

地下水污染风险区划方法研究

申利娜, 李广贺*

(清华大学环境科学与工程系, 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100084)

摘要 针对地下水易污性评价未考虑污染源要素, 缺乏系统有效的地下水污染风险区划方法与参数体系等问题, 基于对污染地下水的系统结构分析, 污染源解析, 构建了地下水脆弱性与污染源综合评价耦合模型, 提出了针对地下水污染源的多指标评价方法, 形成了地下水污染风险区划的多因素综合评价方法, 建立了系统的地下水污染风险评价的参数体系. 利用构建的多因素耦合评价方法, 以我国北方某大型岩溶地下水源地作为案例进行了污染风险区划, 确定了主要污染风险区域. 结果表明, 风险源与地下水易污性的共同作用决定了地下水高污染风险区分布. 地下水污染风险区划方法的建立为地下水污染有效监管提供了必要的方法支撑.

关键词 风险区划; 地下水脆弱性; 污染源; 耦合模型; 叠层分析

中图分类号 X523 **文献标识码** A **文章编号** 0250-3301(2010)04-0918-06

Groundwater Pollution Risk Mapping Method

SHEN Li-na, LI Guang-he

(State Key Joint Laboratory for Environmental Simulation and Pollution Control, Department of Environmental Science & Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract Based on methods for groundwater vulnerability assessment not involving in contamination source elements, and lack of the systemic and effective techniques and parameter system on groundwater pollution risk mapping in present, through analyzing the structure of groundwater system and characteristics of contaminant sources, and coupling groundwater intrinsic vulnerability with contaminant sources, the integrated multi-index models were developed to evaluate the risk sources of groundwater contaminant and form the groundwater pollution risk mapping in this paper. The models had been used to a large-scale karst groundwater source of northern China as a case study. The results indicated that vulnerability assessment overlaid risk pollution sources of groundwater could effectively confirm the high risk regions of groundwater pollution, and the methods might provide necessary support for the supervision of groundwater pollution.

Key words risk mapping; groundwater vulnerability; contaminant source; coupling model; overlay analysis

地下水是我国城市供水的重要水源地^[1], 据对全国 195 个城市监测结果表明, 97% 的城市地下水受到不同程度污染, 其中 40% 污染不断加剧^[2-4]. 由于地下水流动缓慢, 交替程度较弱, 自净能力低, 一旦受到污染难以有效恢复^[5-8]. 因此, 地下水污染预防与有效监管显得尤为重要. 由于地下水分布广泛, 地面环境状况复杂, 因此地下水污染风险区划对于地下水污染防治与污染监控具有十分重要的意义^[9,10]. 地下水污染风险区划是指根据地下水不同空间易污性、叠加污染源空间分布划分地下水污染风险等级的过程^[11,12]. 目前, 地下水污染风险区划的主要方法是基于地下水脆弱性评价^[13-16]. 已有研究结果表明, 地下水脆弱性仅反映了地层对地下水保护性的强弱, 没有考虑到外界环境因素(如污染源分布、污染物特性等)的影响, 难以准确反映地下水系统的污染风险水平^[17-21]. 近年来, 研究人员逐步开展和试图完善地下水污染风险区划方法, 在地下水脆弱性评价的基础上, 增加了土地利用类型等

要素的评价^[22-25]. 但总体上, 缺乏系统的地下水污染风险区划方法与参数体系, 同时对地下水污染源的作用与影响考虑不足.

本研究以浅层地下水为评价对象, 通过对地下水系统结构、污染源解析, 构建地下水脆弱性和污染源综合评价耦合模型, 研究建立针对地下水污染源的多指标评价方法, 形成了地下水污染风险区划的多因素综合评价方法和参数体系. 方法的建立为不同污染类型、不同地质条件的地下水区域的风险识别及重点防控区的确定提供决策支持.

