

地下水污染风险评价研究进展

孙才志, 陈相涛, 陈雪姣, 郑德凤

(辽宁师范大学城市与环境学院, 辽宁 大连 116029)

摘要: 鉴于地下水污染风险评价是地下水环境风险评估的重要组成部分,也是地下水污染防治的重要环节,为全面了解地下水污染风险评价的研究现状,在综合国内外文献和资料的基础上,对地下水污染风险评价的相关研究成果进行总结与评述。首先,对地下水污染风险的概念进行回顾,并就其属性特征与评价历程进行概述。其次,重点介绍了地下水污染风险评价的主要研究内容与具体评价方法。最后,分析了当前地下水污染风险评价中存在的问题,指出未来需要在地下水污染风险评价的理论体系、地下水污染风险评估的不确定性、地下水污染风险区划以及风险决策管理等方面加强研究。

关键词: 地下水污染风险;指数叠加法;过程模拟法;不确定性分析;风险区划

中图分类号: X523 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2015)05-0152-10

Recent advances in groundwater contamination risk assessment//SUN Caizhi, CHEN Xiangtao, CHEN Xuejiao, ZHENG Defeng (College of Urban and Environmental Science, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China)

Abstract: Groundwater contamination risk assessment is not only an important component of groundwater environmental risk assessment, but also a significant link in prevention and control of groundwater contamination. In order to provide a thorough grasp of the current research status of groundwater contamination risk assessment, this paper summarizes and discusses relevant research achievements in groundwater contamination risk assessment based on many domestic and foreign publications and data. The paper first reviews the concept of groundwater contamination risk and outlines its characteristics and assessment process, then elaborates on the main research contents and specific methods of groundwater contamination risk assessment, and finally analyzes the existing shortcomings and points out that several research fields of groundwater contamination risk assessment should be emphasized in the future, such as the theoretical system of groundwater contamination risk, uncertainty analysis of groundwater contamination risk assessment, contamination risk division, and contamination risk management.

Key words: groundwater contamination risk; exponent superposition method; process simulation method; uncertainty analysis; risk division

地下水资源因其稳定的供水量,良好的水质状况和较强的调蓄能力,已成为城乡居民生活、工矿业生产和农业灌溉的重要水源之一。目前我国地下水开采总量占供水总量的 18%,近 30 年来增长近 1 倍,其中北方地区 65% 的生活用水、50% 的工业用水和 33% 的农业灌溉用水来自地下水^[1]。随着地下水开采量的增加,我国地下水污染问题也日益突出,地下水污染对环境和经济发展的影响也日趋严重,《2014 环境状况公报》数据显示:2014 年全国 202 个城市的 4 896 个地下水水质监测点中较差级的监测点所占比例为 45.4%,极差级的监测点所占比例为 16.1%。主要超标指标为溶解性总固体、铁、锰、总硬度、“三氮”(亚硝酸盐氮、硝酸盐氮和氨

氮)、氟化物、硫酸盐等,个别监测点有砷、铅、六价铬、镉等重(类)金属超标现象,对人类的身体健康构成极大威胁。目前我国地下水污染的基本态势是:由单一污染向复合污染转变,由点状、条带状向面状扩散,由浅层向深层渗透,由城市向周边蔓延^[1-2]。

地下水广泛存在于岩土孔隙中,运移过程缓慢,这也决定了地下水污染具有隐蔽性与难以治理的特点^[3]。地下水污染风险评估可利用有效的数据和科学的判断来确定地下水污染风险的大小,并提供相应的风险决策方案,这不仅是地下水资源保护与污染防治的前提,更是地下水污染防治的重要环节。笔者在对地下水污染风险评估领域大量研究成果进行归纳整理与分析的基础上,就其研究历程、评价内容

与方法、最新成果、未来可能发展方向等方面进行了较全面的评述,可为相关研究、生产与教学提供参考。

1 地下水污染风险概念及属性特征

风险表示在特定环境下一定时间内某种损失或破坏发生的可能性,由风险因素、风险受体、风险事故、风险损失组成^[4]。当前较为通用的风险定义为:风险 R 是事故发生概率 P 与事故造成的环境(或健康)后果 C 的乘积,即: $R=PC$ 。地下水污染风险虽然没有一个公认的概念体系,但经过国内外学者的不断探索,其概念逐渐变得全面、科学与系统。自 20 世纪 60 年代法国学者 Margat 提出地下水脆弱性以来一直处于不断发展中^[5-6],经历了由考虑水文地质内部要素和气候条件的地下水本质脆弱性,到考虑人类活动产生外部污染源与污染行为的特殊脆弱性,再到引入灾害风险理论后考虑地下水污染损失的地下水污染风险评价历程。这期间,胡二邦^[7]将地下水污染风险定义为由自发的自然原因或人类活动引起,通过地下水环境介质传播,能对人类社会及环境产生破坏、损害等不良影响后果事件的发生概率及其后果。Morris 等^[8]指出地下水污染风险是指含水层中地下水由于其上人类活动导致遭受污染达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。周仰效等^[9]用地下水污染的概率与污染后果的乘积来表示污染风险。

风险具有客观性、不确定性和发展性。因此,地下水污染风险的属性特征应包括:①自然属性:地下水系统自身对外界污染胁迫具有一定的抵御与恢复能力,当污染物浓度未超出地下水系统可接纳范围时,可通过自身调节恢复到平衡状态,其恢复与调节能力取决于含水层自然条件^[10]。②社会属性:地下水污染风险的产生受人类活动的广泛影响。人类不合理的生产与生活方式,产生了大量污染物,也破坏了地下水环境,改变入渗、补给、径流等地下水循环过程。③不确定性:地下水污染风险涉及多个因素与多个变量,它的不确定性是地下水系统客观随机特性的表现,包括系统变量的不均一性以及风险发生时间与空间的不确定性。④动态性:地下水系统是一个巨大的动态开放系统,系统环境处于不断更新中。外界胁迫因素与地下水系统的动态性使得地下水的污染风险呈现出动态性特征。

2 地下水污染风险评价与研究的主要内容

由地下水污染风险概念可知,地下水污染风险评价应该包括发生污染事故的概率与污染后果损害

两个方面。也就是说地下水污染风险评价过程不仅要考虑含水系统抵御污染的能力以及人类活动产生的外界污染载荷的影响,还需将地下水价值功能的变化以及外界污染物在土壤-地下水系统中的迁移、衰减动态纳入考虑范畴^[11]。目前地下水污染风险评价与研究的主要内容包括:地下水本质脆弱性评价、特殊脆弱性评价、外界污染物种类与危险度识别、地下水价值功能评价 4 个方面。

