

doi:10.3799/dqkx.2012.025

地下水污染风险源识别与分级方法

金爱芳,李广贺*,张旭

清华大学环境学院,地下水与土壤环境研究所,北京 100084

摘要: 由于目前缺乏一套完整成熟的地下水污染风险源准确识别与分级方法,在综合解析污染源结构、污染物输移过程评价的基础上,构建了涵盖地下水易污性和地下水污染源两部分多因素耦合的风险源识别模型,其中从污染源特性和污染物性质两方面建立了污染源危害性评价参数体系.以地下水易污性指数和污染源潜在危害性评价指数作为风险源分级指标,采用乘积模型进行了风险源的评价与分级.选择某水源地对所建方法进行实例分析,确定了地下水污染的高风险源区.结果表明,污染源和地下水易污性共同决定了地下水污染的风险源,所建方法对地下水污染的预防及污染源的有效监管有重要意义.

关键字: 地下水;风险源识别;易污性;污染源;污染控制;环境工程.

中图分类号: X820.4

文章编号: 1000-2383(2012)02-0247-06

收稿日期: 2011-11-05

The Risk Source Identification and Classification Methodology of Groundwater Pollution

JIN Ai-fang, LI Guang-he*, ZHANG Xu

Division of Groundwater & Soil Environment, School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract: There is not a well-developed method to identify accurately the risk source of groundwater pollution at present, so a risk source identification model including the vulnerability and contaminant source, coupling of many factors, was constructed based on the comprehensive analysis of contaminant source structure and the evaluation of contaminant transport process in this study. Hazard assessment parameters system of contaminant source was established from the characteristics of sources and pollutants. Groundwater vulnerability index and potential hazard assessment index of contaminant source were used to evaluate and classify the risk source by product model. The method was applied to a groundwater supply source, and which identified high-risk areas of groundwater contamination. The results show that risk source of groundwater pollution was effectively determined by contaminant source and the vulnerability assessment, and the method was of great importance for the prevention of groundwater contamination and effective supervision of contaminant source.

Key words: groundwater; risk source identification; vulnerability; contaminant source; pollution control; environmental engineering.

地下水污染是指在人类活动影响下,地下水水质朝着恶化方向发展的现象.人类活动产生的污染物是以污染源为载体释放到环境中,经由地质环境到达地下水.然而并非所有的污染物都能到达地下水,并非所有的污染源都是地下水污染的风险源.它不仅取决于污染物的性质,还取决于污染物迁移路径的水文地质条件.因此如何准确识别地下水污染的风险源并进行等级划分,对地下水污染的预防与有效监管显得尤为重要.

目前国内外对地下水污染的风险源研究刚刚起

步,还处于探索阶段,没有一套比较成熟与完善的方法体系,大多是从单方面进行研究. Gustafson (1989)基于污染物的半衰期和有机碳分配系数构建了GUS指数模型,并对农药类污染物的淋溶迁移性进行了评价. Harman *et al.* (2001)基于GIS运用EPA Priority Setting Approach方法对北卡罗来纳州的一个水源保护区的潜在污染源进行了评估与分级.该方法考虑了含水层的特征及污染物的毒性数据,主要分为2个部分:(1)并被污染的可能性(L);(2)污染的严重性(S).通过2部分的相加得出总的

基金项目:国家环保公益性行业项目(No. 200909038).

作者简介:金爱芳(1982-),女,博士后,主要从事土壤与地下水的污染与控制研究.

