

地下水污染风险评价研究综述

刘凡^{1,2}, 孙继朝¹, 张英¹, 黄冠星^{1,3}

(1. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 石家庄 050061; 2. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083; 3. 河北省地下水污染机理与修复重点实验室, 石家庄 050061)

摘要: 地下水资源在我国的城市供水中占有重要的地位, 然而当今我国地下水污染的现象日趋严重, 使得地下水污染风险评价工作已经成为一项不可或缺的研究工作, 其评价成果对地下水污染防治工作的开展有着重要的指导意义。回顾了地下水污染风险的概念和评价方法的发展过程以及评价体系建立的具体步骤和内容等。以国内外现有的相关理论为依据, 对地下水污染风险评价的主要组成内容——固有脆弱性评价、外界胁迫脆弱性评价、地下水价值功能评价进行了着重阐述, 分别按照其特征进行了归纳, 并对评价验证方法进行了概述。从模型的适用性、资料的全面性、成果的时效性、要素的合理性等角度总结了当前地下水污染风险评价研究中存在的问题, 并提出了需深入研究的方向性建议。

关键词: 地下水污染风险; 指标体系; 固有脆弱性; 胁迫脆弱性; 地下水价值

中图分类号: X82.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2014)03-0127-06

Review of Groundwater Pollution Risk Assessment

LIU Fan^{1,2}, SUN Jichao¹, ZHANG Ying¹, HUANG Guanying^{1,3}

(1. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang 050061, China; 2. China University of Geosciences (Beijing), School of Earth Sciences and Resources, Beijing 100083, China; 3. Hebei Key Laboratory of Groundwater Remediation, Shijiazhuang 050061, China)

Abstract: Groundwater resources play an important role in urban water supply in China. However, groundwater has been increasingly polluted recently, thus risk assessment of groundwater pollution is indispensable as the risk assessment results could guide the prevention and control of groundwater pollution. In this paper, the development process of the concept of groundwater pollution risk and assessment methods was reviewed as well as the specific steps and contents for the development of assessment system. Based on the currently available theories, the main components of groundwater pollution risk assessment, including the intrinsic vulnerability assessment, stress vulnerability assessment, and groundwater value assessment, were demonstrated and summarized, and the verification methods of groundwater pollution risk assessment were also introduced. Finally, the existing problems in the current groundwater pollution risk assessment research were discussed from the perspectives of model applicability, data comprehensiveness, timeliness of the results, and rationality of the factors. In addition, some directional suggestions were proposed for further research.

Key words: groundwater pollution risk; index system; intrinsic vulnerability; stress vulnerability; groundwater value

地下水资源对促进社会经济可持续发展和维持生态平衡起着重要作用。随着工业化和城市化进程的不断加快, 地下水受到人类活动的影响日益加深, 随之出现的地下水污染问题也日趋严重, 并且由于其具有“长期性、复杂性、隐蔽性”特征, 污染一旦发生, 很难得到有效的控制和修复^[1]。为了防止地下水污染, 需要探明人类活动对地下水影响的不确定

性, 而地下水污染风险评价是制定地下水污染防治规划、保护地下水资源的一项重要措施。

1 基本概念

地下水污染风险是指地下水污染事件发生的概率与可能危害后果的乘积^[2], 即:

收稿日期: 2013-09-22 修回日期: 2014-03-20 网络出版时间: 2014-05-07

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2014.03.028.html>

基金项目: 国家自然科学基金项目(41103059); 中国地质大调查项目(1212011220982)

作者简介: 刘凡(1988-)男, 河北石家庄人, 硕士研究生, 主要从事地下水环境研究。E-mail: liufanhappy@163.com

通讯作者: 黄冠星(1981-)男, 浙江温岭人, 副研究员, 博士, 主要从事环境地球化学方面的研究。E-mail: huangguanying2004@126.com

$$R = P \times D \quad (1)$$

式中: R 为风险水平(值); P 为地下水污染事件发生概率(或机率); D 为事件发生后可能危害后果。

评价终点或受害对象被称作风险受体。根据风险受体的不同,地下水污染风险评价主要分为三类:基于生态环境的地下水生态风险评价、基于人类健康的地下水健康风险评价、基于地下水功能的地下水污染风险评价^[3]。

地下水污染风险综合考虑了含水层脆弱性、人类活动对地下水产生的污染负荷(包括污染物的类型、污染途径和污染的辐射能力),以及地下水遭受污染之后价值功能的变化。早期的污染风险评价主要是将土地利用情况跟脆弱性评价叠加。随着风险灾害理论的引入,污染风险也出现了不同定义模式,见表 1。

