

# 面向污染企业数字孪生体构建的多粒度时空实体建模

崔晓琛<sup>1</sup>, 田云<sup>2</sup>, 张健钦<sup>1</sup>, 赵苗苗<sup>3</sup>, 马茂鑫<sup>1</sup>, 胡超男<sup>1</sup>, 姜会忠<sup>4</sup>

1. 北京建筑大学 测绘与城市空间信息学院, 北京 102616;

2. 甘肃省生态环境部信息中心, 兰州 730030;

3. 生态环境部信息中心, 北京 100029;

4. 正元地理信息集团股份有限公司科技中心, 北京 101399

**摘要:** 污染企业数字孪生体是指与污染企业物理实体完全等价的计算机信息模型, 是实现在产污染企业场地管控智能化的基础。目前数字孪生体的构建方法在面对污染企业污染源种类多、源汇关系复杂及溯源难度大的情况时, 难以实现对污染企业物理实体特征数据的完整表达。因此, 本文提出一种构建污染企业数字孪生体的多粒度时空实体建模方法, 通过对污染企业时空实体相关特征和关系的建模分析, 以数据模型的形式实现对污染企业场地实体全面多维的信息描述与刻画。以广州市某橡胶厂为应用案例, 进行数据模型的实例验证。结果表明, 多粒度时空实体建模能高效组织和表达实体多维度的特征, 实现污染企业数字孪生体模型的精准构建, 为污染企业数字孪生应用服务提供有效方法和数据模型基础。

**关键词:** 遥感, 污染企业, 数字孪生体, 实体特征数据, 多粒度时空实体建模, 数据模型

**中图分类号:** P2

**引用格式:** 崔晓琛, 田云, 张健钦, 赵苗苗, 马茂鑫, 胡超男, 姜会忠. 2024. 面向污染企业数字孪生体构建的多粒度时空实体建模. 遥感学报, 28(5): 1364-1373

Cui X C, Tian Y, Zhang J Q, Zhao M M, Ma M X, Hu C N and Jiang H Z. 2024. Multigranularity spatiotemporal entity modeling approach for the construction of digital twin entity for polluting enterprises. National Remote Sensing Bulletin, 28(5): 1364-1373 [DOI: 10.11834/jrs.20243299]

## 1 引言

数字孪生是采用信息技术对物理实体的组成、特征、功能和性能进行数字化定义和建模的过程。数字孪生体是指在计算机虚拟空间存在的与物理实体完全等价的信息模型, 可以基于数字孪生体对物理实体进行仿真分析和优化。数字孪生是技术、过程、方法, 数字孪生体是对象、模型和数据(刘大同等, 2018; 陶飞等, 2019)。数字孪生体模型是指从多维度、多空间尺度及多时间尺度对物理实体进行描述与刻画, 可以实现对物理实体的真实映射(陶飞等, 2018)。

目前, 在生态环境领域, 存在产业集群区、工业集聚区在产企业土壤—地下水污染源和污染物种种类多、源汇关系复杂、污染预警与溯源难度

大等问题, 需要研究利用数字孪生技术, 建立在产企业厂区实景三维模型和厂内数字孪生模型, 将实时监测的数据纳入到土壤与地下水孪生仿真体系中, 进行快速数据融合和仿真推演, 最终形成一个完整的多粒度污染企业厂区的数字孪生体系。同时基于三维引擎集成数字孪生模型, 研发具有多源监测数据接收、数据存储与管理、污染分析与预测、智能预警、污染溯源、智慧化防控决策等功能的智能管理平台, 实现在产污染企业场地管控透明化、智能化。

当前, 针对污染企业场地实体要素模型构建的研究, 主要侧重于三维模型的构建方法(周圣文等, 2023; Kousi等, 2019; Yang等, 2022), 忽略了企业实体自身几何参数、属性、关系等特征数据的完整表达和描述, 无法满足全面且多维

收稿日期: 2023-08-24; 预印本: 2024-01-16

基金项目: 国家重点研发计划(编号: 2022YFC3703103); 北京建筑大学2023年度博士研究生科研能力提升项目(编号: DG2023017, DG2023018)

第一作者简介: 崔晓琛, 研究方向为三维GIS可视化分析方法与应用。E-mail: 2108570021063@stu.bucea.edu.cn

通信作者简介: 张健钦, 研究方向为三维GIS可视化分析方法与应用研究、环境大数据、交通大数据可视化。E-mail: zhangjianqin@stu.bucea.edu.cn

动态地刻画企业实体。为了实现企业孪生实体模型的精准构建,需要采用更高效的方式组织与管理企业实体特征数据,选取合适的数据模型对企业场景进行建模。而传统GIS数据组织方式和数据模型以常规地图数据为模板进行间接地实体空间建模(方裕等,2001),限制了空间数据的应用,已难以适应多模态情况下实时动态关联等新的表达需求(陈云海等,2020)。针对这一问题,华一新(2016)从数据模型的角度,提出了多粒度时空对象数据模型。该模型从时空参考、空间位置、属性特征、空间形态、组成结构等方面对多粒度时空实体进行全方位描述,具有多维度、全属性的特征。该模型还增加了行为能力、关联关系等特征信息的描述,表达内容更全面、更符合实际实体表达(杨飞等,2020)。

污染企业实体特征数据来源广泛、属性数据多维、应用需求多样。所以在对污染企业时空实体进行建模时,不仅要考虑实体的数字特征和时空特征,还要考虑其关系特征和变化特征的描述。因此,本文基于多粒度时空对象数据模型的思想,研究了面向污染企业数字孪生体构建的多粒度时空实体建模方法,为验证该方法对于污染企业数字孪生体建模的可行性和实用性,以广州市某橡胶厂为例,对工厂、车间内部以及地下钻孔进行孪生模型构建及三维可视化实现。为污染企业孪生实体模型精准构建和数字孪生应用服务提供有效方法和数据模型基础。

## 2 污染企业多粒度时空实体建模过程和方法

### 2.1 污染企业多粒度时空实体建模一般过程

污染企业多粒度时空实体建模主要分为3个主要过程,即(1)污染企业实体时空多粒度分析;(2)特征和关系建模;(3)多粒度时空对象数据模型,如图1所示。首先从对污染企业客观实体的认知出发,对所表达和描述的实体进行多粒度分析,建立不同粒度下实体之间的关系。然后重点关注污染企业时空实体所包含的多元特征信息,进行特征和关系建模,这一过程旨在确保多粒度时空实体特征能够规范化地表达,将认知的结果按照相应的规范组织成与客观实体相对应的多粒

