

工业污染场地分类管理模糊综合评价方法

陈红枫¹, 吕星辰²

(1. 安徽省环境科学研究院, 合肥 230022; 2. 合肥工业大学资源与环境工程学院, 合肥 230009)

摘要: 工业污染场地风险评估与土壤修复工作需求不断加大, 基于人群健康、生物、生态综合风险的分类管理是优化土壤与地下水治理修复资源配置的重要举措。构建污染场地分类管理模糊综合评价模型, 确定污染特性、污染物迁移途径和污染受体 3 级共 40 项评价因子, 以三角模糊数描述评价因子的隶属度, 综合划分 11 级风险等级和风险重要性, 提出风险等级和风险重要性的赋值标准, 可以根据污染场地的调查资料综合评价得出场地的风险等级和风险重要性判定值, 多层次风险向量分析, 得到场地的综合风险判断结果, 作为是否优先治理的参考依据。利用 MATLAB 编程建模, 将评价模型应用到某农药厂工业污染场地实例, 该模型具有一定的可操作性, 从该模型的评判结果识别出案例场地的综合风险等级为 V8 高度风险, 应及时开展治理修复。

关键词: 工业污染场地; 模糊综合评价; 风险重要性; 风险等级

中图分类号: X53; X822

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2018)04-0682-08

Fuzzy integrated evaluation method for classification of contaminated industrial sites

CHEN Hongfeng¹, LYU Xingchen²

(1. Anhui Academy of Environmental Science, Hefei 230022;

2. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009)

Abstract: The classification of contaminated sites based on human health as well as ambient biological and ecological risk evaluation has become an important tool to deal with increasing needs for risk management and remediation for soil and ground water pollution of contaminated industrial sites. We established 40 indicators of three tiers involving pollutants' characteristics, immigration pathway and recipients, and developed an integrated fuzzy evaluation model for classification of the contaminated industrial sites by applying triangular fuzzy numbers to describing evaluation indicators. We also examined the criteria for determining risk grading and risk importance and the values of risk grading, and the risk importance could be obtained based on site investigation information. Through multi-layer risk vector analysis, a comprehensive conclusion could be drawn as a reference for prioritizing site rehabilitation action. The model built with MATABLE program was applicable in evaluating the site of a pesticide factory, and the results showed that the site was at high risk level (V8) and timely rehabilitation would be necessary.

Key words: contaminated industrial sites; fuzzy integrated evaluation; risk importance; risk grade

随着我国城镇化进程加快, 产业结构和规划布局调整, 不少城市正处在“退二进三”、“退城进园”进程中, 工厂停产、搬迁后的遗留场地可能存在环境污染隐患, 影响到土地再开发利用, 开展场地风险评估与土壤修复工作的需求不断加大^[1]。由于我国场地调查还处于起步阶段, 场地调查获取数据往往不充分, 需要优化评价方法, 以便能快速有效识别污染场地的环境风险, 从而指导后续土壤修复治

理工作, 合理配置有限的污染场地修复资金。

发达国家建立了以分类管理评价为基础的管理模式, 以应对污染场地众多而修复资源紧缺的窘境^[2-4]。我国目前发布了《污染场地风险评估技术导则》(HJ25.3-2014)^[5], 导则中推荐模型、暴露途径和主要参数均参考美国、英国相关模型和数据库, 针对国内适用参数的相关基础研究还需进一步完善^[6]。导则的数据需求量较大, 且对使用者专业要

收稿日期: 2017-12-12

基金项目: 安徽省省级环境保护科研项目“安徽省污染场地的环境管理与土壤修复对策研究”(2013-004)资助。

作者简介: 陈红枫, 博士, 正高级工程师。E-mail: hongfeng.chen71@163.com

求很高。污染场地分类管理评价技术尚在研究阶段, 学者们借鉴美国、加拿大分类管理评价指标体系和评价方法, 提出了我国建立分类管理机制建议^[7-9]。

场地环境可以视作一个模糊的充满了不确定性因素的目标。模糊综合评价在处理模糊的、不确定性的问题时具有特殊的优越性, 结合定性、定量的分析, 得出的结果更客观和合理^[10-11]。国内在应用模糊综合评价理论开展环境风险评价方面开展了相关研究, 如金菊良等^[12]提出以三角模糊数随机模拟来表征地下水环境系统的风险; 李如忠等^[13]建立了耦合风险等级和风险重要性等级的地下水环境系统综合评价模型, 李如忠等^[14]以梯形模糊数描述地表灰尘污染风险, 建立了地表灰尘污染健康风险评价模型; 邱孟龙等^[15]采取优化赋权模糊综合评价方法建立耕地土壤重金属污染风险评价模型, 并对风险影响因素加以分析; 周念清等^[16]运用模糊数学的理论对地铁工程中地下水风险进行评价。国外 Sadiq 和 Husain^[17]应用三级分层结构的综合风险模型, 针对海洋钻井废弃物的排放建立了综合风险模型, 对风险模型进行了敏感性分析, 计算出优化后的各排放方案的风险值。这些研究以单类污染物或者单一迁移途径的污染风险为研究对象, 未能满足判断污染场地综合风险的需要, 但是模糊综合评价方法在污染风险评价中的应用得到了不断完善。因此, 本研究构建了一个基于三角模糊函数的综合评价模