表 1 地下水污染风险代表性定义模式

| 地下水污染风险定义模式 | 提出者 |
|--|------------------------|
| 含水层中地下水由于其上人类活动而遭受污染到不可接受水平的可能性,是含水层污染脆弱性与人类活动造成的污染负荷之间相互作用的结果 | Morris ^[4] |
| 地下水污染的概率与风险受体的预期损害的乘积 | Civital ^[5] |
| 地下水污染的概率与污染后果之乘积 | 周效仰 ^[6] |
| 地下水系统遭受污染的脆弱性及其预期损害评估的积函数 | 张丽君 ^[7] |

2 地下水污染风险评价体系

由于地下水污染风险具有多种定义模式,因此,在地下水污染风险评价体系中,相应的计算模式所涉及的指标体系也有多种建立方式。参与评价的各个指标分别对应一个表示其含义的图层,通过 GIS 中图层叠加进行计算。图 1 中土地利用情况、灾害指数和潜在污染源反映的是污染荷载的状况,价值加权污染风险评价中地下水价值体现了污染之后的地下水在功能上的变化。

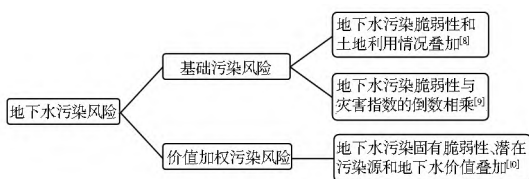


Fig. 1 Structural diagram of the calculation mode of groundwater pollution risk assessment

在价值加权污染风险出现之后,评价体系可总结为“固有脆弱性、外界胁迫脆弱性、地下水价值功能”三个部分。其中,含水层固有脆弱性和外界胁迫脆弱性代表了地下水受到污染的概率,又称作地下水污染风险强度,地下水价值代表了地下水被污染后预期的损害程度^[11]。该体系综合考虑了各指标对整体的影响,具有较高的普遍适用性,在类型上包括孔隙水和岩溶水,在内容上涵盖了无机和有机组分^[12-13]。

2.1 固有脆弱性评价

固有脆弱性的研究始于 20 世纪 60 年代中期,是指在一定的地质与水文地质条件下人类活动所产生的污染物进入

地下水的难易程度^[14]。根据地下水赋存特性的不同主要分为两大类:对于岩溶水区域,相关学者^[15-19]提出了 PI 法、EPIK 法以及欧洲法(OCP)等等;而对于孔隙水区域,相关学者则提出了 DRASTIC 法、GOD 法以及 SINTACS 法等。滕彦国等^[11]对上述各种固有脆弱性评价方法的定义以及具体使用情况和特点做了详细的分类描述。在此基础上深入,针对孔隙水,由于潜水含水层和承压含水层在固有脆弱性上有很大区别,因此在评价过程中被分开对待。在 GOD 模型中,不同类型的地下水被赋以不同的评分值,但由于其评价因子概括性过强以及评价体系过于简单,导致评价结果不够精确。在 DRASTIC 的基础上,钟佐燊^[14]提出了分别评价潜水含水层和承压含水层的 DRTA 和 DLCT 模型,从根本上把潜水含水层和承压含水层分开评价,在承压含水层评价中考虑隔水层的岩性、连续性和厚度。

国内的固有脆弱性评价工作多建立在 DRASTIC 评价模型基础上。但是 DRASTIC 模型在原理设计、计算方法、评价结果上也存在着一些缺陷^[20-23]。据此,学者们提出了很多改进方案,可归纳为三类:评价指标的调整方面、权重的确定方面、评价体系的计算模式方面。

(1) 评价指标方面。评价尺度的不同对评价模型中指标的选择和修改有重要影响。对于小区域尺度,宏观因子的影响往往被弱化,例如地形因子。对城市地区而言,地形因素虽然会影响到固有脆弱性,但由于城市地区地形差异很小,因此,评价时可去掉地形因子^[24]。根据评价区域的实地特征,其他水文地质和地貌等因子同样会对评价结果产生重要影响。在银川平原的脆弱性研究中,多种途径的地下水补给过程均得到考虑,包括大气降水补给、农业灌溉补给和洪水入渗补给^[25]。此外,在计算净补给量因子时,断层的影响同样被考虑在内,距离断层越近,净补给量因子的评分等级越高^[26]。在河网密集的区域,距河尺度经常作为评价因子出现,距河流越近的区域,越易受到污染^[27]。