度时空对象数据模型。最后,我们可以基于数字孪生技术实现相应的客观实例对象,根据计算机组织存储逻辑生成多粒度时空对象数据模型。

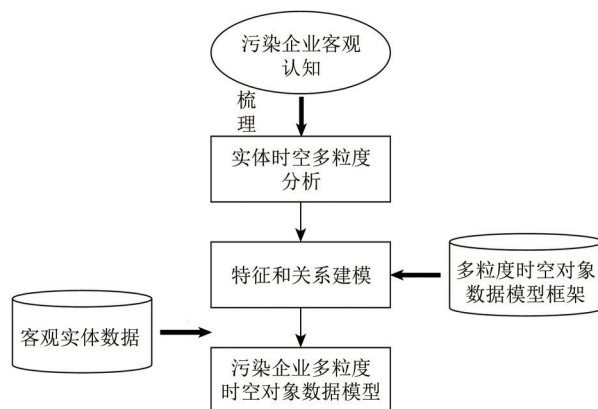


图1 污染企业多粒度时空实体建模一般过程

Fig. 1 General process of multi-granularity spatiotemporal entity modeling for polluting enterprises

### 2.2 污染企业实体时空多粒度分析

依据地理信息分类体系和地理实体空间数据规范对污染企业实体要素进行分类,并进行时间特征和空间特征的多粒度分析。通过分析,意味着相同的实体可以以不同尺度或层次进行观察和研究,也可以从多个层次和角度深入了解污染企业时空实体的性质和行为,这一过程将实体抽象为多粒度时空实体,为后续的建模和数据分析提供可靠的基础。

#### 2.2.1 实体要素多层次分类

根据《GB/T 25529—2010 地理信息分类与编码规则》的分类体系(朱庆等,2020)和《地理实体空间数据规范(GB/T 37118—2018)》国家标准,污染企业时空实体的分类采用线分类法从高位类到低位类构建分类体系,按照实体本身独特的语义特征,总结出污染企业空间范围内时空实体的6大要素类型,其中包含基础设施类实体、建筑类实体、地质类实体等。根据要素类型参考《GB/T 6565—2015 职业分类与代码》将实体进行分类汇总,并将污染企业时空实体要素集分解为门类、大类、中类、小类4个层级,每个层级又分为若干类目。不同层级类目之间构成隶属关系。最终形成高位分类体系共包含1个门类、6个大类、17个中类,具体分类体系如图2所示。

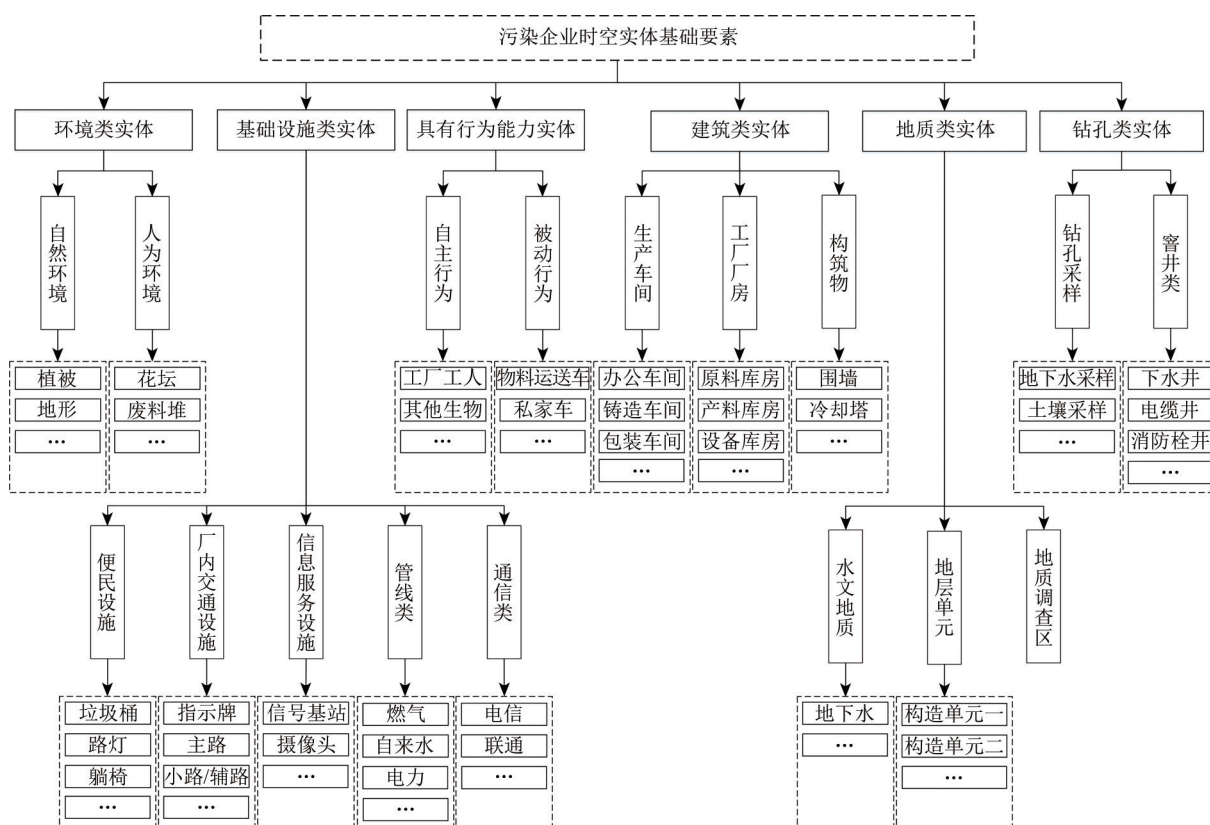


图2 污染企业时空实体要素分类体系

Fig. 2 Classification system for spatiotemporal entity elements of polluting enterprises

### 2.2.2 实体时空多粒度分析

时空多粒度主要考虑时间和空间两个维度，即对污染企业实体不同时间尺度和不同空间尺度的综合分析。

(1) 时间粒度包括常见的秒、分钟、小时到天、月、年等时间单位（李旭晖等，2023），也可以是自定义的企业生产单位时间、工人规定工作时间等具有确定时间起始、终止的时间区间引出的时间概念。污染企业内部实体的时间粒度可以关注生产和运营活动的时间轴。这包括生产批次、生产周期的时间安排以及设备的操作时间、累计生产时间和生产量等，时间粒度的不同可以影响生产效率、资源利用。同时内部设备的维护和维修也具有时间粒度特征，比如说设备的维修次数、停机时间等，时间粒度的不同可以影响设备的可用性和生产计划。对于污染企业，污染物的排放和监测也涉及时间粒度特性。例如，污染物排放的时间表、频率和持续时间；企业通常进行环境监测以收集有关空气质量、土壤与地下水、噪音等环境参数的数据，时间粒度可以涵盖数据采集的时间间隔，例如每小时、每日、每月或每年的数据采集。