型, 作为评价工业污染场地地表水、地下水、空气和土壤污染以及生态影响综合风险的工具, 优化工业污染场地分类管理决策^[18]。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

以长江流域某破产农药厂遗留场地为例, 根据对该厂相关历史资料的查询, 其农药产品主要为 50% 甲胺磷乳油、50% 对硫磷乳油(乙基 1605)、50% 甲基对硫磷乳油(甲基 1605)、40% 辛硫磷乳油以及三唑磷; 氯碱产品生产线于 1991 年竣工投产, 1998 年停产。农药产品生产线于 2005 年 8 月全面停产, 2006 年 6 月宣布破产。

该场地土壤和地下水的采样分析结果显示, 土壤超标污染物主要包括 DDE、DDD、DDT、二甲苯, 地下水超标污染物主要包括 DDT、苯、乙苯和二甲苯, 计算得到各点位的超标倍数。本研究通过场地勘察资料收集, 掌握该场地地质构造、土层结构与特征、水文结构与特征等信息。现场调研获取周边受影响人群、生物及生态基本信息。

1.2 污染场地分类管理模糊综合评价模型

1.2.1 变量描述及相应的三角模糊数 采取三角模糊函数描述污染场地综合风险评价各评价因子的风险等级和风险重要性的大小, 并将模糊语义变量标准划分成 11 级, 见表 1。

表 1 变量的语言描述及相应的三角模糊数

Table 1 Triangular fuzzy number for variables describing risk and importance grading

评价等级 Evaluation grade	风险等级 (<i>r</i>) Risk grade	风险重要性等级 (<i>i</i>) Risk importance grade	三角模糊数 Triangular fuzzy number
1	绝对低	绝对不重要	(0.0, 0.0, 0.1)
2	极低	极不重要	(0.0, 0.1, 0.2)
3	很低	很不重要	(0.1, 0.2, 0.3)
4	低	不重要	(0.2, 0.3, 0.4)
5	稍低	稍不重要	(0.3, 0.4, 0.5)
6	一般	一般	(0.4, 0.5, 0.6)
7	稍高	稍重要	(0.5, 0.6, 0.7)
8	高	重要	(0.6, 0.7, 0.8)
9	很高	很重要	(0.7, 0.8, 0.9)
10	极高	极重要	(0.8, 0.9, 1.0)
11	绝对高	绝对重要	(0.9, 1.0, 1.0)

1.2.2 建立污染场地分类管理评价指标体系 参考美国、加拿大分类评价技术文件以及国内相关研究文献^[19-23], 提出污染物特性、迁移传输途径和受体的风险构成的评价指标, 根据专家调查结果, 采用层次分析法确定各级指标的权重, 以及相应的风险

等级与风险重要性赋值标准。评价指标及权重见表 2。

污染物特性的风险等级主要根据污染物超标倍数、污染范围、超标污染物种类、超标介质类型(表 2)进行赋值, 最低为 1, 最高为 11。超标倍数越

表 2 污染场地分类管理模糊综合评价指标及权重

Table 2 Indicators and weight of fuzzy integrated evaluation for classification of contaminated sites

评价因子 Evaluation indicator		一级指标权重	二级指标权重	三级指标权重	
		W1 (k)	W2 (k _j)	W3 (k _{j,i})	
		Weight of the first tier indicator	Weight of the second tier indicator	Weight of the third tier indicator	
污染特性 Polluting property X ₁	污染物残留介质 X ₁₁	0.50	0.25		
	污染物超标程度 X ₁₂		0.38		
	超标范围 X ₁₃		0.17		
	污染物超标种类 X ₁₄		0.20		
污染迁移途径 X ₂ Pathway of pollution migration	地下水 X ₂₁	降水入渗率 X ₂₁₁	0.25	0.30	0.25
		土壤吸附系数 X ₂₁₂			0.20
		地下水埋深 X ₂₁₃			0.12
		水力传导系数 (含水层) X ₂₁₄			0.23
		水力传导系数 (含水层以上土层) X ₂₁₅			0.20
	地表水 X ₂₂	年降水量 X ₂₂₁		0.19	0.23
		场地地形 X ₂₂₂			0.37
		洪水概率 X ₂₂₃			0.18
		距最近地表水体的距离 X ₂₂₄			0.22
	土壤 X ₂₃	土壤类型 X ₂₃₁		0.22	0.38
		土壤覆盖类型 X ₂₃₂			0.62
		蒸气入侵 X ₂₄	挥发性气体的亨利常数 X ₂₄₁		0.29
			地下水埋深 (蒸气) X ₂₄₂		0.23
			土壤粒径 X ₂₄₃		0.28
	污染受体 Pollution receptor X ₃	人群 X ₃₁	污染接触 X ₃₁₁	0.25	0.69
污染摄入 X ₃₁₂					0.45
到最近饮用水源的距离 X ₃₁₃					0.18
备用饮用水渠道 X ₃₁₄					0.08
场地生物 X ₃₂		污染接触 (植物或无脊椎动物) X ₃₂₁		0.18	0.24
		污染摄入 (生物) X ₃₂₂			0.25
		生物累积性 X ₃₂₃			0.23
		距敏感陆地区域的距离 X ₃₂₄			0.15
生态环境 X ₃₃		距重要地表水资源的距离 X ₃₂₅			0.13
		生态美感 X ₃₃₁		0.13	0.17
	水体富营养化 X ₃₃₂			0.57	
	场地周边气味 X ₃₃₃			0.26	