(2) 权重确定方面。针对 DRASTIC 方法中权重的一成不变性,出现了基于层次分析法(AHP)确定各个参数权重的模型。它将成对的参数进行分析比较,构建出两两因素的比较判断矩阵,求出每一行所有因子的几何平均数,再对其进行归一化即得到各行所对应因子的权重^[21]。

(3) 计算模式方面。含水层脆弱性是由 7 个因子共同决定,在传统的 GIS 图层计算基础上,可以利用样本指标的相对隶属度来完善 DRASTIC 的计算模式,针对选取的指标之间存在关联性、缺乏层次性以及有一定主观性等缺陷,将模糊熵理论引入到评价体系之中,对原有信息和决策者经验判断的主观信息进行量化和综合^[28]。

综上,在固有脆弱性评价中,指标的选取应该根据水文地质条件、地质地貌特征以及自然地理状况等综合决定。随着与各种数学模型的结合,评价结果更加客观可靠。

2.2 外界胁迫脆弱性评价

含水层的外界胁迫脆弱性在很大程度上是指人类活动的影响。地下水污染风险评价中的外界胁迫脆弱性即地表污染源及人类活动作用于地下水环境,并对其造成破坏的一种表征^[29]。

外界胁迫脆弱性可以通过污染荷载或土地利用土地覆盖情况表征^[7],即根据土地利用土地覆盖确定其评分数值,将其作为一个评价因子,赋予相应的评分和权重,与固有脆弱性的最终结果进行叠加^[26,30-32]。该评价模式概括性略高,不能很好地表现地下水在人类活动的影响下受到的具体污染情况。因此,过程分析法被引入到外界胁迫脆弱性评价之中,考虑了“污染源-污染途径-污染受体”这一“污染物进入含水层的过程”。

在污染源识别上,2011年环保部颁布的《环境影响评价导则——地下水环境》(以下简称《导则》)指出,污染源的概化包括排放形式与排放规律两方面。根据污染源的具体情况,排放形式可以简化为点源或面源;排放规律可以简化为连续恒定排放或非连续恒定排放^[31]。对于存在多种不同类型污染源的复杂区域,通过对污染源的合理概化可以很好地解决其评价问题。欧洲的 COST Action 620 项目以列举具体污染源清单的方式定义灾害类型等级,旨在表明人类活动对特定区域的地下水造成的影响。污染源、污染途径和污染受体分别对应潜在污染行为造成的灾害、地下水固有脆弱性和地下水的潜在污染后果^[10,34-35]。

应用过程分析可以更好地反映具体的污染情况。首先根据调查结果初步判定可能的污染源和污染类型(工业活动、农业活动、基础设施发展^[9]),然后确定各污染源或污染物的危害程度和相应的权重。外界胁迫脆弱性指数的计算公式为:

$$HI = H \times Q_n \times R_f \quad (2)$$

式中:HI 为灾害指数即外界胁迫脆弱性指数;H 为权重;Q_n 为污染物的危害程度等级;R_f 为衰减因子。

在该评价体系中,根据污染源或污染物的类别和规模等不同直接赋予相应的危害程度等级数值^[36-37]。该评价模式虽然较为精确,但是具有一定的主观性。其中的危害程度等级指数在不同地区不具有普遍的适用性,因为不同地区的工农业和现代化的发展程度不一致。针对以上评价模型的缺陷,人们又提出了综合考虑了征污染物的污染程度、迁移性、毒性、降解能力^[29,38-40]等因素的评价体系,如式(3)、式(4)所示。

$$S_j = \sum_{i=1}^3 C_{ij} \times Q_{ij} \quad (3)$$

$$C_{ij} = T_{ij} \times W_T + M_{ij} \times W_M + D_{ij} \times W_D \quad (4)$$

式中:S_j 为污染源 j 对地下水环境造成污染能力的定量表征,称为污染源危害性;C_{ij} 为污染源 j 的第 i 种特征污染物 3 种自身属性的定量表征,称为特征污染物的危害性;Q_{ij} 表示风险源 j 排放的第 i 种污染物能够进入地下水环境的数量,称为排放量;T_{ij}、M_{ij}、D_{ij} 分别为特征污染物 i 的毒性量化指标、迁移性量化指标、降解性量化指标;W_T、W_M、W_D 分别为毒性、迁移性、降解性属性的权重值。三种属性权重值由前文提到的层次分析法计算。