1 方法的构建

1.1 地下水污染风险影响因素分析

收稿日期 2009-06-06 修订日期 2009-08-25

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划项目(2007BAC16B06); 国家公益性行业项目(200909038)

作者简介: 申利娜(1984~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为地下水污染控制与治理, E-mail: shenlina02@mails.tsinghua.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: ligh@tsinghua.edu.cn

利用过程分析方法,研究和确定地下水污染风险影响因素.地下水污染风险分析概念模型如图 1 所示.

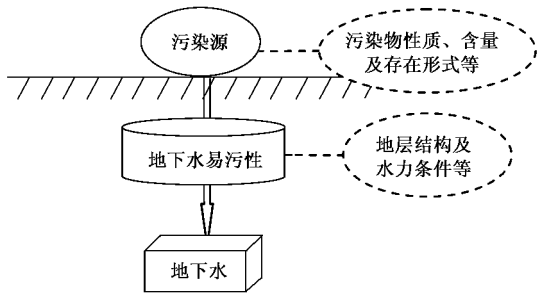


图 1 地下水污染风险分析
Fig. 1 Groundwater pollution risk analysis

从图 1 中可以看出,地下水污染风险主要由地下水污染源及地下水易污性 2 个要素决定.

地下水污染源是指可能向地下水系统中泄漏有毒有害物质、释放有害能量,对地下水正常功能构成一定威胁的对象,包括生产装置、设备、地表水体及覆盖土壤等.污染源的性质特征、含量及存在形式等因素均影响地下水污染风险水平.

地下水易污性主要影响因素包括地层结构、水力条件、水位高低等,用地下水脆弱性进行衡量.地下水脆弱性越高,污染物越易侵入地下水系统,易污性越高.

因此,地下水污染源和地下水易污性构成地下水污染风险区划的主要考虑因素.

1.2 多因素耦合综合评价方法

多因素耦合综合评价方法的前提是不考虑污染物在包气带中的水平扩散.其核心是通过分析地下水污染过程,提取主要的影响因素——地层脆弱性及地下水污染源,采用相应的方法对 2 个因素进行评价,然后建立各因素的空间图层,最后进行空间图层的叠加,确定地下水的风险图谱.方法的技术流程如下.

(1) 基于 GIS 平台,选用 DRASTIC 方法进行地下水脆弱性评价,利用公式(1),计算 DRASTIC 指数 V ,并绘制出地下水脆弱性图层.

$$V = D_r \times D_w + R_r \times R_w + A_r \times A_w + S_r \times S_w + T_r \times T_w + I_r \times I_w + C_r \times C_w \quad (1)$$

式中, D_r 、 R_r 、 A_r 、 S_r 、 T_r 、 I_r 、 C_r 分别为 DRASTIC 模型参数评分; D_w 、 R_w 、 A_w 、 S_w 、 T_w 、 I_w 、 C_w 分别为 DRASTIC 模型参数权重.

(2) 综合考虑污染物的污染程度、迁移性、毒

性、降解能力、是否被列在我国水中优先控制污染物黑名单等因素,选取反映污染源主要特点的 n 种目标污染物.

(3) 构建污染物多指标综合评价方法.基于 GIS 平台,采用公式(2)对目标污染物进行评价,得出污染物评价指数 S_i .然后利用公式(3),计算污染源综合评价指数 S ,并建立污染源综合评价图层.

$$S_i = \sum_{j=1}^m kr_jkw_j \quad (2)$$

式中, m 为目标污染物参数个数; kr_j 为目标污染物参数分级值; kw_j 为目标污染物参数权重.

$$S = \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{n} \quad (3)$$

(4) 利用 GIS 技术对地下水脆弱性图层与污染源综合评价图层进行叠层分析,计算地下水风险指数 R ,并建立地下水风险图谱,计算见公式(4).根据不同区域的地下水风险值,实现地下水风险区域划分.

$$R = \text{AVERAGE}(V, S) \quad (4)$$

上述步骤的流程如图 2 所示.

