

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2025.06.030

区域土壤污染实景数据可视化平台研究

何启凡^{1,2}, 王群英³, 侯祥东⁴, 贾英东¹, 戴韬严¹, 徐向舟¹

(1. 大连理工大学 建设工程学院, 辽宁 大连 116024;

2. 浙江省水利水电勘测设计院有限责任公司, 浙江 杭州 310002;

3. 华电电力科学研究院有限公司, 浙江 杭州 310030;

4. 山东省海河淮河小清河流域水利管理服务中心, 山东 济南 250100)

摘要: 工业发展导致的工厂周边地块土壤重金属污染是长期以来亟待解决的问题。为克服污染信息化工作中复杂数据处理、场景可视化和多维度分析等难点, 利用三维 WebGIS 技术结合无人机现场观测获取的实景影像研发了一套区域土壤和地下水污染实景数据可视化平台。该平台可在卫星地图中直接展示采样点位置和污染程度, 并添加最新污染信息; 能整合已有数据, 从多个维度以动态图表形式在平台页面中实现可视化展示; 能根据国家标准及已有的评价模型进行区域污染风险可视化评估; 能将研究区信息与采样数据融合至无人机摄影, 并构建三维模型, 以还原研究区现场实景。该可视化平台通过展示污染物的时空分布特征, 达到了直观展示采样点的具体位置及污染程度的效果。

关键词: 网络地理信息系统 (WebGIS); 土壤污染; 水污染; 无人机观测; 三维可视化

中图分类号: TV222.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2025)06-0217-08

Visualization Platform for Real Scene and Pollution Data of Regional Soil and Groundwater Pollution

HE Qifan^{1,2}, WANG Qunying³, HOU Xiangdong⁴, JIA Yingdong¹, DAI Taoyan¹, XU Xiangzhou¹

(1. School of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China;

2. Zhejiang Design Institute of Water Conservancy & Hydro-Electric Power Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310002, China;

3. Huadian Electric Power Research Institute Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310030, China;

4. HaiheRiver, Huaihe River and Xiaoqinghe River Basin Water Conservancy Management and Service Center of Shandong Province, Jinan, Shandong 250100, China)

Abstract: Heavy metal pollution in the soil of factory-surrounding area caused by industrial development has long been a critical issue to be addressed. In order to overcome the problem in pollution informatization, including complex data processing, scene visualization, and multi-dimensional analysis, this study develops a real-scene data visualization platform for heavy metal pollution of regional soil and water by integrating 3D WebGIS technology with UAV-based field observation imagery. The platform enables direct display of sampling point data and pollution levels on the satellite map, supports real-time monitoring and early warning by updating the latest pollution information, and consolidates existing data for multidimensional visualization through dynamic charts. The platform also enables risk assessment visualization based on national standards and existing evaluation models, while integrating study area information and sampling data into UAV photogrammetric 3D models to reconstruct the real-scene environment of the study area. By visualizing the spatiotemporal distribution characteristics of pollutants, this platform may provide technical support for pollution early warning.

Keywords: Web Geo-Information System; soil pollution; water pollution; UAV observation; 3D visualization

收稿日期: 2025-06-28

修稿日期: 2025-08-17

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFC3702301; 2022YFC3702302); 2024 年内蒙古自治区科技创新重大示范工程“揭榜挂帅”项目 (2024JBCS0016)

作者简介: 何启凡 (2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为水土保持及可持续发展。

通讯作者: 徐向舟 (1969—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事水土保持与可持续发展等方面工作。E-mail: xzxu@dlut.edu.cn

随着社会经济快速发展,人类活动会造成区域土壤系统的污染。比如,在矿区开采和冶炼活动中,如果处置不当,会产生严重的重金属污染。这些污染影响人类健康并破坏了土壤的生态系统。针对区域土壤中的重金属污染,当前研究多集中于污染状况^[1]、污染机理^[2]、防治对策^[3]、土壤^[4]及地下水^[5]污染全过程模拟等方面。当前,在大力提升生态修复技术水平的同时,还应当搭建并完善基于大数据融合的环境资源智慧监管平台,为土壤和地下水资源安全提供有力保障^[6]。但目前,土壤环境信息化管理水平仍有待提高,亟需借助移动互联网技术构建相关技术平台,将已有的环境数据信息整合并集中地进行可视化展示。