事实上,除污染程度、迁移性、毒性、降解能力和污染物排放量等指标之外,污染物的存在形式(密封、部分密封、暴露)同样会影响地下水污染风险水平^[39]。而在小区域或场地或者污染源资料相对比较充足的区域进行胁迫脆弱性评价时,还可从污染途径的角度细化评价模型,不过在评价过程中需要污染源及其对应的污染物详细资料。对于其他区

域,可以用本地的一些特征污染物来代替污染源,不考虑污染源和污染类型,只考虑污染的结果。例如,在常州市的地下水污染评价研究中^[40],以该区域整体的特征污染物 Pb、Cr、Fe 和 Cu 代替各个污染源的危害水平,据此进行了外界胁迫脆弱性的评价。在对各指标危害级别的赋值和相应的权重分配上也可应用模糊分层模型,把人为的推理加入到控制算法之中,使结果更加客观准确^[35]。

外界胁迫脆弱性评价正处在不断建立完善的阶段,其灵活的评价体系可以根据研究区特点做相应调整。此外,不同的水文地质条件可能会对污染途径产生很大的影响,因此还要考虑一些地质环境问题的影响。

2.3 地下水价值功能评价

地下水价值功能的研究旨在将地下水的价值进行量化,为此国内外学者提出不同的地下水价值评价方案。

(1) 基于含水层分类系统的地下水价值评价,即按照含水层的重要性赋相应的价值分级^[41]。该方法将影响地下水价值的因素进行了简单的综合考虑,直接给出各个含水层对应的重要性等级,以此来表征地下水价值。这种方法简洁易用,但主观性较大,考虑不够全面。

(2) 基于水质和水量的地下水价值评价^[40]。计算公式:

$$V = SC \times QC \quad (5)$$

式中:V 表示地下水价值;SC 表示地下水储藏等级;QC 表示地下水质量等级。水质和水量状况是地下水价值评价的主要方面。在此基础上结合其他影响因素,派生出一些不同的评价体系。

(3) 基于原位价值和开采价值构成的地下水价值评价^[42]。其评价体系见图 2。

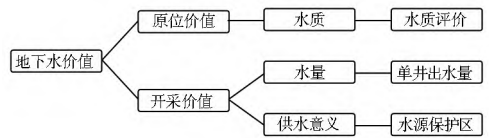


图 2 地下水价值评价体系

Fig. 2 Groundwater value assessment system

(4) 基于生态健康功能和社会经济服务功能的地下水价值评价^[7],其评价体系见图 3。

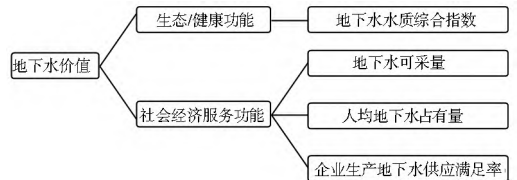


图 3 地下水价值评价体系

Fig. 3 Groundwater value assessment system

地下水价值的评价体系十分灵活,可根据现有资料在一定程度上调整评价指标,但是水质状况始终是地下水价值评价中重要的一部分。在《导则》中,地下水水质影响评价采用标准指数法和污染指数法,若地下水质量现状已超标,或者削减措施在技术上可行而在经济上明显不合理时,认为其不满足地下水环境质量标准(GB/T 14848-93)要求。常规的水质评价方法有:单因子评价法、内梅罗指数法(综合指数法)、

模糊综合评价法、人工神经网络法、集对分析法、物元法等⁴³⁻⁴⁴,具体描述见表2。

表2 水质评价方法

Table 2 Water quality assessment methods

| 水质评价方法 | 描述 |
|---------|---|
| 单因子评价法 | 以水质最差的单项指标所属类别来确定水体综合水质类别 |
| 综合指数法 | 用各组分监测结果与其评价标准之比作为该组分的指数,通过数学方法综合各组分指数,作为水质评价的尺度(例如,内梅罗指数法) |
| 模糊综合评价法 | 以相对隶属度(可用降半梯形法公式计算)和指标权重的模糊运算结果来描述水质类别 |
| 灰色评价法 | 计算水体水质中各因子的实测浓度与各级水质标准的关联度,根据关联度大小确定水体水质的级别 |
| 物元分析法 | 根据各级水质标准建立经典域物元矩阵,各因子的实测浓度建立节域物元矩阵,由此建立各污染指标对不同水质级别标准的关联函数,确定水体水质的级别 |
| 人工神经网络法 | 将水质评价采用的各种指标作为输入变量,水质分类级别为输出变量。根据样本数据得到的输入输出之间的权值矩阵,从而对于未知水质的指标进行分类评价 |