*通讯作者:李广贺, E-mail: ligh@tsinghua.edu.cn

风险值. Kaufman *et al.* (2009) 基于土壤和污染物的性质评价了污染源对地下水的潜在污染. 申利娜和李广贺(2010)针对地下水污染源提出了多指标评价方法, 并采用加权求和模型进行了污染源的综合评价. 江剑等(2010)采用简单评判法对海淀区地下水污染源进行了评价与分级. 从水文地质角度考虑地下水易污性的研究较多, 构建的评价模型主要有基于过程法(process-based methods)、统计方法(statistical methods)及参数系统法(overlay and index methods)等. 其中尤以参数系统法和基于过程法应用较多, 最典型的是美国环保局于 1987 年提出的 DRASTIC 方法(Aller *et al.*, 1987), 该方法已被广泛地应用于国内外地下水易污性评价(Babiker *et al.*, 2005; Awawdeh and Jaradat, 2010; Boughriba *et al.*, 2010; Saidi *et al.*, 2010).

本研究通过解析地下水污染源结构, 建立可操作性强的多指标污染源潜在危害性评价体系; 并结合污染物输移过程的评价和分析, 构建涵盖地下水污染源及地下水易污性耦合模型的风险源识别方法; 基于 GIS 技术平台, 进行风险源的等级划分, 为制定有效的地下水污染防控措施和决策提供技术与方法.

1 方法的构建

1.1 地下水污染风险源因素分析

基于源—路径的分析, 地下水污染风险源主要是由地面环境和地下环境共同决定的. 地面环境是人类活动产生的污染源, 它体现了人类活动对地下水的影响, 主要反映了污染源是否具有较高的污染物输出潜力. 污染源的防护措施及排放的污染物种类是造成地下水污染的主要因素. 污染源的防护措施完整, 排放的污染物毒性较小, 迁移能力弱, 易降解, 则对地下水的潜在危害性越小.

地下环境影响着污染物的运移路径, 通常用地下水易污性来表征, 它反映了天然状态下, 地质环境的自我防护能力, 即地下水受到污染的难易程度. 它用来衡量污染物渗透到地下水的可能性, 是不可变和人为不可控制的. 地下水的埋深、包气带的岩性、含水层的水力传导系数、地形坡度等均是影响易污性的关键因素.

地下水污染的风险源是污染源与地下水易污性作用的结果. 如果一个区域的地下水易污性很高, 但由于没有明显的污染物进入含水层, 因此该区域的

地下水无污染风险; 反之若地下水易污性较低, 但因有大量的污染物进入地下环境, 则该区域地下水污染的风险很大.

1.2 多因素耦合的评价方法

基于地下水污染风险源因素的分析, 提取主要因素——地下水污染源和地下水易污性; 分别采取相应的方法对 2 个因素进行评价, 建立各因素的专题图层; 最后采用乘积模型进行风险源的评价与分级, 划分出地下水污染的高风险源区. 具体的评价方法如下:

(1) 综合考虑污染源的防护措施、所处位置, 及所排放污染物的种类、性质(毒性、迁移性、持久性)等, 构建针对有机污染物的多指标污染源潜在危害性评价方法. 首先采用公式(1)对目标污染物进行评价, 得出污染物的评价指数 S_1 ; 利用公式(2)计算污染源的评价指数 S_2 , 最后利用公式(3)计算污染源的潜在危害性综合指数, 基于 GIS 平台, 建立污染源潜在危害性专题图层, 并进行等级划分.

$$S_1 = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m r_{ij} \omega_{ij}}{n}, \quad (1)$$

式中, n 为目标污染物的个数; m 为目标污染物的参数个数; r_{ij} 为目标污染物 i 的参数分级值; ω_{ij} 为目标污染物 i 的参数的权重值.

$$S_2 = \sum_{k=1}^q r_k \omega_k, \quad (2)$$

式中, q 为污染源特征参数的个数, r_k 为污染源特征参数的分级值, ω_k 为污染源特征参数的权重.

$$S = S_1 + S_2. \quad (3)$$

(2) 地下水易污性评价采用最典型的美国环保局于 1987 年提出的 DRASTIC 方法, 具体计算见公式(4). 基于 GIS 平台, 绘制地下水易污性专题图层, 并进行等级划分.

$$D = D_r \times D_w + R_r \times R_w + A_r \times A_w + S_r \times S_w + T_r \times T_w + I_r \times I_w + C_r \times C_w, \quad (4)$$

式中, $D_r, R_r, A_r, S_r, T_r, I_r, C_r$ 分别为各参数的分级值; $D_w, R_w, A_w, S_w, T_w, I_w, C_w$ 分别为各参数的权重值.

