

碳中和与智慧水务的教学改革研究与实践

陆建, 徐斌, 张天阳. 基于知识图谱的环境学科课程优化与贯通式培养路径[J]. 净水技术, 2026, 45(3): 182-187.

Lu J, Xu B, Zhang T Y. Curriculum optimization and coherent training pathways for environmental disciplines based on knowledge graph [J]. Water Purification Technology, 2026, 45(3): 182-187.

基于知识图谱的环境学科课程优化与贯通式培养路径

陆建, 徐斌, 张天阳*

(同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092)

摘要 【目的】针对环境学科本研贯通教学中内容重复、衔接断层、前沿缺席等结构性痛点,以及传统课程体系以单门课程为单位、缺乏整体结构设计的问题,本文提出一条基于知识图谱的课程体系优化路径,以实现课程整合、衔接增强与前沿嵌入,为拔尖创新人才培养提供结构化的课程组织支撑。【方法】首先,本文开展知识点抽取与结构化表达,以课程大纲、教材与课件等教学文本为数据源,在统一粒度与术语的前提下形成标准化课程知识元;其次,构建教学认知图谱并执行课程关联分析与冗余诊断,基于知识点相似度、共现关系与图谱结构特征识别“冗余区-断层区-关键节点”;进而据此实施基于图谱的课程结构优化,通过课程群模块化、过渡微模块与“双碳/智慧水务/人工智能(AI)”等前沿节点的嵌入,重构“前置-并修-后续”的课程链。【结果】本文提出“知识图谱-能力递进-素养融合”的3层教学优化模式,实现从知识到能力到素养的三维贯通,并明确学生侧(学习导航与路径可达性)、教师侧(教学诊断与协同备课)、学院/学校侧(课程群治理与质量评估)的应用场景与可行性。【结论】本文聚焦方法论与流程,强调知识图谱在课程结构诊断与教学组织中的工具属性,旨在为环境学科由“课程供给逻辑”向“学习生成逻辑”的转型提供结构化参考与可复制框架。

关键词 知识图谱 课程体系优化 本研贯通 环境学科 教学模式

中图分类号: G642 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2026)03-0182-06

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2026.03.019

Curriculum Optimization and Coherent Training Pathways for Environmental Disciplines Based on Knowledge Graph

Lu Jian, Xu Bin, Zhang Tianyang*

(College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract [Objective] To address key challenges in undergraduate-postgraduate (UG-PG) integration in environmental engineering education, including content duplication, insufficient curricular articulation and missing frontier topics, as well as the limitations of traditional curriculum systems organized around isolated individual courses without an integrated structural design, this paper proposes a knowledge-graph based pathway for curriculum optimization to achieve course consolidation, stronger articulation, and frontier embedding, thereby providing structured curricular organization support for the cultivation of top innovative talents. [Methods] First, this paper conducted knowledge-point extraction and structured representation, using teaching texts such as course syllabi, textbooks, and lecture materials as data sources, producing standardized curriculum knowledge units under unified granularity and terminology. Then, this paper built a teaching knowledge graph and performed course linkage analysis and redundancy diagnostics based on knowledge-point similarity, co-occurrence relationships, and graph structural features to identify “redundant zones-articulation gaps-key nodes”. Guided by these signals, this paper implemented graph-informed curriculum restructuring through modular course clusters,

[收稿日期] 2025-11-06

[基金项目] 同济大学 2025 年研究生学科知识能力素质图谱建设项目(2025ZSTP05)

[作者简介] 陆建(1995—),男,研究方向为环境学科实验教学科研,E-mail: jianlu@tongji.edu.cn。

[通信作者] 张天阳(1990—),男,副教授,研究方向为给排水科学与工程教学科研,E-mail: tianyang1815@126.com。

bridging micro-modules, and the insertion of frontier nodes [e. g., carbon neutrality, smart water, artificial intelligence (AI)], thereby re-designing prerequisite-co-requisite-subsequent course chains. [Results] Building on this analysis, this paper proposed a three-layer instructional optimization model—“knowledge graph-ability progression-literacy integration” to achieve a triadic linkage from knowledge to ability to literacy, with explicit application scenarios and feasibility for students (learning navigation and path reachability), instructors (teaching diagnostics and collaborative preparation), and departments/schools (course-cluster governance and quality evaluation). [Conclusion] Focusing on methodology and process, with an emphasis on the use of knowledge graphs as a practical tool for curriculum structure diagnosis and instructional organization, the framework offers a structured and reproducible reference for shifting environmental engineering education from a course-supply logic to a learning-generation logic.

