



护岸多维度健康状态监测及评估指标体系构建*

陈静, 葛乃铭, 倪世阳, 马瑞鑫

(交通运输部天津水运工程科学研究所, 天津 300456)

摘要: 针对内河航道护岸工程传统健康监测方法(人工巡检、单一技术)存在的效率低、覆盖面窄、数据融合不足及评估主观性强等问题, 构建一套基于“水陆空天”多源感知和 DERU-AHP 量化模型的护岸多维度健康状态监测及评估指标体系。创新性地融合岸基视频、无人机激光点云、无人船声纳、分布式光纤传感、北斗导航等技术, 构建空-天-岸-水-下一体化协同监测网络, 实现对护岸结构表面、内部及水下病害的全方位感知。结合层次分析法(AHP)确定指标权重, 并将损坏程度-范围-影响-紧迫性(DERU)模型引入护岸健康评估领域, 建立四维量化分级评价标准。将该体系应用于长江中游某重力式护岸工程进行验证。结果表明, 该体系精准识别人工遗漏的隐蔽裂缝扩展及内部应力异常, 综合评估得分(62.5分, 三类)较传统方法(二类, 80~90分)更符合实际维护需求; 量化分析显示评估误差降低25.4%, 风险评估效率提升40%。研究成果为护岸工程智能化运维提供了精准、高效的技术支撑, 对提升航道基础设施全生命周期管理水平具有重要意义。

关键词: 护岸工程; 健康状态监测; 评估指标体系; 多维度监测; DERU 评估模型

中图分类号: U611

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)01-0121-07

Building of multi-dimensional health status monitoring and evaluation index system for bank protection

CHEN Jing, GE Naiming, NI Shiyang, MA Ruixin

(Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, MOT, Tianjin 300456, China)

Abstract: In view of the problems of low efficiency, narrow coverage, insufficient data integration, and strong subjectivity in evaluation in traditional health monitoring methods (manual inspection, single technology) for bank protection projects in inland waterways, a multi-dimensional health status monitoring and evaluation index system for bank protection is built on the basis of “water-land-air-space” multi-source sensing and DERU-AHP quantitative model. Shore-based video, UAV laser point cloud, unmanned ship sonar, distributed optical fiber sensing, Beidou navigation and other technologies are innovatively integrated, and an air-space-shore-water-underwater integrated collaborative monitoring network is built to achieve all-round perception of surface, internal and underwater diseases of revetment structures. The analytic hierarchy process (AHP) is used to determine the index weights, and the damage-extent-reflection-urgency (DERU) model is introduced into the field of bank protection health assessment to establish four-dimensional quantitative grading evaluation criteria. The system is verified by the application in a gravity-type bank protection project in the middle of the Yangtze River. The results show that the system accurately identifies hidden crack propagation and internal stress anomalies missed by manual inspection, and the comprehensive evaluation score (62.5 points, Class III) is more in line with actual maintenance needs than the traditional method (Class II, 80–90 points). Quantitative analysis shows that the evaluation error is reduced by 25.4%, and the risk assessment efficiency is improved by 40%. The results can provide accurate and

收稿日期: 2025-05-30 录用日期: 2025-07-04

*基金项目: 国家重点研发计划项目(2024YFB2605905); 天津市科技计划项目(25ZYJJC00050); 浙江省交通运输科技计划项目(2023017); 中央级公益性科研院所科研创新基金资助项目(TKS20250501)

作者简介: 陈静(1986—), 女, 硕士, 副研究员, 研究方向为水运信息化。

efficient technical support for the intelligent operation and maintenance of revetment projects, and are of great significance for improving the full life cycle management level of waterway infrastructure.

Keywords: bank protection project; health status monitoring; evaluation index system; multi-dimensional monitoring; DERU evaluation model

护岸工程是保障内河航道通航安全的核心设施,其健康状态直接影响航运效率与岸线生态^[1]。近年航运量增长与极端水文事件频发,护岸结构面临裂缝扩展、混凝土剥落、底部冲刷等病害^[2-3]。传统监测依赖人工巡检与单点传感技术,存在三大局限:1) 监测维度缺失,人工巡检难以覆盖水下及结构内部病害,如邓彩云等^[4]指出隐蔽冲刷与裂缝易被忽视;2) 数据融合不足,单一技术(如仅视频或应变传感)导致信息割裂,廖斌等^[5]强调多源数据协同的必要性;3) 评估主观性强,现有方法依赖定性经验(如 JTS/T 320—2021《航道养护技术规范》^[6] 五类分级),缺乏量化模型支撑^[7-10]。

为此,本文提出一种护岸多维度健康状态监测及评估指标体系,旨在通过技术创新与模型优化,突破传统方法的局限性。通过整合“水陆空天”多源感知技术(如岸基视频、无人机激光点云、无人船声纳扫描等),构建护岸结构全方位监测网络;基于层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)与损坏程度-范围-影响-紧迫性(damage-

extent-reflection-urgency, DERU)评估模型,建立涵盖损坏程度-范围-影响-紧迫性的量化评价框架,实现护岸健康状态的动态分级(一类至四类)。研究创新点在于将多源数据融合与层次化评估相结合,显著提升监测精度与风险评估的客观性。