环境信息化的工作需要充分将信息技术融入环境保护管理业务中,用大数据提升环境治理能力^[7]。已有学者利用克里金法对我国东南部某农药工业区土壤进行了插值分析,揭示了土壤中部分有机污染物的分布规律^[8],但缺乏有效的手段对研究成果进行可视化呈现。地理信息系统组件(COM-GIS)可实现专题地图系统用以可视化地下水污染分布^[9],但该系统需通过 Visual Studio 软件才能实现对监测数据的空间分析和可视化,专业性过强,非计算机专业用户操作有一定局限。在二维 GIS 领域,有学者基于 Spark 的分布式数据库设计架构开发了智能交通数据可视化展示平台^[10]。同时,WebGIS^[11]和 R 语言^[12]也被用于污染信息管理系统开发与构建。伴随着行业需求的不断提升,传统的二维可视化技术无法满足部分项目需求,将 3D 技术和 GIS 技术相结合的三维 WebGIS 研究正逐渐成为推动 GIS 发展及环境信息化管理的重要趋势^[13]。尤其对于那些包含深度信息的土壤采样数据或现场环境复杂的采样点而言,使用二维 GIS 进行可视化处理显然存在较大局限,既无法充分满足地理空间信息展示与分析需求,又缺少对现场实景的有效还原。

因此,采用 WebGIS 技术开发土壤重金属污染信息化平台的同时兼顾现场实景三维展示显得尤为重要。目前已有研究基于 Web GL 等技术,在浏览器上实现了地理信息三维可视化^[14]。然而当前地理模型搭建技术不够成熟,对于大规模三维场景的搭建能力不足,仍停留在小范围研究区实景还原阶段。本研究整合山西省某化工园区及其周边地块现场采样的污染数据,利用多种 WebGIS 开发方法与无人机全景、倾斜摄影及三维建模技术开发了一套

区域土壤重金属污染实景数据可视化网络平台,该平台将三维 WebGIS 与无人机现场观测技术结合,弥补了二维 GIS 中空间立体表征与实景还原能力不足的局限。该可视化平台可实现监测数据与三维模型的空间联动,提升环境数据的空间解析度与场景化展示效果,为环境污染的精准识别与空间分析提供了技术框架。为工业区及矿区土壤与地下水污染场地的评估与管理提供技术支持。

1 研究区域及数据获取

研究区选为山西省某化工园区及其周边地块。该示范区位于山西省东境中段,处温带、暖温带、半干旱大陆性季风气候区。示范区长 7.39 km,属于石灰岩地区。研究区范围内主要污染源为两处化工厂区,污染对象为三处村庄及周边农田。

本平台主要展示或使用到的数据内容为:研究区现场采集的土壤和水样信息,以及污染物检测数据、研究区现场无人机航拍影像等。其中,土样和水样的分析数据由国家重点研发项目“区域土壤与地下水污染绿色生态修复技术及应用(2022YFC3702300)”的相关子课题提供,另外,由于项目研究的需要本文中作了必要的加密处理。研究区现场无人机航拍影像由本文作者赴现场拍摄完成。为全面获取研究区域的现场航拍影像及全景图数据,作者于 2023 年 8 月赴示范区现场进行初次现场调查,获取研究区现场航拍视频图片,并通过现场地形地貌、河流分布确定了研究范围,通过研究区化工厂及村庄、农田位置分布确定污染源及污染对象。作者于 2024 年 12 月再赴研究区进行无人机详细现场观测。此次调查的主要任务包括:①对研究区内的关键点位进行全景影像采集;②获取高精度的无人机摄影测量数据,为后续三维建模及空间分析提供基础数据支撑。在调查实施过程中,根据研究区的地理特征,规划了像控点的布设方案。研究区呈沿公路分布的狭长形带状空间格局,基于此地形特点,沿研究区附近公路系统布设了 4 个像控点。这些像控点遵循空间均匀分布原则,沿公路走向等间距布设,确保对整个研究区实现全覆盖,从而有效保证摄影测量数据的精度和可靠性。

1.1 关键技术

本平台使用 Visual Studio Code 作为开发工具,通过 Visual Studio Code 内置的 Live Server 扩展来启动 Web 服务器,平台包含三个主要功能模块,分别为污染信息空间分析模块、区域污染评估模块以及

三维实景展示模块,各模块开发过程中所需关键技术如下:

1.1.1 高德地图 API

基于产品性能和数据信息安全性角度考虑,空间分析模块主体采用高德地图 API 进行开发。高德地图 API 为开发者提供了丰富的函数、控件、事件和封装的类型,提供很多专题地图服务,使用高德地图 API 可以集成地图显示、定位、导航、搜索等核心功能。另外,高德地图在数据安全方面采取了严格措施,符合国家信息安全标准,确保用户数据的隐私和安全。开发过程中,高德地图 API 支持 JavaScript 等多种编程语言,便于开发者快速构建地图应用。通过上述技术优势,高德地图不仅为本模块的开发提供精准的地图服务,还为各类可视化功能的开发提供了强大的支持。

1.1.2 Echarts 数据可视化

ECharts 是百度开源的企业级图表库,是一个基于 JavaScript 的可视化工具。区域土壤-地下水复合污染是一个多污染主体、多类型污染物的复杂问题,分析此类污染数据时需兼顾污染主体、污染物种类从多个维度进行分析展示。ECharts 提供了直观、生动、可交互、可高度个性化定制的数据可视化图表样式^[15],足以应对此类污染问题的可视化需求。

1.2 污染评估方法

本研究对区域土壤重金属污染风险开展评估的过程中,所参照的国家标准为《土壤环境质量建设用地土壤污染风险管控标准》(GB 36600—2018)^[16]。根据保护对象暴露状况的不同,可将建设用地细分为第一类用地与第二类用地两大类。依据标准内容可判断研究区土地类型为第二类用地。整理采样数据中污染物种类,在系统中上传国家标准中第二类用地对应的各污染项目的筛选值及管控值。

研究以单因子和内梅罗污染指数评价法为基础,并针对研究区污染特点,对内梅罗指数法进行改进,在传统内梅罗指数法基础上引入了毒性和深度权重系数,使评估结果更能反映污染物的生态毒性风险差异和垂直迁移特征。评估过程分为三个计算阶段:第一步计算各污染物的单因子指数,反映其超标程度;第二步计算各污染物的内梅罗污染指数,该指数受单因子指数的均值和最大值影响,更加科学合理。最后引入毒性和深度权重系数进行修正,权重值根据污染物的生态毒性效应和采样深度确定,通过特定的数学模型合成综合污染指数,该模型考虑了污染物的平均影响,突出了主要污染物的贡献,

同时针对不同污染物的毒性和深度位置赋予不同的权重。可视化表单中污染评价的量化输出成果包含:综合污染等级、综合污染指数、加权内梅罗指数以及风险系数四个指标。为了便于展示,对于这四个指标的评估标准为临时确定,后续可根据实际工程需求修改标准进行可视化展示。

1.3 无人机摄影测量建模

在三维实景展示模块,通过无人机摄影测量建立的三维模型导入到 Web 端展示现场实景。无人机倾斜摄影测量可多角度多方位的进行地物采集,提供全面的信息。使用倾斜摄影测量生成三维模型的过程称为倾斜摄影测量建模^[17]。无人机倾斜摄影测量技术作为一种更便捷、高效的影像获取与模型构建手段,因而有成本低、效率高等优势^[18],适用于本研究中对于小规模区域的摄影测量工作。倾斜摄影的基本流程包括了根据研究方案划定建模范围,进行航线设计,现场布设控制点及实地飞行,其中无人机倾斜摄影测量建模精度与像控点质量有较大关联,包括像控点的类型、外业测量精度、空间分布等方面^[19]。获取多视图的影像后,进行图像预处理和空中三角测量,最终生成研究区的三维模型^[20]。

2 平台功能及展示

本平台将三维 WebGIS 与无人机现场观测技术结合,弥补了二维 GIS 中空间立体表征与实景还原能力不足的局限。通过无人机摄影测量构建的高精度三维实景模块,建立了污染点位与真实坐标的精准映射关系,解决了传统二维 GIS 在立体空间表达不足和全景影像空间属性缺失的问题。该技术可实现监测数据与三维模型的空间联动,提升环境数据的空间解析度与场景化展示效果,为环境污染的精准识别与空间分析提供了技术框架。