其中,单因子评价法过于简单,未考虑各指标之间的关联;综合指数法在单因子的基础上结合了数学方法,但区分度不高;模糊综合评价法以隶属度来描述模糊的水质界限,可较为准确的反映水质状况。需要指出的是,一般的数学方法并没有将常规指标和毒理指标区分开对待。

3 评价验证

由于选置指数法在因子评分和赋权方面有主观性特点,所以需要建立评价验证模型,以保证评价的精度。至今,已有很多验证方法被提出,较为常用的是硝酸盐浓度验证法和灵敏性分析法(sensitivity analysis)等^[10, 30, 32, 37, 45]。

硝酸盐浓度法是根据样品中的硝酸盐浓度高低跟脆弱性好坏的相关性来验证结果是否准确^[30, 45]。

灵敏性分析法分为两种^[46-47]:地图排除灵敏性分析(map removal sensitivity analysis)和单参量灵敏性分析(single parameter sensitivity)。

地图排除灵敏性分析是从评价体系中移除一个或多个参量,按照公式(6)来计算灵敏性:

$$S_a = \frac{V_i/N - V'_i/n}{V_i} \times 100 \quad (6)$$

式中: S_a 是灵敏性分析指数; V_i 是按照未去除因子的正常方法计算的脆弱性指数; V'_i 是用去除了因子之后的方法计算的脆弱性指数; N 和 n 分别表示计算 V_i 和 V'_i 时实际使用的因子个数。 S_a 值的高低可体现所去除的因子在整个评价体系中的灵敏程度,高 S_a 值对应的因子应该分配较高的初始权重。由于区域水文地质条件的不同,在排除灵敏性分析时,也可能会出现某些因子分配的权重相同,但 S_a 值不同的情况。

单参量灵敏性分析通过评价结果和因子的数值以及权重来计算验证权重,验证公式为:

$$W = \frac{P_r \times P_w}{V_i} \times 100 \quad (7)$$

式中: W 代表单因子的验证权重; P_r 和 P_w 分别代表因子的数值和权重; V_i 表示计算出的脆弱性指数值。同样根据验证权重跟初始权重的对比确定评价体系中特定因子的重要性。

4 结语

当前地下水污染风险评价总结为以下四个难点:评价模型在复杂水文地质条件下的适用性、污染源资料以及污染物危害数据的全面性、污染风险评价工作的时效性、风险要素整合方式的合理性。

(1)评价模型的适用性方面。对于固有脆弱性评价,当前研究多是根据某区域的水文地质特征,选择一种较为合适的模型并在此基础上进行适当修改。例如,华北平原广泛分布第四纪含水层,普遍应用基于DRASTIC的评价模型;欧洲的一些岩溶水区域,多采用OCP或PI评价模型。然而在某些水文地质条件相对复杂的区域,第四纪含水层和岩溶水交替分布,则某一种评价模型很难同时应用于孔隙水和岩溶水区域。因此,当前评价体系在模型的选择上受含水层类型的限制,不能很好地解决水文地质条件复杂区域的评价问题。

(2)相关资料的全面性方面。外界胁迫脆弱性评价在评价体系的建立上具有较高的自由度,相应指标的选择具有较高的灵活性,可根据持有资料的情况做适当调整。因为受污染源资料特别是污染排放量资料的限制,外界胁迫脆弱性研究大多数针对的是污染场地,在较大区域上难以做到详细评价。

(3)污染风险评价工作的时效性方面。在进行基于过程的外界胁迫脆弱性评价时,由于未考虑污染源释放污染物的不规律性,使得污染风险评价不具备时效性。为此,可在评价体系中加入时间尺度,表征污染源释放污染物的特征,但是前提是该区域没有新增的污染源。在地下水污染风险评价体系中,外界胁迫脆弱性通常表示的是人为活动对地下水危害性的估计,由于人为活动的可变性,外界胁迫脆弱性评价也需随之改变,持续排污意味着人为活动一直对地下水环境施加负效应,时间尺度的加入可以从一定程度上体现出该负效应的演化过程。

(4)各风险要素整合方式的合理性方面。当前的地下水污染风险评价方法主要是利用指标叠加的模式,这种方法在精确度和适用性等方面存在一定缺陷。在考虑固有脆弱性、外界胁迫脆弱性和水质的综合影响时,现阶段常用的基于GIS图层叠加的方式只是将这三个因素做了简单的合并,并没有从污染机理上对其内在关系进行整合。因此,完善现有指标叠加体系、从污染机理的角度整合各风险评价要素是值得深入研究的问题。近年来,各国地下水污染风险评价工作还出现一些新方向:在区域尺度上,改进和提出适应各种区域水文地质条件的评价模型;在场地尺度上,从多个角度细化各类污染源及其污染物的危害,并结合其迁移和降解等机理来阐释污染风险。

