

引用格式: 王嘉琳, 周睿, 袁焯城, 等. 基于对象模型的污染场地表达方法及案例研究[J]. 资源科学, 2024, 46(4): 761-774.
[Wang J H, Zhou R, Yuan Y C, et al. Method and case study of the contaminated site's expression using an object-based model[J].
Resources Science, 2024, 46(4): 761-774.] DOI: 10.18402/resci.2024.04.08

基于对象模型的污染场地表达方法及案例研究

王嘉琳^{1,2}, 周睿³, 袁焯城^{1,2}, 赵鑫科⁴, 沈靖^{1,2}, 雷梅^{2,5}, 万庆^{1,2}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101;
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 京师天启(北京)科技有限公司, 北京 100086; 4. 中国人民解放军战略支援部队信息工程大学 地理空间信息学院, 郑州 450052; 5. 中国科学院地理科学与资源研究所 资源利用与环境修复重点实验室, 北京 100101)

摘要:【目的】近几十年, 中国工业和城市化进程飞速发展, 但也带来一系列频发的污染事件, 如石油泄漏、重金属污染等。在这样的背景下, 对污染全过程的精准评估和污染场地的管控是实现污染场地治理和修复的重要环节。【方法】本文以石油泄漏污染为例, 采用对象化的视角和系统性的分析方法, 描述污染物从源到汇的完整过程, 表达污染物在迁移过程中的环境行为。首先, 将污染场地及关联的实体抽象表达为时空对象, 并说明其组织结构; 其次, 围绕污染物的浓度表达, 描述各时空对象与之相关的属性特征; 然后, 从时间、空间、属性3个方面描述各时空对象之间的关联关系; 最后, 描述各时空对象相互之间的动态影响。【结果】①以2014年某地的一起原油泄漏真实事件为例, 以XML结构的表达方式, 构建了污染场地的对象化表达模型; ②构建了污染场地对象可视化表达方法, 用于展示各时空对象的关联关系和属性特征; ③尝试应用表达模型开展对污染物浓度的归因分析, 快速获取暴露评估指标的相关计算参数, 从而更便捷地进行健康风险评估。【结论】本文通过对象化表达方法构建的模型能够有效描述污染场地并对其建模, 有助于对污染从源到汇的全过程分析和评估, 为实现污染场地的管控和修复提供重要支持。此外, 本文提出的对象化表达方法在解决复杂问题时具有实践可借鉴性。通过将研究对象视为一个对象, 从组成结构、属性特征、相互关系以及行为动态等多个方面进行分析和表达, 可以更好地理解研究对象内部关系和相互影响, 为相关问题的分析和评估提供清晰的视角。

关键词: 地理信息系统; 污染场地; 对象模型; 全空间信息系统; 时空对象; 空间建模

DOI: 10.18402/resci.2024.04.08

1 引言

近几十年来, 随着中国经济与工业的飞速发展, 以及城市化进程的加快, 污染泄漏事件频繁发生, 逐渐成为工业变革和城市扩张的伴随产物, 不仅影响周边环境, 还对土壤和地下水造成污染^[1]。因此, 对污染场地的治理、管控和修复成为了亟待研究与实践的课题^[2]。欧美国家的污染场地管理始于20世纪80年代, 经过近40年的发展, 已归纳出一套完整的理论与应用体系。例如, 美国国家环境保护局2014年建立的超级基金信息系统(Comprehen-

sive Environmental Response, Compensation and Liability Information System, CERCLIS)专门用于对污染场地进行追踪与监管^[3]。

相较于欧美国家, 中国污染场地研究起步时间较晚^[4], 不过随着近年来政府的大力支持, 在农用地和工矿用地土壤污染过程与修复科技研究方面取得了大量成果, 在论文发表和发明专利数量上均超越欧美^[5]。一方面, 从污染场地环境行为模拟与表达角度看, 大量模型研究集中于精准反演与模拟环境行为。模型也从早期的反演模型^[6,7](如动力学模

收稿日期: 2023-02-14; 修订日期: 2023-05-31

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1800100; 2021YFB3900900)。

作者简介: 王嘉琳, 男, 内蒙古赤峰人, 博士研究生, 主要从事地理空间智能及对象空间建模研究。E-mail: wangjiahe0011@igsrr.ac.cn

通讯作者: 袁焯城, 男, 浙江嵊州人, 助理研究员, 主要从事资源环境评价、地理信息系统前沿技术与应用研究。E-mail: yuanyc@lreis.ac.cn

型^[8]、非线性吸附模型^[9]),到构建模拟替代模型^[10](如基于数据的替代模型^[11]),再发展到近年来广受关注的深度学习模型^[12]。另一方面,从污染场地修复技术角度看,针对场地内不同类型污染物造成的污染,其相应的技术选择已愈发成熟,实践效果也愈发显著。在有机污染物修复方面,中国主要采用热脱附技术和微生物修复技术,其中,原位或异位热脱附技术在挥发性或半挥发性污染场地的修复效率平均达到95%^[13,14];在无机污染物修复方面,冶炼场地是主要关注对象,目前大部分采用固化/稳定化技术,并且在实际实施过程中,还常与植物修复技术联合应用^[15]。

然而,中国污染场地实际情况复杂,由于缺乏整体把控,以及对污染物在土壤-水环境下动态迁移规律的详细研究,导致上述模型和技术应用到实际场景时,难以实现高效管控与精准修复^[16]。目前的研究大多从污染物的组成成分、环境行为模拟入手,污染场地在各模型中大多以参数因子的方式表达,鲜少探讨污染场地本身的整体性表达与建模^[17,18]。随着“双碳”目标的提出,污染场地修复技术由原来的注重效率转变为低碳与高效并重,并更强调在节能减排的基础上探索更精准的污染场地管控与修复方式^[19]。面对中国污染场景复杂多样的情况,如何定性与定量确定污染修复技术及修复材料,绿色高效地持续性管控与修复污染场地,是目前亟待解决的问题^[20]。若要对污染场地的精准管控,则需要关注其中污染物从源到汇的完整过程,全面监测和评估污染物在迁移过程中的环境行为,从而作出决策^[21]。构建污染场地对象化的表达模型可以完整地污染场地建模,详细地描述污染物环境行为及源汇过程,从而有助于污染场地的管控,并制定高效的治理措施^[22]。

近年来,全空间信息系统以对象化视角呈现空间信息特征,形成对现实世界实体的描述与表达,以实现动态复杂的现实世界的建模^[23,24]。因此,本文尝试通过这种对象化的思想,创新性地污染污染场地看作一个对象,同时也是一个内蕴多个对象且相互间存在联系和影响的“系统”,以污染物从源到汇的全过程表达为视角,构建污染场地对象表达模型,并尝试辅助污染场地的管控与精准修复。首先,本文梳理了污染场地相关概念,明确污染场地

的定义和内涵;然后,以目前污染事件发生频繁且环境行为较复杂的石油污染为典型案例,构建分析性表达模型,对污染场地的时空对象、组成结构、属性特征、关联关系和动态变化方面进行分析性表达;最后,以2014年某地原油泄漏真实事件^[25]为例进行描述与建模,并基于此分析提出精准修复建议,验证模型的有效性和可行性。

2 研究方法

2.1 污染场地概念与分析

2.1.1 污染场地概念

本节系统梳理了污染场地的内涵,以及污染场地内污染物和污染源的概念。污染场地指在与有害物质相关的加工、经营、堆积,或者转运有毒物质过程中造成了泄漏事故,或在处理、处置有污染性的废物等过程中,对人体健康或生态环境造成危害或潜在风险的区域^[26]。在污染场地区域内,主要存在土壤(包括沉积物、污泥)和水体(包括地下水、地表水)两种污染物承载介质,且这两种介质并不是独立存在,往往还会相互影响。例如,某工业场地的污染物会从深层土壤渗透到地下水水体中,形成地下水污染^[27,28]。另外,污染场地还可能对周围环境产生影响,包括空气、建筑物以及生物体等。

另外,污染源是指产生污染物的源头,通常在污染行业的企业生产或城市搬迁过程中产生,如工业、矿业等。不同污染源会对环境造成不同的影响,例如,染料厂排放的染料废水中含有大量的有机污染物,这些有机污染物成分复杂,排放到水体中会影响水生生物的生存,且一部分污染物会沉入水体并发生厌氧反应,进而产生有毒有害气体,持续性地危害水体生态环境。石油烃等挥发性有机物一旦泄漏,会使土壤无法支撑植物生长,降低土壤肥力和通透性,同时也会对土壤微生物造成伤害。经由降水过程后,一部分污染物会迁移到地下水中恶化水质,并且随水流的扩散导致污染面积扩大。此外,土壤中的一部分石油烃还会挥发至空气中,释放大量有害气体,对人类健康造成危害^[29]。