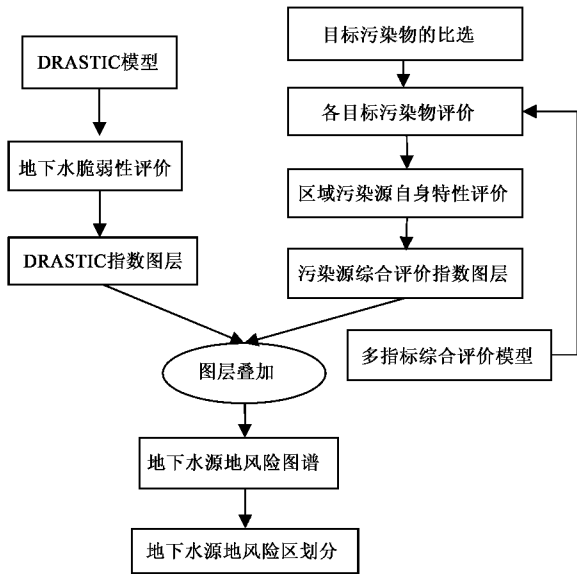


图 2 地下水风险区划流程
Fig. 2 Groundwater risk mapping process

2 多因素耦合方法相关参数

2.1 参数体系

本方法的参数体系分为 2 层,一层为地下水脆弱性参数:地下水埋深(D)、净补给量(R)、含水层岩性(A)、土壤介质类型(S)、地形坡度(T)、包气带岩性(I)、水力传导系数(C).另一层为地下水污染

源参数:污染物赋存形式、污染负荷、污染物的迁移性能、污染物的衰减特征、污染物的毒性等.

2.2 参数分级及权重

(1) 地层脆弱性参数

地层脆弱性参数设计分值范围是 1~10,防污性

能最好的评分为 1,最差的评分为 10. 具体评分标准见表 1. 传统上按参数对地下水脆弱性影响大小给予权重值,影响最大的权重值为 5,最小的为 1. 为了使地下水脆弱性指数与污染源综合指数的取值区间一致,将权重进行归一化,处理后的权重值如表 2.

表 1 DRASTIC 参数的评分¹⁾
Table 1 DRASTIC parameters rating

地下水埋深 (D)/m	净补给量(R) /mm	含水层岩性(A)	土壤介质类型(S)	地形坡度(T) /%	包气带岩性(I)	含水层水力传导系 数(C)/m·d ⁻¹
0~1.5 (10)	0~50.8 (1)	块状页岩 (2)	薄层或缺失 (10)	0~2 (10)	粉土/黏土 (1)	0.4~4.1 (1)
1.5~4.6 (9)	50.8~101.65 (3)	变质岩、火成岩 (3)	砾石 (10)	2~6 (9)	页岩 (3)	4.1~12.2 (2)
4.6~9.1 (7)	101.65~177.8 (6)	风华的变质岩、火成岩 (4)	砂 (9)	6~12 (5)	变质岩、火成岩 (4)	12.2~28.5 (4)
9.1~15.2 (5)	177.8~254 (8)	薄层状砂岩、灰岩、页岩 (6)	胀缩性黏土 (7)	12~18 (3)	灰岩、砂岩、层状页岩、含较多粉粒和黏粒的砂砾石 (6)	28.5~40.7 (6)
15.2~22.9 (3)	>254 (9)	块状砂岩 (6)	砂质壤土 (5)	>18 (1)	砂砾石 (8)	40.7~81.5 (8)
22.9~30.5 (2)		块状灰岩 (6)	壤土 (5)		玄武岩 (9)	>81.5 (10)
>30.5 (1)		砂砾岩 (8)	粉质壤土 (3)		岩溶发育灰岩 (10)	
		玄武岩 (9)	黏质壤土 (2)			
		岩溶发育灰岩 (10)				

1) 表中括号内为评分值,下同

表 2 DRASTIC 参数的权重
Table 2 DRASTIC parameters weight

参数	D	R	A	S	T	I	C
权重	0.22	0.17	0.13	0.09	0.04	0.22	0.13

(2) 地下水污染源参数

选取对地下水污染风险影响较大的 5 个污染源性质参数,分别为存在形式、衰减特征、污染物的量、迁移性及毒性等. 污染源参数设计的分值范围为 1~10,对地下水威胁最大的评分为 10,威胁最小的评分为 1,各参数的评分结果见表 3,具体分级评分方法如下.