参考文献(References):

- [1] 王焰新. 地下水污染与防治[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007. (WANG Yan xin. Groundwater Contamination[M]. Beijing: Higher Education Press, 2007. (in Chinese))
- [2] 胡二邦. 环境风险评价实用技术和方法[M]. 中国环境科学出版社, 2000. (HU Er bang. Practical Techniques and Methods of Environmental Risk Assessment[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2000. (in Chinese))
- [3] 田华. 基于过程的地下水污染风险评价[D]. 西安: 西安科技大学, 2011. (TIAN Hua. Risk Assessment of Groundwater Pollution Based on Process[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2011. (in Chinese))
- [4] Morris B, Foster S. Assessment of Groundwater Pollution risk [EB/OL]. <http://www.inweb18.worldbank.org/essd/essd.nsf,2006-05-06>
- [5] Civita M V, M De Maio. Assessing Groundwater Contamination Risk Using ArcInfo via GRID Function [EB/OL]. <http://gis.esri.com/library/userconf/proc97/pro97/to600/pap591/p591.htm,2006-05-02>.
- [6] 周仰效, 李文鹏. 地下水水质监测与评价[J]. 水文地质工程地质, 2008, (1): 1-11. (ZHOU Yang xiao, LI Wen peng. Groundwater Quality Monitoring and Assessment[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2008, 35(1): 1-11. (in Chinese))
- [7] 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, (6): 113-119. (ZHANG Li jun. Review on Groundwater Vulnerability and Risk Assessment[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2006, (6): 113-119. (in Chinese))
- [8] 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(1): 39-57.
- [9] Heike Werz, Heinz HÉtzel. Groundwater Risk Intensity Mapping in Semi Arid Regions Using Optical Remote Sensing Data as an Additional Tool[J]. Hydrogeology Journal, 2007, (15): 1031-1049.
- [10] Junjie Wang, Jiangtao He, Honghan Chen. Assessment of Groundwater Contamination Risk Using Hazard Quantification, a Modified DRASTIC Model and Groundwater Value, Beijing Plain, China[J]. Science of the Total Environment, 2012, 432: 216-226.
- [11] 滕彦国, 苏洁, 翟远征, 等. 地下水污染风险评价的迭置指数法研究综述[J]. 地球科学进展, 2012, 27(10): 1140-1147. (TENG Yan guo, SU Jie, ZHAI Yuan zheng, et al. A Review on the Overlay and Index Method for Groundwater Pollution Risk Assessment[J]. Advance in Earth Science, 2012, 27(10): 1140-1147. (in Chinese))
- [12] 王晓红, 张新钰, 林健. 有机污染场地地下水风险评价指标体系构建的探讨[J]. 地球与环境, 2012, 40(1): 126-132. (WANG Xiao hong, ZHANG Xin yu, LIN Jian. Investigation on the Establishment of Index System for Groundwater Risk Assessment at the Organically Contaminated Site[J]. Earth and Environment, 2012, 40(1): 126-132. (in Chinese))
- [13] 郇托娅, 王金生, 王业耀, 等. 我国地下水污染风险评价方法研究进展[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2012, 48(6): 648-653. (TAN Tu o ya, WANG Jin sheng, WANG Ye yao, et al. Groundwater Risk Assessment in China[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2012, 48(6): 648-653. (in Chinese))
- [14] 钟佐桑. 地下水防污性能评价方法探讨[J]. 地学前缘, 2005, 12(S1): 3-11. (ZHONG Zu o shen. A Discussion of Groundwater Vulnerability Assessment Methods[J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12(S1): 3-11. (in Chinese))
- [15] Aller L, Bennet T, Lehr J H, et al. DRASTIC: a Standardized System for Evaluating Groundwater Potential Using Hydrogeological Settings [M]. Ada (Oklahoma): Environmental Protection Agency, 1985.
- [16] Ibe K M, Nwankwor G I, Onyekuru S O. Assessment of Groundwater Vulnerability and its Application to the Development of Protection Strategy for the Water Supply Aquifer in Owerri, Southeastern Nigeria[J]. Environment Monitoring and Assessment, 2001, 67: 323-360.
- [17] Doerfliger N, Jeannin P Y, Zwahlen F. Water Vulnerability Assessment in Karst Environments: a New Method of Defining Protection Areas Using a Multi Attribute Approach and GIS Tools (EPIK Method) [J]. Environmental Geology, 1999, 39(2): 165-176.
- [18] Daly D, Dassargues A, Drew D, et al. Main Concepts of the "European Approach" to Karst-Groundwater Vulnerability Assessment and Mapping [J]. Hydrogeology Journal, 2002, 10: 340-345.
- [19] Goldscheider N, Klute M, Sturm S, et al. The PI Method: a GIS based Approach to Mapping Groundwater Vulnerability with Special Consideration of Karst Aquifers[J]. Z Angew Geol, 2000, 46(3): 157-166.
- [20] 张股钦, 刘俊民, 尹丽娜. 地下水脆弱性评价研究进展[J]. 灌溉排水学报. 2012, 31(5): 127-131. (ZHANG Yu qin, LIU Jun min, YIN Li na. Research Progress on Groundwater Vulnerability Assessment[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2012, 31(5): 127-131. (in Chinese))
- [21] 范琦, 王贵玲, 蔺文静, 等. 地下水脆弱性评价方法的探讨及实例[J]. 水利学报, 2007, 38(5): 601-605. (FAN Qi, WANG Gui ling, LIN Wen jing, et al. New Method for Evaluating the Vulnerability of Groundwater[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(5): 601-605. (in Chinese))
- [22] 李绍飞, 孙书洪, 王勇. 基于 DRASTIC 的含水层脆弱性模糊评价方法与应用[J]. 水文地质工程地质. 2008, (3): 112-117. (LI Shao fei, SUN Shu hong, WANG Yong. Application of the Method for Fuzzy Assessment of Aquifer Vulnerability Based on DRASTIC[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2008, (3): 112-117. (in Chinese))
- [23] 鄂建, 孙爱荣, 钟新永. DRASTIC 模型的缺陷与改进方法探讨[J]. 水文地质工程地质. 2010, 37(1): 102-107. (E Jian, SUN Ai rong, ZHONG Xin yong. Inadequacies of DRASTIC Model and Discussion of Improvement[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2010, 37(1): 102-107. (in Chinese))
- [24] 刘香, 王洁, 邵传青, 等. 城市地下水脆弱性评价方法及应用[J]. 地下水, 2007, 29(5): 90-92. (LIU Xiang, WANG Jie,