(3) 考虑到加法模型会弱化和掩盖限制性因素的作用, 本研究以地下水易污性指数和污染源潜在危害性评价指数作为风险源分级指标, 采用乘积模型计算风险源综合指数, 基于 GIS 技术平台, 对其进行等级的划分.

首先将各指标专题图层转换成 shape 格式的矢

量图,然后按各指标中等级划分值转换成 30 m × 30 m 的栅格图,将各栅格图乘以相应指标的权重,通过加权和公式完成各指标的叠加计算,得出不同区域地下水污染源评价指数或易污性指数。

通过 GIS 中的栅格计算器功能将地下水污染源潜在危害性评价的栅格图和易污性评价的栅格图进行乘积计算,得出不同区域的地下水污染风险源综合指数;运用 Equal Interval 或 Natural Breaks 分级方法进行等级划分,分为 5 个不同的级别,分别为低、较低、中等、高、较高风险源。具体计算见公式(5):

$$R_{(x,y)} = S_{(x,y)} \times D_{(x,y)}, \quad (5)$$

式中, $R_{(x,y)}$ 为第 (x,y) 个单元格的风险源指数, $S_{(x,y)}$ 为第 (x,y) 个单元格的污染源潜在危害性指数, $D_{(x,y)}$ 为第 (x,y) 个单元格的易污性指数。

通过对地下水污染风险源指数的等级划分,识别出不同区域的地下水污染风险等级,进而采取相应的措施进行管理和预防。

2 多因素耦合方法的相关参数

2.1 参数体系

参数体系是否科学、合理,直接影响着评价结果的准确性。参数体系的建立必须遵循 4 个原则:系统性原则、动态性原则、科学性原则、可操作性原则。遵循以上原则,利用污染源特征参数(排放位置、污染发生概率、污染的持续时间、影响面积)及目标污染物的参数(毒性、迁移性、持久性、等标负荷)构建了污染源潜在危害性的参数体系。地下水易污性评价采用美国环保局的 DRASTIC 方法,它涉及 7 个水文地质因子,分别为地下水埋深(D)、净补给量(R)、

表 1 污染源潜在危害性评价的参数体系

Table 1 Parameters system of contaminant source potential hazard assessment

总体指标	一级指标 A	二级指标 B
污染源潜在危害性评价	污染物的性质	毒性
		迁移性
污染源的特性	污染源的持久性	持久性
		等标负荷
		排放位置
		污染发生概率
		影响面积
		污染持续时间

含水层介质(A)、土壤介质(S)、地形坡度(T)、包气带介质类型(I)及含水层水力传导系数(C)。

2.2 参数的分级及权重

2.2.1 污染源潜在危害性参数 从污染源特性和污染物性质两方面选取对地下水潜在危害大的参数进行考虑,建立的参数体系见表 1。

污染源潜在危害性评价参数的衡量及其等级划分具体见表 2。所有参数的等级范围为 1~10,等级越高,对地下水危害性越大。污染物的毒性主要参考 EPA 等级划分,毒性越大,等级越高;迁移性依据有机碳-水分配系数 K_{oc} 进行划定, K_{oc} 值越低,则污染物越不易被土壤或含水层介质吸附,迁移能力越强,等级越高;持久性依据污染物在土壤中的半衰期进行划定,半衰期越长,污染物越不易降解,危害性越大,等级越高;污染物的等标负荷则依据测试浓度计算的等标负荷结果进行划分,标准值参考《地表水环境质量标准》(GB3838-2002),没有的项目参考其他国家的相关标准;污染物的排放位置依据污染源的存在形式进行划分,地表污染源相对地下污染源而言,危害较小,等级较低;污染源发生概率依据其