Keywords knowledge graph curriculum system optimization undergraduate-postgraduate integration environmental discipline teaching mode

面向“双碳”战略与生态文明建设的新需求,环境学科亟须培养既掌握学科交叉理论、具备系统思维,又能运用碳中和相关前沿技术与人工智能方法解决复杂工程问题的复合型拔尖人才^[1]。然而,当前高等教育在课程体系建设上仍存在结构重复、衔接松散、路径割裂等共性问题,本研贯通培养缺乏稳定的结构化支撑与可追踪的进阶路径,改革动力强而抓手不足。作为教育数字化转型的重要技术,知识图谱能够通过课程知识点及其关系的结构化、显性化与可视化表达,为课程体系重构与教学逻辑优化提供数据依据与路径分析工具^[2]。

同济大学自2024年发布《人工智能赋能学科创新发展行动计划(2024—2027)》以来,持续推进人工智能与学科建设的深度融合。2025年3月,校党委书记郑庆华院士提出:要构建新工科专业知识图谱与知识模型,搭建AI4E(工程智能)教学创新实训平台。在此背景下,环境科学与工程学科以“数智化、绿色化、融合化”为导向推进课程体系优化与本研贯通式培养改革。基于以上现实需求与校内条件,本文以环境学科为对象,提出一条基于知识图谱的课程体系优化路径,并据此构建“知识-能力-素养”递进式教学优化模式,力求为本研贯通的结构化改革提供方法性参考与可操作的框架。

1 背景与现状

1.1 环境学科课程体系现存问题

本研贯通教育已成为拔尖创新人才培养的重要途径,但总体仍处于探索期^[3]。以环境学科为例,现行体系主要存在3类问题:一是课程结构重复、边界模糊,本科与研究生课程在核心知识点上的交叉率较高,章节内容彼此覆盖,阶段性教学缺

少明确分工与梯度,导致学习负担加重、资源利用效率偏低;二是内容衔接断层、过渡薄弱,本科阶段偏重工艺与概念,研究生阶段侧重机理与模型,中间缺乏系统化过渡与铺垫,学生从“知识积累”到“科研创新”易出现跳跃;三是前沿模块缺席、更新滞后,双碳治理、智慧水务、数据智能等新兴内容尚未形成稳定模块与进阶序列,难以支撑新工科导向的能力培养目标。其根本原因在于传统课程体系重内容罗列、轻结构设计。课程以门为单位堆叠,缺少跨课程的知识关联与能力递进^[4]。要实现有效的本研衔接,当前亟须具备面向课程体系的结构性与诊断能力——对课程知识点进行标准化表达与层级划分,提供跨课程关联识别与冗余检测的可视化机制,并建立刻画阶段递进与能力生成的评价框架,据此明确各学段的知识边界与前沿内容的纳入原则与时序。

1.2 国内外进展与同济大学实践

国际上,知识图谱技术已深度融入高等教育改革。斯坦福大学利用Neo4j构建计算机学科课程知识网络,实现跨学段知识可视化^[5],新加坡国立大学通过图谱分析优化工程类本研课程衔接逻辑^[6],代尔夫特理工大学基于图谱重构土木工程课程体系,为核心课程(如《城市水系统设计》)在本科与研究生阶段的内容承接与能力递进提供参考框架^[7],美国土木工程师协会(ASCE)发布面向工程教育的知识图谱标准,推动课程标准化建设^[8]。国内,清华大学、上海交通大学在医学与计算机领域开展了基于大模型的知识图谱探索^[9-10],但环境学科尚缺系统性实践。校内经验方面,同济大学土木工程学院于2024年上线垂域知识大模型CivilGPT^[11],完成国家备案,汇聚44

门课程、约 50 万页语料、2 600 余本教材规范与 7 万道试题,构建包含 11 408 个知识点、13 222 条关系的土木工程知识图谱,已用于薄弱点定位与个性化学习路径推荐,显著提升教学效率^[12]。上述国际经验与同济土木的范式为环境学科开展知识图谱建设与课程体系优化提供了可借鉴的技术路径与实施样板。