- SHAO Chuangqing, et al. Groundwater Vulnerability Assessment in Urban Area[J]. Groundwater, 2007, 29(5): 90-92. (in Chinese))
- [25] Qian H, Li P, Howard K W F, et al. Assessment of Groundwater Vulnerability in the Yinchuan Plain, Northwest China Using OREADIC[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2012, 184(6): 3613-3628.
- [26] Saidi S, Bourri S, Dhia H B. Groundwater Vulnerability and Risk Mapping of the Hajeb elmeia Aquifer (Central Tunisia) Using a GIS-based DRASTIC Model [J]. Environmental Earth Sciences, 2010, 59(7): 1579-1588.
- [27] 杨莎, 孔维琳, 董磊, 等. 滇池流域地下水污染风险评价及其防控研究[J]. 环境污染与防治, 2012, 34(11): 34-39. (YANG Sha, KONG Weilin, DONG Lei, et al. Research on Groundwater Pollution Risk Assessment and its Controls in Dianchi Lake Watershed [J]. Environmental Pollution & Control, 2012, 34(11): 34-39. (in Chinese))
- [28] 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. (ZHANG Baoxiang, WAN Li, YU Cheng, et al. Fuzzy Optimization Assessment of DRASTIC Groundwater Vulnerability Based on Entropy Weight and GIS [J]. Geoscience, 2009, 23(1): 150-156. (in Chinese))
- [29] 王俊杰, 何江涛, 陆燕, 等. 地下水污染风险评价中特征污染物量化方法探讨[J]. 环境科学, 2012, 33(3): 771-776. (WANG Junjie, HE Jiangtao, LU Yan, et al. Quantitative Method of Representative Contaminants in Groundwater Pollution Risk Assessment [J]. Environmental Science, 2012, 33(3): 771-776. (in Chinese))
- [30] Dimitriou E, Zacharias I. Groundwater vulnerability and risk mapping in a geologically complex area by using stable isotopes, remote sensing and GIS techniques[J]. Environmental Geology, 2006, 51(2): 309-323.
- [31] Brahim F B, Khanfir H, Bourri S. Groundwater Vulnerability and Risk Mapping of the Northern Sfax Aquifer, Tunisia [J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2012, 37(5): 1405-1421.
- [32] Ahmad A H Hanbali, Akihiko Kondoh. Groundwater Vulnerability Assessment and Evaluation of Human Activity Impact (HAI) within the Dead Sea Groundwater Basin, Jordan [J]. Hydrogeology Journal, 2008, 16: 499-510.
- [33] HJ 610-2011, 环境影响评价技术导则——地下水环境[S]. (HJ 610-2011, Guidelines for Environmental Impact Assessment Groundwater Environment [S]. (in Chinese))
- [34] Zwahlen F. Vulnerability and Risk Mapping for the Protection of Carbonate (karst) Aquifers, Final Report (COST Action 620). European Commission, Directorate General XII Science [J]. Research and Development, Brussels, 2004, 297.
- [35] 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): 277-292.
- [36] De Ketelaere, D., HÉtzel, H., Neukum, et al. Hazard Analysis and Mapping. In: Zwahlen, F. (Ed.), COST Action 620: Vulnerability and Risk Mapping for the Protection of Carbonate (karst) Aquifers. Final Report [R]. Office of the Official Publications of the European Communities, Brussels, Belgium, 2004, 297.