(2) 空间粒度通常考虑不同的地理空间尺度，对污染企业时空实体的空间粒度分析主要涉及空间区域、空间要素（如点、线、面）以及空间单元（网格、办公楼、生产区）等。例如，不同设备的位置坐标、布局 and 空间关系的粒度体现。企业内部不同生产区域和车间的划分，每个区域可能用于不同的生产过程或产品制造，这种划分反映了空间粒度特性。企业通常需要运输液体、气体或固体物料，这涉及到管道、输送带和地下管线等，空间粒度体现在这些地下管线的布局、路径和连接；还可能需要储存原材料、成品或废弃物，空间粒度特征则体现为不同储存区域、仓库或货架的位置和存储条件。在环境管理和监测方面，重点关注污染物排放来源和钻孔采样的具体位置，其中涵盖了排放口、废水排放点、采样点等位置。

### 2.3 污染企业多粒度时空实体特征与关系建模

#### 2.3.1 实体特征描述

基于以上分析，结合多粒度时空对象数据模型描述框架（杨飞等，2021），该框架包括时空



参照、空间形态、时空位置、属性特征、组成结构等8个描述元组，在计算机虚拟环境中对不断进行时空变化的污染企业实体对象进行描述，所

构建的描述模型如图3所示。其中对象版本是用来记录污染企业实体对象在时空过程中所发生的变化。

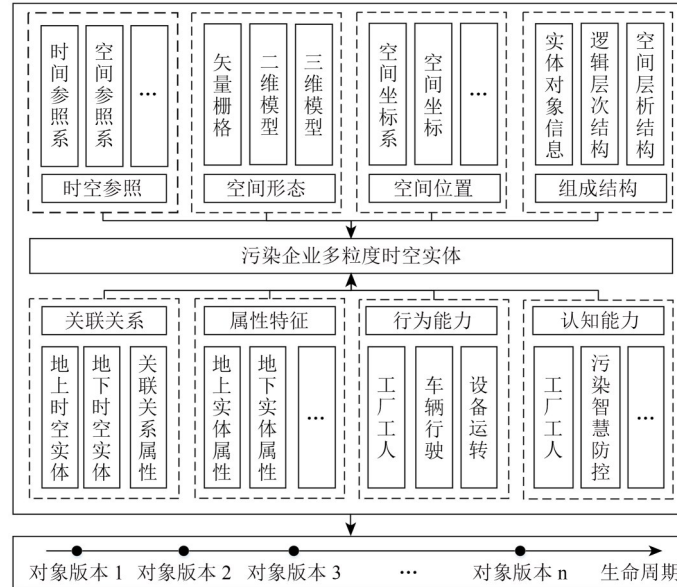


图3 实体特征描述模型

Fig. 3 Entity feature description model

### 2.3.2 实体特征建模

依照实体特征描述模型，污染企业中并非每个实体对象都完全具有这些特征，其中属性特征、时空位置等特征还可能会随着时空的变化而发生改变。本文对污染企业中的时空实体对象进行建模分析，总结出各对象的特征情况（表1），其中主要包括以下内容：（1）厂区对象的组成结构特征中，父对象是整个厂区，子对象则包括担任不同职能的车间、构筑物及其他设施；其空间形态特征中，几何特征取决于应用尺度。当以整个厂区为应用尺度时，将车间抽象为矩形；当以车间为应用尺度时，将其子对象加工设备抽象为点，流水线加工抽象为线段。（2）车间的组成结构中，父对象是整个车间，子对象包含物料、生产流水线所涉及的加工设备、控制设备等。加工设备、控制设备等对象属性特征中的附属属性描述了设备的运行状态、运行时间的变化，其行为能力是指将原料生产为成品的能力。（3）对于环境类实体，现实涉及的数据具有一定的局限性，不能实现其行为能力、认知能力特征的描述，本文主要关注除行为能力、认知能力外环境类实体其他特征的研究。（4）车辆对象的行为能力指车辆的行驶行为，属于被动行为。（5）地下空间实体组成

结构中，整个厂区地下空间为父对象，子对象包含污染物、地质类实体、钻孔类实体、管线设施，其中随着污染的排放，地下不同种类的污染物的时空位置、形态、浓度属性等都会发生改变。（6）工厂工人具有行为能力、认知能力，是企业生产、建设、维护的实体。

### 2.3.3 实体关联关系描述

关联关系描述了污染企业实体之间关联、作用、约束等关系以及它们的强弱程度（张政等，2017），也是辅助污染企业数字孪生体模型构建的重要依据。污染企业时空实体对象间关联关系呈现出复杂多样性，需按照多粒度时空实体关联关系特征的表达与不同粒度下实体的属性特征和要素类型进行分析建模。同时，在生命周期中污染企业实体对象间的关联关系及强弱都会随着时间和场景的改变而发生变化（张永树等，2021），如图4所示。此外，根据时间跨度的不同，在某一时刻对应的空间范围内时空对象间的关联关系可以看作一个集合表示为

$$TSv = \{(t, Sv)\} \quad (1)$$

式中， $TSv$ 表示可视化空间范围集合， $t$ 表示某一时刻， $Sv$ 表示 $t$ 时刻对应的空间范围和关联关系。

表1 污染企业时空实体特征情况分析  
Table 1 Analysis of the spatiotemporal entity characteristics of polluting enterprises

对象特征	特征分类	特征描述	对应特征的污染企业时空实体
时空参照		描述对象的时空位置,包括时间参照和空间参照	企业(厂区)建筑、车间内部设施、地下空间实体、钻孔采样、环境及其他设施
空间位置	变化标记	描述当前时空参照系下的时空位置是否发生变化	企业(厂区)建筑、车间内部设施、地下空间实体、钻孔采样、环境及其他设施
	位置参数	记录对象在一系列离散时间点下的时空位置	环境及其他设施
空间形态	变化标记	描述对象空间形态是否发生变化	企业(厂区)建筑、车间内部设施、地下空间实体、环境及其他设施
	几何特征	描述对象形态的直观形象	
	分布特征	描述对象形态的分布情况	
组成结构		描述对象部分与整体的构成关系	企业(厂区)建筑、地下空间实体、钻孔采样、环境及其他设施
关联关系	隶属关系	描述地理实体间的包含、组成关系	
	位置关系	描述地理实体间的位置关系	
	协同关系	描述对象间相干能力,对象在整体发展运行过程中协调与合作的关系	企业(厂区)建筑、车间内部设施、地下空间实体、地下空间实体、环境及其他设施
	因果关系	描述对象间引起和被引起关系	
属性特征	认知关系	描述对象在自主认知或群体决策学习中形成关系	
	本质属性	描述对象的固有属性	企业(厂区)建筑、车间内部设施、地下空间实体、钻孔采样、环境及其他设施
	限定属性	描述对象的名称、大小、形状颜色等物理特征	
	附属属性	描述对象的功能、归属等信息	
认知能力		描述对象所具有的知识,自主决策能力形成的基础	企业(工厂)工人
行为能力		描述对象作用、影响自身或其他时空对象的能力	企业(工厂)工人、污染物粒子、车辆、植物