1 监测技术指标体系构建

根据以往的内河限制性航道基础设施监测经验,构建内河限制性航道基础设施多维度健康状态监测指标体系。其中,在指标构建中确定护岸工程监测作为对象;在多源监测信息感知中研究结合岸基视频、无人船、无人机、北斗导航卫星、高分遥感、分布式光纤、多波束、断面实时监测等“水陆空天”多种技术的护岸安全健康状态监测技术。护岸工程监测根据护岸形式分为重力式护岸监测、斜坡式护岸监测、钢板桩护岸监测,重点通过岸基视频监控摄像机、无人机、无人船、传感器、北斗、水下机器人等监测载体,监测结构锈蚀、结构破损、坍塌滑坡、位移沉降、底部冲刷等具体问题^[11-13]。指标体系见表1。

表1 护岸健康监测指标体系

Tab. 1 Monitoring index system for bank protection health

一级指标	二级指标	三级指标	监测位置	监测载体	技术装备
重力式护岸	结构 破损	表面裂缝、陷坑、混凝土及块石剥落	水上	岸基视频监控摄像机	视频监控摄像机
			水上	无人机	遥感、激光点云
			水面	无人船	视频人工智能(artificial intelligence, AI)
	应力应变	土压力、支挡结构应力和应变	结构	传感器	分布式光纤、光纤光栅
			地下	传感器	应力应变传感器
	沉降	初始沉降、固结沉降	水上	岸基视频监控摄像机	视频监控摄像机
			水面	无人船	视频 AI
			水上	北斗	北斗导航卫星系统
	位移	竖向位移、水平位移、深层水平位移	水上	岸基视频监控摄像机	视频监控摄像机
			水面	无人船	视频 AI
			水上	无人机	遥感、激光点云
			水上	北斗	北斗导航卫星系统
底部冲刷	轻微、严重	水面	无人船	视频 AI	
		水下	水下机器人	多波束、孔径雷达、侧扫声呐	

续表1

一级指标	二级指标	三级指标	监测位置	监测载体	技术装备
斜坡式护坡	护岸 塌陷	轻微塌陷、明显塌陷、 严重塌陷	水上	岸基视频监控摄像机	视频监控摄像机
			水上	无人机	遥感、激光点云
	滑坡	轻微滑坡、明显滑坡、 严重滑坡	水上	岸基视频监控摄像机	视频监控摄像机
			水上	无人机	遥感、激光点云
底脚 冲刷	轻微、严重		水面	无人船	视频 AI
			水下	水下机器人	多波束、孔径雷达、侧扫声呐
钢板桩 护岸	结构 变形	轻微变形、明显变形、 严重变形	水上	岸基视频监控摄像机	视频监控摄像机
			水上	无人机	遥感、激光点云
			结构	传感器	分布式光纤、光纤光栅
	钢板 锈蚀	无锈蚀、局部锈蚀、锈蚀 范围较广、大部分锈蚀	地下	传感器	腐蚀监测传感器

2 健康状态评估指标体系构建

应用 AHP 和 DERU 方法, 在基于“水陆空天”立体感知的护岸多维度安全健康状态监测基础上, 构建护岸安全健康状态评估指标, 并评估其技术性能。DERU 是按照损坏程度、损坏范围、构件损坏对整体结构的影响、维修的急迫程度对护岸健康状态进行分级量化评级, 并依次进行 DERU 评估标准构建、各检测指标 DERU 评估值构建与评估结果计算^[14-16]。

2.1 护岸健康状态评价指标体系架构

根据以往的护岸状况综合评价经验, 基于指标构建原则和 AHP, 将护岸健康状态评价指标体系分为 3 个层次: 目标层 U、准则层 u_i 、指标层 u_{ij} 。

1) 目标层 U。构建护岸健康状态评价体系时, 目标层即为护岸健康状态评价。

2) 准则层 u_i 。护岸健康状态主要受护岸本身结构功能完整性和护岸附近水流泥沙情况影响。基于护岸自身的结构特点, 调查分析护岸常见损坏情况及历年观测数据, 结合 JTS/T 320—2021《航道养护技术规范》等要求, 选取安全性准则和耐久性准则为体系的准则层。

3) 指标层 u_{ij} 。根据 JTS/T 320—2021《航道养护技术规范》等要求, 结合护岸常见损坏情况的经验, 选取护岸的监测重点指标护岸塌陷、混凝土及块石剥落、钢筋锈蚀、表面裂缝。最终所得的护岸健康状态评价体系见图 1。