2.1 本质脆弱性评价

本质脆弱性又称为固有脆弱性,是地下水系统自身对外界环境变化适应能力的表现,强调区域含水层的自然属性,具有较高的稳定性特征。本质脆弱性的大小是由地下水位埋深、渗流区介质、含水层水力传导系数等多因素决定的。它反映了外界污染物抵达含水层的速度以及地下水环境消纳污染物的能力。目前国内外地下水脆弱性的评价模型主要有 DRASTIC、GOD、AVI、SEEPAGE、SINTACS、EPIK 等,这些模型所考虑的参数与评价侧重点基本相同,但都有各自的优势^[12]。Gogu 等^[13]用 EPIK 等上述 5 种模型对比利时 Condruz 地区的含水层脆弱性进行了评价与比较,认为物理方法可以用来检验评价结果的可靠性。滕彦国等^[14]也对上述地下水本质脆弱性的评价模型做了较为详尽的论述。目前国内外评价本质脆弱性广泛采用 1985 年美国环境保护署(USEPA)建立的 DRASTIC 模型^[15]。DRASTIC 模型包含 7 个指标,计算公式为

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

式中: V_i 为本质脆弱性指数; D 为地下水埋深; R 为含水层净补给量; A 为含水层介质类型; S 为土壤介质; T 为地形坡度; I 为包气带影响; C 为水力传导系数; 下标 r 和 w 分别表示各个指标的评级和权重。

通过模型加权得到本质脆弱性指数,进一步进行脆弱性指数的大小分级。由于 DRASTIC 模型在评价原理、方法与结果上有不同程度的缺陷^[16],因此众多学者在后续研究与应用中对此模型进行了改进。Thirumalaivasan 等^[17]利用 GIS 的建模功能,创建了 AHP-DRASTIC 软件包,改进了参数的权重与评级。Panagopoulos 等^[18]依据研究区的特点在简化的 DRASTIC 模型基础上添加土地利用参数,通过硝酸盐检验取得了比传统 DRASTIC 模型更为准确的结果。王国利等^[19]将多目标模糊模式识别模型引入到含水层本质脆弱性评价中,较传统 DRASTIC 模型取得了更准确的结果。孟宪萌等^[20]将熵值法引入 DRASTIC 模型中提升了权重的合理性。Nura 等^[21]将 DRASTIC 模型的各个指标进行了灵敏度分

析,用灵敏度分析的有效权重来改进 DRASTIC 模型,为在小区域范围的地下水脆弱性评价提供了参考。

对地下水本质脆弱性的研究,形成了最初地下水污染风险评价的雏形,其本质是将地下水环境的自然属性与区域的水文地质、土地利用因素、区域气候条件等因素进行简单的复合叠加。该阶段的评价方法基本以基于指数叠加法的线性评价模型为主,掩盖了许多污染细节与问题,不能称为真正意义上的地下水污染风险评价。

2.2 特殊脆弱性评价

20 世纪 80 年代末期国内外学者意识到地下水污染风险是地下水的本质脆弱性与外界污染源共同作用的结果。地下水脆弱性较高的区域如果没有明显的外界污染负荷则不存在污染风险,而即便在脆弱性较低但污染负荷高的地区仍存在较大的污染风险^[22]。美国国家科学研究委员会于 1993 年定义地下水脆弱性为污染物到达最上层含水层之上某特定位置的倾向性与可能性。此时地下水污染风险评价将人类活动与外界污染物纳入考虑范畴,形成了地下水污染风险评价的特殊脆弱性研究。地下水特殊脆弱性表征了人类活动产生的污染源以及土地资源开发过程中对地下水天然流场的影响,具有动态性与可控性,是地下水受到外界干扰时敏感性的体现,它的大小由污染源类型、规模以及污染物在地下水环境中的迁移转化规律共同决定^[23]。

国内外对地下水特殊脆弱性的研究多以土地利用类型和人类活动为切入点。Al-Adamat 等^[24]将土地利用参数添加到 DRASTIC 模型中,加强了脆弱性评价中量化数据的补充,并用地下水中硝酸盐含量做了验证。孙才志等^[12]通过加权叠加模型,对下辽河平原地下水系统进行了本质脆弱性与特殊脆弱性评价,分析了脆弱性的空间分异规律及其形成机理。Nerantzis 等^[25]改进了 DRASTIC 模型的指标构成,用 LOSW-PN 法计算得到的硝酸盐流失量代替土壤介质类型 S ,用 LOSW-PW 法计算得到的水的渗透量代替含水层净补给量 R ,在此基础上提出了 DRASTIC-PA 与 DRASTIC-PNA 模型,结果表明这

2 种模型在含硝酸盐污染的多孔介质含水层特殊脆弱性评价中有较好的适应性。

特殊脆弱性评价的过程多是将外界污染源以及土地利用类型作为评价指数进行量化评分,并赋予权重,然后与本质脆弱性的最终结果进行叠加^[26-29]。它是在本质脆弱性评价研究的基础上发展起来的,是地下水污染风险评价过渡阶段的重要组成部分。

2.3 外界污染源种类与危险度识别

外界污染物种类与危险度识别建立在污染源类型、分布、负荷与迁移研究的基础上。目前地下水外界污染源种类与危险度的识别主要从定性与定量 2 个角度入手(表 1)。Zaporozec^[30]将污染物分为自然、农村、生活、工矿等 7 类,并依据经验将污染源风险划分为高、中、低 3 个等级。Foster 等^[31]根据数据获取的容易度与操作度提出了定性与定量相结合的 POSH 法,利用污染源及其产生的载荷进行分级。此外还有详细分级法,它需要通过广泛的室外调查与监测来获取丰富的污染源信息,建立污染物迁移与污染源强度矩阵来划分外界污染等级。