表 2 污染源潜在危害性评价参数的分级

Table 2 Parameters rating of contaminant source potential hazard assessment

毒性	等级	迁移性	等级	持久性	等级	等标负荷	等级	排放位置	等级	污染发生概率	等级	影响面积	等级	持续时间	等级
ND	1	$K_{oc} > 2000$	2	≤ 15 d	1	< 1	2	密封	1	$< 0.1\%$	2.5	$< 0.1\%$	2.5	小时	2
D	2.5	$500 < K_{oc} \leq 2000$	4	15~60 d	3	1~10	4	地表	2.5	0.1%~1%	5	0.1%~1%	5	天	4
C	5	$150 < K_{oc} \leq 500$	6	60~180 d	7	10~100	6		部分密封	5	1%~10%	1%~10%	7.5	月	6
B	7.5	$50 < K_{oc} \leq 150$	8	180~360 d	8	100~1000	8			10	10%~100%	10%~100%	10	年	8
A	10	$K_{oc} \leq 50$	10	360~720 d	9	> 1000	10	地下	10	暴露	10			几十年	10
				> 720 d	10										

注:毒性参考 EPA 等级划分,A 类为人类致癌物;B 类为很可能的人类致癌物,其中,B1 为人类致癌证据有限,B2 为动物致癌证据充足。但人类致癌证据很不足或无证据;C 类为可能的人类致癌物;D 类为尚不能进行人类致癌分类的组分;ND 类为有对人类无致癌证据的组分。污染源各个方位都有隔离措施时称其为密封;污染源下方有隔离措施但其他方位未进行与外界隔离时称其为部分密封;污染源下方未有隔离措施的均称其为暴露。

表 3 污染源潜在危害性评价参数的权重

Table 3 Parameters weight of contaminant source potential hazard assessment

指标	毒性	迁移性	持久性	排放位置	等标负荷	影响面积	污染发生概率	持续时间
权重	0.265 0	0.132 5	0.132 5	0.110 0	0.194 3	0.095 7	0.035 0	0.035 0

表 4 DRASTIC 方法中各参数的等级值

Table 4 Parameters rating of DRASTIC method

地下水埋深		净补给量		含水层介质		土壤介质		地形坡度		包气带介质类型		水力传导系数	
D(m)	等级	R(mm)	等级	A	等级	S	等级	T(%)	等级	I	等级	C(m/d)	等级
0~1.5	10	0~50.8	1	块状页岩	1~3(2)	薄层或缺失	10	0~2	10	粉土/粘土	1~2(1)	0.04~4.1	1
1.5~4.6	9	50.8~101.6	3	变质岩、火成岩	2~5(3)	砾石	10	2~6	9	页岩	2~5(3)	4.1~12.2	2
4.6~9.1	7	101.6~177.8	6	风化的变质岩、火成岩	3~5(4)	砂	9	6~12	5	灰岩	2~7(6)	12.2~28.5	4
9.1~15.2	5	177.8~254.0	8	薄层状砂岩、灰岩、页岩	5~9(6)	胀缩性粘土	7	12~18	3	砂岩	4~8(6)	28.5~40.7	6
15.2~22.9	3	>254	9	块状砂岩	4~9(6)	砂质壤土	6	>18	1	层状的灰岩、砂岩、页岩	4~8(6)	40.7~81.5	8
22.9~30.5	2	—	—	块状灰岩	4~9(6)	壤土	5	—	—	含较多粉粒和粘粒的砂砾石	4~8(6)	>81.5	10
>30.5	1	—	—	砂砾石	6~9(8)	粉质壤土	4	—	—	变质岩、火成岩	2~8(4)	—	—
—	—	—	—	玄武岩	2~10(9)	粘质壤土	3	—	—	砂砾石	6~9(8)	—	—
—	—	—	—	岩溶发育灰岩	9~10(10)	非胀缩性粘土	1	—	—	玄武岩	2~10(9)	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	岩溶发育灰岩	8~10(10)	—	—