2 知识图谱助力学科内涵发展的路径设计

2.1 路径设计思路

本文以“可落地、可评估”为原则,构建“课程数据整合与标准化层级梳理-多模型知识点提取对比-轻量化课程知识图谱构建-“科技树”式本研贯通培养路径设计-形成可复制的方法体系”的整体链路(图 1)。为便于教学场景应用,将其进一步凝练为“知识点抽取-图谱构建-课程关联分析-教学结构优化”4 步法,目标不是搭建庞大而沉重的知识库,而是形成教学认知图谱:一方面让教师能够直观诊断课程内容的重复、断层与关键节点;另一方面让学生能够清晰感知学习路径与能力递进^[13]。面向环境学科,该图谱的直接目标是厘清本科生与研究生阶段课程在知识点覆盖范围与层级深度上的差异,识别并削减冗余、弥补衔接薄弱环节,将“双碳、智慧水务、数据智能”等前沿模块有机嵌入课程体系,并输出可复用的贯通式培养路径与评价指标。

2.2 具体路径

2.2.1 知识点抽取与结构化表达

选取环境学科核心课程的课程大纲、教材与课件作为数据源,输入多模型(ChatGPT、DeepSeek、豆包等)进行知识点识别,并以统一的指令模板(Prompt)与术语表约束输出格式。经教师人工校核,最终以标准三元组表达“一级知识点-关系-二级知识点”,关系限定为“定义、包含、属于、特点”,同时完成同义项归一,形成可比的课程知识点表。为保证抽取结果的稳定性与可比性,构建经教师一致性校核的人工参考集(reference set),并以该参考集为对照,计算知识点抽取的一致性指标,包括准确率、召回率与 F1 值[(F1-score,用于综合衡量知识点抽取中准确性与完整性的评价指标];同时统计专业术语覆盖率以及三元组生成率,作为抽取阶段的客观评测依据。

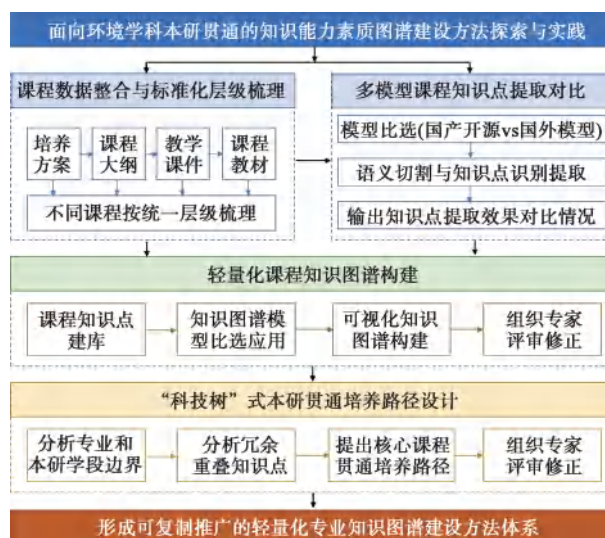


图 1 基于知识图谱的学科内涵发展路径设计思路

Fig. 1 Design Approach of a Knowledge Graph-based Pathway to Intrinsic Disciplinary Development

2.2.2 课程关联分析与冗余诊断

将经人工校核的知识点及其关系导入 Neo4j 或同济大学知识图谱构建平台,构建轻量化课程知识图谱(图 2)。在此基础上,通过知识点集合相似度与共现分析量化课程间的知识重叠程度,其中相似度反映课程知识覆盖的重合比例,共现分析用于统计同一知识点在不同课程中的重复出现情况,从而识别系统性内容冗余。

进一步结合图谱结构特征,引入先修链完整度、孤立度与中心性指标进行诊断:先修链完整度用于判断课程核心知识是否形成明确的前置-后续衔接关系;孤立度用于识别与其他课程关联较弱的课程或知识点;中心性(PageRank 与介数)用于识别在多条学习路径中起关键连接作用的节点。上述指标可直接由知识图谱平台或脚本计算,无需引入复杂模型或额外训练过程。综合上述分析,可在图谱中区分冗余区、断层区与关键节点,并以可视化方式呈现课程间的衔接强度与知识路径,为后续课程结构优化提供依据。

2.2.3 基于图谱的课程结构优化

依据诊断结果实施 3 项策略:其一,模块化整合,将高重叠的知识点并箱为“课程群”,并在群内按“基础-方法-应用”建立层级结构;其二,衔接性增强,针对断层区设置过渡模块或专题微课,例如在《水处理工程》与《高级氧化技术》之间增设“反应动力学与机理建模”微模块,以平滑从工艺认知到机