因此,尽管不同污染源及污染物对污染场地造成了多种复杂影响,但从受影响的受体视角来看,可分为受污染物直接影响的直接受体和受间接影响的间接受体两类。对于不同污染物,其改变的仅是受体的种类,以及对这些受体的影响程度(如持

2024年4月

久性影响或短暂性影响等)。基于这种理解,本文接下来将以对象化的视角对污染场地进行分析性表达与建模,将污染场地抽象为由污染源、污染物、直接受体、间接受体4类时空对象组成,并深入探讨它们之间的相互关系和动态变化。

2.1.2 污染场地分析性表达

2015年,周成虎^[30]提出全空间信息系统(Pan Spatial Information System, PSIS)的概念。PSIS的目的是基于人类直觉形成的对象化认知,对现实物理世界进行抽象与建模,构建与动态复杂的现实世界相关联和孪生的数字世界,并进一步探究现实世界数据中潜藏的信息。2017年,华一新等^[23]在此基础上提出了多粒度时空对象模型,从时空参照、时空位置、空间形态、属性特征、组成结构、关联关系、行为与认知8个方面对时空对象进行全方位的抽象和表达,实现客观实体在全空间理论框架下的对象化建模。

全空间信息系统对现实世界的表达分为3个层次,即展示性表达、分析性表达及探索性表达^[31]。展示性表达主要是在已有数据情况下,利用多种可视化技术互补的方式,将现实世界中时空实体及关系抽象到数字世界,并以可视的方式展示、交互等;分析性表达是对各时空实体下隐藏的信息进行分析,包括在空间模式下的某时空过程分析、各时空实体间复杂多样的关联关系分析等;探索性表达即在已有数据或认知的基础上,去探索未知,这是全空间信息系统表达的最高层次,用以与用户一起探究数据背后潜藏的关系、认知等。

本文以全空间理论框架为基础,从组成结构、属性特征、关联关系以及动态4个方面对污染场地进行分析性描述与表达。时空对象的组成结构表达的是包含在整体时空对象下的各组分之间的组成和结构关系。在描述时空对象的组成结构时,需要清晰描述对象间的从属关系和空间结构关系以及关系的可变性。属性特征指的是时空对象的属性信息。与传统GIS相比,多粒度时空对象的所有属性特征都会发生动态变化。时空对象的关联关系包括空间、属性、时间关系等,主要描述的是时空对象间的相互联系。其中,属性关系稳定性高,变化频率低,可以转化为持久化信息并存储^[32],因此可以从每段关系关联的两个时空对象、对这段关系的

描述和约束3个方面来描述^[33]。

动态指的是描述时空对象可以实施的动作。时空对象的动态能力可以包括接收信息并产生反馈、执行某个动作、一些特殊行为(如爆炸、解体)等^[34]。另外,在描述动态时,不仅要描述其动态能力本身的相关参数,还要考虑到其与所处环境的相互影响,因此,时空对象的动态往往并不是孤立存在的。

2.2 污染场地对象化表达方法

本文基于全空间信息系统下的时空对象表达模型理论,以空间建模的视角,探究污染场地时空对象间的相互影响机制,并从时空对象及其组成结构、属性特征、对象间关联关系和对象动态4个方面构建污染场地对象表达模型。

2.2.1 时空对象及组成结构

在现实世界描述某一时空实体的过程中,往往无形中设定了其时间和空间尺度。因此,在谈到某一时空实体时,可以将其看作一个整体,也可以探究其“内部”各组成部分之间的关系^[35]。污染场地时空对象(Spatiotemporal Object, STO)包括:污染场地(Contaminated Site, STO_C)、污染源(Contaminated Source, STO_{CS})、污染物(Contaminant, STO_{CT})、直接受体(Direct Receptor, STO_{DR})、间接受体(Indirect Receptor, STO_{IDR})。以污染场地中石油污染物从泄漏到迁移至周围环境的全过程为例,分别对上述的各组成部分列举对应的案例对象,例如,石油公司(Petroleum Enterprise, STO_{PE})和石油(Petroleum, STO_P)分别为污染源和污染物,直接受体包括土壤(Soil, STO_{SL})和地下水(Underground Water, STO_{UW}),间接受体包括空气(STO_{AIR})、污染企业周围房屋(Surrounded House, STO_{SH})以及附近居民(Nearby-living Residents, STO_{NR})。

2.2.2 属性特征

某时空对象 STO_i 的属性特征用集合 A_i 表示为 $A_i = \{A_{i,a_1}, A_{i,a_2}, A_{i,a_3}, \dots\}$,其中 a_1 、 a_2 、 a_3 是此时空对象的属性项名称。污染物在环境中发生的物理、化学、生物过程被称为环境行为^[36]。由于本文的重点在于论述污染场地中污染物的环境行为,因此在描述时空对象的属性项时,主要考虑与环境行为相关的方面。有研究表明,石油污染物的环境行为与自身属性以及周围环境特性相关。本文围绕石油的特点,通过查找相关资料,列举需要考虑的主要

属性特征 A_p ,主要包括物理与化学属性两方面。其中,物理属性主要有石油的密度(Petroleum Density, $A_{p, pd}$)、辛醇水分配系数(Octanol-Water Partition Coefficient, $A_{p, kow}$)、有机碳分配系数(Organic Carbon Partition Coefficient, $A_{p, koc}$)、比重(Specific Gravity, $A_{p, sg}$)、浓度(Concentration, $A_{p, con}$)等,化学属性包括碳当量数(Carbon Equivalent, $A_{p, ce}$)、亨利常数(Henry's Law Constant, $A_{p, h}$)、水溶解度(Solubility, $A_{p, s}$)、挥发度(Volatility, $A_{p, v}$)等^[37]。依次表达为:

$$A_p = \{ A_{p, pd}, A_{p, kow}, A_{p, koc}, A_{p, sg}, A_{p, con}, A_{p, ce}, A_{p, h}, A_{p, s}, A_{p, v} \} \quad (1)$$

在直接受体中,一方面,土壤的属性特征 A_{SL} 主要包括土壤的物理、化学、生物特性。物理特性包括土壤质地(Soil Texture, $A_{SL, st}$)、土壤有机质含量(Soil Organic Matter Content, $A_{SL, somc}$)、土壤含水量(Soil Moisture Content, $A_{SL, smc}$)、化学特性包括pH值 $A_{SL, ph}$ 、阳离子交换量(Cation Exchange Capacity, $A_{SL, cec}$)、生物特性主要有微生物群落的种类和数量(Types and Quantity of Microorganisms, $A_{SL, mtq}$)等^[38]。在下式中依次表达为:

$$A_{SL} = \{ A_{SL, st}, A_{SL, somc}, A_{SL, smc}, A_{SL, ph}, A_{SL, cec}, A_{SL, mtq} \} \quad (2)$$

另一方面,影响石油在地下水中环境行为的属性特征 A_{UW} 主要有pH值($A_{UW, ph}$)、孔隙水流速(Porosity Water Flow Rate, $A_{UW, pfr}$)、地下水盐度(Salinity, $A_{UW, sal}$)、溶解氧(Dissolved Oxygen, $A_{UW, dox}$)、温度($A_{UW, tem}$)、电导率(Electrical Conductivity, $A_{UW, ec}$)等^[39]。依次表达为:

$$A_{UW} = \{ A_{UW, ph}, A_{UW, pfr}, A_{UW, sal}, A_{UW, dox}, A_{UW, tem}, A_{UW, ec} \} \quad (3)$$

在间接受体中,首先,需要考虑当石油挥发至空气中传播时,与之相关的空气介质属性有扩散系数(Coefficient of Diffusion, $A_{AIR, cod}$)、温度($A_{AIR, tem}$)、湿度($A_{AIR, hum}$)、大气压强($A_{AIR, ap}$)等。其次,周围环境包括空气、土壤、水体环境介质,由于与上述描述相似,这里不再重复。最后,考虑污染场地中居民的受影响程度时,可以从暴露时间($A_{NR, t}$)、与污染源的距离($A_{NR, l}$)和方向($A_{NR, dir}$)等方面描述^[40]。间接受体对象属性特征可以表达为:

$$\begin{cases} A_{AIR} = \{ A_{AIR, cod}, A_{AIR, tem}, A_{AIR, hum}, A_{AIR, ap} \} \\ A_{SH} = \{ A_{SL}, A_{UW}, A_{AIR} \} \\ A_{NR} = \{ A_{NR, t}, A_{NR, l}, A_{NR, dir} \} \end{cases} \quad (4)$$