国内已开展了大量地下水外界污染源研究工作,研究成果包含外界污染源的类型、胁迫度等级和空间分布等。2011 年环境保护部发布的 HJ610—2011《环境影响评价导则—地下水环境》中对地下水污染源的分类和重点污染源的排放形式与规律做了明确阐述。陆燕等^[22]筛选工业等 6 个地下水污染源,叠加污染物特征属性与排放量,以定量的方式得出了北京市地下水污染源的分级与空间分布特征。金爱芳等^[32]构建了多因素耦合的风险源识别模型,用该模型进行了风险源的评价与分级,其成果对地下水污染预防以及污染源的监管有重要意义。王俊杰等^[33]在对地下水污染源进行解析的基础上,提出了基于特征污染物及其排放量的量化体系,一定程度上解决了外界胁迫脆弱性评价难以量化的问题。

2.4 地下水价值功能评价

20 世纪 80 年代,Varner^[34]提出了“风险 = 脆弱性 × 灾害性”的风险评价模式,随后该模式逐渐被引入地下水污染风险评价系统中。由此地下水污染风

表 1 地下水污染风险外界污染源识别方法

评价方法	简介	评价结果	优缺点
简单评判法	将污染物分为自然、农村、生活、工矿等 7 类,依据经验将污染源风险划分为高、中、低 3 个等级	定性	简单方便,需要数据少,但主观性强,缺乏全面性认知与区域间的对比
详细分级法	建立污染物迁移矩阵与污染源强度矩阵,将污染源风险划分为高、中、低 3 个等级	定量	较为客观且分类精度较高,但所需数据量大,需深入调查获取污染源详细信息
DCI 法	将污染源分为畜牧业、农业、工业及其他类型,依据行业规模与类型等条件将污染源划分为 9 个级别,级别越高,危险越大	定性	是较为清晰的分类与识别方法,计算简单方便,但缺乏区域对比
POSH 法	利用污染源及其所产生的污染负荷划分胁迫等级	定性、定量	数据需求量少,但不同污染源缺少对比性

险进入高级阶段,在考虑地下水污染事件发生可能性的同时,也注重了污染风险受体——地下水的灾害损失研究,地下水价值功能的变化被纳入到地下水污染风险评价中。此时用含水层的本质脆弱性和外界污染载荷的侵害来表征地下水系统发生污染风险的概率;用地下水价值功能的变化来表征地下水系统发生污染风险的损害。

地下水价值功能评价方法较多,但研究方法多是将地下水的价值或功能进行量化,可概括分为以下2种:

a. 基于地下水水质状况与地下水存储量的地下水价值评价方法,计算公式为

$$V = G_0 G_s \quad (2)$$

式中: V 为地下水价值量; G_0 为地下水水质状况; G_s 为地下水存储量。

Wang等^[35]利用式(2)对北京平原区地下水价值功能进行了测算与分级。江剑等^[36]从地下水水量、地下水水质和供水意义3个方面评价了北京市海淀区地下水价值功能。

b. 基于开采价值与原位价值的评价。开采价值突出地下水的使用性与经济意义,包括各种人类活动所需要的地下水;原位价值包括地下水的生态与调节价值,以及维持地下水系统稳定与抗干扰的价值^[14]。地下水开采价值的研究早于原位价值的研究。鉴于地下水价值功能较难量化的问题,1997年Civita等^[37]指出地下水价值应该与地下水的供水区及供给人口相联系。Daniela^[38]在Civita等研究的基础上改进了地下水价值评价的指标与分级,对意大利皮亚纳东部地下水污染风险与编图开展了研究。张丽君^[23]从地下水的生态服务功能、健康服务功能及其社会经济服务功能方面建立了地下水价值功能评价体系。张保祥等^[39]从开采价值与原位价值2个方面选取了人口密度等5个指标,采用加权综合法计算了龙口市平原区地下水价值功能。

对地下水价值功能的测算与评价,是灾害风险理论在地下水污染风险评价中的重要应用,增强了评价体系的系统性与全面性。但地下水的价值功能评价仍具有较大难度,地下水价值功能是地下水重

要性的体现,它需要大量的数据资料作为支撑。另外,地下水的原位价值多基于生态意义,存在很大模糊性,较难量化。

3 地下水污染风险评价方法

评价方法的选择,需要充分考虑区域资料与数据的详尽程度、风险评价模型的选取以及评价结果的可靠程度。评价方法的确定是风险研究的核心内容之一,直接关系到风险评价结果的可信度。当前地下水污染风险的评价方法较多,包括指数叠加法,污染物复杂物理、化学和生物过程模拟法,不确定性分析法以及数学统计方法,前3种方法应用最为普遍。

3.1 指数叠加法

指数叠加法通过建立指标体系,按照划分的指标分级系统来计算风险指数的大小,然后再对风险指数进行分级,常应用于大区域范围的地下水污染风险评价(表2)。指数叠加法通过将表征地下水自身防污性能的本质脆弱性指数、表征外界污染源对地下水施加压力的外界胁迫性指数进行加权叠加,以此来获取地下水污染的可能性;然后再与表征地下水重要性的地下水价值功能指数进行叠加来获取研究区的地下水污染风险指数,并利用ArcGIS等软件的空间分析功能与可视化技术进行计算与制图表达^[38,40-42]。除此之外,近些年建立在水文地质条件基础上的GALDIT模型已用于受海水入侵威胁的沿海地区地下水脆弱性评价中^[43-44],其本质仍然是指数叠加法的应用。

指数叠加法具有评价过程操作简单、指标数据容易获取、评价成本较低的优势^[45]。但其评价模型多以线性模型为主,无论是在评价指标选取、等级划分还是最后污染风险大小的确定上均有较强的主观性。指数叠加法的评价结果概括性较强,忽略了外界污染物的具体迁移与衰减过程,不适合对单个污染源污染的风险评价。此外,指数叠加法在指标选取的过程中要注意指标间的因果联系,避免指标选取的重复性。

3.2 污染物复杂物理、化学和生物过程模拟法

过程模拟法能弥补指数叠加法在污染场地和单

表2 地下水污染风险指数叠加的主要方法

叠加方法	操作步骤	优缺点
Overlay	利用空间统计分析工具 Overlay 对地下水本质脆弱性、特殊脆弱性、价值性进行叠加;根据重要性逐一赋予权重,最终得到地下水污染风险评价分区图	便于对指标数据的管理,但缺少各图层间的过程关联
Map Algebra	将指标图层栅格化,用 Map Algebra 方法计算每个栅格图层的像元值,从而确定地下水污染风险大小	与 Overlay 法基本相同,但评价精度受像元大小的影响较大
矩阵法	将地下水本质脆弱性图和价值性图叠加生成地下水保护紧迫性图;用矩阵法将地下水保护紧迫性图和地下水污染等级图进行矢量叠加得到地下水污染风险性图,并根据评价结果将污染风险划分等级	该方法清晰明确,但存在如何分配各部分权重的问题