目标污染物的存在形式分为密封、部分密封及暴露. 污染物各个方位均有隔离措施时称其为密封; 污染物下方有隔离措施但其它方位未与外界隔离时称其为部分密封; 污染物下方未有隔离措施的均称其为暴露. 污染物密封状态直接影响其与地下水系统的交互难易,密封性越差,对地下水的威胁性越大,其值越大. 目标污染物的衰减特征根据半衰期评分. 通常在水中半衰期大于 2 个月、在土壤或沉积物中半衰期大于 6 个月的有机污染物称为持久性有机污染物. 参考此标准,将半衰期分为 6 个等级,半衰期越长,污染物的危险性越大,数值越高. 目标污染物的量依据检测及计算结果,对其划分为低、较低、中等、较高、高 5 个等级. 目标污染物的迁移性依据油水分分配系数评分. 油水分分配系数是有机污染物在

有机碳(含 100% 的碳)和水间的分配系数,它是污染物本身的性能参数. 对不同的有机污染物在同一种土壤或含水层介质的迁移而言,油水分分配系数决定了其在地下水中的迁移能力,数值越大,含水层介质的阻滞能力越强,有机物的迁移能力越弱. 依据目标污染物的急性毒性指标、慢性毒性指标及国际癌症研究所最新公布的对人致癌危险评价表,对污染物的毒性划分为 5 个等级.

采用模糊层次分析法对污染源参数的权重进行计算. 设目标污染物的存在形式、目标污染物的衰减特征、污染负荷、迁移特征及毒性分别为 f_1 、 f_2 、 f_3 、 f_4 、 f_5 ,确立优先关系矩阵 F .

$$F = \begin{bmatrix} 0.5 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0 & 0.5 & 0 \\ 1 & 1 & 0.5 & 1 & 0.5 \\ 0 & 0.5 & 0 & 0.5 & 0 \\ 1 & 1 & 0.5 & 1 & 0.5 \end{bmatrix}$$

其后,计算模糊一致矩阵 R .

$$R = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.8 & 0.2 & 0.8 & 0.2 \\ 0.2 & 0.5 & -0.1 & 0.5 & -0.1 \\ 0.8 & 1.1 & 0.5 & 1.1 & 0.5 \\ 0.2 & 0.5 & -0.1 & 0.5 & -0.1 \\ 0.8 & 1.1 & 0.5 & 1.1 & 0.5 \end{bmatrix}$$

最后,计算出污染源参数权重值见表 4.

表3 地下水污染源参数的评分

Table 3 Parameters rating of groundwater contaminant source

存在形式	半衰期/d	污染物的量	油水分配系数	毒性
密封 (1)	15 (1)	低 (1)	< 50 (10)	弱 (1)
	15 ~ 60 (3)		< 100 (8)	
部分密封 (5)	60 ~ 180 (7)	较低 (3)	100 ~ 500 (7)	软弱 (3)
	180 ~ 360 (8)	中等 (5)	500 ~ 1 000 (5)	中等 (5)
			1 000 ~ 5 000 (3)	
暴露 (10)	360 ~ 720 (9)	较高 (8)	5 000 ~ 10 000 (2)	较强 (8)
	> 720 (10)	高 (10)	> 10 000 (1)	强 (10)