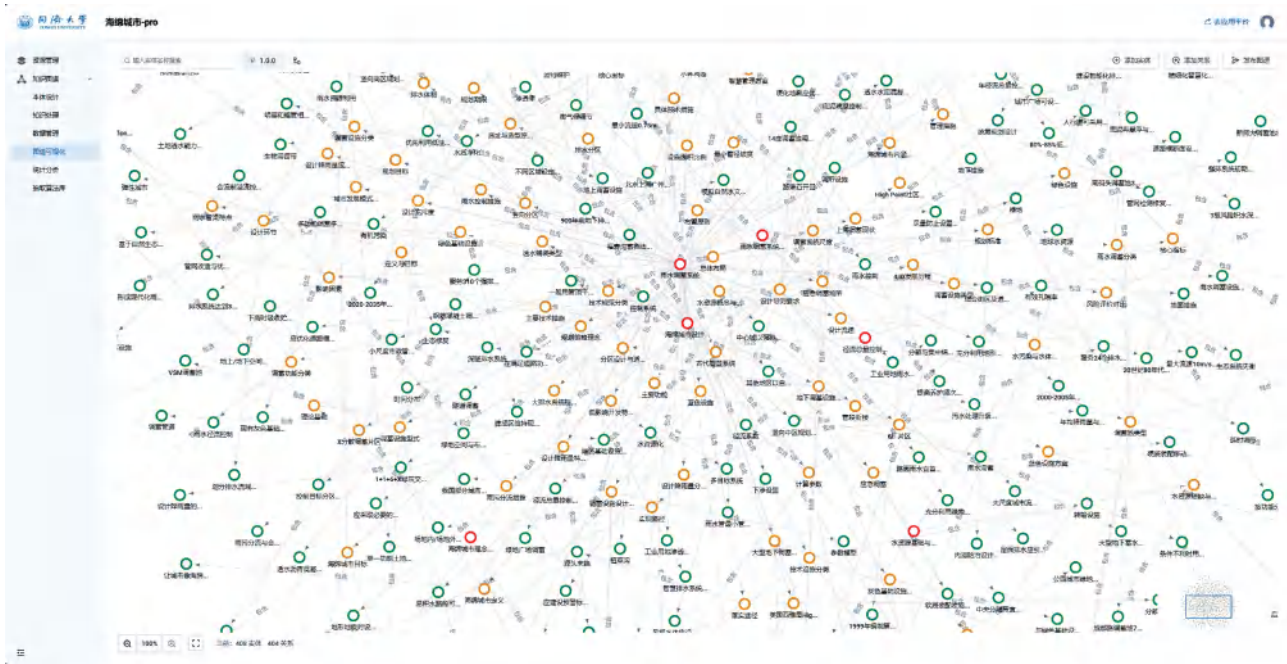


图2 同济大学知识图谱构建平台与图谱示例

Fig. 2 Knowledge Graph Construction Platform and Graph Example of Tongji University

理分析的过渡;其三,前沿内容嵌入,在课程群边缘引入“双碳治理”“AI+水质预测”“厂-网-河一体化”等节点,保持体系的开放演化。结构表达上,由传统“课程树状”转向“知识网络”,以前置-并修-后续描述课程链关系,并据此形成合并与精简建议、新增过渡模块清单、本科生-研究生分层教学大纲与初始贯通路程图。目前,超星、智慧树等教学平台已经完成多个学科专业课程关系的优化配置,用于支撑课程结构调整与教学组织决策。

3 构建“知识图谱-能力递进-素养融合”的教学优化模式

本研究提出的“知识图谱-能力递进-素养融合”教学优化模式,旨在由传统以课程与教师为中心的教学组织方式,转向以学生学习路径为核心的知识图谱联动式教学。知识图谱在此不仅用于呈现课程知识结构,更作为教学设计与学习组织的支撑工具,将课程内容、能力培养与素养目标进行显性关联(表1)。

表1 知识图谱-能力递进-素养融合3层教学模式

Tab. 1 Three-Layer Teaching Mode of Knowledge Graph-Ability Progression-Literacy Integration

| 层级 | 目标导向 | 图谱支撑作用 | 教育逻辑 |
|-----|----------------------|-------------------------------------|---------------|
| 知识层 | 构建清晰、无冗余的学科知识体系 | 知识点抽取→图谱化→显性化课程关联;标注“定义/包含/属于/特点”关系 | 解决“教什么、如何组织” |
| 能力层 | 强化跨课程的综合应用与思维能力 | 通过图谱识别关键节点/共用知识点,形成能力链 | 解决“学了能干什么” |
| 素养层 | 构建跨阶段、跨模块的综合应用场景与价值观 | 将课程群链接到项目/实训/科研,打通“学-研-创” | 解决“如何实践、如何贯通” |