表 3 污染特性风险等级划分标准

Table 3 Criteria of risk grading corresponding to contaminants' characteristics

污染物质量浓度超标倍数 Exceed multiple of contaminant		污染范围 Contamination scope		超标污染物种类 Types of excessive contaminant		污染物超标介质 Medium of excessive contaminant	
倍 Multiple	等级 Grade	hm ²	等级 Grade	个数 Number	等级 Grade	个数 Number	等级 Grade
NAPL	10~11	>10	10~11	>5	10~11	3	9~11
>100	8~9	8~10	8~9	4~5	6~9	2	5~8
70~100	6~7	6~8	6~7	2~3	2~5	1	1~4
40~70	4~5	4~6	4~5	1	1		
10~40	2~3	2~4	2~3				
<10	1	<2	1				

表 4 地表水风险等级赋值标准

Table 4 Criteria of risk grading corresponding to surface water contamination

距最近地表水体距离		场地地形		洪水概率		年降水量	
Distance to the closest surface water		Terrain		Probability of flooding		Annual precipitation	
距离/m Distance	等级 Grade	坡度% Slope	等级 Grade	次/年 Time/Year	等级 Grade	mm	等级 Grade
<100	10~11	<2	11	>1	10~11	>1 000	10~11
100~200	7~9	2~6	9~10	0.5~1	8~9	600~1 000	7~9
200~300	4~6	6~10	7~8	0.1~0.5	5~7	400~600	4~6
300~500	2~3	10~14	5~6	0.02~0.1	3~4	0~400	1~3
>500	1	14~18	3~4	<0.02	1~2		
		>18	1~2				

表 5 污染场地风险分类

Table 5 The classification of risk-based contaminated sites

评语等级 Classification result	等级分类 Type of classification	说明 Interpretation
$V_1 \sim V_5$	第 4 类	低度风险污染场地
$V_5 \sim V_7$	第 3 类	中度风险污染场地
$V_7 \sim V_9$	第 2 类	高度风险污染场地
$V_9 \sim V_{11}$	第 1 类	优先治理污染场地