表4 地下水污染源参数的权重

Table 4 Parameter weight of groundwater contaminant source

污染性质 指标	存在 形式	衰减 特征	污染物 的量	迁移特征	毒性
权重	0.2	0.05	0.35	0.05	0.35

3 案例分析

研究区为北方某岩溶地下水源地,地势南高北低,南部为低山丘陵河谷地形,北部为山前倾斜平原,如图3所示.按其形态分为4种类型:构造剥蚀岩溶低山丘陵地区的南部主要是石灰岩裸露区,基本上没有土壤覆盖层;剥蚀堆积山麓坡地地区,地表土壤介质主要为坡积和洪积成因的黄土状亚黏土,含碎石黄土状亚砂土(轻亚黏土);河谷冲积平原从外向内逐渐为亚黏土、中粗砂、卵砾石,部分地区卵砾石裸露在外;山前冲洪积平原沉积物岩性为亚黏土、黏质砂土、砂卵砾石等.研究区主要由上下2个主要的含水岩组构成:上部为第四系松散岩类孔隙含水岩组,下部为奥陶系中统碳酸盐岩类裂隙岩溶含水岩组.全区多年平均降雨量为623.0 mm,最大年降雨量为1 107.2 mm(1964年),最小降雨量为

331.0 mm.区内坐落着某大型石化企业及大量小化工,对地下水产生了巨大威胁.长期监测结果表明研究区地下水污染物构成复杂,有机污染明显,苯系物类、烷烃类、多环芳烃类等是主要的污染物类型,地下水污染严重区主要是西部水源地、东部河谷冲积平原部分地区及分散的小化工区.

首先,利用 DRASTIC 模型对研究区进行地下水脆弱性分析,结果如图4所示.评价结果表明,南部山区岩溶裸露区和东部河谷砂卵砾石层属于地下水高脆弱性区;北部平原区由于广泛分布第四系粘性土层,地下水保护性能较高,属于低地下水脆弱区,地下水固有防护性能较高,易污性较低.

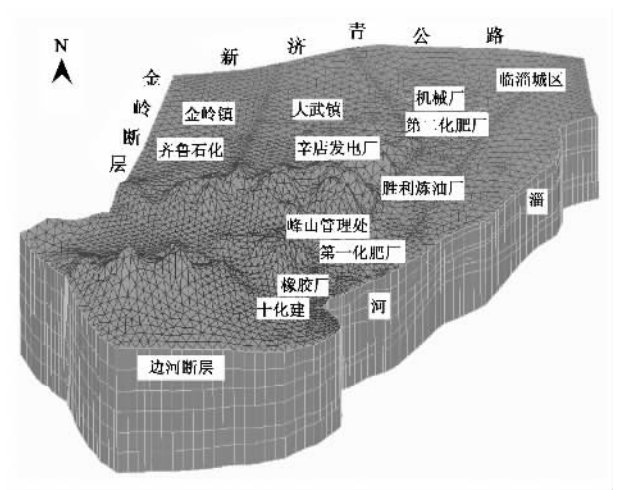


图3 研究区三维模型

Fig.3 3D model of research area

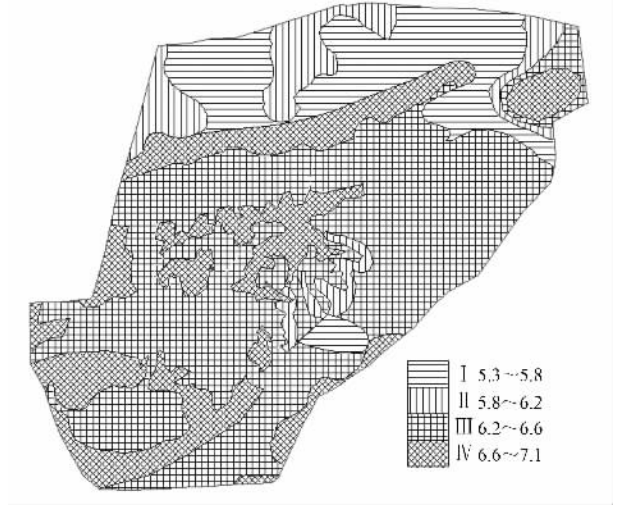


图4 地下水脆弱性分区评价

Fig.4 Groundwater vulnerability mapping

根据区内污染源的系统调查与分析,苯系物(BTEX)、多环芳烃(PAHs)、氯代烃为区内土壤和地下水的主要污染物.基于污染物选择原则,选取土壤中污染物含量高、“三致”效应明显的苯、三氯甲烷、四氯化碳、萘、菲及苯并芘6种污染物为地下水污染风险区划的目标污染物.采用多指标评价方法确定研究区地下水污染源综合指数,如图5所示.