防护措施进行分级,防护措施好,则污染地下水的可能小,等级较低;影响面积依据其影响范围的大小进行分级,影响范围越大,则地下水污染的范围越大,危害性越大,等级较高;污染的持续时间越长,危害性越大,等级越高。

采用层次分析法确定污染源潜在危害性参数的权重,结果见表 3。

2.2.2 地下水易污性参数 地下水易污性评价 DRASTIC 方法中各参数的等级范围为 1~10,等级值越高,则地下水防护能力越差,越容易受到污染。各参数的具体等级划分见表 4。

为了使地下水易污性指数与污染源潜在危害性指数的取值区间一致,将 DRASTIC 模型中各参数权重进行归一化,处理后各参数的权重值分别为 D(0.22)、R(0.17)、A(0.13)、S(0.09)、T(0.04)、I(0.22)、C(0.13)。

3 案例应用

研究区为某水源地,面积约 140 km²,地势南高北低。南部为低山丘陵河谷地形,灰岩裸露区地表和

地下岩溶发育,出现较大的溶蚀洼地。北部为山前倾斜平原,为早期所形成的隐伏冲洪积扇,沉积物岩性为黄土状亚粘土、粘质砂土、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,下部为中奥陶统碳酸盐岩类裂隙岩溶含水岩组。研究区建立了某石化公司,在其周边地区聚集了大批乡镇、区、市属化工企业。在促进地区短期经济发展和繁荣的同时,对地区的水环境造成了巨大的压力并产生了严重的污染。样品分析测试结果表明,研究区地下水污染复杂多样,有机物污染比较严重,主要污染物为苯系物、氯代烃、多环芳烃类。

首先对研究区污染源采用普查与重点调查相结合的方法,对重点污染源进行采样分析,确定研究区的主要目标污染物为苯、三氯甲烷、四氯化碳、萘、菲、苯并(α)芘。基于 GIS 平台,结合野外调查分析数据与污染区域的划分,采用文中所建方法对研究区污染源危害性进行评价,评价结果如图 1 所示。