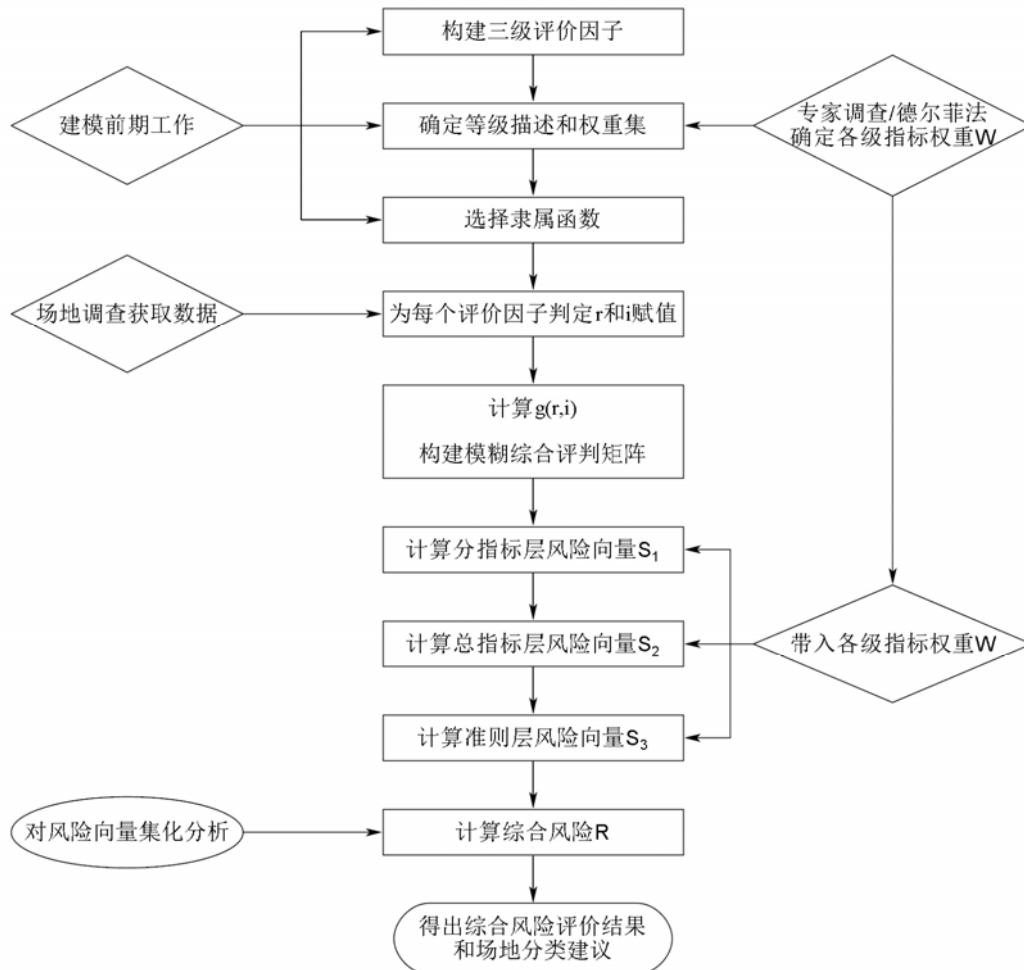


图 1 污染场地分类模糊综合评价流程

Figure 1 Process of fuzzy integrated evaluation for classification of contaminated sites

高、污染范围越大、超标污染物种类越多、超标介
质类型越多，风险等级赋值就越高。例如随着污染

物质质量浓度超标倍数递增，其风险等级的赋值也随
之提高，当达到 100 倍以上时的赋值为 8~9。由于

场地污染中还存在着一种非水相液体 NAPL (non-aqueous phase liquid), 在自然环境中难以被分解, 会长期存留在地下介质中且持续向地下水释放, 因此一旦检测出 NAPL, 赋予最大风险等级 10~11。污染迁移途径分为地表水、地下水、蒸气入侵和土壤等, 参考相关研究文献^[24-30], 提出各类迁移途径的风险等级赋值标准。迁移途径因子中, 蒸气入侵评价因子适用于挥发性有机物, 不适用于非挥发性有机物或无机污染物的污染迁移途径。节选列出污染物特性、地表水迁移途径风险赋值标准, 具体见表 3 和表 4。

风险重要性的赋值标准考虑了污染物毒性、场地防护工程情况、受体敏感程度及场地用途 3 项内容。以污染场地的防护工程 (包括人工防护工程和自然障碍) 为例, 将污染物迁移途径的风险重要性分为 5 等: 对于完全不存在防护工程的污染场地, 赋予 10~11 级的风险重要性等级; 对于稍有防护工程的污染场地, 赋予 8~9 级的风险重要性等级; 对于关键工作区域有防护工程的污染场地, 赋予 6~7 级的风险重要性等级; 对于绝大部分工作区域有防护工程的污染场地, 赋予 4~5 级的风险重要性等级; 对于完全覆盖防护工程的污染场地, 赋予 1~3 级的风险重要性等级。若防护工程存在老化、破损未修复及易于污染物质迁移的情形, 酌情考虑提高风险重要性等级 1~2 级。

1.2.3 建立评价等级集合 评价等级集合是由所有可能的评价结果组成的集合, 模糊综合评价就是通过综合考虑评价对象的所有影响因子, 选择最恰当的评价集合 V 中的评价结果来描述评价对象。本模型采取 11 个等级的评语集, $V = \{V_1, V_2, \dots, V_{11}\} = \{\text{绝对低风险, 极低风险, 很低风险, 低风险, 稍低风险, 一般, 稍高风险, 高风险, 很高风险, 极高风险, 绝对高风险}\}$ 。

为了达到分类管理的效果, 对评语进行等级分类, 见表 5。

1.3 综合评价流程

本研究构建的污染场地风险等级与风险重要性耦合评价模型的评价流程如图 1 所示。

在综合考虑污染场地的各项影响因素, 从评价因子的风险等级和风险重要性出发, 定义污染场地的风险值为风险等级和风险重要性的乘积:

$$R_{\text{风险值}} = R_{\text{风险等级}} \times R_{\text{风险重要性}} \quad (1)$$

由式 (1) 得到的是一个三角数模糊数, 需要去模糊化。在这里定义风险率 $g(r, i)$:

$$g(r, i) = \frac{\int_a^b x \mu_{N_r, \otimes N_i}(x) dx}{\int_a^b \mu_{N_r, \otimes N_i}(x) dx} \quad (2)$$

式 (2) 中 a 和 b 为积分的下限和上限, N_i 和 N_r 分别为风险重要性等级 i 和风险等级 r 的三角模糊数, μ_{N_i} 和 μ_{N_r} 分别是相应的隶属度函数。