2.1 土壤重金属污染空间分析模块功能实现

以化工园区土壤中重金属污染数据为例阐述污染信息空间分析模块功能实现。在本模块中开发了一个基于 Web 的交互式系统,旨在对化工园区附近地块土壤中的重金属污染进行监控和分析。该系统通过集成地理信息系统(GIS)技术,利用高德地图 API 构建了交互式的地图界面,不仅能够展示卫星影像,还实现了动态热力图功能,以视觉化的方式呈现不同区域内的重金属浓度分布情况,其中热力图的颜色深浅直观反映了污染物浓度的高低,对于环境污染的研究和治理决策具有一定参考价值。本模块展示功能及效果如图 1 所示。

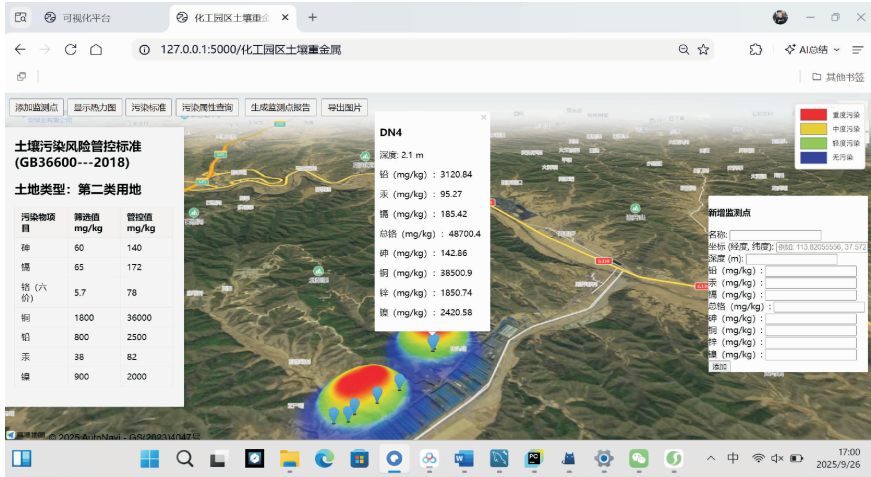


图 1 污染信息空间分析模块

该模块主要包含新增监测点、显示热力图、对照污染标准以及查询污染属性等功能。可通过新增监测点的功能表单输入新监测点的经纬度坐标及相应的污染物含量数据,支持系统的持续更新与灵活的数据收集;内置污染属性查询功能,可以按名称查找特定的采样点或根据具体的污染物种类进行查询(如图 2)。通过该功能可以实现对区域内采样点数据及所有采样点中某污染物信息的查询。用户可以通过搜索框输入监测点名称,系统会返回与该名称匹配的监测点数据。查询结果以列表形式展示,用户点击列表项后,系统会在地图上定位该监测点,并

显示其详细信息;搜索框输入污染物名称(如铅、汞、镉等),系统会返回所有监测点中该污染物的浓度数据以及各点对应的采样深度。所有查询结果在展示数据信息的基础上,还能实现对应的可视化图表展示。为了提供更深入的数据分析,系统结合 Chart.js 库生成柱状图或折线图来表示各监测点的重金属含量变化趋势,这种图形化的表达方式有助于清晰理解数据特征,辅助研究人员发现潜在的问题和污染数据变化趋势。考虑到用户体验的优化,设计了可移动的搜索框以及隐藏/显示表单按钮等功能,确保了良好的交互体验。

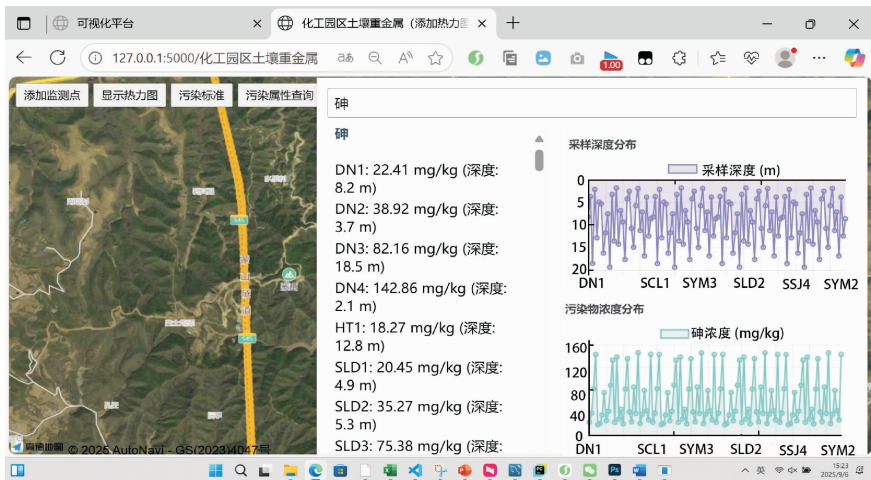


图 2 污染属性查询功能

2.2 复合污染数据可视化

本平台使用 Vue.js 集成 Echarts 技术开发了污染数据可视化模块,针对不同类型的数据使用不同的图表形式展示,为复杂污染数据提供了集中的可视化展示窗口。将传统的文字、数据表格等形式的