由图 1 可以看出,研究区危害程度低的区域主要分布在南部及北部,危害程度中等的区域主要分布在某石化公司,这主要是由于土壤中苯、萘、菲、苯

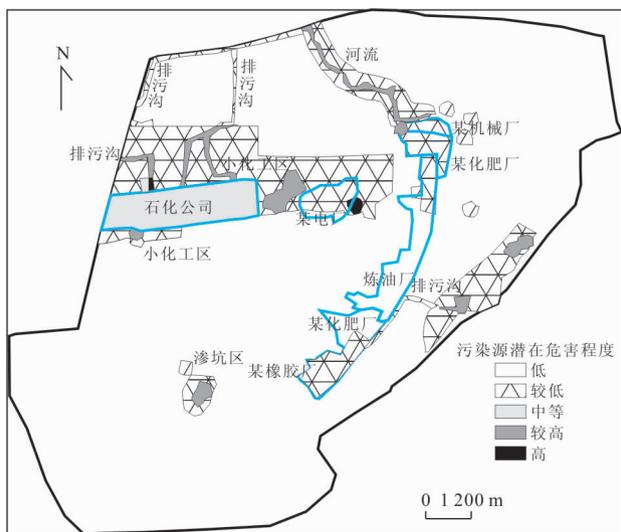


图 1 研究区污染源危害性评价结果

Fig. 1 Potential assessment of contaminant source in study area

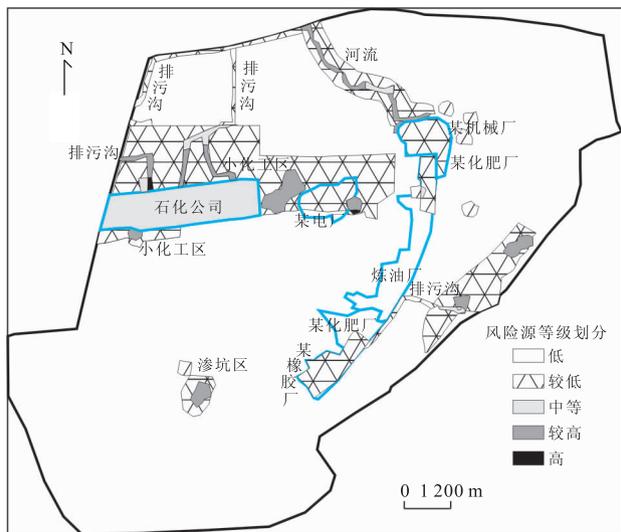


图 3 研究区地下水污染风险源评价结果

Fig. 3 Risk source assessment of groundwater in study area

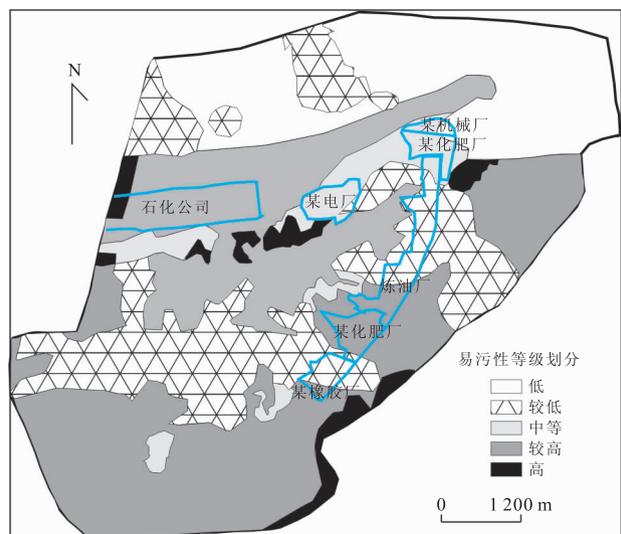


图 2 研究区地下水易污性评价结果

Fig. 2 Groundwater vulnerability assessment in study area

并(α)的污染负荷较高所致。危害程度较高和高的区域主要分布在排污沟及石化公司周边的一些渗坑。这些污染源排放的污染物浓度很高,个别污染物如三氯甲烷的最大超标倍数达 1 358。

运用 DRASTIC 模型对研究区地下水的易污性进行了评价,结果如图 2 所示。由图 2 可以看出,地下水易污性等级较高,高的区域主要分布在南部山区及东部河滩沿岸。这是由于这些区域的土壤覆盖层大面积缺失,部分区域为卵砾石覆盖,包气带岩性主要为灰岩、砾岩及卵砾石,对污染物的截留和阻隔作用较弱,且地下水的净补给量大。因此该区域地下水自我防护能力很差,有利于污染物的渗透和运移,

易受到污染。易污性等级较低,低的区域主要分布在南部山区中间盆地、某炼油厂的東西两侧地区和北部平原零星区域。这是由于南部山区地下水埋藏较深,净补给量较小,且地形坡度较大,北部平原区的包气带介质为粉砂土及亚粘土,对地下水保护作用强。其余地区的易污性等级为中等水平。

以研究区的污染源危害性评价指数和地下水易污性指数为分级指标,基于 GIS 系统,利用构建的乘积模型进行风险源评价与分级,共分为 5 级,评价结果如图 3 所示。

由图 3 可以看出,研究区地下水污染的风险较高,高的区域主要分布在渗坑和排洪沟的初始段。这是由于这些区域的污染源等级较高,地下水易污性等级较高,因此地下水污染的风险较高。相关政府部门应该引起重视,对污染源进行优先治理。地下水污染中等风险区主要分布在某石化公司及排洪沟的中部,其余地区为地下水污染的低或较低风险区。评价结果能够真实客观地反映出研究区的地下水污染状况,可见该方法可行且有效。