2.2.3 关联关系

关联关系由集合 R 表示,任意两个时空对象间的关联关系表示为集合 $R_{STO_1 \rightarrow STO_2}$ 。 R 主要包括空间、属性和时间关系三方面(图1),表示为 $R = \{ R_s, R_A, R_T \}$,其中, R_s 为空间关系, R_A 为属性关系, R_T 为时间关系。图1将污染场地作为一个内蕴的空间“系统”,即表达了与污染全过程相关的所有时空对象及其关联关系。

(1) 空间关系

污染场地空间关系从拓扑关系(Topological Relationship, R_{St})和方位关系(Orientational Relationship, R_{So})两方面来表达,即 $R_s = \{ R_{St}, R_{So} \}$,空间关系的具体描述包含以下几个方面:

$$R_{St, 1 \rightarrow 2} = Relationship(STO_1, STO_2, RS, LC, RC) \quad (5)$$

式中: $Relationship$ 表达具体的关系名称,如相交、邻接、相离等,关系内需要考虑5个描述参数,前两个是时空对象,第一个是主时空对象,可以解释为时空对象2(STO_2)相对于时空对象1(STO_1)的空间关系。关系强度(Relationship Strength, RS)表达的是这段关系的紧密程度,例如,可以用两时空对象相交部分占主时空对象的百分比来衡量;生命周期(Life Cycle, LC)指的是这段关系存在的时间,可以用时间段或者时间点来表达;关系约束(Relationship Constraint, RC)指的是对这段关系的约束,例如,限定这段关系的关系强度,或者限定其生命周期的时效等。

由于时空对象是对现实世界的直接映射,现实情况中,污染场地承载介质的组成大多为土壤、水体或土-水混合结构,且这些组分之间的空间关系

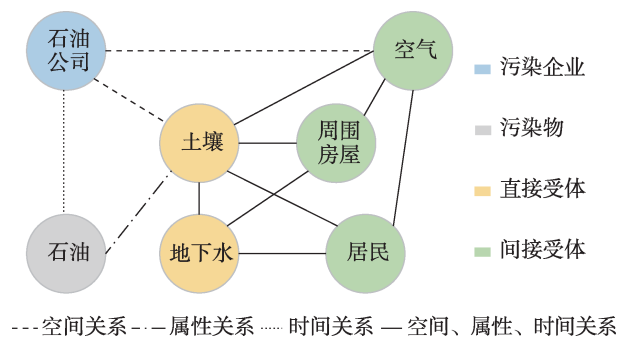


图1 污染场地关联关系示意图

Figure 1 Diagram depicting the relationships within a contaminated site

2024年4月

大多为上下分层结构^[31]。因此,污染场地中的空间关系表达如下:首先,石油公司与周围土壤属于相交关系;由于石油公司储油罐是埋在土壤下的,从方位上看,石油公司整体位于土壤上方,因此,石油公司与土壤的空间关系举例描述为:

$$\begin{cases} R_{S, PE \rightarrow SL} = \{R_{St, PE \rightarrow SL}, R_{So, PE \rightarrow SL}\} \\ R_{St, PE \rightarrow SL} = \text{Overlap}(STO_{PE}, STO_{SL}, < 0.3 >, \\ < 2000 - >, < LC \leq 70, RS \leq 0.5 >) (6) \\ R_{So, PE \rightarrow SL} = \text{Down}(STO_{PE}, STO_{SL}, < 1 >, \\ < 2000 - >, < LC \leq 70 >) \end{cases}$$

在拓扑关系中,假设石油公司与土壤的关系强度为0.3,生命周期是假设公司自2000年建厂到现在,关系约束是假设公司的生命周期为70年,拓扑关系强度不超过0.5。

土壤与地下水、周围房屋($R_{S, SL \rightarrow SH}$)、居民($R_{S, SL \rightarrow NR}$)的空间拓扑关系均属邻接,方位关系也是上下关系,以土壤与地下水关系为例,可以表示为:

$$\begin{cases} R_{S, SL \rightarrow UW} = \{R_{St, SL \rightarrow UW}, R_{So, SL \rightarrow UW}\} \\ R_{St, SL \rightarrow UW} = \text{Adjacency}(STO_{SL}, STO_{UW}, < 1 >, \\ < / >, < / >) (7) \\ R_{So, SL \rightarrow UW} = \text{Down}(STO_{SL}, STO_{UW}, < 1 >, \\ < / >, < / >) \end{cases}$$

石油具有挥发性,一旦泄漏会在土壤孔隙中留存,部分还会挥发到空气中,因此,空气作为间接受体之一,在模型中也被抽象为一个时空对象。与空气存在空间关系的时空对象有石油公司、土壤、周围房屋和居民,因此,其相互间的空间关系也可用公式表达,由于与上述公式相似,这里不作赘述。

(2) 属性关系

不同时空对象间可能存在多个属性的关联关系,即 $R_A = \{R_{Aa_1}, R_{Aa_2}, \dots, R_{Aa_n}\}$ 。对污染场地而言,污染物浓度及生命周期变化是重要的属性信息,是实现污染场地全生命周期管理的重要依据。因此,本文主要考虑不同受体中的石油浓度(Petroleum Density, PD)及其持续时间(LC),构建污染物传输迁移过程的属性关系。对于不同受体的石油浓度,有的可以利用函数模型运算得出,有的则暂时无法给出准确的函数模型,因此,可将属性关系的表达分为函数关系(Function)以及相关关系(Correlation)。相关关系表达某两个时空对象的石油含量属性存在关系,但缺乏具体的定量描述方法。属性关系描述包括:

$$R_{Aa_1, 1 \rightarrow 2} = \text{Relationship}(STO_1, STO_2, RD, LC, RC) \quad (8)$$

另外,关系描述(Relationship Description, RD)表达具体的属性计算模型及所需的参数等。生命周期及关系约束的表达则与空间关系中描述一致。

石油属于非水相液体(Non-Aqueous Phase Liquids, NAPL),且带有挥发性。一旦石油进入土壤后,部分会停留在土壤中,包括吸附(Adsorption)在土壤中和以气体形式赋存(Occurrence)在土壤孔隙中,部分会扩散(Diffusion)至深层土壤^[41]。在孔隙中的部分,会逐渐扩散至空气中,经过对流(Convection)进入到建筑物室内,对居民造成影响。扩散到深层土壤的部分遇到地下水后,其可溶性成分会溶解到地下水中造成地下水污染,进而影响周围环境和居民。有实验表明,石油在土壤中的含量与土壤有机质相关,其扩散与对流过程分别与石油本身、土壤性质等有关^[42]。

因此,土壤中的石油浓度可以表达为:

$$\begin{aligned} R_{Apd, P \rightarrow SL} = & \text{Adsorption} \left(STO_P, STO_{SL}, f_{abs}(A_P, A_{SL}), \right. \\ & < 2015 - 2016 >, < / > \left. \right) \\ & + \text{Occurrence}(A_P, A_{SL}, f_{occ}(A_P, A_{SL}, L), \\ & < 2015 - 2016 >, < / >) \end{aligned} \quad (9)$$

式中: f_{abs} 表示对石油吸附在土壤中的模拟函数,与石油浓度、辛醇水分配系数、浓度等相关,并与土壤质地、有机质含量、土壤含水量、pH值等相关; f_{occ} 表示对石油赋存在土壤孔隙中的函数模拟。另外,假设在某段时期内陆续监测出石油在土壤中有残留,则这段关系的生命周期在这段时间内持续存在。

地下水中的石油浓度可以表达为:

$$R_{Apd, SL \rightarrow UW} = \text{Diffusion} \left(STO_{SL}, STO_{UW}, \right. \\ \left. f_{dif}(f_{abs}(A_P, A_{SL}, L), A_{UW}, L), \right. \\ \left. < 2015 - 2016 >, < / > \right) \quad (10)$$

