地质参数评价指标的加权值,见表 1.对每一个 DRASTIC 参数给定了一个相对权重值,其范围为 1—5,以反映各个参数的相对重要程度.对地下水污染最具影响的参数的权重为 5,影响程度最小的参数权重为 1.权重为不可改变的定值.

DRASTIC 方法最初是由美国环境保护署(EPA)于 1987 年提出的(据文献[2]),并先后用于哥伦比亚、怀俄明等 10 个市区的地下水污染敏感性评价工作,并被加拿大、南非等国采用.在 1991 年由 Lobo-Ferreira 博士引入欧共体国家,作为欧共体各国地下水污染敏感性评价的统一标准.欧盟委员会(EEC)地下水工作组采用 DRASTIC 的目的是为

欧盟各国建立一个国际统一的地下水污染敏感性评价方法.但是,由于各国的水文地质、气候等条件的不同,DRASTIC 方法存在一定的局限性.首先,参数之间存在着依赖性,含水层水力传导系数的大小显然与含水层的岩性密切相关;地形虽然也影响污染物的入渗,但由于对各城市而言,地形差异很小,故在评价城市地下水污染敏感性时可以忽略地形因素的影响.另外,我国人口稠密,城市地区地表多被各种建筑物或硬地覆盖着,因此,如果把 DRASTIC 方法中的土壤类型作为一个评价因子,在我国各城市之间的地下水敏感性分析中缺乏可比性.此外,DRASTIC 模型忽略了污染物以及含水层厚度对含水层敏感性的影响.因此,笔者在 DRASTIC 模型的基础上加以改进开发,提出了 DRAMIC 模型.其指标的各个评价参数及其权重如表 1.

表 1 DRASTIC 指标和 DRAMIC 指标的评价参数和权重
Table 1 Factors and weights of DRASTIC and DRAMIC

DRASTIC			DRAMIC	
评价参数	权重		评价参数	权重
	正常	农药		
地下水埋深(D)	5	5	地下水埋深(D)	5
含水层的净补给(R)	4	4	含水层的净补给(R)	3
含水层的岩性(A)	3	3	含水层岩性(A)	4
土壤类型(S)	2	5	含水层厚度(M)	2
地形(T)	1	3		
包气带影响(I)	5	4	包气带影响(I)	5
含水层的水力传导系数(C)	3	2	污染物的影响(C)	1

DRAMIC 模型参数的权重是根据我国实际情况来分配的.DRAMIC 地下水污染敏感性指标由下式确定:

DRAMIC=5×D+3×R+4×A+2×M+
5×I+1×C.

3 DRAMIC 敏感性评价指标

3.1 地下水埋深(D)

地下水埋深决定着污染物到达含水层之前所经过的距离及与周围介质接触的时间.通常,地下水埋深越大,污染物到达含水层所需时间越长,则污染物稀释机会越多,这同样适用于承压含水层.根据地下水埋深对地下水污染的影响程度,定义了 DRAMIC 埋深范围及其评分值(见表 2).

含水层一般分为非承压(潜水)、承压、半承压含

表 2 DRAMIC 指标评分
Table 2 Rating of DRAMIC

地下水埋深		净补给		含水层介质			含水层厚度		包气带介质		污染物特征		
范围/m	评分	范围/mm	评分	类别	评分	典型 评分	厚度/m	评分	类别	评分	典型 评分	污染物特征	评分
0.0~2.5	10	0~60	1	块状页岩	1~3	2	0~6	9	承压层	1	1	污染物稳定,易渗入含水层	9
2.5~6.5	9	60~125	2	变质岩/火成岩	2~5	3	6~18	7	粉砂/粘土	2~6	3	污染物稳定,较易渗入含水层	7
6.5~12.0	7	125~195	3	风化变质岩/火成岩	3~5	4	18~30	5	页岩	2~5	3	污染物稳定,不易渗入含水层	5
12.0~19.0	5	195~270	4	冰碛层	4~6	5	30~42	4	灰岩	2~7	6	污染物较稳定,易渗入含水层	5
19.0~30.0	3	270~350	6	层状砂岩、灰岩及页岩序列	5~9	6	42~55	3	砂岩	4~8	6	污染物较稳定,较易渗入含水层	4
30.0~43.0	2	350~445	7	块状砂岩	4~9	6	55~70	2	层状灰岩,砂岩,页岩	4~8	6	污染物较稳定,不易渗入含水层	3
>43.0	1	445~550	8	块状灰岩	4~9	6	>70	1	含较多粉砂和粘土的砂砾	4~8	6	污染物不稳定,易渗入含水层	3
				砂砾层	4~9	8			变质岩/火成岩	2~8	4	污染物不稳定,较易渗入含水层	2
		>550	9	玄武岩	2~10	9			砂砾	6~9	8	污染物不稳定,不易渗入含水层	1
				岩溶灰岩	9~10	10			玄武岩	2~10	9		
									岩溶灰岩	8~10	10		