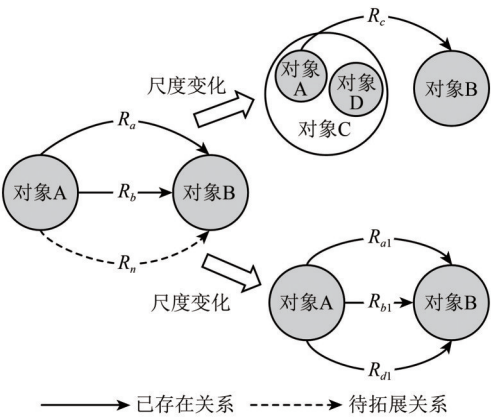


图4 关联关系描述模型  
Fig. 4 Association relationship description model

2.3.4 实体关联关系建模

通过分析描述,污染企业时空实体对象间存在的关联关系类型包含隶属关系、协同关系、位置关系、控制关系、共生关系和因果关系,如图5所示。其中隶属关系是指实体间包含、组成的关系,可存在于不同空间尺度下。例如,在整个污染企业宏观尺度下,厂区建筑、地下空间实体、基础设施及其他环境类实体同属污染企业,与污染企业场地构成隶属关系。在地上或地下微观尺度下,不同职能车间、构筑物等实体组成厂区建筑;钻孔采样实体、地下管线和地质层等实体隶属于地下空间实体范畴。同时,隶属于地上空间的建筑也会与地下实体构成协同关系,协同关系是指实体间的相互作用能力,实体在整体发展运行过程中协调与合作的

关系。例如,企业生产经营、设备生产需要管道运送液体、固体物料来协同加工。位置关系是指不同实体之间在空间上的相对位置或空间布局关系。几乎所有地上地下及基础设施实体都存在位置关系,例如:生产车间、废物处理车间、废料堆放区域位置影响着污染源的位置;同时,生产车间、废物处理车间、废料堆放区域位置也会影响和决定地下污染程度和钻孔的分布,从而构成因果关系。控制关系是指一个实体对其他实体或过程的控制和管理能力。例如,工作人员对生产设备和工艺单元拥有控制权,以确保其正常运行、维护和维修,这包括设备的启动、调整和维护。共生关系是指不同实体之间相互依赖和共同生存的关系,随着时间的变化、对象消亡,共生关系也会消失。厂区建筑与环境及其他设施以及地下设施之间都存在着共生关系。

2.4 污染企业多粒度时空对象数据模型生成

在前文对污染企业实体时空组织描述和对象数据模型设计的基础上,梳理客观污染企业场地实体相关数据,并对有效信息进行筛选整理。针对空间位置、属性、关联关系等特征对应的数据形式利用合适的计算机存储逻辑进行存储,在数据库中以序列快照的方式进行对象版本的存储与更新。并重点实现污染企业实体点形态、线形态、面形态、三维形态等模型的构建,完成数据与模型的融合,生成多粒度时空对象数据模型,实现污染企业数字孪生体模型的构建。

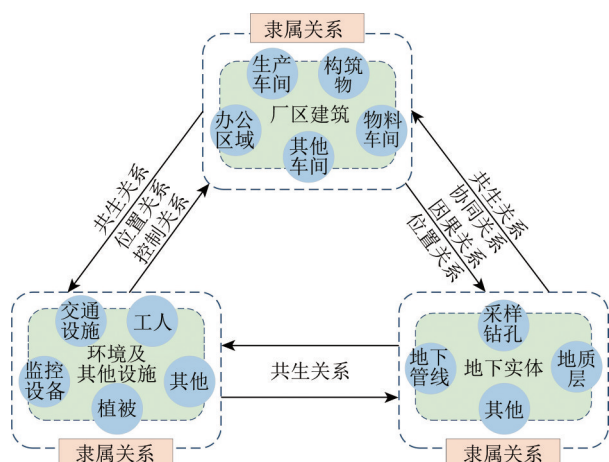


图5 污染企业实体对象关联关系基本模型

Fig. 5 Basic model of object-association relationships of the entities of polluting enterprises

### 3 污染企业多粒度时空对象数据模型实例

本节以广州市某橡胶厂为例，整合橡胶厂客观实体数据，采用Hadoop分布式存储框架进行存储，将结构化及非结构化等不同类型的数据存储到HDFS相应的数据存储层。利用多种数字孪生技术和三维建模技术实现污染企业实体多层次、全属性建模，融合B/S架构对污染企业实体建模效果进行可视化展示。

#### 3.1 广州市某橡胶厂数据模型实例构建

(1) 实体对象特征表达。宏观尺度下，以整个橡胶厂场地为研究对象时，其具体的特征属性集合可以表达为“{名称：广州市某橡胶厂”，“位置：广州市海珠区”，“占地面积：50443 m<sup>2</sup>”，“建厂时间：2019年7月”，“组成结构：厂区建筑、地下实体、环境及其他基础设施”，“附属属性：橡胶厂主营橡胶轮胎制造、加工和销售，主要以炼胶、压延、成型、硫化为基本工序”，“……”}”，其中在组成结构描述中，我们考虑了多个不同的尺度，涵盖了从污染场地到厂区建筑、地下实体、环境及其他设施再到其对应的子对象的描述。微观尺度下，当某硫化车间作为研究对象时，除基本属性特征外还包括硫化机运行状态监测、硫化机运行效率、每日运行时间、设备日志等特征信息；地下钻孔的属性特征按照钻孔时间、采样位置、钻孔深度、采样区域土质类型等进行描述。