式中: f_{dif} 表示深层土壤中的石油含量扩散到地下水中的关系模拟,深层土壤中的石油含量表示为 $f_{abs\circ}$ 。

空气中的挥发性污染物浓度可以表达为:

$$R_{Apd, SL \rightarrow AIR} = \text{Diffusion} \left(STO_{SL}, STO_{AIR}, \right. \\ \left. f_{dif}(f_{occ}(A_P, A_{SL}, L), A_{AIR}, L), \right. \\ \left. < 2015 - 2016 >, < / > \right) \quad (11)$$

周围房屋中污染物浓度来源于空气中的污染物以及土壤地下水中污染物的向上扩散,因此可表达为:

$$\left\{ \begin{array}{l} R_{\text{Apd}, \text{SH}} = \{ R_{\text{Apd}, \text{AIR} \rightarrow \text{SH}}, R_{\text{Apd}, \text{SL} \rightarrow \text{SH}}, R_{\text{Apd}, \text{UW} \rightarrow \text{SH}} \} \\ R_{\text{Apd}, \text{AIR} \rightarrow \text{SH}} = \text{Diffusion}(STO_{\text{AIR}}, STO_{\text{SH}}, \\ \quad f_{\text{dif}}(A_{\text{AIR}}, A_{\text{SH}}, L), < 2015 - 2016 >, \\ \quad < A_{\text{PD}, \text{SH}} \leq A_{\text{PD}, \text{SH max}} >) \\ R_{\text{Apd}, \text{SL} \rightarrow \text{SH}} = \text{Diffusion}(STO_{\text{SL}}, STO_{\text{SH}}, \\ \quad f_{\text{dif}}(A_{\text{SL}}, A_{\text{SH}}, L), < 2015 - 2016 >, \\ \quad < A_{\text{PD}, \text{SH}} \leq A_{\text{PD}, \text{SH max}} >) \\ R_{\text{Apd}, \text{UW} \rightarrow \text{SH}} = \text{Diffusion}(STO_{\text{UW}}, STO_{\text{SH}}, \\ \quad f_{\text{dif}}(A_{\text{UW}}, A_{\text{SH}}, L), < 2015 - 2016 >, \\ \quad < A_{\text{PD}, \text{SH}} \leq A_{\text{PD}, \text{SH max}} >) \end{array} \right. \quad (12)$$

式中: L 表示扩散距离。另外,上述公式中的关系约束条件是周围环境的石油挥发性污染物浓度含量要小于设定的浓度阈值。类似地,房屋室内的污染物浓度需要考虑土壤、地下水、空气中的污染物,经扩散、对流等动态污染室内环境的过程。这种属性关系也可用类似上式的公式描述,这里不再赘述。

(3) 时间关系

时间关系(R_T)表达的是任意两个事件或者时空对象发生的时间点或持续的时间段之间的相对关系,分为定性时间关系(Qualitative Temporal Relationship, R_{Tqa})和定量时间关系(Quantitative Temporal Relationship, R_{Tqn})。定性时间关系的表达侧重于对相对关系的描述,例如,事件A发生在事件B之前,事件C和事件A同时发生等等。定量事件关系则以公式、数值等方式精确地表达出两个事件之间的相对关系,强调可计算性。

1983年,艾伦提出了“艾伦区间代数”,用于描述定性时间关系。对于两个事件发生的时间段,其定义了13种可能的相对关系^[43]。对于任意事件A, B,其相对时间关系可以表达为这些可能性的组合,例如 $A(moOM)B$ 。

从污染企业到污染物,再到直接受体和间接受体的整个污染物传导过程中,存在时间上的因果关系,如果将各对象间关系看作一个事件(Event, E),相邻两个事件开始发生的时间可以通过定量时间关系描述,任意两个事件的关系可以通过定性时间关系描述。

假设石油公司泄漏石油的时间点为 t_0 ,那么,石

油公司与石油两个时空对象之间的时间关系表达为:

$$\left\{ \begin{array}{l} R_{T, \text{PE} \rightarrow \text{P}} = \{ R_{\text{Tqa}, \text{PE} \rightarrow \text{P}}, R_{\text{Tqn}, \text{PE} \rightarrow \text{P}} \} \\ R_{\text{Tqa}, \text{PE} \rightarrow \text{P}} = E_{\text{PE} \rightarrow \text{P}}(moFDseSdfOM) E_{\text{P} \rightarrow \text{SL}} \\ R_{\text{Tqn}, \text{PE} \rightarrow \text{P}} = t_0 \end{array} \right. \quad (13)$$

$R_{\text{Tqa}, \text{PE} \rightarrow \text{P}}$ 通过对两个事件的定性表达来确定此关系的相对时间关系。

石油污染土壤的时间关系表达为:

$$\left\{ \begin{array}{l} R_{T, \text{P} \rightarrow \text{SL}} = \{ R_{\text{Tqa}, \text{P} \rightarrow \text{SL}}, R_{\text{Tqn}, \text{P} \rightarrow \text{SL}} \} \\ R_{\text{Tqa}, \text{P} \rightarrow \text{SL}} = E_{\text{PE} \rightarrow \text{P}}(moFDseSdfOM) E_{\text{P} \rightarrow \text{SL}} \\ R_{\text{Tqn}, \text{P} \rightarrow \text{SL}} = f_{\text{P} \rightarrow \text{SL}}(A_{\text{P}}, A_{\text{SL}}, L) + t_0 \end{array} \right. \quad (14)$$

$R_{\text{Tqn}, \text{P} \rightarrow \text{SL}}$ 由起始时间 t_0 以及石油到土壤的传导函数 $f_{\text{P} \rightarrow \text{SL}}$ 决定,函数由石油和土壤本身相关性质以及土壤深度决定。

土壤中部分污染物下沉到深层土壤并污染地下水的关系表达为:

$$\left\{ \begin{array}{l} R_{T, \text{SL} \rightarrow \text{UW}} = \{ R_{\text{Tqa}, \text{SL} \rightarrow \text{UW}}, R_{\text{Tqn}, \text{SL} \rightarrow \text{UW}} \} \\ R_{\text{Tqa}, \text{SL} \rightarrow \text{UW}} = E_{\text{P} \rightarrow \text{SL}}(pmoDdOMP) E_{\text{SL} \rightarrow \text{UW}} \\ R_{\text{Tqn}, \text{SL} \rightarrow \text{UW}} = f_{\text{SL} \rightarrow \text{UW}}(A_{\text{SL}}, A_{\text{UW}}, L) + t_{\text{P} \rightarrow \text{SL}} \end{array} \right. \quad (15)$$

式中: $t_{\text{P} \rightarrow \text{SL}}$ 表示石油从开始污染土壤到传输至深层土壤过程的时间。其他时空对象间的定性与定量时间关系的表达与上述关系类似,不再赘述。

2.2.4 动态

动态(Dynamic, D)指的是时空对象因外界或自身的某种“刺激”而作出的反应,这种反应可以体现在对象间的关系变化上,也可能体现在对象本身的变化上,而传统GIS的“点、线、面”表达模型是无法表达对象动态变化的。动态的类型多种多样,包括引起物理变化的物理动态、根据参与人数数量划分的个体动态和群体动态、以动态持续的时间分类的短暂动态和持续动态,以及引起时空对象间空间、时间、语义、属性变化的对应动态等等。在污染场地中,主要考量的是时空对象的属性变化,又称属性动态(D_A)。污染场地中的属性动态可从两个方面描述,即污染物在污染场地中的传导能力,以及污染场地地块对周围房屋中不同污染受体的影响能力。例如,当污染物是挥发性有机物(如石油)时,污染场地动态应包括石油在土壤、地下水介质中的吸附与传导,以及经扩散与对流后污染周围空

2024年4月

气及房屋室内的过程等^[42]。

由于时空对象的属性动态可能会引起一个或多个属性的变化,为了简化描述,本文仅考虑动态引起的自身或其他时空对象的石油污染物浓度含量这一单一属性变化的情况。属性动态从以下4个方面描述:首先是动态的触发因素(*TriggerFactors*),包括时空对象本身与动态相关的性质,以及与动态变化相关的其他时空对象的相关性质;其次是时空对象的动态名称(*DynamicName*),主要包括改变自身属性的动态和改变其他时空对象属性的动态;接下来是动态的结果(*DynamicResult*),即引发时空对象自身或其他时空对象属性发生的变化;最后是动态的生命周期,即动态的持续时间,可以用时间段或时间点表示。公式表达如下:

$$D_{Aa1,STO1} = \{ TriggerFactors, DynamicName, DynamicResult, LC \} \quad (16)$$