11 级定性尺度的三角模糊数的隶属函数如下:

$$\mu_{N_i}(x) = \begin{cases} 1-10x, & 0 \leq x < 0.1, \\ 0, & 0.1 \leq x \leq 1, \end{cases}$$

$$\mu_{N_l}(x) = \begin{cases} 10x - (l-2), & \frac{l-2}{10} \leq x \leq \frac{l-1}{10}, \\ l-10x, & \frac{l-1}{10} \leq x \leq \frac{l}{10}, \\ 0, & 0 \leq x \leq \frac{l-2}{10} \text{ 或 } \frac{l}{10} \leq x \leq 1, \end{cases} \quad (3)$$

$$\mu_{N_r}(x) = \begin{cases} 0, & 0 \leq x \leq 0.9, \\ 10x - 9, & 0.9 \leq x \leq 1, \end{cases}$$

在选定适用于场地风险综合评价的隶属函数后, 各级指标的权重 W 根据专家小组建议或德尔菲法进行调查后, 通过层次分析法得到权重值, 根据分指标的单个评价因子模糊评判矩阵可以进行底层模糊评价。然后递推上一层级的模糊综合评价, 得到风险向量 S 。准则层的风险向量定义为其包含的总指标层的各指标对应的权重与风险向量集合的乘积。目标层的风险向量定义为其包含的准则层的各指标对应的权重与风险向量集合的乘积。

采用贴近度分析法对风险向量进行标准化, 得到最贴近模糊集合目标的评价等级^[31]。贴近度是刻画模糊集合接近程度的一种度量, 定义风险向量 $S = [S_1, S_2, \dots, S_n]$ 中评价对象为最为理想的子集是 $(1, \dots, 1, \dots, 0)$ (其中 1 是第 i 个分量), 称此向量为 S 的理想目标, 记为 D_i 。对于任何 $S^j (S^j \in S)$, 贴近度 $N(S^j, D_i) (i=1, \dots, n)$ 的计算方法为:

$$N(S^j, D_i) = 1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |S^j - \mu D_i|^{\frac{1}{i}} \quad (4)$$

式 (4) 中 S^j 和 μD_i 分别为对象对评价等级的隶属度, 对风险向量 S 标准化, 得到 S^j 。若 $N(S^j, D_i) = \max_{1 \leq j \leq n} N(S^j, D_i)$, 则评价对象最贴近该评价等级, 该评价等级用来表征综合风险 R 。

利用 MATLAB 编程建模, 设计用户界面, 使用者在进行场地风险综合评价时, 只需依据场地调查数据, 参照场地风险等级与风险重要性赋值标准, 为每个评价因子判定风险等级和风险重要性赋值, 模型即可计算得出该场地的综合风险评价结果。

2 结果与分析

2.1 评价因子风险等级与风险重要性判定

根据表 2 给出的评价因子风险等级和风险重要

性赋值标准, 依据场地调查信息对该农药厂的风险等级加以判定, 对于不确定的评价因子以中间值 6 为风险等级判定。表 6 给出污染物特性总指标和地表水迁移途径分指标的判定示例。

表 6 污染物特性与地表水迁移途径风险等级判定示例

Table 6 Example of determination of risk grades corresponding to contaminants' characteristics and migration in surface water

评价因子 Evaluation indicator	场地信息 Site information	风险等级 R Risk grade
污染物残留介质 Pollutant residue media X_{11}	土壤和地下水两类介质存在污染物	6
污染物超标程度 The extent of excessive pollution X_{12}	乙苯超标质量浓度超过 100 倍	8
超标范围 Range above the standard X_{13}	约 5 000 m^3	10
污染物超标种类 Types of pollutants exceeding the limit X_{14}	芳香族化合物和有机氯农药	4
年降水量 Annual precipitation X_{221}	1 300~1 500 mm	10
场地地形 Site topography X_{222}	坡度 2%~6%	9
洪水概率 Flood probability X_{223}	2~3 次/年	10
距最近地表水体距离 The distance from the nearest surface water body X_{224}	100 m	10

2.2 风险向量计算

2.2.1 总指标层风险向量计算 首先进行总指标层的综合评价风险向量计算。在得到判断矩阵的基础

上集成各个评价因子的权重指标, 计算得到单个评价因子的风险向量。总指标层各评价因子风险向量为:

$$\begin{aligned}
 S(2, 1) &= [0 \ 0 \ 0 \ 0.154 \ 4 \ 0.618 \ 7 \ 0.029 \ 9 \ 0.108 \ 4 \ 0.088 \ 7 \ 0 \ 0 \ 0] \\
 S(2, 2) &= [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0.100 \ 2 \ 0.695 \ 3 \ 0.204 \ 4 \ 0 \ 0] \\
 S(2, 3) &= [0 \ 0 \ 0 \ 0.465 \ 5 \ 0.155 \ 2 \ 0 \ 0.208 \ 6 \ 0.170 \ 6 \ 0 \ 0 \ 0] \\
 S(2, 4) &= [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0.459 \ 9 \ 0.024 \ 2 \ 0.156 \ 2 \ 0.301 \ 7 \ 0.058 \ 0 \ 0 \ 0] \\
 S(3, 1) &= [0 \ 0 \ 0.1608 \ 0.131 \ 6 \ 0.433 \ 2 \ 0.049 \ 9 \ 0.146 \ 7 \ 0.078 \ 8 \ 0 \ 0 \ 0] \\
 S(3, 2) &= [0 \ 0 \ 0.1312 \ 0.107 \ 3 \ 0.595 \ 7 \ 0.031 \ 4 \ 0.074 \ 0 \ 0.060 \ 5 \ 0 \ 0 \ 0] \\
 S(3, 3) &= [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0.501 \ 9 \ 0.498 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]
 \end{aligned}$$