(2) 实体对象关联关系表达。分析橡胶厂时

空实体之间的关联关系，有助于展示实体对象间因生产活动或时间动态变化产生的相互作用。在橡胶厂范围内，整个厂区所在区域是其所包含的其他多粒度时空实体动态变化的空间基础，在空间上包含车间库房、植被围墙等地上实体和地下管线等地下实体，属于隶属关系；工人与设备机器、车辆等之间存在协同关系；空间关系几乎涉及橡胶厂范围内所有的空间实体，每个实体的功能需求决定实体的空间位置，如摄像头、交通指示牌的摆放位置与企业内路段在空间上具有位置关系；因果关系是不可逆的单向作用，如硫化设备、电力设施等发生损坏、故障需要维护人员进行维修保养；认知关系方面，摄像头监控可识别路情状况及周围实体行为，工作人员能识别生产设备运行状况信息。将橡胶厂实体对象间存在的关联关系类型通过网络数据的形式展示，如图6所示。通过点击时空对象之间的关系线来展示两者间的关联关系，如环境及其他基础设施>广州市某橡胶厂，表示两者的关系为隶属关系。

(3) 橡胶厂实体要素模型构建。结合上述对橡胶厂实体特征和关联关系的描述，对整个厂区内地上地下以及车间内部进行精细化建模，验证多粒度时空实体建模在构建橡胶厂实体环境方面的优势。对厂区建筑实体建模时，选取遥感影像、建筑物电子地图、工厂实景照片作为数据源，并结合文档资料和影像特征提取建筑类模型的名称、建筑物面积等属性信息进行封装。同时，融合空间参考、场景处理、数据存储及三维模型输出工具生成建筑物三维模型。对某硫化车间进行实体建模时，利用CATIA对车间设备进行尺寸、曲面设计并进行零件装配，依照CAD车间布局图纸对车间环境包括门窗、墙体、通道进行模型建立，在Unreal Engine4中对车间整体三维模型按照自身属性特征的不同，进行材质和纹理贴图，最后利用像素流送（Pixel Streaming）与web端连接，结合WebGL开源技术实现地上空间场景可视化交互。在进行钻孔类实体建模时，利用ArcGIS将钻孔点数据依照钻孔分布图平铺到二维影像上，填充钻孔点的属性值，建立与地表垂直匹配的钻孔矢量模型。具体建模流程如图7所示，对于构筑物、管线类实体等基础设施类结构模型，利用3D MAX结合点、线、面与材质信息对其进行独立建模，建模效果如图8、9所示。



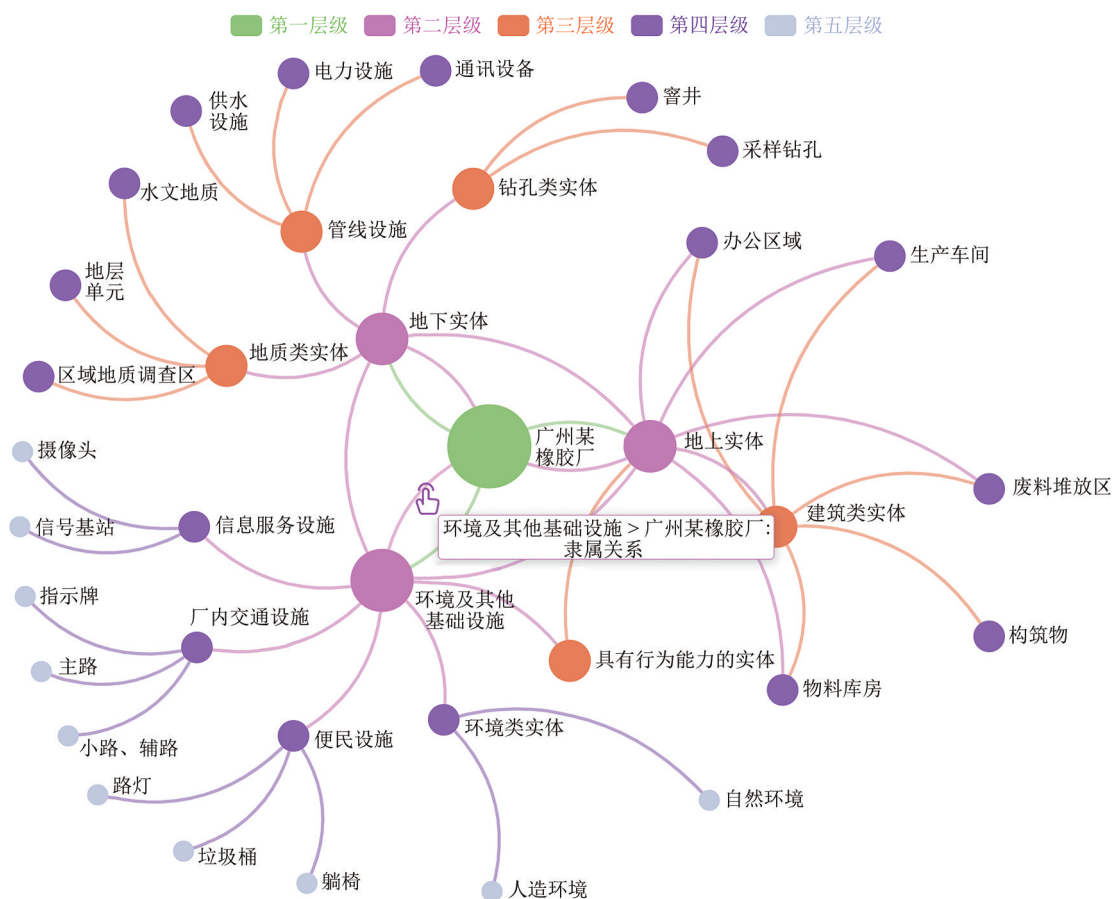
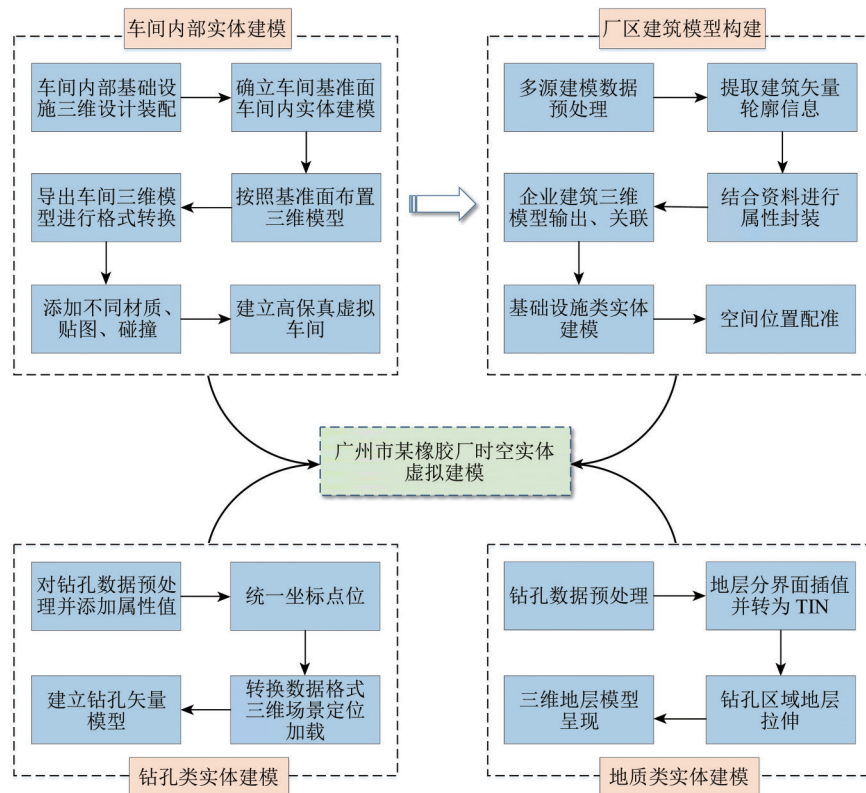
图6  $T_0$ 时刻橡胶厂实体对象关联关系特征描述Fig. 6 Description of the relationship characteristics of physical objects in rubber factory at  $T_0$  time