石油泄漏后在不同介质间的传导过程可以归纳出石油的属性动态有:吸附在土壤介质上、溶解在地下水介质里以及扩散到空气中。因此,对于石油引发不同介质的污染浓度提高的属性动态(D_{Apd})可以表达为:

$$\begin{cases} D_{Apd,P} = \{ D_{Apd,P \rightarrow SL}, D_{Apd,P \rightarrow UW}, D_{Apd,P \rightarrow AIR} \} \\ D_{Apd,P \rightarrow SL} = \left\{ \{ A_p, A_{SL} \}, Adsorption, R_{Apd,SL}, \right. \\ \quad \left. < 2015 - 2016 > \right\} \\ D_{Apd,P \rightarrow UW} = \left\{ \{ A_p, A_{UW} \}, Dissolution, R_{Apd,UW}, \right. \\ \quad \left. < 2015 - 2016 > \right\} \\ D_{Apd,P \rightarrow AIR} = \left\{ \{ A_p, A_{AIR} \}, Diffusion, R_{Apd,AIR}, \right. \\ \quad \left. < 2015 - 2016 > \right\} \end{cases} \quad (17)$$

对居民来说,来自地下水、土壤、空气的污染还会引起自身“属性”的动态变化。大量事实表明,居住在受污染环境周围的居民,患癌率明显变高,且可能终生持续受到影响。因此,对于居民的自身属性发生的动态可表达为:

$$D_{Apd,NR} = \left\{ \{ A_{SL}, A_{UW}, A_{AIR}, A_{NR} \}, Influence, \right. \\ \left. R_{Apd,NR}, < 2015 - > \right\} \quad (18)$$

3 案例结果

本文将以2014年发生的一起真实事件为例,利用XML的表达方式,对污染场地进行对象化建模,并通过计算验证表达模型的准确性和可行性。

本文中的事件选自中国新闻网([https://www.](https://www.chinanews.com.cn)

[chinanews.com.cn](https://www.chinanews.com.cn))。事件发生时间为2014年6月30日18时30分,事件发生地点位于辽宁省大连市金州新区路安停车场附近,发生的泄漏事件为一起原油泄漏事故。事故原因是由大连岳林建筑工程有限公司施工方进行水平定向钻作业失误,钻通了输油管道引起。随后原油流入了地下污水管网,并在污水管网地面排污出口处发生火灾。原油管网为大连中石油公司新大一线,当公司发现此线路管道压力异常后,立刻关停管道,并启动应急预案,部署抢修抢险工作。当地消防部门也在接到通知后赶赴现场,最终于当晚22时20分将明火扑灭。有群众反馈,19时在污染场地附近能闻到浓重的汽油味,后经环保部门监测,其VOC浓度超标0.79倍,其他指标均正常^[25]。

3.1 时空对象属性及组成结构表达

图2展示了污染场地的名称、时空位置、生命周期、属性及其包含的时空对象,其中:

污染场地的空间位置由空间参照以及坐标点集合表示,将这些坐标顺序连接构成污染场地的空间范围。生命周期由时间参照以及时间标记集合表示,时间参照包含时间的记录标准以及时间标记的格式,时间标记由若干中括号表示,每一个中括号中包含一个或两个时间标记,用来表示时间点或者一段生命周期。

污染场地的属性以“空气中石油浓度含量($A_{pd,AIR}$)”为例进行展示。由于当晚19时在场地附近闻到浓重的汽油味,这与环保部门的监测数据中VOC浓度指标($A_{pd,max}$)超标0.79倍相对应,因此将其作为19时污染场地空气中石油浓度含量的属性值。

在“<Spatio-temporalObjects>”中,表达了组成此污染场地的时空对象。每一个时空对象同样包含时空位置、时空参照、属性、动态的描述。这里列出了以“石油”对象的密度为代表的属性的表达,以及石油向土壤和空气扩散污染的两个属性动态的描述方式。

3.2 时空对象及其关联关系表达

图3展示的是污染场地的关联关系表达部分。空间关系上,由于输油管线和污水管线存在空间上的相离关系,新大一线于1970年修建,污水管道的修建则更早,因此,其空间关系的生命周期从1970年开始,并持续到现在。此外,其相互之间的距离

```

<ContaminatedSite>
  <CS-Name>辽宁省大连市金州新区路安停车场附近</CS-Name>
  <CS-Location>
    <CS-Location-Reference>EPSG:4326</CS-Location-Reference>
    <CS-Location-Coordinates>
      {(121.81826,39.07597),(121.81893,39.07603),(121.82063,39.07302),(121.81788,39.07302)}
    </CS-Location-Coordinates>
  </CS-Location>
  <CS-LifeCycle>
    <CS-LifeCycle-Reference>{UTC,YYYY-MM-DD,HH:MM:SS}</CS-LifeCycle-Reference>
    <CS-LifeCycle>{(2014-06-30,18:30:00),(2014-06-30,22:20:00)}</CS-LifeCycle>
  </CS-LifeCycle>
  <Attributes>
    <Attribute>
      <Attribute-TimeStamp>{2014-06-30,19:00:00}</Attribute-TimeStamp>
      <Attribute-Name>Apd,AIR</Attribute-Name>
      <Attribute-Value>{0.79Apd,max}</Attribute-Value>
    </Attribute>
    <Attribute>...</Attribute>
  </Attributes>
  <Spatio-temporalObjects>
    <STO>
      <STO-Name>石油</STO-Name>
      <Dynamics>
        <Dynamic>
          <Dynamic-Name>DApd,P→SL</Dynamic-Name>
          <Dynamic-Name>DApd,P→AIR</Dynamic-Name>
        </Dynamic>
      </Dynamics>
      <Attributes>
        <Attribute>
          <Attribute-Name>Ap,pd</Attribute-Name>
          <Attribute-value>0.8g/cm3</Attribute-value>
        </Attribute>
        <Attribute>...</Attribute>
      </Attributes>
    </STO>
    <STO>
      <STO-Name>空气</STO-Name>
      ...
    </STO>
    <STO>
      <STO-Name>土壤</STO-Name>
      ...
    </STO>
    <STO>
      <STO-Name>中石油原油管道新大一线</STO-Name>
      ...
    </STO>
    <STO>
      <STO-Name>污水管道</STO-Name>
      ...
    </STO>
  </Spatio-temporalObjects>

```

图2 污染场地时空位置、生命周期、属性及包含的时空对象的XML表达及文件存储

Figure 2 Spatiotemporal location, life cycle, attributes, and involved objects of the contaminated site with XML expression and file storage

```

<Relationships>
  <Spatial-Relationships>
    <Spatial-Relationship>
      <Spatial-Relationship-Objects>
        <STO1>中石油原油管道新大一线</STO1>
        <STO2>污水管道</STO2>
      </Spatial-Relationship-Objects>
      <Topological-Relationship>
        <Relationship-Name>Disjoint</Relationship-Name>
        <Relationship-Strength>0</Relationship-Strength>
        <Relationship-LifeCycle>(1970-现在)</Relationship-LifeCycle>
        <Relationship-Constraints>(Diffusion(原油),STO1->STO2,true)</Relationship-Constraints>
      </Topological-Relationship>
      <Orientational-Relationship>
        <Relationship-Name>Down</Relationship-Name>
        <Relationship-Strength>0</Relationship-Strength>
        <Relationship-LifeCycle>(1970-现在)</Relationship-LifeCycle>
        <Relationship-Constraints>(Diffusion(原油),STO1->STO2,true)</Relationship-Constraints>
      </Orientational-Relationship>
    </Spatial-Relationship>
  </Spatial-Relationships>
  <Attribute-Relationships>
    <Attribute-Relationship>
      <Attribute-Relationship-Objects>
        <STO1>土壤</STO1>
        <STO2>空气</STO2>
      </Attribute-Relationship-Objects>
      <Relationship-Name>Apd,AIR</Relationship-Name>
      <Relationship-LifeCycle>{(2014-06-30,18:30:00),(2014-06-30,19:00:00)}</Relationship-LifeCycle>
      <Relationship-Constraints>{{DApd,P→S L,DApd,S L→A I R},DApd,P→A I R} </Relationship-Constraints>
    </Attribute-Relationship>
  </Attribute-Relationships>
</Relationships>

```

图3 污染场地关联关系(空间、属性、时间关系)的XML表达及文件存储

Figure 3 Relationship connections (spatial, attribute, temporal relationships included) of contaminated site XML expression and file storage