水层. 显然,非承压含水层由于接近地表,最易被污染. 承压含水层具有天然防止污染物从地表渗入的性质,其敏感性较低. 而对于半承压含水层,是指其承压层具有一定的渗透性,介于承压层和非承压层之间. DARMIC 方法用于评价承压和非承压含水层. 对于半承压含水层,则根据其渗透性大小,划分为承压(confined aquifer)或非承压含水层(unconfined aquifer). 当含水层具有轻微的渗透性时,视作承压层;当它具相对较大的渗透性时,视作非承压含水层. 当不能确定时,一般当作非承压层来评价. 对于承压含水层,地下水埋深指地表到含水层顶板即承压层底板的深度. 对非承压含水层,其埋深则指地表至等水位线的深度.

3.2 净补给(R)

净补给指单位面积内渗入地表并达到含水层的总水量,而且这里净补给量指年均补给量. 污染物通过补给水垂直传输到含水层并在含水层内水平运移,因此,补给水是污染物运移到含水层的主要载体. 补给量越大,地下水污染的潜势越大. 但当补给量足够大时,就会稀释污染物,因此,地下水污染的潜势不再增大反而减小. 净补给量主要来源于降雨量,可根据水均衡方程,用降雨量减去地表径流量和蒸发量来估计补给量. 另外,净补给量还与人工补

给、废水排放等有关,故考虑以上这些因素,通过建立水量平衡方程得到的净补给量的精度将提高. 由于补给量精度较低,故其范围较宽,给用户留有较大的余地. 值得注意的是,当承压含水层的水力梯度向上时,补给量应取一个较小值. 根据我国实际情况作出以下补给评分(表 2).

3.3 含水层岩性(A)

污染物的运移路线及运移路径的长度由含水层介质控制,从而又影响着污染物的稀释、吸附、分散、降解程度. 一般而言,含水层介质的颗粒尺寸越大或裂隙和溶洞越大,其渗透性越强,含水层的敏感性越高. 含水层介质的评分见表 2. 用户可根据含水层的详细情况进行评分. 对每一种介质,这里给出的是一个评分范围而非一个特定值,这是因为对于固结岩石含水层中裂隙和层面发育程度不同. 例如,若含水层介质为裂隙中等发育的变质岩或火成岩时,可评分为 3,但当裂隙非常发育时,含水层的敏感性较高,可评分为 5. 对于非固结含水层,可根据含水层介质颗粒大小和分选情况进行评分. 例如,典型砂砾层的评分值为 8,当沉积层颗粒粗大时,可评分为 9,相反,呈细颗粒含量增加且分选不好时,可评分为 7 或 6,当缺乏详细资料时,可取典型评分. 典型评分值是根据相关含水层介质组成的典型含水层确定的.

3.4 含水层厚度(M)

含水层污染敏感性显然受含水层的水量大小影响.含水层厚度决定了地下水资源量的多少,从而反映了地下水稀释能力的强弱.因此,在很大程度上决定了地下水敏感性大小(表 2).

3.5 包气带介质的影响(I)

包气带是指水位线以上的非饱和区或非连续饱和区.包气带介质的类型决定了渗流路径的长度和路线,污染物在迁移过程的稀释、吸附、降解以及物理化学反应等.包气带内的任何裂隙对渗流路线起控制作用.

当对承压含水层进行评分时,应选承压层为包气带,其赋值应永远为 1,因为承压层对污染敏感性的影响最大.而非承压含水层,则应选择对敏感性有显著影响的介质层.当有多层介质时,则应考虑各层介质的相对厚度以及各层介质对敏感性的影响大小.如当含水层上覆盖一层粘土和一层等厚度或厚度较大的砂砾层时,应选粘土作为包气带介质,因为它限制着污染物向含水层迁移,对敏感性的影响最大.

包气带介质的评分类似于含水层介质的评分,即为一个范围,在评分时对固结岩石介质同样考虑裂隙、层理、溶洞的发育程度,对非固结岩石介质则应考虑介质中颗粒大小、分选性和细颗粒的含量来评分.其原理类似于对含水层介质的评分(表 2).

3.6 污染物特征(C)

毫无疑问,同一含水层对不同污染物的敏感性不同.污染物种类,与含水层的距离,污染物的排放强度、方式对含水层的敏感性影响很大,而污染物的物理化学性质则决定了其在迁移过程中发生的对流、吸附、降解、弥散程度.地下水对不稳定的、易降解或易被吸附的污染物的敏感性低,对于稳定的、不易降解的污染物的敏感性高(表 2).