在教学实施层面,该模式对应3个递进层级。在知识显性化层,以知识图谱为依据,对课程大纲与教学内容进行重组,将分散于不同课程中的知识点以“知识点-关系-逻辑链”的形式显性呈现,并据此调整教学重点与内容边界。该过程可直接服务于课程教案修订与章节安排,减少内容重复并强化课程

间的前后衔接。在能力递进层,基于图谱识别的关键知识点群,重构教学单元与学习任务,将多门课程中相关知识点整合为能力导向的教学模块(如污染控制能力、水系统建模能力、数据驱动分析能力等)。在教学设计中,这些模块通过案例分析、综合性作业或跨章节问题驱动学习实施,使学生在连续

课程中逐步形成综合分析与解决问题的能力。在素养融合层,以能力模块为载体组织跨课程学习活动。如综合案例研讨、课程设计型任务或科研导向的小型专题训练,引导学生将所学知识与方法应用于复杂工程与环境问题情境中。该层面强调学习成果的迁移与综合运用,服务于工程意识、系统思维与创新能力的培养。在运行机制上,教师可基于知识图谱开展课程协同设计与教学诊断;学生将图谱作为学习导航工具规划学习路径;学院层面则可据此开展课程群统筹与培养方案优化。通过上述方式,该模式将知识组织、能力培养与素养目标嵌入具体教学环节,实现从“课程供给逻辑”向“学习生成逻辑”的转变。部分专业课程结构调整与先修-后修关系已在超星、智慧树等教学平台上线实施,其长期教学成效有待在后续教学实践中持续跟踪与评估。

4 结语

围绕拔尖创新人才培养对课程体系结构化、进阶化、前沿化的要求,本文提出以知识图谱为抓手的课程体系优化路径,并据此形成“知识图谱-能力递进-素养融合”的教学优化模式。我们按“知识点抽取与结构化表达→课程关联分析与冗余诊断→基于图谱的课程结构优化”三步推进:其一,得到标准化知识库与证据化索引,为后续比对与更新提供数据底座;其二,生成课程衔接图与“冗余区-断层区-关键节点”诊断清单,并给出重叠率、先修链完整度、中心性等量化指标;其三,产出课程群重构方案(模块整合)、过渡微模块清单(衔接增强)、前沿嵌入位点与“前置-并修-后续”链路说明,并据此绘制方向化的科技树式贯通路径,为培养方案修订与课程协同提供可视化依据。在应用层面,该模式面向学生用于学习导航与个性化路径可达性提升,面向教师用于课程诊断、协同备课与资源统筹,面向学院/学校用于课程群治理、培养方案优化与质量评估,推动课程建设从以单门课程为中心,转向以知识结构与学习路径为核心的组织逻辑。

鉴于本文研究重点在于课程体系的结构组织方法与治理工具构建,尚未对教学效果开展系统性的量化实证检验,相关教学验证有待在后续实践中逐步推进。未来研究将结合具体课程与教学场景,以知识图谱为分析框架,跟踪课程衔接质量、学习路径完整性及学生学习负担结构的变化,并对知识节点