4 结论

(1)本研究通过解析地下水污染源结构,结合污染物输移过程的评价和分析,提出了地下水污染风险源概念,并构建了涵盖地下水污染源及地下水易污性两因素的耦合模型。其中污染源评价构建了详细的参数体系,并采用加权求和法进行了定量的评价。(2)基于 GIS 技术平台,运用数学方法——乘积

模型将地面环境与地下环境进行耦合. 所建方法体现了地面污染源和地下水易污性共同决定了地下水污染的风险源,且能够定量评价区域的地下水污染风险源,并进行空间不同等级的划分. (3)运用所建立的方法对某水源地的地下水污染风险源进行了识别与分级,评价结果能够真实地刻画研究区的地下水污染状况,并圈画出地下水污染的不同级别风险区的分布. 这说明本方法是可行、有效的,能够为地下水污染风险源的管理提供重要依据,为后续的污染防治措施和决策提供技术与方法.

References

- Aller, L. , Bennett, T. , Lehr, H. , et al. , 1987. DRASTIC: a standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydro-geologic settings. In: U. S. Environmental Protection Agency, National Water Well Association, Washington, D. C. , 35—66. EPA/600/2—85—018
- Awawdeh, M. M. , Jaradat, R. A. , 2010. Evaluation of aquifers vulnerability to contamination in the Yarmouk River basin, Jordan, based on DRASTIC method. *Arabian Journal of Geosciences*, 3(3): 273—282. doi:10. 1007/s12517—009—0074—9
- Babiker, I. S. , Mohamed, A. A. M. , Hiyama, T. , et al. , 2005. A GIS-based DRASTIC model for assessing aquifer vulnerability in Kakamigahara Heights, Gifu Prefecture, Central Japan. *Science of the Total Environment*, 345(1—3): 127—140. doi:10. 1016/j. scitotenv. 2004. 11. 005
- Boughriba, M. , Barkaoui, A. , Zarhloule, Y. , et al. , 2010. Groundwater vulnerability and risk mapping of the Angad transboundary aquifer using DRASTIC index method in GIS environment. *Journal of Geosciences*, 3(2): 207—220. doi:10. 1007/s12517—009—0072—y
- Gustafson, D. I. , 1989. Groundwater ubiquity score: a simple method for assessing pesticide leachability. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 8(4): 339—357. doi: 10. 1002/etc. 5620080411
- Harman, W. A. , Allan, C. J. , Forsythe, R. D. , 2001. Assessment of potential groundwater contamination sources in a wellhead protection area. *Journal of Environmental Management*, 62(3): 271—282. doi: 10. 1006/jema. 2001. 0436
- Jiang, J. , Dong, D. W. , Yang, G. N. , et al. , 2010. Risk assessment of groundwater pollution of Haidian district of Beijing. *Urban Geology*, 5(2): 14—18 (in Chinese with English abstract).
- Kaufman, M. M. , Rogers, D. T. , Murray, K. S. , et al. , 2009. Using soil and contaminant properties to assess the potential for groundwater contamination to the lower Great Lakes, USA. *Environ. Geol.*, 56(5): 1009—1021. doi:10. 1007/s00254—008—1202—7
- Saidi, S. , Bouri, S. , Dhia, H. B. , 2010. Groundwater vulnerability and risk mapping of the Hajeb-Jelma aquifer (Central Tunisia) using a GIS-based DRASTIC model. *Environ. Earth Sci.*, 59(7): 1579—1588. doi: 10. 1007/s12665—009—0143—0
- Shen, L. N. , Li, G. H. , 2010. Groundwater pollution risk mapping method. *Environmental Science*, 31(4): 918—923 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 江剑,董殿伟,杨冠宁,等,2010. 北京市海淀区地下水污染风险性评价. *城市地质*, 5(2): 14—18.
- 申利娜,李广贺,2010. 地下水污染风险区划方法研究. *环境科学*, 31(4): 918—923.