个污染源风险评价上的不足。过程模拟法事先假定风险表征,然后以反演的方式反推风险的等级^[46]。该方法将地下水流动状况与污染物进入含水层的整个运移衰减过程进行模拟,可以预测随时间与外界条件变化下,外界潜在污染物对地下水的可能影响,最后依据污染物的浓度分布和影响范围来确定风险等级。该方法能定量描述地下水的污染水平,可用于污染场地的风险评价、新建场地的优化选址和设计参数的确定。

爱尔兰地质调查局认为地下水污染风险评价应考虑含水层脆弱性,地表潜在污染物的类型、分布和毒性以及可能造成的环境受体的损失^[47],由此强调了污染过程模拟在地下水污染风险中的重要性。基于过程模拟法的地下水污染风险评价,要求有数学模型与仿真模型的支撑,通过建立评价数学公式,将各评价因子定量计算后,得出区域地下水的污染风险综合指数。

过程模拟法的实质是地下水数值模拟的一部分,Modflow 是美国地质调查局(USGS)开发的较早的地下水模拟软件,主要应用于孔隙介质中三维有限差分地下水流数值模拟。之后出现了 FEFLOW、HYDRUS、GMS、Groundwater Vistas、Visual Modflow、Geostudio 等众多地下水数值模拟软件与模型,其中三维有限差分地下水流模型 Modflow 及相关溶质迁移模型 MT3DMS,已成为公认的标准地下水流动与污染物迁移模型^[48-49]。Cheng 等^[50]建立了铵态氮与硝态氮在台湾浊水溪冲积扇地下水中的迁移转化模型,对当地地下水污染风险进行了研究。Nobre 等^[51]将数值模型和综合模糊法相结合对污染场地进行评价,同时也对污染源的毒性、迁移性和降解过程进行了研究。Devi 等^[52]建立了地下水流动模型,用来模拟 Mauritius 南部含水层的地下水流动特征以及预测外界污染物在地下水中的运移路线。刘东旭等^[53]基于 Modflow 模型建立了饱和带水流运动及核素迁移数值模型,对关注核素³H 和⁹⁰Sr 在地下水中的迁移趋势和环境影响进行预测评价,研究表明:³H 迁移扩散速度快且浓度衰减性小,对下游远场地下水危害性大;⁹⁰Sr 迁移扩散速度相对较慢,污染范围限定在污染源 200m 左右。针对地下水污染的数值模拟及污染预测问题,徐铁兵等^[48]建立了某项目厂区及邻近区域地下水的渗流模型与溶质运移模型,开展了地下水污染模拟预测以及地下水中 Cr⁶⁺的浓度变化研究。

此外,我国学者在地下水污染识别^[54]、模拟地下水石油污染风险^[55]、农村生活非点源污染负荷量估算^[56]、解析法预测污染物迁移的空间与时间过

程^[57]等方面也做了大量的研究,对进一步开展地下水污染风险评价提供了丰富的理论与实践支持。

数学模型与仿真模型的应用使得地下水污染风险评价得以量化与系统化,评价结果也更加贴近实际,但地下水系统是一个复杂的动态开放系统,系统的内外部特征与形成机制仍具有很强的不确定性,建立模拟模型所依赖的水文地质数据与物理参数的可获取性较差。另外,受人类认知范围的限制以及监测活动时空条件的约束,模拟过程仍具有很强的模糊性,很多情况下仍然不能反映出真实的风险水平。此外过程模拟法没有与灾害理论结合起来,多是研究污染物的时空分布特征,不能体现真正的风险内涵。

3.3 不确定性分析法

风险评价的实质就是不确定性分析,没有不确定性,就没有风险,在整个分析过程中要求对不确定性因素进行定性和定量研究,并在评价结果中体现风险程度,使评价结果更加科学^[58]。地下水系统是一个巨大的动态开放系统,系统内外部结构复杂,系统本身也具有很强的不确定性。束龙仓等^[59]将地下水资源评价中的不确定性分为客观不确定性与主观不确定性 2 类。吴吉春等^[60]将地下水模拟不确定性分为参数不确定性、模型不确定性和资料不确定性 3 类。文献^[59-60]尽管分类不同,但在不确定性因素的具体种类上基本一致。Verma 等^[61]也对地下水溶质运移中的不确定性进行了类似的分类。随着不确定性理论的建立与发展,不确定性的相关理论也逐渐引入到地下水污染风险评价领域中。目前该领域进行不确定性研究的主要方法可以归为以下 3 类。

a. 基于概率理论的随机模型方法。如 Lo 等^[62]采用随机模拟技术评价垃圾填埋场的含水层污染概率。Copty 等^[63]采用蒙特卡罗方法与贝叶斯耦合方法评价了地下水污染恢复方案评价中的不确定性。Ma 等^[64]采用蒙特卡罗方法模拟了地下水污染对人体健康的影响,并通过秩相关系数进行灵敏度分析以确定主要影响参数,最终确定污染处理方案。Aminreza 等^[65]用蒙特卡罗方法和正态分布函数来确定硝酸盐参数的不确定性与农业区地下水污染的可能性。梁婕^[66]采用高斯随机场模型和序贯高斯模型来刻画地下水渗透系数的随机性,同时采用贝叶斯定理推断不确定性参数的后验概率,基于这 2 种不确定性因素,研究含水层中溶质运移问题。王伟明等^[67]采用概率配点法在流域尺度上进行非点源污染不确定性分析。史良胜等^[68]利用随机配点模型和多项式抽样技术,通过与传统随机模型进