访问频率、学习路径偏好与课程通过情况进行过程性分析,为课程结构优化提供持续反馈,逐步增强该模式的教学应用价值与推广适用性。

参考文献

- [1] 郑庆华. 人工智能赋能创建未来教育新格局[J]. 中国高教研究, 2024(3): 1-7.
Zheng Q H. Artificial intelligence enables the creation of a new future education landscape [J]. China Higher Education Research, 2024(3): 1-7.
- [2] 刘娟, 金明, 章联军. 知识图谱助力的本研贯通拔尖人才培养探索[J]. 教育教学论坛, 2025(3): 93-96.
Liu J, Jin M, Zhang L J. Exploration of cultivating top talents through integrated undergraduate and graduate education aided by knowledge graph [J]. Education and Teaching Forum, 2025(3): 93-96.
- [3] 郑庆华. 系统探索工程智能驱动学科转型发展的创新路径[J]. 中国高等教育, 2025(11): 14-20.
Zheng Q H. Systematically explore the innovative path of discipline transformation and development driven by engineering intelligence [J]. China Higher Education, 2025(11): 14-20.
- [4] 胡敬平, 陈然, 侯慧杰, 等. “双碳”战略下融合人工智能的环境学科人才培养模式探索[J]. 高等工程教育研究, 2024(6): 85-88.
Hu J P, Chen R, Hou H J, et al. Exploration of talent cultivation model in environmental disciplines integrating artificial intelligence under the dual-carbon strategy [J]. Research in Higher Education of Engineering, 2024(6): 85-88.
- [5] Stanford University. CS520-Knowledge Graphs[EB/OL]. [2025-11-06]. <https://bulletin.stanford.edu/courses/2221681>.
- [6] National University of Singapore, College of Design and Engineering. Curriculum structure[EB/OL]. [2025-11-06]. <https://cde.nus.edu.sg/esp/undergraduate/b-eng-engineering-science/curriculum-structure/>.
- [7] Delft University of Technology. 1.2.4 AI for knowledge graphs [EB/OL]. [2025-12-22]. <https://ocw.tudelft.nl/course-lectures/1-2-4-ai-for-knowledge-graphs/>.
- [8] Isah M A, Kim B S. Question-answering system powered by knowledge graph and generative pretrained transformer to support risk identification in tunnel projects[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2025, 151(1): 15230. DOI: 10.1061/JCEMD4.COENG-15230.
- [9] Tsinghua University, Department of Electronic Engineering. Selected publications [EB/OL]. [2025-12-22]. <https://web.ee.tsinghua.edu.cn/heliang/en/lwcg/2692/list/index.htm>.
- [10] Zhao Z H, Zhang Y, Wu C Y. et al. Large-vocabulary segmentation for medical images with text prompts [J]. npj Digital Medicine, 2025(8): 566-566. DOI: 10.1038/s41746-

- 025-01964-w.
- [11] 同济大学土木工程学院. CivilGPT 大模型[EB/OL]. [2025-12-22]. <https://civileng.tongji.edu.cn/CivilGPT/list.htm>. Tongji University, College of Civil Engineering. CivilGPT model [EB/OL]. [2025-12-22]. <https://civileng.tongji.edu.cn/CivilGPT/list.htm>.
- [12] 周颖, 孟诗乔, 徐灏然, 等. 土木工程专业知识驱动大语言模型构建与评测体系[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2025, 53(6): 831-840.
Zhou Y, Meng S Q, Xu H R, et al. Construction and evaluation framework of knowledge-driven large language models for civil engineering[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2025, 53(6): 831-840.
- [13] 李静, 成柏霖, 刘蕾. 知识图谱赋能高校通识课程建设——以“社会组织管理”课程为例[J]. 煤炭高等教育, 2025, 43(4): 63-71.
Li J, Cheng B L, Liu L. Empowering the development of university general education courses through knowledge graphs: A case study of the course “Social Organization Management”[J]. Coal Higher Education, 2025, 43(4): 63-71.

(上接第 181 页)

- [4] 徐祖信, 张竞艺, 徐晋, 等. 城市排水系统提质增效关键技术研究——以马鞍山市为例[J]. 环境工程技术学报, 2022, 12(2): 348-355.
Xu Z X, Zhang J Y, Xu J, et al. Study on key technologies for improving quality and efficiency of urban drainage system: A case of Ma'anshan City [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2022, 12(2): 348-355.
- [5] 鄢琳, 荣宏伟, 谭锦欣, 等. “源-网-厂-河”一体化智慧排水系统的构建设计[J]. 给水排水, 2021, 47(3): 150-154.
Yan L, Rong H W, Tan J X, et al. Construction and design of pollution source-drainage pipe network-sewage treatment plant-urban river integrated intelligent drainage system [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 47(3): 150-154.
- [6] 颜愉愉, 金东君. 浅析智慧一张图在智慧排水中的应用[J]. 净水技术, 2019, 38(s1): 378-380.
Yan Y Y, Jin D J. Analysis of the application of smart one-map in smart drainage[J]. Water Purification Technology, 2019, 38(s1): 378-380.
- [7] 邵军峰, 安振源, 王羽中, 等. 郑州市污水厂群应急联合调度的优化布局与实现[J]. 净水技术, 2024, 43(7): 92-99.
Shao J F, An Z Y, Wang Y Z, et al. Optimal layout and implementation of joint emergency operation of WWTPs group in Zhengzhou City [J]. Water Purification Technology, 2024, 43(7): 92-99.