图7 橡胶厂时空实体建模流程图

Fig. 7 Flowchart for spatio-temporal entity modeling of rubber factory

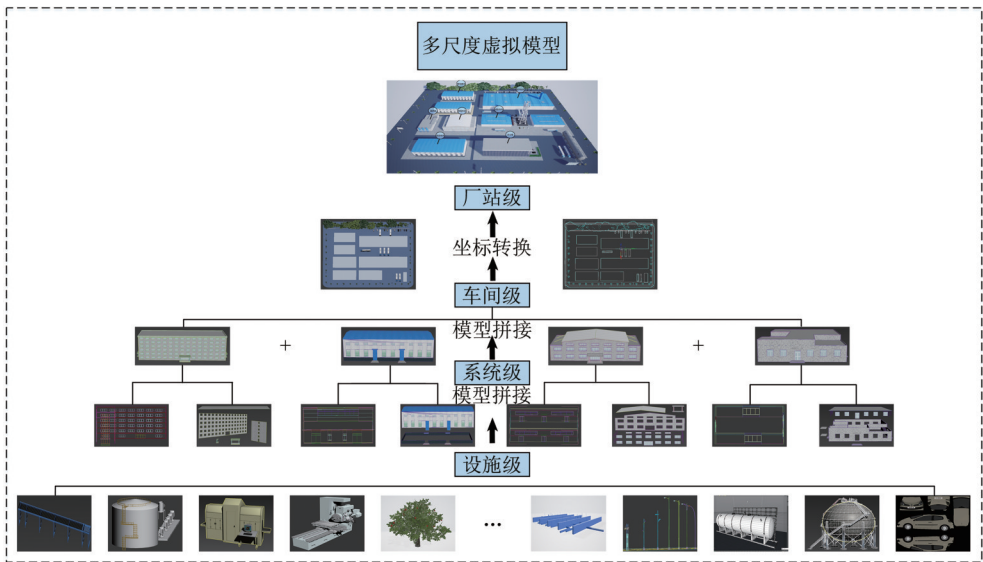


图8 橡胶厂多尺度虚拟孪生模型  
Fig. 8 Multi-scale virtual twin model for rubber factory

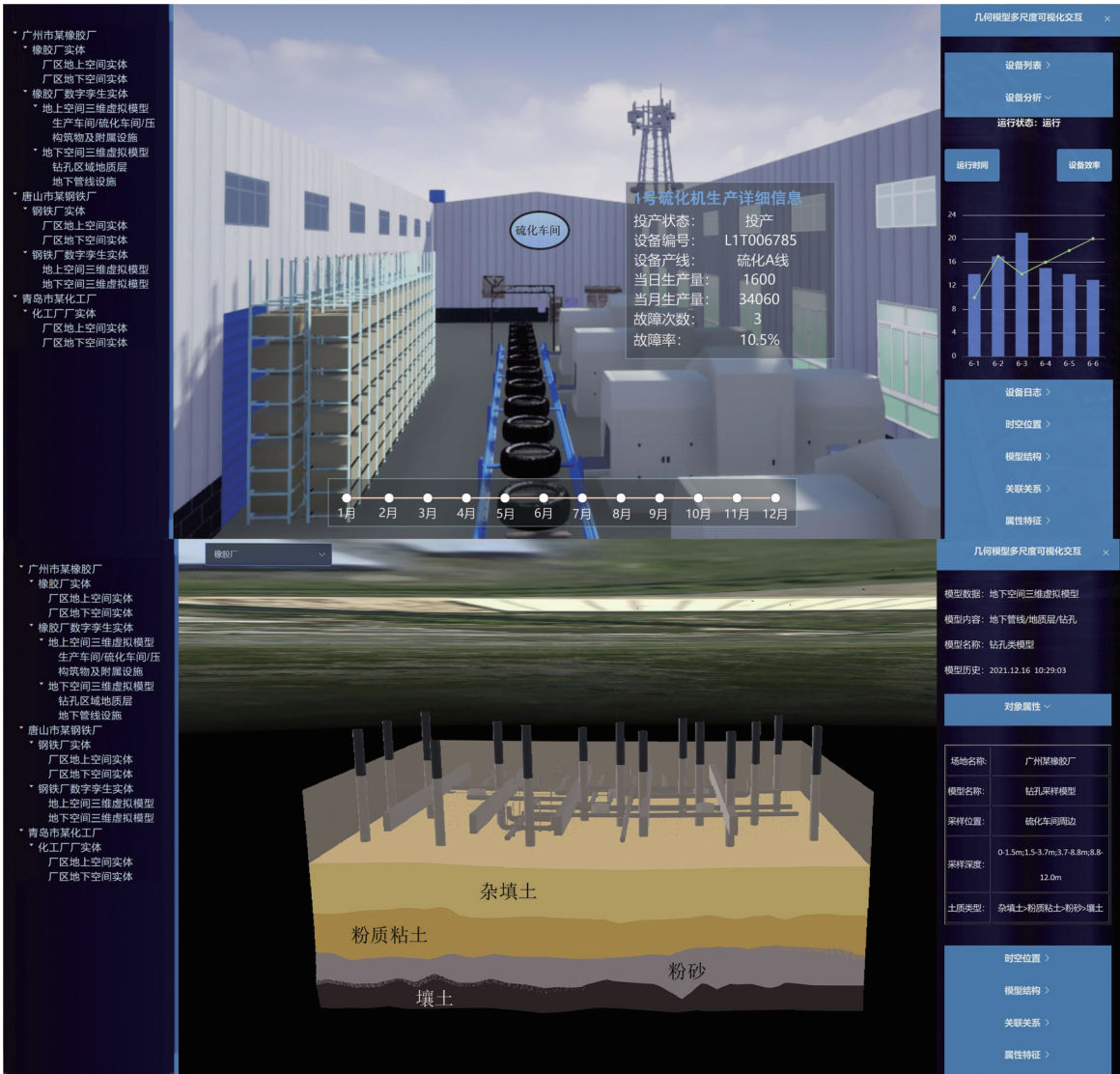


图9 硫化车间及地下空间虚拟模型三维可视化

Fig. 9 Three-dimensional visualization of virtual models of vulcanization workshop and underground space