行对比,说明随机配点模型具有明显的效率优势和优越的收敛速度。李世峰等^[69]在用贝叶斯方法对土壤渗透系数进行处理的基础上,用蒙特卡罗方法模拟了非饱和土壤渗透系数的不确定性,为后续变异条件下包气带渗透系数对污染物的运移研究提供了参考。

b. 基于模糊集理论的模糊数学方法。Uricchio等^[70]将地下水污染风险评价看成模糊决策过程,利用模糊推理技术进行地下水污染风险评价。Verma等^[61]将地下水运移模型参数模糊化,模拟了农药在包气带中的运移规律。Yang等^[71]采用模糊优化与模糊回归模型进行污染含水层修复的优化设计。李绍先等^[72]建立了基于突变理论的地下水环境风险模糊评价模型,并成功应用于海河流域的地下水环境风险评价。李如忠等^[73]通过建立多属性决策分析模型,对皖北3个城市浅层地下水进行环境风险分析,取得了较为理想的结果。

c. 随机-模糊耦合方法。地下水污染系统中通常既含有随机因素,也含有模糊因素,因此随机-模糊耦合方法在地下水污染风险评价中得到越来越多的应用。Liu等^[74]综合采用蒙特卡罗法和模糊综合评判模型,评价了受垃圾填埋场污染的地下水对人体健康的影响。Li等^[75]建立了综合模糊随机风险评价模型,评价了地下水石油污染风险,该模型系统地量化了位置条件、环境标准和健康影响标准的随机不确定性和模糊不确定性。梁婕等^[76]提出了基于随机-模糊模型的地下水污染风险评价方法,评价了地下水中锰污染的环境风险。孙才志等^[77]将蒙特卡罗法和 α 截集技术引入到下辽河平原地下水脆弱性研究中,有效处理了参数随机不确定性和模糊不确定性问题,用隶属函数和累积分布曲线的形式表达脆弱性和不确定性,使评价结果更为科学合理。

目前相关研究主要集中于地下水健康风险评价,这主要是因为地下水健康风险评价模型比较简单,参数较少;而不确定性条件下地下水污染风险评价多侧重于本质脆弱性部分,这主要是因为地下水污染风险评价需要考虑的问题复杂、参数多,但这也为不确定性理论在该领域的进一步应用提供了很好的机会。由于随机数学理论和模糊数学理论具有较好的互补性,因此认为随机-模糊耦合方法将是未来地下水污染风险评价的主要方法。

4 讨论与展望

地下水污染风险评价是地下水环境风险评价的重要组成部分,已成为地下水环境研究的热点领域。

目前污染风险评价方法较多,但无论采取哪种评价方法,都需要明确污染风险的概念内涵、外界污染源与污染过程,以便进行科学的风险分析与损害评估,最后采取有效的风险管理措施。同一区域采用不同的评价方法可能会造成评价结果的差异,因此加强地下水污染风险评价方法的改进与适用性研究是确保评价结果准确与实施有效风险管理的重要前提。尽管国内外地下水污染风险评价已取得了较多成果,但仍存在一些需要改进的地方。

a. 地下水污染风险评价的理论体系建设。迄今为止对地下水污染风险评价还没有统一的认识,其概念偏重于对地下水污染载荷以及地下水污染后果的描述,而对污染物在地下水环境中迁移、衰减的过程描述甚少;部分研究甚至将地下水水质评价看成污染风险评价,研究成果很难真正体现风险的内涵,无法为决策者提供足够的风险信息。因此,应借鉴现代自然灾害风险理论与环境风险理论,科学界定其概念与内涵,构建符合现代风险分析模式的地下水污染风险评价模型。

b. 地下水环境作为地下水污染风险的受体,目前多侧重于对地下水脆弱性和价值功能性的研究,对其适应性研究较少,应加强对其适应性的研究,即地下水自身纳污能力以及人类对污染风险的响应措施研究。此外,在强调其价值功能时,不仅仅是定性层面的相对价值评价,更应该加强地下水价值与功能核算,以定量的方式来确定其绝对价值。

c. 地下水污染风险评价的不确定性问题。目前对于不确定性的处理普遍是假设随机参数的概率分布特征是已知的,但这本身就是一个不确定性问题,尤其是对于小样本参数;而对于模糊参数,多以三角模糊数表示,但三角模糊数的乘法、除法与函数运算尚不严谨,若采用扩张原理与截集技术进行计算则实现过程非常复杂,也难以适用于三角模糊数的函数运算。显然,这些缺陷均会带来较大的计算误差,急需探索解决该问题的有效方法。

d. 国内外地下水污染风险评价研究均侧重于污染风险等级大小与空间分布特征的研究,对污染事故发生前的防护研究以及假设污染发生后的防治措施研究较少。在防护研究中需加强地下水污染风险的区划研究,现有灾害风险区划通常存在3个问题:①风险区划主要基于风险的空间分异特征,忽视风险的空间关联特征;②风险区划多采用统计模型根据历史数据作出静态区划,忽视了动态指标的作用^[78];③风险区划多是确定性区划,无法体现风险的不确定性^[79]。地下水是流动的,各风险分区在空间上存在着关联性;地下水污染风险受人类活动影

响较大,而人类活动往往呈现出可调控的动态规律;基于随机-模糊耦合方法的风险评价,其结果是以概率表征的,具有不确定性。这需要在进行地下水污染风险区划时,在借鉴现有自然灾害风险区划成果的基础上,重点解决上述3个问题。

e. 加强污染风险的决策管理。地下水污染风险评价的最终目的是为风险决策管理提供科学参考,但目前对这一环节缺乏系统的研究。风险决策是涉及多个学科、多个领域、多个层次的综合性问题,包含技术、经济、政策、公众参与、社会伦理等各个方面,只有加强决策管理才能发挥风险评价在风险决策过程中的最大效用。

参考文献:

[1] 中华人民共和国环境保护部,国土资源部,水利部. 全国地下水污染防治规划(2011-2020)[Z]. 北京: 中华人民共和国环境保护部,2011.

[2] 中国科学院可持续发展战略研究组. 中国可持续发展战略报告——水: 治理与创新[M]. 北京: 科学出版社,2007.

[3] 钟秀,马腾,刘林,等. 地下水饮用水源地污染源风险等级评价方法研究[J]. 安全与环境工程,2014,21(2): 104-108. (ZHONG Xiu, MA Teng, LIU Lin, et al. Method research on the risk level evaluation of contamination sources for drinking groundwater wellhead[J]. Safety and Environmental Engineering, 2014, 21(2): 104-108. (in Chinese))

[4] 常福宣,陈进,张洲英. 汉江中下游水资源风险分析与对策研究[J]. 长江科学院院报,2013,30(7): 11-15. (CHANG Fuxuan, CHEN Jin, ZHANG Zhouying. Water supply risk in the middle and lower reaches of Hanjiang River and its countermeasures[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2013, 30(7): 11-15. (in Chinese))

[5] NATIONAL R C. Ground water vulnerability assessment: contamination potential under conditions of uncertainty [M]. Washington, D. C. : National Academy press, 1993.