数据转化为可视化图表上传至平台,并根据不同类型的数据设计多种分析维度,实现污染数据的可视化。在此基础上,每个图表内部均嵌入多个污染数据组,在一个图表中即可查看全部污染物的浓度分布以及变化趋势,提高了 Web 页面资源利用率,可

实现污染数据的高效分析与展示。以化工园区数据可视化展示页面为例,在此页面中以折线图、柱状图以及饼状图形式直观展示了化工园区采样点分布、地表水的水环境指标及复合污染情况、以及土壤重金属污染情况等,页面效果如图 3 所示。

2.3 土壤重金属污染评估可视化实现

本研究构建的土壤重金属评估系统在技术实现上,系统整合了现代 WebGIS 技术、数据可视化技术和环境评价模型,形成了一套完整的污染评估解决方案。主要包含数据采集、模型计算和可视化呈现三个关键阶段。系统通过标准化数据接口加载采样点的空间坐标和污染物浓度数据,并在地理信息平台上完成空间可视化标记。在模型计算阶段,采用改进的加权内梅罗指数法进行多维度评估:先计算

各污染物的单因子指数(P_i),反映其超标程度;再引入基于生态毒性的权重系数(W)进行修正,获得加权污染指数(WP_i);最后通过内梅罗指数合成公式得到综合评估结果。评估过程还整合了深度修正因子和复合污染协同效应计算,确保结果能准确反映实际环境风险。在可视化阶段,系统将计算结果转化为多维度展示组件:通过颜色编码体系直观呈现污染等级(安全、轻度、中度、重度),以结构化表单展示内梅罗指数、污染指数和风险系数等关键指标,并借助动态图表实现污染物浓度与标准限值的对比分析。整个流程实现了从原始数据到风险评估再到决策支持的无缝衔接,形成了完整的污染评估技术闭环。



图 3 污染数据可视化页面

采样点数据模型严格遵循地理信息数据标准,每个采样点包含空间坐标属性和环境属性两类数据。空间坐标采用 WGS84 坐标系,精确记录采样点的经纬度位置。环境属性数据包括基础信息和污染指标两个部分,基础信息涵盖采样点名称、采样深度等元数据,污染指标则包含铅、汞、镉、铜、锌、铬、镍、砷共八种重金属元素的实测浓度值。

在地图中采用矢量标记符号系统,通过颜色渐变(从绿色到红色)和形状变化直观反映污染等级差异。每个采样点标记都设置了点击事件响应,交互后触发评估结果显示。采样点的污染评估功能可以展示基础的单因子指数评估结果也可以切换为详细的加权内梅罗指数法评估结果展示。评估结果展示采用多视图协同的可视化方案,包括:① 基本信息视图:展示采样点名称、地理位置、采样深度等基础信息;② 污染详情视图:以表格形式列出各污染

物的实测浓度、标准限值、超标倍数等关键指标;③ 综合评价视图:显示综合污染等级、内梅罗指数、风险系数等评估结果;④ 图表视图:通过柱状图直观对比各污染物浓度与标准限值的的关系。

对于单一采样点的评估结果样例如图 4 所示。该污染评估控制面板所呈现的数据结果基于改进的加权内梅罗指数法计算得出,其评估过程体现了多参数协同的环境风险量化模型。

在对单一采样点进行污染评估的基础上,不改变评估逻辑基于地理信息系统和综合评价模型,实现了对自定义区域内土壤与地下水污染的整体评估。可通过在地图上绘制任意多边形,系统自动识别该区域内的所有监测点,并综合计算污染等级、污染指数及污染物分布特征。