- [37] Saidi S, Bourri S, Ben Dhia H, et al. Assessment of Groundwater Risk Using Intrinsic Vulnerability and Hazard Mapping: Application to Souassi Aquifer, Tunisian Sahel [J]. Agricultural Water Management, 2011, 98: 167-182.
- [38] 陆燕, 何江涛, 王俊杰, 等. 北京平原区地下水污染源识别与危害性分级[J]. 环境科学, 2012, 33(5): 1526-1531. (LU Yan, HE Jiangtao, WANG Junjie, et al. Groundwater Pollution Sources Identification and Grading in Beijing Plain [J]. Environmental Science, 2012, 33(5): 1526-1531. (in Chinese))
- [39] 申利娜, 李广贺. 地下水污染风险区划方法研究[J]. 环境科学, 2010, 31(4): 918-923. (SHEN Lina, LI Guanghe. Groundwater Pollution Risk Mapping Method [J]. Environmental Science, 2010, 31(4): 918-923. (in Chinese))
- [40] 杨彦, 于云江, 王宗庆, 等. 区域地下水污染风险评价方法研究[J]. 环境科学, 2013, 34(2): 653-661. (YANG Yan, YU Yunjiang, WANG Zongqing, et al. Study on the Risk Assessment Method of Regional Groundwater Pollution [J]. Environmental Science, 2013, 34(2): 653-661. (in Chinese))
- [41] Parsons R. A South Africa Aquifer System Management Classification [M]. Pretoria, South Africa: Water Research Commission, Report KV77/95, 1995: 31.
- [42] 江剑, 董殿伟, 杨冠宁, 等. 北京市海淀区地下水污染风险性评价[J]. 分析研究, 2010, 5(2): 14-18. (JIANG Jian, DONG Diarwei, YANG Guanming, et al. Risk Assessment of Groundwater Pollution of Haidian District of Beijing [J]. Analysis and Research, 2010, 5(2): 14-18. (in Chinese))
- [43] 任淑霞, 马涛, 李慧赞. 模糊可变评价模型在地下水水质评价中的应用[J]. 南水北调与水利科技, 2011, 9(4): 105-108. (REN Shuxia, MA Tao, LI Huiyan. Application of the Fuzzy Variable Set Model in Groundwater Quality Assessment [J]. South-to-North Water Diversion and Water Science & Technology, 2011, 9(4): 105-108. (in Chinese))
- [44] 白玉娟, 殷国栋. 地下水水质评价方法与地下水研究进展[J]. 水资源与水工程学报, 2010, 21(3): 115-123. (BAI Yujuan, YIN Guodong. Evaluation Method and Research Progress for Groundwater Quality [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2010, 21(3): 115-123. (in Chinese))
- [45] Boughriba M, Barkaoui A, Zarhlou Y, et al. Groundwater Vulnerability and Risk Mapping of the Angad Transboundary Aquifer Using DRASTIC Index Method in GIS Environment [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2010, 3(2): 207-220.
- [46] Lodwick W A, Monson W, Svoboda L. Attribute Error and Sensitivity Analysis of Map Operations in Geographical Information Systems: Suitability Analysis [J]. International Journal of Geographical Information System, 1990, 4(4): 413-428.
- [47] Napolitano P, Fabbri A G. Single parameter Sensitivity Analysis for Aquifer Vulnerability Assessment Using DRASTIC and SINTACS [J]. IAHS Publications Series of Proceedings and Reports Intern Assoc Hydrological Sciences, 1996, 235: 559-566.