还应控制在原油在当地土壤性质下扩散范围内,因此,这个条件可以作为空间关系的限制约束之一。在属性关系上,自石油泄漏事件发生开始,就不断有挥发污染物扩散至空气中;同时,泄漏至土壤中的石油也有一部分挥发至空气中,这两种环境行为导致了污染场地的空气浓度升高。由于直至19时,空气中石油浓度仍然较高,因此,此属性关系的生命周期自泄漏时间开始而开始,生命周期确定大于半个小时。另外,此属性关系的约束,则是取决于石油本身分别向土壤和空气扩散的两个属性动态。

3.3 时空对象动态的表达

图4展示的是石油从土壤向空气扩散的表达。此动态属于“石油”时空对象,其涉及到的其他时空

对象是“土壤”和“空气”。扩散行为的结果是根据环保部门的监测数据得出的。因此,这里分别记录了属性名称,记录时间以及对应的属性值。另外,这里用中括号表达生命周期的某个时间段或时间点,如果中括号内有两个时间点,那么此动态的生命周期以这两个时间点为始末的这段时间,一个动态完整的生命周期可以由若干中括号的组合来表达。

3.4 模型的应用案例

若要实现污染场地的有效管控和精准修复,那么首先需要做好污染场地的风险评估工作。不过,由于石油污染场地包含的环境行为较多,污染成分较复杂,使得污染情况难以准确把握,因此,在实际

```

<Dynamics>
  <Dynamic>
    <Dynamic-Name>石油从土壤向空气扩散</Dynamic-Name>
    <Dynamic-Objects>
      <STO-main>石油</STO-main>
      <STO1>土壤</STO1>
      <STO2>空气</STO2>
    </Dynamic-Objects>
    <TriggerFactors>{Diffusion(原油),STO1->STO2,true}</TriggerFactors>
    <Dynamic-Result>(Apd,AIR,(2014-06-30,19:00:00),0.79Apd,max)</Dynamic-Result>
    <LifeCycle>{[(2014-06-30,18:30:00),(2014-06-30,19:00:00)]}</LifeCycle>
  </Dynamic>
  <Dynamic>...</Dynamic>
</Dynamics>
...
</ContaminatedSite>

```

图4 污染场地扩散过程XML表达及文件存储

Figure 4 XML expression and file storage of diffusion process of the contaminated site

情况中掣肘污染场地的评估与修复。

基于本文理论模型的应用,可有效实现对污染物浓度的归因分析,并计算出实际污染情况,提升污染场地的评估效率。图5是污染场地对象的可视化展示。通过将此事件场景中的对象及其环境行为梳理并建模后,可以将其应用到污染场地污染物浓度的归因分析中。首先,当VOC浓度超标0.79倍时,此时空气中的VOC浓度来源于石油从泄漏处直接挥发至空气中,以及石油先扩散到土壤,再经由土壤挥发至空气中两部分构成。在明确石油污染的直接受体是土壤和空气的情况下,根据石油和空气的属性特征,可以得出污染场地中石油直接挥发至空气中的浓度含量,从而反算出土壤挥发至空气中的浓度含量,形成对空气中VOC浓度的归因分析。

其次,通过对象表达模型,可以更便捷地计算出暴露浓度评估指标,进行暴露评估。暴露评估是污染场地健康风险评价指标之一,其包括暴露背景、暴露途径及暴露量化三方面的确定^[44]。结合本文的分析,暴露背景指的是石油对象及其存在于周围环境中的各种形态;暴露途径即石油污染物进入人体的途径,前面的归因分析描述了污染物与环境间发生的各种环境行为,可作为本文暴露途径分析的基础;暴露量化则是对石油污染物的各种环境行为的定量表达。另外,此模型还记录每种环境行为的生命周期,可以得出人群的暴露期,并进一步估

算出人体摄取的污染物总量。因此,应用此模型可以大大提高健康风险评价效率。例如,以呼吸途径为例,论文^[45]计算呼吸挥发性气体的公式为:

$$Intake = \frac{C_a \times IR \times ET \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (19)$$

式中: $Intake$ 为单位时间单位体重污染物摄取量(mg/kg/天); C_a 为空气中挥发性气体浓度(mg/m^3); IR 为摄取速率($\text{m}^3/\text{小时}$); ET 和 EF 分别为暴露时间(小时/天)和频率(天/年); ED 为暴露期(年); BW 为人群平均质量(kg); AT 为平均暴露时间(天)。除 C_a 外,其他参数均为与个体有关的参数。

在本文案例中,根据式(19)可得周围居民所在地的污染物浓度 $A_{pd,AIR}$,假设 $A_{pd,AIR}$ 是 7.9 mg/m^3 ,并将其他参数值代入为正常人体的平均参数,如式(20)所示,即可算出正常人在当地通过呼吸途径摄取的污染物剂量约为 $6.656 \times 10^{-4} \text{ mg/kg/天}$ 。

$$\begin{cases} IR = 15 \text{ m}^3/\text{h} \\ ET = 8 \text{ 小时/天} \\ EF = 250 \text{ 天/年} \\ ED = 1 \text{ 年} \\ BW = 70 \text{ kg} \\ AT = 365 \text{ 天} \end{cases} \quad (20)$$

另一方面,从污染场地修复上,根据石油在污染场地中的环境行为模型以及上述推理,可得知石油分别对土壤和空气造成的污染程度,并进一步估算对周围环境、居民造成的间接影响。据此可针对性的投放修复材料与设计修复方法,并通过对周围环境、居民、空气中VOC浓度的周期性的监测,实现

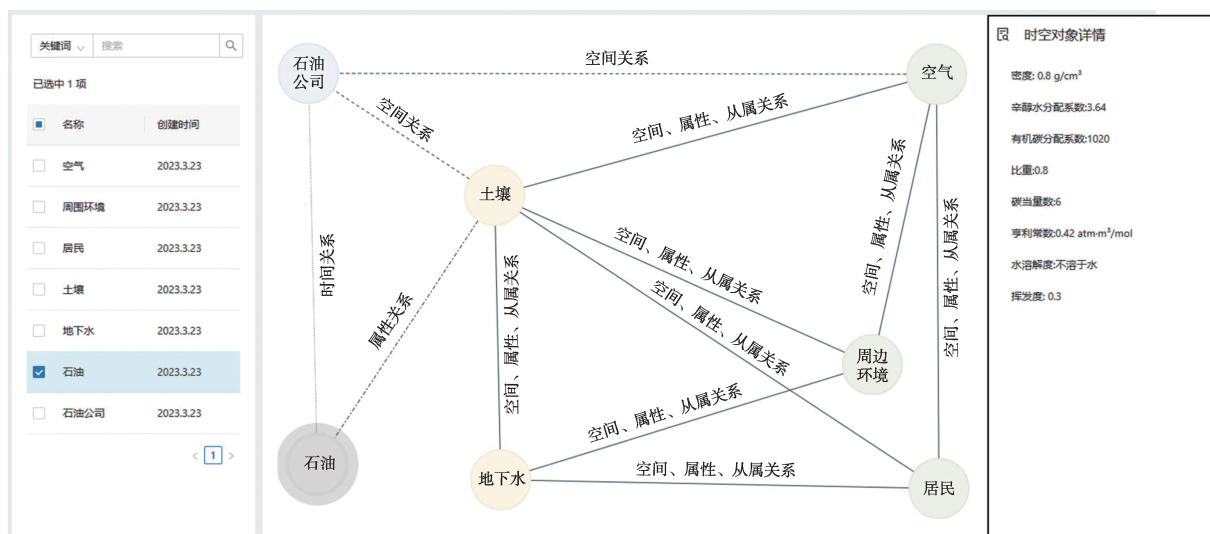


图5 污染场地对象的可视化表达

Figure 5 Visualization expression of the contaminated site

精准评估与高效修复污染场地。

4 结论

本文以空间建模为视角,围绕污染物从源到汇的全过程,对污染场地的全要素信息进行了抽象,包括时空对象及其组成结构,并对时空对象的属性特征进行了描述与表达,接下来从空间、时间、属性关系三方面描述污染场地时空对象间的关联关系,并对时空对象中的属性动态进行归纳和梳理,系统完整地构建污染场地对象表达模型理论。本文得出的结论是:

(1)本模型可应用在污染物归因分析及暴露评估领域。通过可视化表达,直观展示各时空对象的关联和属性特征,同时可以快速获取暴露评估指标的相关计算参数,从而更便捷地进行健康风险评估。