不同于传统固定网格划分方法,本研究在评估中支持用户自定义任意形状区域,适应复杂地形或

管理需求。同时通过毒性权重与空间统计的结合,解决了传统方法对高毒性污染物敏感性不足的问题。评估结果以多维度统计指标(如污染物浓度均值、超标比例、最大污染指数)和交互式可视化图表呈现,区域评估方式和结果如图 5 所示,帮助用户快速掌握区域污染的整体状况及风险分布。该功能适用于环保监管、工业场地修复优先级划分、农业用地安全评估等场景。

应,在平台中对研究区现场进行实景还原。有研究利用无人机现场拍摄的全景影像开发了水利枢纽的无人机 VR 全景展示系统用于还原该枢纽的现场实景^[21],但对于污染可视化平台来说,在还原现场实景的基础上,更重要的是在三维空间中对污染数据信息的可视化展示,而全景图中添加的热点是不具备空间信息的,无法准确还原采样点的真实经纬位置。所以本平台融合无人机摄影测量建立的三维模型还原现场实景,设立了区域实景展示模块。研究区为沿一段公路分布的化工厂区与土地,该段公路长约 7.39 km,拟建模范围形状狭长,总面积约为 5.12 km²,对研究区分四块构建三维模型。环摄技术常用于解决大型场景建模中局部区域细节丢失的问题^[22]。本研究中基于此方法,对于此类小范围研究区,采取手动操作无人机低空环摄的方法获取研究区航拍影像,直接进行研究区的精细建模,减少无人机观测成本的同时,提高了小范围研究区无人机摄影测量建模的工作效率。获取现场航拍影像后,使用 ContextCapture 或 Pix4D 等摄影测量软件进行场景三维建模。对于本文小面积研究区,选择使用模型效果更精细的 Context Capture 软件建立研究区三维模型。本研究布设的四个像控点,经过反复刺点与空中三角测量计算,得出像控点的重投影误差 RMS 为 0.55 像素,表明模型的空间精度满足低空摄影测量建模的精度控制要求。



图 4 某采样点污染风险可视化表单

2.4 研究区现场实景还原

为将地图中的采样点位与研究区现场实景对

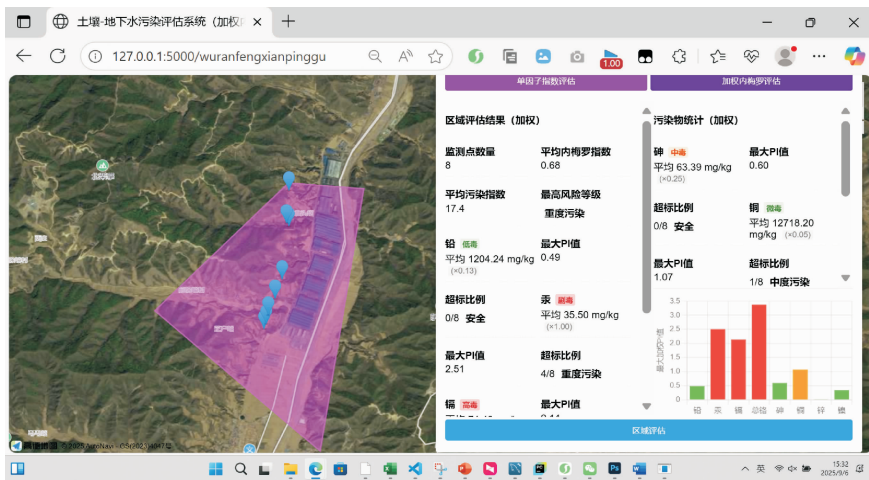


图 5 区域污染评估及可视化表单

2.5 Web 端实景展示方法

将模型数据转化为适用于 Web 的格式,以实现在 Web 平台中直接和高效地展示研究区三维模型。生成的模型数据一般为 OSGB 或 OBJ 格式,但在 Web 环境中直接展示 OSGB 格式的三维模型存在显

著的技术和性能挑战。一方面 Web 浏览器并不原生支持 OSGB 格式,这种二进制格式主要设计用于 Open Scene Graph 库,而非 Web 平台。另一方面,OSGB 格式的数据结构和编码方式不利于高效传输和渲染,而 Web 环境对数据传输和解析的效率有较