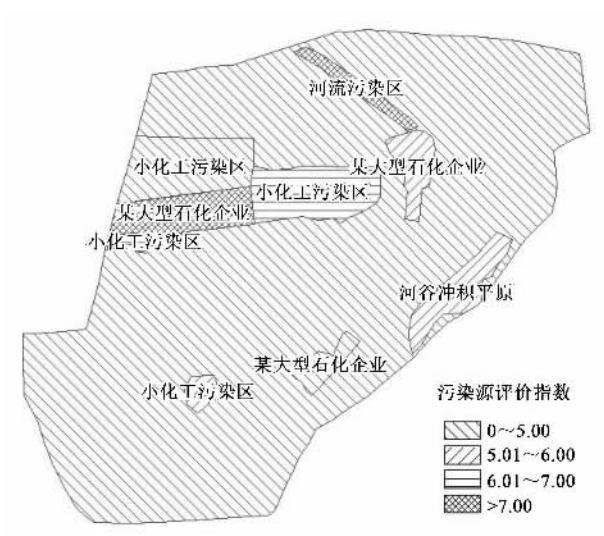


图5 地下水污染源分区评价

Fig.5 Contaminant source of groundwater mapping

由图5可见,某大型石化西部厂区及东部河谷地区的污染物风险指数最高,污染影响明显;其次是该石化企业周边的小化工污染区。

将地下水污染源综合指数评价结果及地层脆弱性评价结果进行叠层分析,得到地下水污染风险区划,如图6所示。

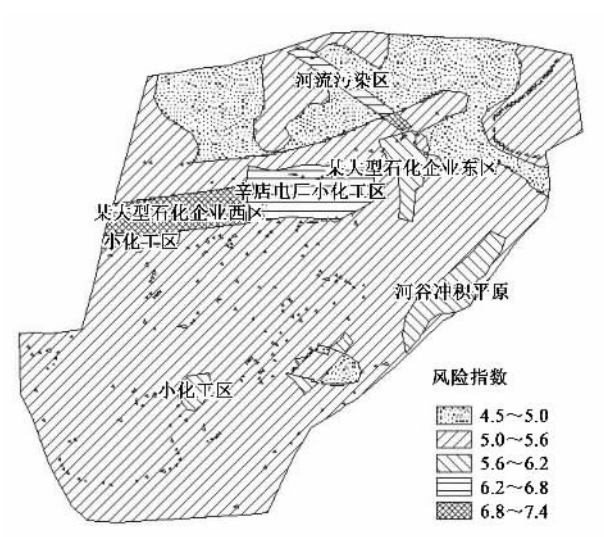


图6 地下水污染风险分区评价

Fig.6 Groundwater pollution risk mapping

从图6可以看出,地下水风险最高的为某大型石化西部厂区及河流污染区南部。其次是辛店电厂附近的小化工区和渗坑集中地带,河流污染区北部及某大型石化厂区周边的小化工区。东部河谷地区、某大型石化东部厂区及南部小化工区风险也较高。

4 结论

(1) 建立了地下水脆弱性评价及地下水污染源评价相耦合的多因素评价方法及技术流程,构建了包括地下水脆弱性及污染源性质2个层次的地下水污染风险区划方法参数体系。

(2) 建立了多指标评价模型,选择地下水污染源的5个性质指标作为参数,分别是目标污染物存在形式、污染物负荷、迁移特征、衰减特征和毒性。确定了各个参数的取值依据,取值范围在1~10,利用模糊层次分析法计算了参数的权重,分别为0.2、0.35、0.05、0.05、0.35。