(2)实验结果表明,本文提出的污染场地对象表达方法可以有效地描述有机污染物从源到汇的全过程,完整地建模与表达污染过程中涉及到的时空实体、相互间的关联关系和环境行为,并可通过原型系统直观展示,基本实现对污染场地全生命周期的分析与表达,为污染场地精准管控与修复提供参考。

然而,本文提出的模型还有许多地方亟待改进。后续工作中,在理论层面上,需要进一步考虑如何记录及存储污染场地对象表达模型中的各种

变化,以及面向多源复杂污染物的场景中,更复杂的时空对象间关系的表达。另外,目前此方法仍在理论阶段,需要更多的实际案例来检验和完善。

参考文献(References):

- [1] 孙兴凯, 黄海, 王海东, 等. 大型污染场地修复过程中的问题探讨与工程实践[J]. 环境工程技术学报, 2020, 10(5): 883-890. [Sun X K, Huang H, Wang H D, et al. Discussion of problems in the process of large-scale contaminate sites remediation and project practice[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2020, 10(5): 883-890.]
- [2] 胡宗义, 李毅. 环境信息披露的污染减排效应评估[J]. 统计研究, 2020, 37(4): 59-74. [Hu Z Y, Li Y. Assessment of the pollution reduction effect of environmental information disclosure[J]. Statistical Research, 2020, 37(4): 59-74.]
- [3] Song Y, Lv Y, Qian S T, et al. Identifying urban candidate brown-field sites using multi-source data: The case of Changchun City, China[J]. Land Use Policy, 2022, DOI: 10.1016/j.landuse-pol.2022.106084.
- [4] 姜林, 梁竞, 钟茂生, 等. 复杂污染场地的风险管理挑战及应对[J]. 环境科学研究, 2021, 34(2): 458-467. [Jiang L, Liang J, Zhong M S, et al. Challenges and response to risk management of complex contaminated sites[J]. Research of Environmental Sciences, 2021, 34(2): 458-467.]
- [5] 骆永明, 滕应. 中国土壤污染与修复科技研究进展和展望[J]. 土壤学报, 2020, 57(5): 1137-1142. [Luo Y M, Teng Y. Research progresses and prospects on soil pollution and remediation in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(5): 1137-1142.]
- [6] Gomez-Hernandes J, Xu T. Contaminant source identification in

- aquifers: A critical view[J]. *Mathematical Geosciences*, 2022, 54(3): 437–458.
- [7] Moghaddam M B, Mazaheri M, Samani J M V. Inverse modeling of contaminant transport for pollution source identification in surface and groundwaters: A review[J]. *Groundwater for Sustainable Development*, 2021, DOI: 10.1016/j.gsd.2021.100651.
- [8] 张腾飞. 针对汽油和柴油污染的功能微生物组构建及降解动力学研究[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2021. [Zhang T F. Research on Functional Microbiome Construction and Degradation Kinetics of Gasoline and Diesel Pollution[D]. Jinan: Qilu University of Technology, 2021.]
- [9] 周翔. 苯系物在土壤中的吸附及热脱附行为研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2022. [Zhou X. The Research on Adsorption and Thermal Desorption Behavior of Benzene Series in Soil[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2022.]
- [10] Jiang X, Ma R, Wang Y, et al. Two-stage surrogate model-assisted Bayesian framework for groundwater contaminant source identification[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.125955.
- [11] Yin J, Tsai F T C. Bayesian set pair analysis and machine learning based ensemble surrogates for optimal multi-aquifer system remediation design[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.124280.
- [12] Sit M, Demiray B Z, Xiang Z R, et al. A comprehensive review of deep learning applications in hydrology and water resources[J]. *Water Science and Technology*, 2020, 82(12): 2635–2670.
- [13] 赵涛, 周宇, 马刚平, 等. 焦化类污染场地原位热脱附修复效果试验[J]. *环境工程*, 2021, 39(4): 201–205. [Zhao T, Zhou Y, Ma G P, et al. Experimental study on restoration effect of in situ thermal desorption in coking contaminated sites[J]. *Environmental Engineering*, 2021, 39(4): 201–205.]
- [14] 籍龙杰, 陈芒, 张维琦, 等. 原位热脱附去除土壤有机污染机理及技术研究[J]. *能源环境保护*, 2022, 36(5): 46–52. [Ji L J, Chen M, Zhang W Q, et al. Study of organic pollutant removal mechanism and technology for in-situ thermal desorption in soil[J]. *Energy Environmental Protection*, 2022, 36(5): 46–52.]
- [15] 兰鹏鹏, 万大娟, 董法秀, 等. 冶炼厂遗留场地土壤重金属污染分析及健康风险评价[J]. *湖南农业科学*, 2019, (4): 59–63. [Lan P P, Wan D J, Dong F X, et al. Pollution analysis and health risk assessment of heavy metal in a smelter site[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2019, (4): 59–63.]
- [16] 董林明, 宋景辉, 曹嘉萌, 等. 工业地块土壤与地下水污染风险分级方法国际比较研究[J]. *环境污染与防治*, 2023, 45(1): 113–121. [Dong L M, Song J H, Cao J M, et al. International comparative study of soil and groundwater pollution risk ranking methods for industrial land[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2023, 45(1): 113–121.]
- [17] 葛锋, 张转霞, 扶恒, 等. 我国有机污染场地现状分析及展望[J]. *土壤*, 2021, 53(6): 1132–1141. [Ge F, Zhang Z X, Fu H, et al. Distribution of organic contaminated sites in China: Statu quo and prospect[J]. *Soils*, 2021, 53(6): 1132–1141.]
- [18] 刘丽, 孙炜琳, 姜茜, 等. 环境政策对畜禽养殖污染排放的影响及机制[J]. *资源科学*, 2022, 44(5): 1051–1065. [Liu L, Sun W L, Jiang Q, et al. Impact and mechanism of environmental policies on pollution emissions from livestock and poultry breeding[J]. *Resources Science*, 2022, 44(5): 1051–1065.]
- [19] 王文兵, 李春阳, 董纤凌, 等. 双碳背景下污染场地修复策略与技术前景[J]. *环境工程学报*, 2023, 17(1): 188–196. [Wang W B, Li C Y, Dong Q L, et al. Strategies and technology prospects for contaminated site remediation in carbon peak and carbon neutrality vision[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2023, 17(1): 188–196.]
- [20] 张红振. 大型复杂污染场地绿色修复与可持续风险管控关键技术及应用[J]. *中国环保产业*, 2022, (2): 63–64. [Zhang H Z. Key technology for green remediation of large and complex contaminated sites and sustainable risk management and control and its application[J]. *China Environmental Protection Industry*, 2022, (2): 63–64.]
- [21] Ali-Toudert F, Ji L, Fährmann L, et al. Comprehensive assessment method for sustainable urban development(CAMSUD): A new multi-criteria system for planning, evaluation and decision-making[J]. *Progress in Planning*, 2020, DOI: 10.1016/j.progress.2019.03.001.
- [22] 于靖靖, 梁田, 罗会龙, 等. 近十年来我国污染场地再利用的案例分析与环境管理意义[J]. *环境科学研究*, 2022, 35(5): 1110–1119. [Yu J J, Liang T, Luo H L, et al. Case analysis and environmental management significance of contaminated site reuse in China from 2011 to 2021[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2022, 35(5): 1110–1119.]
- [23] 华一新, 周成虎. 面向全空间信息系统的多粒度时空对象数据模型描述框架[J]. *地球信息科学学报*, 2017, 19(9): 1142–1149. [Hua Y X, Zhou C H. Description frame of data model of multi-granularity spatio-temporal object for Pan-spatial Information System[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2017, 19(9): 1142–1149.]
- [24] Zhang W Q, Xi Z L. Application of Delphi method in screening of indexes for measuring soil pollution value evaluation[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2021, 28(6): 6561–6571.
- [25] 中国新闻网. 中石油大连输油管泄漏事故未对自来水管网造成污染[N/OL]. (2014–07–01) [2023–05–31]. <https://www.chinanews.com.cn/sh/2014/07-01/6339190.shtml>. [China News. The Leakage Accident of Petro China Dalian Oil Pipeline Did Not Pollute the Water Pipe Network[N/OL]. (2014–07–01) [2023–05–31]. <https://www.chinanews.com.cn/sh/2014/07-01/6339190.shtml>.]
- [26] 许明军, 冯淑怡, 苏敏, 等. 基于要素供容视角的江苏省资源环境承载力评价[J]. *资源科学*, 2018, 40(10): 1991–2001. [Xu M J, Feng S Y, Su M, et al. The evaluation of resource environmental