高要求。例如 3D Tiles 格式通过层级细节 (LOD) 技术和流式加载机制,能够根据用户的视点动态加载和卸载数据,从而显著提升渲染性能和减少网络带宽消耗。此外,大规模三维模型文件通常体积庞大,直接在 Web 上加载和渲染可能导致页面加载时间过长甚至崩溃。3D Tiles 格式的使用通过将模型分割成多个小块,按需加载,有效解决了这一问题。现代 Web 地图库如 Cesium.js 提供了丰富的交互性和可扩展性功能,这些功能通常需要特定的数据格式支持,而 OSGB 格式在这些方面存在局限性。所以为了在 Web 环境中直接且高效地展示三维模型,通常需要将 OSGB 格式的模型转换为更适合 Web 环境的格式,如 3D Tiles 或 glTF。通过 Super Map、ArcGIS Pro 或 Wish3D Earth 等平台^[23]将三维模型上传至 Web 端是行业内常用的网页发布方法,但这些方法本质上都是以第三方平台或链接的形式展示三维模型,并难以对模型进行二次操作。本文使用 Cesi-

um 提供的命令行工具“3d-tiles-convert”实现将 OSGB 格式数据转为 3D Tiles。在命令行中运行该工具,指定输入的 OSGB 文件路径和输出的 3D Tiles 文件路径。转换完成后,生成的 3D Tiles 数据可以托管在 Web 服务器上,在 Web 页面中使用 Cesium.js 加载和展示这些 3D Tiles 数据。

将三维模型导入平台后利用 Cesium.js 对该模块进行二次开发,并在 Web 端三维模型中添加带有污染信息的空间点。在 HTML 文件中引入 Cesium.js 库,并创建一个 Cesium Viewer 实例。通过调用“Cesium3DTileset”类,指定 3D Tiles 数据的 URL,将模型添加到场景中。本文还使用 Cesium.js 提供的相机控制和动画功能,能够平滑地浏览和交互三维模型。在模型中根据坐标添加空间点作为采样点,该采样点会在右上角显示污染信息数据。示范样例区三维模型平台展示效果如图 6 所示。

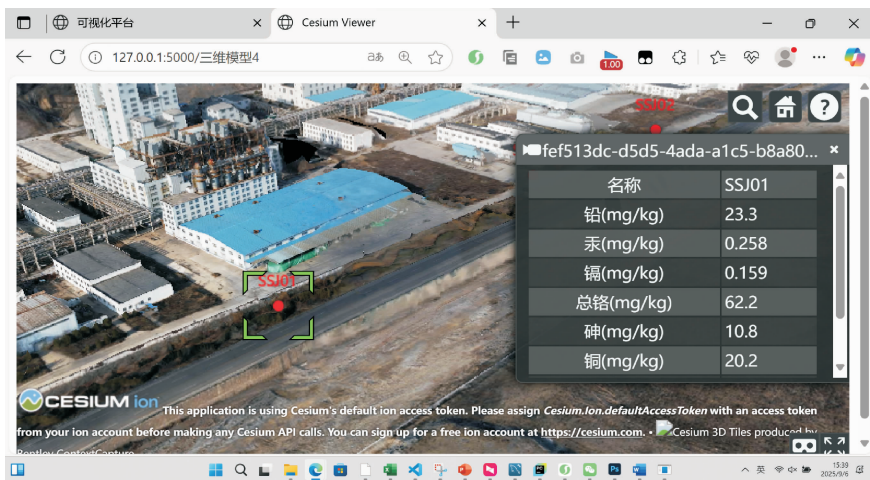


图 6 研究区三维模型及采样信息展示

3 结 论

(1) 空间分析模块解决了污染数据的空间分布可视化需求。基于高德地图 API 开发,通过热力图生成、交互式查询及动态数据加载功能,平台能够直观识别污染热点区域,并展示采样点的详细信息。模块支持多种污染物浓度的空间分布展示,可以根据需求调整热力图参数,生成符合分析需求的可视化结果。在此基础上模块还添加了污染信息的查询、对比分析及数据导出功能,支持用户通过柱状图、折线图等形式进行多维度数据对比分析。

(2) 优化后的污染评估体系量化了污染评估结

果并可视化展示。本研究构建的加权内梅罗指数评价体系,通过引入毒性分级权重和深度修正因子,有效地解决了传统评估方法对污染物生态风险和垂直迁移特征量化不足的问题。该体系将重金属的生态毒性效应和其在土壤剖面中的迁移特性纳入评估模型,使污染风险评估结果更符合实际环境风险。

(3) 三维实景与污染数据的联动展示实现了污染信息的空间可视化。通过无人机摄影测量技术构建的高精度三维模型,本研究实现了污染数据与现场实景的联动展示。能够通过三维场景控制功能自由调整视角,直观了解采样点在实际环境中的位置及其污染特征。