[6] VRBA J, JAPOROZEC A. The guide book on mapping groundwater vulnerability [M]. Hannover: Verlag Heinz Heise, International Association Hydrogeology, 1994.

[7] 胡二邦. 环境风险评价实用技术和方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社,2000.

[8] MORRIS B, FOSTER S. Assessment of groundwater pollution risk [M/OL]. [2006-05-06]. <http://www.lnweb18.worldbank.org/essd/essd.nsf>.

[9] 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, 35(1): 1-11. (ZHOU Yangxiao, LI Wenpeng. Groundwater quality monitoring and assessment [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2008, 35

(1): 1-11. (in Chinese))

[10] 孙才志,朱静. 下辽河平原浅层地下水环境风险评价及空间关联特征[J]. 地理科学进展,2014,33(2): 270-279. (SUN Caizhi, ZHU Jing. Environmental risk evaluation of shallow groundwater and its spatial auto-correlation in lower reach of Liaohe River Plain [J]. Progress in Geography, 2014, 33(2): 270-279. (in Chinese))

[11] 田华. 基于过程的地下水污染风险评价:以滦河三角洲为例[D]. 西安: 西安科技大学,2011.

[12] 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. (SUN Caizhi, ZUO Haijun, LUAN Tianxin. Research on groundwater vulnerability assessment of the Lower Liaohe River Plain [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2007, 37(5): 943-948. (in Chinese))

[13] GOGU R C, HALLET V, DASSARGUES A. Comparison of aquifer vulnerability assessment techniques: application to the Neblon River Basin (Belgium) [J]. Environmental Geology, 2003, 44(8): 881-892.

[14] 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 Yanguo, SU Jie, ZHAI Yuanzheng, et al. A review on the overlay and index method for groundwater pollution risk assessment [J]. Advances in Earth Sciences, 2012, 27(10): 1140-1147. (in Chinese))

[15] ALLER L, BENNETT T, LEHR J H, et al. Drastic: a standardized system for evaluating groundwater potential using hydrogeological settings [R]. Ada Oklahoma: Environmental Research Laboratory, 1985.

[16] 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 Airon, ZHONG Xinyong. Inadequacies of DRASTIC model and discussion of improvement [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2010, 37(1): 102-107. (in Chinese))

[17] THIRUMALAIIVASAN D, KARMEGAM M, VENUGOPAL K. AHP-DRASTIC: software for specific aquifer vulnerability assessment using DRASTIC model and GIS [J]. Environmental Modelling and Software, 2003, 18(7): 645-656.

[18] PANAGOPOULOS G P, ANTONAKOS A K, LAMBRAKIS N J. Optimization of the DRASTIC method for groundwater vulnerability assessment via the use of simple statistical methods and GIS [J]. Hydrogeology Journal, 2006, 14(6): 894-911.

[19] 王国利,周惠成,杨庆,等. 基于 DRASTIC 的地下水易污染性多目标模糊模式识别模型[J]. 水科学进展, 2000, 11(2): 173-179. (WANG Guoli, ZHOU Huicheng, YANG Qing. A multi-objective fuzzy pattern recognition

- model for assessing groundwater vulnerability based on the DRASTIC system[J]. *Advances in Water Science*, 2000, 11(2): 173-179. (in Chinese))
- [20] 孟宪萌,束龙仓,卢耀如. 基于熵权的改进 DRASTIC 模型在地下水脆弱性评价中的应用[J]. *水利学报*, 2007, 38(1): 94-99. (MENG Xianmeng, SHU Longcang, LU Yaoru. Modified DRASTIC model for groundwater vulnerability assessment based on entropy weight [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, 38(1): 94-99. (in Chinese))
- [21] NURA U K, MOHAMMAD F R, SHAHARIN I, et al. Assessment of groundwater vulnerability to anthropogenic pollution and seawater intrusion in a small tropical island using index-based methods [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22(2): 1512-1533.
- [22] 陆燕,何江涛,王俊杰,等. 北京市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))
- [23] 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. (ZHANG Lijun. Review on groundwater vulnerability and risk assessment [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2006, 33(6): 113-119. (in Chinese))
- [24] AL-ADAMAT R, FOSTER I, BABAN S. Groundwater vulnerability and risk mapping for the basaltic aquifer of the Azraq Basin of Jordan using GIS, remote sensing and DRASTIC[J]. *Applied Geography*, 2003, 23(4): 303-324.
- [25] NERANTZIS K, KONSTANTION S. Groundwater vulnerability and pollution risk assessment of porous aquifers to nitrate: modifying the DRASTIC method using quantitative parameters[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 525: 13-25.
- [26] ELIAS D, IEROTHEOS Z. 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.
- [27] AL-HANBAL A, KONDOH A. Groundwater vulnerability assessment and evaluation of human activity impact (HAI) within the Dead Sea Groundwater Basin, Jordan [J]. *Hydrogeology Journal*, 2008, 16(3): 499-510.
- [28] SALWA S, SALEM B, HAMED B D. Groundwater vulnerability and risk mapping of the hajeb-jelma aquifer (central tunisia) using a GIS-based drastic model[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2010, 59(7): 1579-1588.
- [29] FATMA B B, HAFEDH K, SALEM B. Groundwater vulnerability and risk mapping of the Northern Sfax Aquifer, Tunisia [J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2012, 37(5): 1405-1421.
- [30] ZAPOROZEC A. Groundwater contaminations inventory a methodological guide[M]. Paris: UNESCO, 2004: 10-18.
- [31] FOSTER S, HIRATA R, DANIEL G, et al. Groundwater quality protection: a guide for water utilities, municipal authorities and environment agencies[M]. Washington, D. C: The World Bank, 2002.
- [32] 金爱芳,李广贺,张旭,等. 地下水污染风险源识别与分级方法[J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, 2012, 37(2): 247-252. (JIN Aifang, LI Guanghe, ZHANG Xu. The risk source identification and classification methodology of groundwater pollution[J]. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 2012, 37(2): 247-252. (in Chinese))
- [33] 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]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2012, 33(3): 771-776. (in Chinese))
- [34] VARNES D J. Commission on landslides and other mass-movement-IADE landslide hazard zonation: a review of principles and practices[M]. Paris: UNESCO, 1984.
- [35] WANG J J, HE J T, CHEN H H. 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.
- [36] 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]. *城市地质*, 2010, 5(2): 14-18. (JIANG Jian, DONG Dianwei, YANG Guanning, et al. Risk assessment of groundwater pollution of Haidian District of Beijing [J]. *Urban Geology*, 2010, 5(2): 14-18. (in Chinese))
- [37] CIVITA M V, MAIO M D. Assessing groundwater contamination risk using arcInfo via GRID function [J/OL]. [2015-07-30]. <http://proceedings.esri.com/library/userconf/proc97/proc97/to600/pap591/p591.htm>.
- [38] DANIELA D. GIS techniques for mapping groundwater contamination risk[J]. *Natural Hazards*, 1999, 20(2/3): 279-294.
- [39] 张保祥,李玲玲,刘海娇,等. 地下水污染风险评价研究: 以龙口市平原区为例[C]//第六届海峡两岸土壤和地下水污染与整治研讨会论文集. 烟台: 中国科学院, 2012.
- [40] AYSE M, AHMET Y. A fuzzy logic approach to assess groundwater pollution levels below agricultural fields[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2006, 118(1/2/3): 337-354.
- [41] MOHAMED O A, AHMED R. An integrated GIS and