(3) 采用构建的多因素耦合方法对北方某大型水源地进行风险区划,结果表明风险高的地区,地下水的水质相对其它区域较差,表明了地下水污染高风险水平,证实所建立的地下水污染风险区划方法与参数体系的合理与适用性。

参考文献:

- [1] 郝华. 我国城市地下水污染状况与对策研究[J]. 水利发展研究, 2004, 4(3): 23-25.
- [2] 徐凤兰, 叶丹, 曹德福, 等. 浅谈地下水污染及其防治[J]. 地下水, 2005, 27(1): 50-52.
- [3] 罗兰. 我国地下水污染现状与防治对策研究[J]. 中国地质大学学报, 2008, 8(2): 73-75.
- [4] 陈冬琴. 杭嘉湖地区地下水流域模拟及污染物迁移规律分析[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2007.
- [5] 杭小帅, 王火焰, 周健民. 电镀厂下游水体中重金属的分布特征及其风险评价[J]. 环境科学, 2008, 29(10): 2736-2742.
- [6] 崔学慧, 李炳华, 陈鸿汉. 太湖平原城近郊区浅层地下水中多环芳烃污染特征及污染源分析[J]. 环境科学, 2008, 29(7): 1806-1810.
- [7] 毛媛媛. 张集地区地下水污染风险评估方法及地下水源保护区划分[D]. 南京: 南京大学, 2006.
- [8] 赵勇胜. 地下水污染场地污染的控制与修复[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2007, 37(2): 303-310.
- [9] Burkart M R, Kolpin D W, James D E. Assessing groundwater vulnerability to agricultural contamination in the Midwest US [J]. Water Science and Technology, 1999, 39(3): 103-112.
- [10] Thapinta A, Hudak P. Use of geographic information systems for assessing groundwater pollution potential by pesticides in Central Thailand [J]. Environmental International, 2003, 29(1): 87-93.
- [11] 张树军, 张丽君, 王学风. 基于综合方法的地下水污染脆弱性评价——以山东济宁市浅层地下水为例[J]. 地质学报, 2009, 83(1): 131-137.
- [12] 吴登定, 谢振华, 林健, 等. 地下水污染脆弱性评价方法[J]. 地质通报, 2005, 24(10): 1043-1047.
- [13] 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.
- [14] Close M E. Assessment of pesticide contamination of groundwater in New Zealand1. Ranking of regions for potential contamination [J]. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Researchs*, 1993, **27**:257-266.
- [15] Lynch S D, Reynders A G, Schuize R E. A DRASTIC approach to groundwater vulnerability in South Africa [J]. *South African Journal Science*, 1997, **93**:59-60.
- [16] 杨悦所, Wang J L. 基于 GIS 的农业面源硝酸盐地下水污染动态风险评价 [J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2007, **37**(2):311-318.
- [17] 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.
- [18] 张丽君. 地下水脆弱性和风险性评价研究进展综述 [J]. *水文地质工程地质*, 2006, **33**(6):113-119.
- [19] 陈学群. 莱州市地下水脆弱性评价研究 [D]. 济南:山东大学, 2006.
- [20] 武强, 王志强, 赵增敏, 等. 油气田区承压含水层地下水污染机理及其脆弱性评价 [J]. *水利学报*, 2006, **37**(7):851-857.
- [21] 张保祥, 万力, 余成, 等. 基于熵权与 GIS 耦合的 DRASTIC 地下水脆弱性模糊优选评价 [J]. *现代地质*, 2009, **23**(1):150-156.
- [22] Secunda S, Collin M, Melloul A J. Groundwater vulnerability assessment using a composite model combining DRASTIC with extensive land use in Israel's Sharon region [J]. *Journal of Environmental Management*, 1998, **54**(1):39-57.
- [23] Connell L D, Daele G. A quantitative approach to aquifer vulnerability mapping [J]. *Journal of Hydrology*, 2003, **276**(1-4):71-88.
- [24] 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**(1-3):127-140.
- [25] 梁婕, 谢更新, 曾光明. 基于随机-模糊模型的地下水污染风险评价 [J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2009, **36**(6):54-58.