参考文献:

- [1] 陈世宝,王 萌,李杉杉,等. 中国农田土壤重金属污染防治现状与问题思考[J]. 地学前缘,2019,26(6):35-41.
- [2] 彭 程,徐漪琳,石钰婧,等. 生物炭改性及其对除草剂污染水体和土壤修复的研究进展[J]. 化工进展,2024,43(2):1069-1081.
- [3] 任 静,李 娟,席北斗,等. 我国地下水污染防治现状与对策研究[J]. 中国工程科学,2022,24(5):161-168.
- [4] 许丹芸,张亚宁,朱 玲,等. 基于 COMSOL 模拟的有机污染土壤 ERH 修复工艺优化[J]. 环境工程学报,2021,15(11):3642-3650.
- [5] 刘 玲,陈 坚,牛浩博,等. 基于 FEFLOW 的三维土壤-地下水耦合铬污染数值模拟研究[J]. 水文地质工程地质,2022,49(1):164-174.
- [6] 官娇娇,郑跃军,曹祥会. 我国地下水资源面临的问题及对策思考[J]. 华东地质,2024,45(3):255-263.
- [7] 魏 斌,黄明祥. 新形势下环境信息化发展展望[J]. 中国环境管理,2015,7(1):14-17.
- [8] Ren Lixia, Lu Hongwei, He Li, et al. Characterization of monochlorobenzene contamination in soils using geostatistical interpolation and 3D visualization for agrochemical industrial sites in southeast China [J]. Archives of Environmental Protection, 2016,42(3):17-24.
- [9] Jing Ping. The method to display the distribution of groundwater pollution dynamically with COMGIS based on visual developing platform [J]. Advanced Materials Research, 2014,908:489-492.
- [10] Gu Jiayi. Design of intelligent traffic visualization platform based on big data architecture [J]. Advances in Computer and Communication, 2023,4(3):172-176.
- [11] 王汉雨,周永章,许娅婷,等. 基于微服务架构的城市土壤污染物联网监测及可视化系统研发[J]. 地学前缘,2024,31(4):165-174.
- [12] Kaya E, Şentürk E, Erener A, et al. SoilSpatvis: WEB application for geographical data visualization with R Language for assessing soil pollution [J]. Soil and Sediment Contamination: An International Journal, 2024,33(7):961-975.
- [13] Auer M, Zipf A. 3D WebGIS: From visualization to analysis. An efficient browser-based 3D line-of-sight analysis [J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2018,7(7):279 (1-14).
- [14] 韩淑梅. 基于无人机摄影技术的地理信息三维可视化研究[J]. 自然资源信息化,2023(4):35-39.
- [15] 冀 潇,李 杨. 采用 ECharts 可视化技术实现的数据体系监控系统[J]. 计算机系统应用,2017,26(6):72-76.
- [16] 土壤环境质量建设用地土壤污染风险管控标准(试行): GB 36600—2018[S]. 北京:中国环境出版集团,2019.
- [17] Yang Boxiong, Ali F, Zhou Bo, et al. A novel approach of efficient 3D reconstruction for real scene using unmanned aerial vehicle oblique photogrammetry with five cameras [J]. Computers & Electrical Engineering, 2022,99:107804.
- [18] 褚 宁,米 川. 一种基于无人机倾斜摄影的高精度单体三维建模方法[J]. 地理空间信息,2023,21(11):9-14.
- [19] 胡书友,李瑞红. 倾斜摄影不同定向方法三维建模精度影响研究[J]. 地理空间信息,2024,22(10):83-86.
- [20] 尤其浩. 基于 WebGIS 的土壤污染评价与三维可视化系统研究[D]. 杭州:浙江大学,2020.
- [21] 张 瑶,黄鹏嘉,朱长富. 大藤峡水利枢纽无人机 VR 全景展示系统开发与应用[J]. 人民珠江,2021,42(8):116-122.
- [22] Li Jia, Yao Yongxiang, Duan Ping, et al. Studies on three-dimensional(3D) modeling of UAV oblique imagery with the aid of loop-shooting [J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2018,7(9):356.
- [23] 王 宇,邢希凯,赵胜楠. 基于无人机倾斜摄影三维模型构建及网页发布[J]. 地理空间信息,2022,20(6):17-19,23.