2.2.2 准则层的综合评价计算 准则层的风险向量定义为为其包含的总指标层的各指标对应的权重与风

险向量集合的乘积, 可得到污染物特性、迁移途径和污染受体的风险向量:

$$\begin{aligned}
 S(1) &= [0 \ 0 \ 0.015 \ 0 \ 0.186 \ 0 \ 0.035 \ 0 \ 0.211 \ 0 \ 0.079 \ 0 \ 0.302 \ 0 \ 0.047 \ 0 \ 0.125 \ 0 \ 0] \\
 S(2) &= [0 \ 0 \ 0 \ 0.151 \ 2 \ 0.353 \ 2 \ 0.015 \ 9 \ 0.014 \ 3 \ 0.257 \ 6 \ 0.054 \ 8 \ 0 \ 0] \\
 S(3) &= [0 \ 0 \ 0.134 \ 2 \ 0.109 \ 8 \ 0.470 \ 6 \ 0.106 \ 1 \ 0.114 \ 3 \ 0.065 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]
 \end{aligned}$$

2.2.3 目标层的综合评价计算 目标层的风险向量定义为为其包含的准则层的各指标对应的权重与风险

向量集合的乘积, 得到目标层的综合评价风险向量如下:

$$\begin{aligned}
 S^1 &= [0 \ 0 \ 0.039 \ 9 \ 0.158 \ 5 \ 0.221 \ 0 \ 0.136 \ 1 \ 0.104 \ 1 \ 0.233 \ 5 \ 0.037 \ 8 \ 0.063 \ 0 \ 0] \\
 S^2 &= [0 \ 0 \ 0.040 \ 0 \ 0.158 \ 0 \ 0.221 \ 0 \ 0.136 \ 0 \ 0.104 \ 0 \ 0.234 \ 0 \ 0.038 \ 0 \ 0.063 \ 0 \ 0] \\
 S^3 &= [0.039 \ 9 \ 0 \ 0.158 \ 5 \ 0 \ 0.221 \ 0 \ 0.136 \ 1 \ 0.104 \ 1 \ 0.233 \ 5 \ 0.037 \ 8 \ 0.063 \ 0 \ 0] \\
 S^4 &= [0.158 \ 5 \ 0.039 \ 9 \ 0.221 \ 0 \ 0 \ 0.136 \ 1 \ 0 \ 0.104 \ 1 \ 0.233 \ 5 \ 0.037 \ 8 \ 0.063 \ 0 \ 0] \\
 S^5 &= [0.221 \ 0 \ 0.158 \ 5 \ 0.136 \ 1 \ 0.039 \ 9 \ 0.104 \ 1 \ 0 \ 0.233 \ 5 \ 0 \ 0.037 \ 8 \ 0.063 \ 0 \ 0] \\
 S^6 &= [0.136 \ 1 \ 0.221 \ 0 \ 0.104 \ 1 \ 0.158 \ 5 \ 0.233 \ 5 \ 0.039 \ 9 \ 0.037 \ 8 \ 0 \ 0.063 \ 0 \ 0 \ 0] \\
 S^7 &= [0.104 \ 1 \ 0.136 \ 1 \ 0.233 \ 5 \ 0.221 \ 0 \ 0.037 \ 8 \ 0.158 \ 5 \ 0.063 \ 0 \ 0.039 \ 9 \ 0 \ 0 \ 0] \\
 S^8 &= [0.233 \ 5 \ 0.104 \ 1 \ 0.037 \ 8 \ 0.136 \ 1 \ 0.063 \ 0 \ 0.221 \ 0 \ 0 \ 0.158 \ 5 \ 0.039 \ 9 \ 0 \ 0] \\
 S^9 &= [0.037 \ 8 \ 0.233 \ 5 \ 0.063 \ 0 \ 0.104 \ 1 \ 0 \ 0.136 \ 1 \ 0.221 \ 0 \ 0.158 \ 5 \ 0.039 \ 9 \ 0 \ 0] \\
 S^{10} &= [0.063 \ 0 \ 0.037 \ 8 \ 0 \ 0.233 \ 5 \ 0.104 \ 1 \ 0.136 \ 0 \ 0.211 \ 0 \ 0.158 \ 5 \ 0.039 \ 9 \ 0 \ 0] \\
 S^{11} &= [0 \ 0.063 \ 0 \ 0.037 \ 8 \ 0.233 \ 5 \ 0.104 \ 1 \ 0.136 \ 1 \ 0.221 \ 0 \ 0.158 \ 5 \ 0.039 \ 9 \ 0 \ 0]
 \end{aligned}$$