2024年4月

- carrying capacity in Jiangsu Province on the factor supply perspective[J]. *Resources Science*, 2018, 40(10): 1991–2001.]
- [27] 黄文建, 陈芳, 么强, 等. 地下水污染现状及其修复技术研究进展[J]. *水处理技术*, 2021, 47(7): 12–18. [Huang W J, Chen F, Yao Q, et al. Research progress on groundwater pollution and its remediation technology[J]. *Technology of Water Treatment*, 2021, 47(7): 12–18.]
- [28] 宋晓谕, 陈玥, 闫慧敏, 等. 水资源资产负债表表式结构初探[J]. *资源科学*, 2018, 40(5): 899–907. [Song X Y, Chen Y, Yan H M, et al. Initial research into an accounting framework for a water resource balance sheet[J]. *Resources Science*, 2018, 40(5): 899–907.]
- [29] 袁增伟, 程明今. 物质循环科学的研究对象、理论与方法[J]. *资源科学*, 2021, 43(3): 435–445. [Yuan Z W, Cheng M J. Object, theories and methods of material cycling science[J]. *Resources Science*, 2021, 43(3): 435–445.]
- [30] 周成虎. 全空间地理信息系统展望[J]. *地理科学进展*, 2015, 34(2): 129–131. [Zhou C H. Prospects on pan-spatial information system[J]. *Progress in Geography*, 2015, 34(2): 129–131.]
- [31] 李锐, 石佳豪, 董广胜, 等. 多粒度时空对象组成结构表达研究[J]. *地球信息科学学报*, 2021, 23(1): 113–123. [Li R, Shi J H, Dong G S, et al. Research on expression of multi-granularity spatio-temporal object composition structure[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2021, 23(1): 113–123.]
- [32] 文娜, 张英卓, 陈达. 多粒度时空对象属性关联关系的组成与交互式构建方法[J]. *地理信息世界*, 2018, 25(2): 17–22. [Wen N, Zhang Y Z, Chen D. The composition and interactive build method of multi-granularity spatial-temporal objects attributive associative relationship[J]. *Journal of Spatial-temporal Information*, 2018, 25(2): 17–22.]
- [33] 张政. 时空对象关联关系生成、管理与可视化关键技术研究[D]. 郑州: 战略支援部队信息工程大学, 2020. [Zhang Z. Research on Key Technology of Spatio-temporal Object Associative Relationship Generation, Management, and Visualization[D]. Zhengzhou: PLA Information Engineering University, 2020.]
- [34] 曾梦熊, 华一新, 张江水, 等. 多粒度时空对象动态行为表达模型与方法研究[J]. *地球信息科学学报*, 2021, 23(1): 104–112. [Zeng M X, Hua Y X, Zhang J S, et al. Research on dynamic behavior expression model and method of multi-granularity spatio-temporal objects[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2021, 23(1): 104–112.]
- [35] 华一新, 赵鑫科, 张江水. 地理信息系统研究新范式[J]. *地球信息科学学报*, 2023, 25(1): 15–24. [Hua Y X, Zhao X K, Zhang J S. New paradigm of geographic information systems research[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2023, 25(1): 15–24.]
- [36] 滕应, 骆永明, 沈仁芳, 等. 场地土壤-地下水污染物多介质界面过程与调控研究进展与展望[J]. *土壤学报*, 2020, 57(6): 1333–1340. [Teng Y, Luo Y M, Shen R F, et al. Research progress and perspective of the multi-medium interface process and regulation principle of pollutants in site soil-groundwater[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57(6): 1333–1340.]
- [37] Liu Z, Gu M, Zhu W, et al. Petroleum-contamination drives the shift of microbiome through modifying soil metallome[J]. *Land Degradation & Development*, 2022, 33(10): 1718–1730.
- [38] Villa Y B, Khalsa S D S, Ryals R, et al. Organic matter amendments improve soil fertility in almond orchards of contrasting soil texture[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2021, DOI: 10.1007/s10705-021-10154-5.
- [39] 陈捷. 石油烃组分在土壤和地下水环境中的分布规律与迁移特征研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018. [Chen J. Distribution and Migration Characteristics of Petroleum Hydrocarbon Components in Soil and Groundwater Environment[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.]
- [40] 吴志远, 张丽娜, 夏天翔, 等. 基于土壤重金属及PAHs来源的人体健康风险定量评价: 以北京某工业污染场地为例[J]. *环境科学*, 2020, 41(9): 4180–4196. [Wu Z Y, Zhang L N, Xia T X, et al. Quantitative assessment of human health risks based on soil heavy metals and PAHs sources: Take a polluted industrial site of Beijing as an example[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(9): 4180–4196.]
- [41] Wang L, Cheng Y, Naidu R, et al. The key factors for the fate and transport of petroleum hydrocarbons in soil with related in/ex situ measurement methods: An overview[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2021, DOI: 10.3389/fenvs.2021.756404.
- [42] 张文毓, 钟茂生, 姜林, 等. 污染场地中VOCs的环境行为与调查评估技术[J]. *中国环境科学*, 2023, 43(6): 2814–2822. [Zhang W Y, Zhong M S, Jiang L, et al. Environmental behavior, investigation and risk assessment technologies of VOCs in contaminated sites[J]. *China Environmental Science*, 2023, 43(6): 2814–2822.]
- [43] Allen J F. Maintaining knowledge about temporal intervals[J]. *Communications of the ACM*, 1983, 26(11): 832–843.
- [44] 刘婕, 徐东群. 环境空气污染空间分布插值模型及其应用[J]. *卫生研究*, 2020, 49(1): 169–173. [Liu J, Xu D Q. Interpolation model for spatial distribution of environmental air pollution and its application[J]. *Journal of Hygiene Research*, 2020, 49(1): 169–173.]
- [45] 陈鸿汉, 谌宏伟, 何江涛, 等. 污染场地健康风险评价的理论和方法[J]. *地学前缘*, 2006, (1): 216–223. [Chen H H, Zhan H W, He J T, et al. Health-based risk assessment of contaminated sites: Principles and methods[J]. *Earth Science Frontiers*, 2006, (1): 216–223.]

Method and case study of the contaminated site's expression using an object-based model

WANG Jiahe^{1,2}, ZHOU Rui³, YUAN Yecheng^{1,2}, ZHAO Xinke⁴, SHEN Jing^{1,2},
LEI Mei^{2,5}, WAN Qing^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Image Sky Beijing Technology Co.Ltd, Beijing 100086, China; 4. Institute of Geographic Space Information, PLA Strategic Support Force Information Engineering University, Zhengzhou 450052, China; 5. Key Laboratory of Resources Use and Environmental Remediation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: [Objective] In recent decades, with the rapid industrial growth and urbanization in China, pollution incidents like oil spills and heavy metal contamination have become frequent. Under this background, accurate assessment of the entire pollution process and control of polluted sites are crucial steps in achieving pollution site remediation and restoration. [Methods] This study adopts an object-based perspective and a systematic analysis approach to describe the migration of pollutants from source to sink, emphasizing the environmental behavior during their migration. It abstractly represents contaminated sites and associated entities as spatiotemporal objects, focusing on pollutant concentrations and their attributes. It also explores the interrelationships among spatiotemporal objects from temporal, spatial, and attribute perspectives, as well as describes their dynamic influences. [Results] (1) Taking the real incident of an oil spill in 2014 as an example, an object-based representation model of the contaminated site was constructed using the XML structure. (2) A visualization method for expressing contaminated site objects has been established, which displays the interrelationships and attribute characteristics of various spatiotemporal objects. (3) Attempts to apply the representation model to conduct attribution analysis of pollutant concentrations have been made, allowing for the rapid acquisition of relevant calculation parameters for exposure assessment indicators, thereby facilitating more convenient health risk evaluations. [Conclusion] The experimental results demonstrate that the proposed object-based representation method can effectively describe and model contaminated sites, facilitating the comprehensive analysis and evaluation of pollution processes from source to sink. It provides significant support for the management and remediation of contaminated sites. Furthermore, the object-based representation method proposed offers practical guidance in addressing complex problems. By considering the research subject as an object and analyzing and expressing it from various aspects such as composition, attribute features, interrelationships, and behavioral dynamics, a better understanding of the internal relationships and interactions within the research object can be achieved, thereby providing a clear perspective for the analysis and evaluation of related issues.

Key words: geographic information system; contaminated sites; object-based model; pan-spatial information system; spatiotemporal object; spatial modeling