4 地下水污染敏感性分区及制图

地理信息系统(GIS)技术可以对地理空间数据和信息实现输入、存储、管理、检索、处理和综合分析等功能,已经广泛地用于各个领域^[6,7].由于 GIS 技术日趋成熟,具有了综合分析和进行空间建模的能力,而且可以随时修改与更新数据库,使评价过程变得简便、容易,已开始应用于地下水污染敏感性分区与制图^[8].所用软件主要为以处理栅格数据为代表

的 ARC/INFO.整个评价过程如下:(1)DRAMIC 各参数的数据收集.(2)地图数字化,建立原始数据层次,各参数形成一个数据文件,而且每个数据文件的格式要与 DRAMIC 相容.参数的范围应用符号代替,如 A,B,C 分别代表地下水埋深的 0.0~2.5 m,2.5~6.5 m,6.5~12.0 m.(3)输入每个参数的权重、相对应的评分值,每个参数各产生一张同比例的图.(4)如有必要,对各种参数对污染敏感性重新分级(评分),形成新的数据层次.(5)输入各参数的权重,把编辑后的各参数所形成的地图栅格化,并把底图栅格化.栅格化利用的是 ARC/INFO 软件的栅格化功能来完成的,使用的命令是 POLYGRID 和 LINEGRID,POLYGRID 用来把参数图的多边形栅格化,LINEGRID 用来栅格化基础底图.(6)建立评价模型,把各参数图叠加在一起,通过叠置分析(OVERLAY),得到敏感性分区图.叠置分析是把多个地图层面的数据根据所建立的评价模型进行一定的操作后,得出结果的分析方法^[9].通过把一定范围的评分划为一个等级,如把最后评分为 177—210 的地区划为一个等级.最后,可分为 5 个等级:(1)敏感性高;(2)敏感性较高;(3)敏感性中等;(4)敏感性较低;(5)敏感性低.

目前,GIS 正向着开放性和多媒体方向发展^[10].由于在地下水污染敏感性评价方面,存在着模拟的准确度问题,因此,目前交互式模拟系统的出现日益迫切,以解决以下几个问题:(1)错误结果的传播和空间聚集问题,以提高在 GIS 平台上模拟的准确度,并减少空间错误对模型输出的影响;(2)实现 GIS 与环境模型、空间统计包的无缝连接,以便于确定准确的模型输入参数;(3)决定各参数的重要程度以及它们之间的相互依赖性;(4)在 GIS 平台上扩充模型,使其与三维有限元溶质运移及时间模拟相结合;(5)与专家系统相结合;(6)便于修改模型;(7)使用户便于使用模拟结果等^[11].

参考文献:

[1] 陈葆仁.人类活动对地下水的影响[J].水文地质工程地质,1996,(2):1~4.
[2] Aller L T. DRASTIC: standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings [M]. [s. l.]: Office of Research Development, US EPA, 1985.
[3] Ray I A, Odell P W. DIVERSITY: a new method for evaluating sensitivity of groundwater to contamination

[J]. *Environmental Geology*, 1993, 22: 344~352.

[4] 郭永海,沈照理,刘淑芬,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, (1): 40~42.

[5] 刘淑芬,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, 19(1): 42~45.

[6] 何隆华,杨宏伟,周修萍. 地理信息系统与生态系统对酸沉降相对敏感性评价[J]. *环境科学学报*, 1998, 18(2): 177~180.

[7] Fayer M J. Estimating recharge rates for a groundwater model using a GIS [J]. *Environment and Quality*, 1996, (25): 510~518.

[8] Wagenet R J, Huston J L. Scale-dependency of solute transport modeling/GIS applications [J]. *Environment and Quality*, 1996, 25: 499~507.

[9] Rosebaum M S, Nowbuth M D. Aquifer vulnerability assessment through the use of GIS technology [A]. In: Marinos K, et al, eds. *Engineering Geology and the Environment* [C]. Rotterdam: Balkema, 1997. 1475 ~ 1477.

[10] Tim U S, Dharmesh J. Interactive modeling of groundwater vulnerability within a geographic information system environment [J]. *Groundwater*, 1995, (7): 618~627.

[11] James W M. GIS-based groundwater pollution hazard assessment: a critical review of the DRASTIC model [J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 1994, 60(9): 618~627.

VULNERABILITY TO CONTAMINATION OF
GROUNDWATER IN URBAN REGIONS

Fu Surong Wang Yanxin Cai Hesheng Li Yilian

(*Faculty of Engineering , China University of Geosciences , Wuhan 430074, China*)

Abstract: The evaluation and mapping of the groundwater vulnerability to contamination are of primary importance for hydrogeological studies. In this paper, the traditional methods are reviewed and a new *DRAMIC* model is presented by improving the *DRASTIC* model to make it suitable for the hydrogeological conditions of urban areas in China. The model *DRAMIC* can be used as a general index system for evaluating the vulnerability of groundwater to contamination in Chinese cities. In the final part of this paper, is introduced the method for the application of GIS to the mapping of the *DRAMIC* model.

Key words: groundwater; vulnerability; *DRASTIC* model; *DRAMIC* model.