2.2.4 综合风险评级 将 S¹ 带入贴近度分析公式 (4), 得到:

N(S^j, D_1) = 1 - 1/11 + 0.039 * 9^(1/3) + 0.158 * 5^(1/4) + 0.221 * 0^(1/5) + 0.136 * 1^(1/6) + 0.104 * 1^(1/7) + 0.233 * 5^(1/8) + 0.037 * 8^(1/9) + 0.063 * 0^(1/10) = 0.4145 (5)

同理可得:

N(S^j, D_2) = 0.4145, N(S^j, D_3) = 0.4565, N(S^j, D_4) = 0.5156, N(S^j, D_5) = 0.4762, N(S^j, D_6) = 0.5337, N(S^j, D_7) = 0.5306, N(S^j, D_8) = 0.5565, N(S^j, D_9) = 0.5065, N(S^j, D_10) = 0.5019, N(S^j, D_11) = 0.4605

N(S_j, D_8)数值最大, 按照贴近度原则, 该农药厂评判结果为评语等级 V_8, 按表5场地风险级别分类, 该场地为高度风险污染场地, 需要及时开展修复。

3 讨论与结论

3.1 讨论

3.1.1 对照研究 根据《污染场地风险评估技术导

则》(HJ25.3-2014)[5]推荐的人体健康风险评价方法, 采用中国科学院南京土壤研究所开发的 HERA 软件进行风险评估, 该场地性质现状为工业用地, 拟规划为居住用地, 因此按敏感用地方式的居住用地评估。场地周边不种植农作物, 不采用地下水, 因此暴露途径不包括农作物经口摄入和饮用地下水。得到该场地的土壤和地下水总致癌风险为 6.36 * 10^-6, 大于 1 * 10^-6, 不可接受; 非致癌危害指数为 3.52, 大于 1, 不可接受。风险计算结果见表7。

由此可见, 采用《污染场地风险评估技术导则》(HJ25.3-2014)[5]方法评价该场地具有不可接受的致癌风险和非致癌危害, 需要进行治理, 与本研究评价方法的结论是一致的。

表7 污染场地人体健康风险评价结果

Table 7 Results of human health risk assessment for contaminated sites

Table with 5 columns: No., Contaminant, Soil carcinogenic risk, Soil non-carcinogenic hazard index, Ground water carcinogenic risk. Rows include various pollutants like benzene, toluene, and their respective risk values.

3.1.2 模型讨论 目前国内尚未发布污染场地分类管理评价方法, 《污染场地风险评估技术导则》(HJ25.3-2014)[5]推荐模型是基于人体健康风险评价方法, 能给出风险定量评价结论, 并计算关注污染物风险控制值, 但是未考虑除人群以外其他受体所受的潜在影响, 且需要对场地开展详细调查, 对评

价人员专业要求也较高。本研究的评价方法目的是帮助场地管理者根据场地风险水平进行优先排序, 优势在于可以在场地资料较少的情况下, 结合场地初步调查结果选取指标赋值, 即可得出定性的综合风险评价结论。本研究的指标体系不仅包含了基于人体健康的风险评价因子, 还增加了对于周边生物

及生态影响的评价因子,能够较好地表征污染场地的综合风险。但是不足之处是预设的评价因子和参数较多,若使用者混淆了模型中的风险等级和风险重要性等参数,会导致评价结果失真。因此需进一步研究参数设置,在实际应用中细化参数选取说明,设计方便用户使用的界面,输出直观的判定结论。

3.2 结论

污染场地管理的核心理念是以场地的风险判断对污染场地进行分类,分辨出最需要治理场地,从而采取优先修复措施,能够有效缓解污染场地修复资源紧缺的局面。污染场地的风险判定是一个复杂问题,包含了众多影响因素。为了清晰的表达场地风险评价因子之间的内在联系,本研究构建出基于三角模糊函数的多层次综合评价模型,兼顾了地表水、地下水、蒸气和土壤等迁移途径,综合考察一个污染场地污染物特性、迁移途径以及对人群健康及周边生物、生态潜在的危害。本模型对评价因子进行了无量纲化处理,在文献回顾的基础上提出了各类指标风险等级与风险重要性赋值的标准,具有一定的实用性,可以为场地分类管理提供判断依据。

随着我国对工业场地污染物迁移机理和生态环境受体影响研究的加强,场地调查技术的不断完善,需要进一步研究指标体系的优化,完善评价因子阈值的设置,更快捷准确地评价不同特性工业污染场地的综合风险。

参考文献:

- [1] 常春英,肖荣波,章生健,等.城市工业企业搬迁遗留污染场地再开发环境管理问题与思考[J].生态经济,2016,32(8):191-195
- [2] 龚宇阳,谢剑.国际经验综述:污染场地管理政策与法规框架[J].经济社会体制比较,2011,53:120-161.
- [3] 谷庆宝,颜增光,周友亚,等.美国超级基金制度及其污染场地环境管理[J].环境科学研究,2007,20(5):84-88.
- [4] 单艳红,林玉锁,王国庆.加拿大污染场地的管理方法及其对我国的借鉴[J].生态与农村环境学报,2009,25(3):90-93.
- [5] 环境保护部科技标准司.污染场地风险评估技术导则:HJ25.3-2014[S].北京:中国环境科学出版社,2014.
- [6] 陈梦舫,骆永明,宋静,等.中、英、美污染场地风险评估导则异同与启示[J].环境监测管理与技术,2011,23(3):14-18.
- [7] 余勤飞,侯红,白中科,等.中国污染场地国家分类体系框架构建[J].农业工程学报,2013,29(12):228-234.
- [8] 周友亚,颜增光,郭观林,等.污染场地国家分类管理模式与方法[J].环境保护,2007,35(10):32-35.
- [9] 单艳红,王国庆,张孝飞,等.中国污染场地分类管理程序与方法研究[J].中国人口·资源与环境,2011,21(12):75-80.
- [10] 许亚飞,余勤飞,毕如田,等.发达国家污染场地数据库系统建设及其对我国的借鉴[J].环境工程技术学报,2013,3(5):458-464.
- [11] POLLARD S J T, BROOKES A, EARL N, et al. Integrating decision tools for the sustainable management of land contamination[J]. Sci Total Environ, 2004, 325(1/2/3): 15-28.
- [12] 金菊良,刘丽,汪明武,等.基于三角模糊数随机模拟的地下水环境系统综合风险评价模型[J].地理科学,2011,31(2):143-147.
- [13] 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.
- [14] 李如忠,童芳,周爱佳,等.基于梯形模糊数的地表灰尘重金属污染健康风险评价模型[J].环境科学学报,2011,31(8):1790-1798.
- [15] 邱孟龙,王琦,刘黎明,等.优化赋权模糊综合评价法对耕地土壤重金属污染的风险评价[J].生态与农村环境学报,2017,33(11):1049-1056
- [16] 周念清,魏诚寅,娄荣祥,等.基于模糊数学理论探讨评判地铁工程中地下水风险[J].同济大学学报(自然科学版),2011,39(11):1629-1633.
- [17] SADIQ R, HUSAIN T. A fuzzy-based methodology for an aggregative environmental risk assessment: a case study of drilling waste[J]. Environ Modell Softw, 2005, 20(1): 33-46.
- [18] 吕星辰.基于三角模糊函数的污染场地分类评价研究[D].合肥:合肥工业大学,2017.
- [19] Canadian Council of Ministers of the Environment. A federal approach to contaminated sites [EB/OL]. [2017-08-24]. <http://www.federalcontaminatedsites.gc.ca>, 2017.
- [20] USEPA. The hazard ranking system guidance manual[EB/OL].[1992-11-17]. <https://semspub.epa.gov/work/HQ/189159,1992>.
- [21] USEPA. Addition of a subsurface intrusion component to the hazard ranking system[EB/OL]. [2016-07-14]. <http://www.regulations.gov>, 2016.
- [22] Canadian Council of Ministers of the Environment. Supplemental guidance for the scoring of sites [EB/OL]. [2013-05-23]. <http://www.federalcontaminatedsites.gc.ca>, 2013.
- [23] 杨亮,朱卫红,熊琪,等.图们江流域湿地土壤重金属污染特征[J].安徽农业大学学报,2017,44(4):677-683.
- [24] 袁兴中,刘红,陆健健.生态系统健康评价:概念构架与指标选择[J].应用生态学报,2001,12(4):627-629.
- [25] 王宏,杨霓云,闫振广,等.我国持久性、生物累积性和毒性(PBT)化学物质评价研究[J].环境工程技术学报,2011,1(5):414-419.
- [26] 赵串串,张愉笛,张藜,等.黄河源区玛多县湿地生态健康评价[J].安徽农业大学学报,2017,44(1):108-113.
- [27] 肖庆文.城市工业污染场地蒸气入侵健康风险评估与控制研究[D].北京:中国地质大学(北京),2016.
- [28] 郭观林,王翔,关亮,等.基于特定场地的挥发/半挥发有机化合物(VOC/SVOC)空间分布与修复边界确定[J].环境科学学报,2009,29(12):2597-2605.
- [29] 王长友,王修林,于文金,等.污染物环境生态效应评价研究进展[J].生态学报,2009,29(9):5081-5087.
- [30] 杨庆,栾茂田.地下水易污性评价方法:DRASTIC指标体系[J].水文地质工程地质,1999,26(2):4-9.
- [31] 张晓平.基于贴近度的模糊综合评判结果的集化[J].山东大学学报(理学版),2004,39(2):25-29.