### 3.2 结果分析

通过对橡胶厂实例化多粒度时空对象数据模型的实现,验证了多粒度时空实体建模方法在构建污染企业数字孪生体方面的可行性。该方法可实现污染企业多维模型精准构建、多尺度模型组装与仿真。同时,全面多维的表达污染企业实体空间位置、名称、形态等基本信息,还对行为、关联关系、动态过程等特征进行多方位的描述,使得污染企业实体对象数据更加完整、动态。有效的弥补了现有模型构建时对描述实体自身特征方面的不足,实现了数据与孪生模型的高效融合。为污染企业数字孪生体模型的精准构建和模型仿真优化提供了有效方法,并为污染企业实现污染场地管控、污染溯源等数字孪生应用服务奠定坚实基础。

## 4 结 论

本文针对污染企业,探讨了面向污染企业数字孪生体模型构建的多粒度时空实体建模的方法和实现技术流程,从不同的维度对污染企业实体进行了分类分析,重点实现了污染企业实体多维特征与关系的建模。最后,以广州市某橡胶厂作为研究对象进行数据模型的具体实现,验证了多粒度时空对象建模方法的优势。由于现实世界污染企业实体特征及其发展规律极为复杂,本文对污染企业实体的描述与孪生体建模方法仍存在一定的局限性。下一步还需强化理论方法、扩展建模内容并深入实践,例如:污染物、污染粒子的建模分析。同时,在多粒度时空实体建模辅助数字孪生模型进行污染预测、模型交互等方面深化研究。

### 参考文献(References)

Chen Y H, Jiang N and Zi L. 2020. The cognition and representation of spatio-temporal behaviors of wetland based on spatio-temporal objects of multi-granularity. *Bulletin of Surveying and Mapping*, (2): 147-150 (陈云海, 江南, 訾璐. 2020. 多粒度时空对象支持下湿地时空行为认知与表达初探. *测绘通报*, (2): 147-150) [DOI: 10.13474/j.cnki.11-2246.2020.0062]

Fang Y, Zhou C H, Jing G F, Lu F and Luo J C. 2001. Research of 4<sup>th</sup> generation GIS software. *Journal of Image and Graphics*, 6(9): 817-823 (方裕, 周成虎, 景贵飞, 陆锋, 骆剑承. 2001. 第四代GIS软件研究. *中国图象图形学报*, 6(9): 817-823) [DOI: 10.3969/j.issn.1006-8961.2001.09.001]

Hua Y X. 2016. The core problems and key technologies of pan-spatial information system. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 33(4): 331-335 (华一新. 2016. 全空间信息系统的核心问题和关键技术. *测绘科学技术学报*, 33(4): 331-335) [DOI: 10.

3969/j.issn.1673-6338.2016.04.001]

Kousi N, Gkournelos C, Aivaliotis S, Giannoulis C, Michalos G and Makris S. 2019. Digital twin for adaptation of robots' behavior in flexible robotic assembly lines. *Procedia Manufacturing*, 28: 121-126 [DOI: 10.1016/j.p-romfg.2018.12.020]

Li X H, Feng Y M and Liu L Y. 2023. A time semantic pattern representation method for events in domain-oriented texts. *Journal of Wuhan University(Natural Science Edition)*, 69(6): 809-818 (李旭晖, 冯玉涓, 刘柳滢. 2023. 一种面向领域文本中事件的时间语义模式表示方法. *武汉大学学报(理学版)*, 69(6): 809-818) [DOI: 10.14188/j.1671-8836.2022.0291]

Liu D T, Guo K, Wang B K and Peng Y. 2018. Summary and perspective survey on digital twin technology. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 39(11): 1-10 (刘大同, 郭凯, 王本宽, 彭宇. 2018. 数字孪生技术综述与展望. *仪器仪表学报*, 39(11): 1-10) [DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1804099]

Tao F, Liu W R, Liu J H, Liu X J, Liu Q, Qu T, Hu T L, Zhang Z N, Xiang F, Xu W J, Wang J Q, Zhang Y F, Liu Z Y, Li H, Cheng J F, Qi Q L, Zhang M, Zhang H, Sui F Y, He L R, Yi W M and Cheng H. 2018. Digital twin and its potential application exploration. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 24(1): 1-18 (陶飞, 刘蔚然, 刘检华, 刘晓军, 刘强, 屈挺, 胡天亮, 张执南, 向峰, 徐文君, 王军强, 张映锋, 刘振宇, 李浩, 程江峰, 戚庆林, 张萌, 张贺, 隋芳媛, 何立荣, 易旺民, 程辉. 2018. 数字孪生及其应用探索. *计算机集成制造系统*, 24(1): 1-18) [DOI: 10.13196/j.cims.2018.01.001]

Tao F, Liu W R, Zhang M, Hu T L, Qi Q L, Zhang H, Sui F Y, Wang T, Xu H, Huang Z G, Ma X, Zhang L C, Cheng J F, Yao N K, Yi W M, Zhu K Z, Zhang X S, Meng F J, Jin X H, Liu Z B, He L R, Cheng H, Zhou E Z, Li Y, Lu Q and Luo Y M. 2019. Five-dimension digital twin model and its ten applications. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 25(1): 1-18 (陶飞, 刘蔚然, 张萌, 胡天亮, 戚庆林, 张贺, 隋芳媛, 王田, 徐慧, 黄祖广, 马昕, 张连超, 程江峰, 姚念奎, 易旺民, 朱恺真, 张新生, 孟凡军, 金小辉, 刘中兵, 何立荣, 程辉, 周二专, 李洋, 吕倩, 罗椅民. 2019. 数字孪生五维模型及十大领域应用. *计算机集成制造系统*, 25(1): 1-18) [DOI: 10.13196/j.cims.2019.01.001]

Yang F, Hua Y X, Li X, Li P, Yang Z K and Cao Y B. 2021. An urban facilities modeling and management method based on the multi-granularity spatiotemporal object data model. *Journal of Geo-Information Science*, 23(11): 1984-1997 (杨飞, 华一新, 李响, 李坡, 杨振凯, 曹一冰. 2021. 基于多粒度时空对象数据模型的城市基础设施建模与管理. *地球信息科学学报*, 23(11): 1984-1997) [DOI: 10.12082/dqxxkx.2021.210400]