- hydrochemical approach to assess groundwater contamination in West Ismailia Area, Egypt [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2013, 6(8): 2829-2842.
- [42] RABIE E B, KAMAL T, KHADIJA A. A contribution of GIS methods to assess the aquifer vulnerability to contamination: a case study of the calcareous dorsal (Northern Rif, Morocco) [J]. *Journal of Water Resource and Protection*, 2015, 7(6): 485-495.
- [43] RECINOS N, KALLIORAS A, PLIAKAS, et al. Application of GALDIT index to assess the intrinsic vulnerability to seawater intrusion of coastal granular aquifers [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 73(3): 1017-1032.
- [44] PEDREIRA R, KALLIORAS A, PLIAKAS F, et al. Groundwater vulnerability assessment of a coastal aquifer system at River Nestos Eastern Delta, Greece [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 73(10): 6387-6415.
- [45] 郭晓静, 周金龙, 靳孟贵, 等. 地下水脆弱性研究综述 [J]. *地下水*, 2010, 32(3): 1-5. (GUO Xiaojing, ZHOU Jinlong, JIN Menggui, et al. Overview of the research on groundwater vulnerability [J]. *Underground Water*, 2010, 32(3): 1-5. (in Chinese))
- [46] 张鑫. 基于过程模拟法的地下水污染风险评价 [D]. 长春: 吉林大学, 2014.
- [47] Geological Survey of Ireland. Groundwater protection schemes [J/OL]. [2015-07-30]. <http://www.doc88.com/p-9932674730379.html>.
- [48] 徐铁兵, 梁静, 马跃涛, 等. 地下水污染的数值模拟及污染预测研究: 以迁安市某项目的 Cr⁶⁺ 污染为例 [J]. *环境科学与管理*, 2014, 39(12): 63-67. (XU Tiebing, LIANG Jing, MA Yuetao, et al. Numerical simulation and pollution prediction of hexavalent chromium in groundwater of Qianan City [J]. *Environmental Science and Management*, 2014, 39(12): 63-67. (in Chinese))
- [49] 王平, 黄爽兵, 韩占涛, 等. 基于溶质运移模拟的某化工场地污染物对拟建水库污染风险预测 [J]. *现代地质*, 2015, 29(2): 307-315. (WANG Ping, HUANG Shuangbing, HE Zhantao, et al. A chemical site's pollution risk prediction to the proposed reservoir based on solute transport simulation [J]. *Geoscience*, 2015, 29(2): 307-315. (in Chinese))
- [50] CHENG S J, CHEN W L. Contamination potential of nitrogen compounds in the heterogeneous aquifers of the Choushui River Alluvial Fan, Taiwan [J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2005, 79(3): 135-155.
- [51] NOBRE R C M, ROTUNNO F O C, MANSUR W J. Groundwater vulnerability and risk mapping using GIS modeling and a fuzzy logic tool [J]. *Contam Hydrol*, 2007, 94(3/4): 277-292.
- [52] DEVI N M, RAMBHOJUN P, UMRIKAR B. Numerical groundwater flow and contaminant transport modelling of the Southern Aquifer, Mauritius [J]. *Earth Science India*, 2012, 5(3): 79-91.
- [53] 刘东旭, 司高华, 郑军芳, 等. 基于 MODFLOW 对某区域地下水污染的数值模拟及评价 [J]. *辐射防护*, 2013, 33(1): 30-36. (LIU Dongxu, SI Gaohua, ZHENG Junfang, et al. Numerical simulation and impact assessment of a groundwater pollution based on MODFLOW [J]. *Radiation Protection*, 2013, 33(1): 30-36. (in Chinese))
- [54] 江思珉, 张亚力, 周念清, 等. 基于卡尔曼滤波和模糊集的地下水污染羽识别 [J]. *同济大学学报: 自然科学版*, 2014, 42(3): 435-440. (JIANG Simin, ZHANG Yali, ZHOU Nianqing, et al. Groundwater contaminant plume identification by using kalman filter technique and fuzzy set theory [J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2014, 42(3): 435-440. (in Chinese))
- [55] 阳艾利. 基于模拟的地下水石油污染风险评估与修复过程优化技术研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2013.
- [56] 朱梅, 吴静学, 李瑞波. 海河流域农村生活非点源污染负荷量估算及环境风险分析 [J]. *农业环境与发展*, 2010, 27(5): 66-71. (ZHU Mei, WU Jingxue, LI Ruibo. Estimation of non-point source pollution load and environmental risk analysis of rural life in the Hai River Basin [J]. *Agro-environment and Development*, 2010, 27(5): 66-71. (in Chinese))
- [57] 刘婷, 肖长来, 王雅男, 等. 基于解析法预测地下水溶质运移的研究 [J]. *节水灌溉*, 2015(2): 47-49. (LIU Ting, XIAO Changlai, WANG Yanan, et al. Research of groundwater solute transport forecast based on analytical method [J]. *Water Saving Irrigation*, 2015(2): 47-49. (in Chinese))
- [58] 马禄义, 许学工, 徐丽芬. 中国综合生态风险评价的不确定性分析 [J]. *北京大学学报: 自然科学版*, 2011, 47(5): 893-900. (MA Luyi, XU Xuegong, XU Lifen. Uncertainty analysis of integrated ecological risk assessment of China [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2011, 47(5): 893-900. (in Chinese))
- [59] 束龙仓, 朱元生. 地下水资源评价中的不确定性因素分析 [J]. *水文地质工程地质*, 2000, 27(6): 6-8. (SHU Longcang, ZHU Yuansheng. Uncertainties analysis in groundwater resources assessment [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2000, 27(6): 6-8. (in Chinese))
- [60] 吴吉春, 陆乐. 地下水模拟不确定性分析 [J]. *南京大学学报: 自然科学版*, 2011, 47(3): 227-234. (WU Jichun, LU Le. Uncertainty analysis for groundwater modeling [J]. *Journal of Nanjing University: Natural Sciences*, 2011, 47(3): 227-234. (in Chinese))
- [61] VERMA P, SINGH P, GEORGE K V, et al. Uncertainty analysis of transport of water and pesticide in an unsaturated layered soil profile using fuzzy set theory [J]. *Applied Mathematical Modeling*, 2009, 33(2): 770-782.