Yang F, Hua Y X, Li X, Wei Y Y and Yu X K. 2020. Research on sensor facilities access method driven by multi-granularity spatio-temporal object behavior. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 37(5): 537-544 (杨飞, 华一新, 李响, 韦原原, 俞鑫楷. 2020. 多粒度时空对象行为驱动的传感设施接入方法. *测绘科学技术学报*, 37(5): 537-544) [DOI: 10.3969/j.issn.1673-6338.2020.05.015]

Yang X, Ran Y, Zhang G B, Wang H W, Mu Z Y and Zhi S G. 2022. A digital twin-driven hybrid approach for the prediction of performance degradation in transmission unit of CNC machine tool. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 73: 102230 [DOI: 10.1016/j.rcim.2021.102230]

Zhang Y S, Hua Y X, Zhang Y, Cao Y B and Chen Y H. 2021. Research on object-oriented spatio-temporal modeling of interpersonal relationship network. *Geomatics and Spatial Information*

- Technology, 44(6): 41-45, 53 (张永树, 华一新, 张毅, 曹一冰, 陈云海). 2021. 人际关系网络对象化时空建模方法研究. 测绘与空间地理信息, 44(6): 41-45, 53 [DOI: 10.3969/j.issn.1672-5867.2021.06.012]
- Zhang Z, Hua Y X, Zhang X N, Guo S M and Wen N. 2017. The basic issues of associative relationship of spatial-temporal objects of multi-granularity. Journal of Geo-Information Science, 19(9): 1158-1163 (张政, 华一新, 张晓楠, 郭邵萌, 文娜). 2017. 多粒度时空对象关联关系基本问题初探. 地球信息科学学报, 19(9): 1158-1163 [DOI: 10.3724/SP.J.1047.2017.01158]
- Zhou S W, Guo S S, Du B G, Wang L, Guo J, Li Y B, Peng Z and Yu L. 2023. Digital twin model construction method of water treatment plant. Computer Integrated Manufacturing Systems, 29(6): 1867-1881 (周圣文, 郭顺生, 杜百岗, 王磊, 郭钧, 李益兵, 彭兆, 于磊). 2023. 净水厂数字孪生模型构建方法研究与实践. 计算机集成制造系统, 29(6): 1867-1881 [DOI: 10.13196/j.cims.2023.06.007]
- Zhu Q, Li H K, Zeng H W, Liu M W, Ding Y L, Ren X C, Wang W, Zhang L G, Luo X and Zhu J. 2020. Classification and coding of entity features for digital twin Sichuan-Tibet railway. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 45(9): 1319-1327 (朱庆, 李函侃, 曾浩炜, 刘铭崑, 丁雨淋, 任晓春, 王玮, 张利国, 罗勋, 朱军). 2020. 面向数字孪生川藏铁路的实体要素分类与编码研究. 武汉大学学报(信息科学版), 45(9): 1319-1327 [DOI: 10.13203/j.whugis20200010]

## Multigranularity spatiotemporal entity modeling approach for the construction of digital twin entity for polluting enterprises

CUI Xiaochen<sup>1</sup>, TIAN Yun<sup>2</sup>, ZHANG Jianqin<sup>1</sup>, ZHAO Miaomiao<sup>3</sup>, MA Maoxin<sup>1</sup>,  
HU Chaonan<sup>1</sup>, JIANG Huizhong<sup>4</sup>

1. School of Surveying and Mapping and Urban Spatial Information, Beijing University of Civil Engineering and Architecture,  
Beijing 102616, China;

2. Information Center of the Ministry of Ecology and Environment of Gansu Province, Lanzhou 730030, China;

3. Information Center of the Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100029, China;

4. Zhengyuan Geographic Information Group Co., Ltd. Technology Center, Beijing 101399, China

**Abstract:** Digital twin entity refers to the information model that exists in the computer virtual space that is completely equivalent to the physical entity, which is a multidimensional, multiscale description and portrayal of the physical entity, and can achieve the real mapping and simulation analysis of the physical entity. The field of ecological environment has many types of soil-groundwater pollution sources and pollutants in production enterprises, complex source-sink relationship, pollution early warning, and traceability difficulties. The use of digital twinning technology must be studied to establish a real-life 3D model of the plant area of the production enterprise and a digital twin model within the plant, incorporate real-time monitoring data into the simulation system of soil and groundwater twinning, carry out rapid data fusion and simulation derivation, and eventually form a complete digital twin system of a multigranularity polluting enterprise plant. When facing the above problems, the current construction method of digital twin model focuses on the construction of a 3D model, ignoring the complete expression and description of the enterprise entity's geometrical parameters, attributes, relationships, and other characteristic data, so it is unable to meet the requirements of comprehensively and multidimensionally dynamic portrayal of the enterprise entity. To achieve the accurate construction of the twin entity model of the pollution enterprise, a more efficient way needs to be adopted to organize and manage the characteristic data of the enterprise entity, and select a suitable data model to model the enterprise scene. The traditional GIS data model uses conventional map data as a template for indirect spatial modeling of entities, which limits the application of spatial data and hinders adapting to new expression needs such as real-time dynamic correlation in multimodal situations. To address this problem, Hua Yixin proposed a multigranularity spatiotemporal object data model from the perspective of data model. The model provides an all-round description of multigranularity spatiotemporal entities from spatiotemporal reference, spatial location, attribute characteristics, spatial morphology, and compositional structure, with multidimensional and all-attribute characteristics. The model also increases the description of characteristic information such as behavioral ability and association relationship, and the expression content is more comprehensive and more in line with the actual entity expression. Therefore, this paper proposes a multigranularity spatiotemporal entity modeling method for constructing a digital twin of a polluting enterprise, which achieves the comprehensive multidimensional information description and portrayal of the site entity of a polluting enterprise in the form of a data model by modeling, and analyzing the relevant features and relations of the spatiotemporal entity of the polluting enterprise. A rubber factory in Guangzhou City is taken as a case study for instance validation of the data model. Results show the multigranularity spatiotemporal entity modeling can efficiently organize and express the multidimensional features of the entity, achieve the accurate construction of the digital twin body model of the pollution enterprise, and provide an effective method and data model basis for the application service of the digital twin of the pollution enterprise.

**Key words:** remote sensing, polluting companies, digital twins, entity feature data, multi-granularity spatio-temporal entity modelling, data models

**Supported by** National Key Research and Development Program of China (No. 2022YFC3703103); Beijing University of Civil Engineering and Architecture 2023 Doctoral Postgraduate Research Ability Improvement Program (No. DG2023017, DG2023018)