- [62] LO I M C, LWA W K W, SHEN H M. Risk assessment using stochastic modeling of pollutant transport in landfill clay liners [J]. *Water Science and Technology*, 1999, 39 (10): 337-341.
- [63] COPTY N K, FINDIKAKIS A N. Quantitative estimates of the uncertainty in the evaluation of groundwater remediation scheme [J]. *Groundwater*, 2000, 38 (1): 29-37.
- [64] MA H W, WU K Y, TON C D. Setting information priorities for remediation decisions at a contamination-groundwater site [J]. *Chemosphere*, 2002, 46 (1): 75-81.
- [65] AMINREZA N, BISWAJEET P, SAMAN J. Risk assessment of groundwater pollution using Monte Carlo approach in an agricultural region: an example from Kerman Plain, Iran [J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2015, 50: 66-73.
- [66] 梁婕. 基于不确定性理论的地下水溶质运移及污染风险研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2009.
- [67] 王伟明, 郑一, ARTURO K. 概率配点法在流域非点源污染不确定性分析中的应用[J]. *农业环境科学学报*, 2010, 29 (9): 1750-1756. (WANG Weiming, ZHENG Yi, ARTURO K. Application of probabilistic collocation method in the uncertainty analysis for watershed non-point source pollution modeling [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29 (9): 1750-1756. (in Chinese))
- [68] 史良胜, 唐云卿, 杨金钟. 基于随机配点法的地下水污染风险评价[J]. *水科学进展*, 2012, 23 (4): 529-538. (SHI Liangsheng, TANG Yunqing, YANG Jinzhong. Risk assessment of groundwater contamination based on stochastic collocation method [J]. *Advances in Water Science*, 2012, 23 (4): 529-538. (in Chinese))
- [69] 李世峰, 白顺果, 王月影, 等. 非饱和土壤渗透系数空间不确定性对溶质运移的影响[J]. *环境工程学报*, 2015, 3 (9): 1471-1476. (LI Shifeng, BAI Shunguo, WANG Yueying, et al. Effect of spatial uncertainty of unsaturated zone permeability coefficient on solute transport [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2015, 3 (9): 1471-1476. (in Chinese))
- [70] URICCHIO V F, GIORDANO R, LOPEA N. A fuzzy knowledge-based decision support system for groundwater pollution risk evaluation [J]. *Journal of Environmental Management*, 2004, 73 (3): 189-197.
- [71] YANG A L, HUANG G H, FAN Y R, et al. A fuzzy simulation-based optimization approach for groundwater remediation design at contaminated aquifers [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2012, 26 (3): 1-13.
- [72] 李绍飞, 孙书洪, 王向余. 突变理论在海河流域地下水环境风险评价中的应用[J]. *水利学报*, 2007, 38 (11): 1312-1317. (LI Shaofei, SUN Shuhong, WANG Xiangyu. Application of catastrophe theory to risk assessment of groundwater environment for river basin [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, 38 (11): 1312-1317 (in Chinese)).
- [73] 李如忠, 汪明武, 金菊良. 地下水环境风险的模糊多指标分析方法[J]. *地理科学*, 2010, 30 (2): 229-235. (LI Ruzhong, WANG Mingwu, JIN Juliang. Multi-variable fuzzy analysis method for groundwater environmental risk [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2010, 30 (2): 229-235. (in Chinese))
- [74] LIU L, CHENG S Y, GUO H C. A simulation-assessment modeling approach for analyzing environmental risks of groundwater contamination at waste landfill sites [J]. *Human and Ecological Risk Assessment*, 2004, 10 (2): 373-388.
- [75] LI J B, HUANG G H, ZENG G M, et al. An integrated fuzzy-stochastic modeling approach for risk assessment of groundwater contamination [J]. *Journal of Environmental Management*, 2007, 82 (2): 173-188.
- [76] 梁婕, 谢更新, 曾光明, 等. 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. (LIANG Jie, XIE Gengxin, ZENG Guangming, et al. An integrated stochastic-fuzzy modeling approach for the risk assessment of groundwater pollution [J]. *Journal of Hunan University: Natural Sciences*, 2009, 36 (6): 54-58. (in Chinese))
- [77] 孙才志, 奚旭. 不确定条件下的下辽河平原地下水本质脆弱性评价[J]. *水利水电科技进展*, 2014, 34 (5): 1-7. (SUN Caizhi, XI Xu. Assessment of groundwater intrinsic vulnerability in the Lower Reaches of Liaohe River Plain under uncertain conditions [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2014, 34 (5): 1-7. (in Chinese))
- [78] 黄崇福. 自然灾害风险分析与管理[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [79] 郑度, 欧阳, 周成虎. 对地理自然区划方法的认识与思考[J]. *地理学报*, 2008, 63 (6): 563-573. (ZHENG Du, OU Yang, ZHOU Chenghu. Thinking about the methods of the natural geographic division [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2008, 63 (6): 563-573. (in Chinese))

(收稿日期: 2015-06-26 编辑: 骆超)