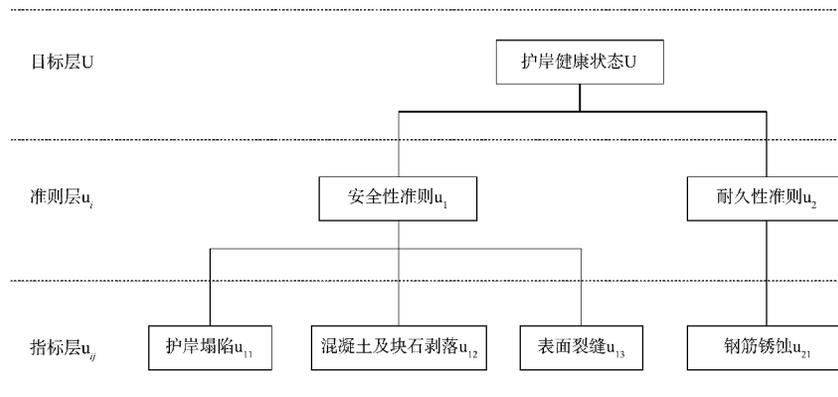


图 1 护岸健康状态评价指标体系架构

Fig. 1 Architecture of evaluation index system for bank protection health status

2.2 DERU 评估指标标准确定

按照 DERU 法指标分级标准, 参考 JTS/T 320—2021《航道养护技术规范》等, 综合各部位病害可

能呈现的形态及其发展程度, 形成 DERU 评估指标标准。其中 D 分为 1~4 级, 级别越大代表损坏程度越重; E 依损坏范围百分比分为 1~4 级;

R 依据检测项目损坏对整体结构的影响分别确定为 1~4 级; *U* 根据 *D* 和相关技术规范确定^[17-18]。DERU 法的评估标准见表 2。

表 2 DERU 法评估标准
Tab. 2 Evaluation criteria of DERU

级别	<i>D</i>	<i>E</i> /%	<i>R</i>	<i>U</i>
1 级	良好	≤10	轻微	例行保养
2 级	一般	10~30	较小	2 a
3 级	较差	30~60	中等	1 a
4 级	严重	≥60	较大	紧急抢修

2.2.1 *D* 值分级标准设定

护岸塌陷、混凝土及块石剥落、钢筋锈蚀、表面裂缝的 *D* 值判定分级见表 3。

表 3 护岸塌陷、混凝土及块石剥落、钢筋锈蚀、表面裂缝的 *D* 值判定分级

Tab. 3 Classification of *D*-value determination for bank collapse, concrete and stone spalling, steel reinforcement corrosion, and surface cracks

病害类型	病害状况描述	<i>D</i> 值
护岸塌陷	结构完好,无塌陷现象	1
	有轻微塌陷情况	2
	护岸塌陷明显	3
	护岸塌陷严重	4
混凝土及块石剥落	结构完好,无剥落现象	1
	混凝土局部剥落、空鼓	2
	局部有剥落,空鼓和剥落面积小于 30%	3
	大面积剥落,空鼓和剥落面积达 30% 以上	4
钢筋锈蚀	钢筋处无锈蚀	1
	混凝土表面可见局部锈迹	2
	锈迹较多,钢筋锈蚀范围较广	3
	锈迹普遍,钢筋表面大部分或全部锈蚀	4
表面裂缝	结构完好,无裂缝	1
	局部有微小锈蚀裂缝,裂缝宽度小于 0.3 mm	2
	裂缝较多或呈网状,裂缝宽度在 0.3~1.0 mm	3
	大面积锈蚀裂缝呈网状,裂缝宽度大于 1.0 mm	4

2.2.2 *E* 值分级标准设定

护岸塌陷、混凝土及块石剥落、钢筋锈蚀、表面裂缝的 *E* 值判定分级见表 2。

2.2.3 *R* 值分级标准设定

护岸塌陷、混凝土及块石剥落、钢筋锈蚀、表面裂缝的 *R* 值判定分级见表 4。

表 4 护岸塌陷、混凝土及块石剥落、钢筋锈蚀、表面裂缝的 *R* 值判定分级

Tab. 4 Classification of *R*-value determination for bank collapse, concrete and stone spalling, steel reinforcement corrosion, and surface cracks

病害类型	病害状况描述	<i>R</i> 值
护岸塌陷	对结构整体无影响	1
	对结构整体较小	2
	塌陷已影响结构完整性	3
	已影响结构完整性并继续发展	4
混凝土及块石剥落	无影响	1
	剥落位置在墙身处	2
	剥落位置在变形缝处	3
	剥落位置在结构受力较大处	4
钢筋锈蚀	对结构整体无影响	1
	已初步影响结构受力	2
	已影响结构受力并继续发展	3
	严重影响结构受力	4
表面裂缝	对结构整体无影响	1
	裂缝发生在局部,不影响结构	2
	裂缝长度达结构的 1/3~1/2	3
	裂缝长度超过结构的 1/2	4

2.2.4 *U* 值分级标准设定

护岸塌陷、混凝土及块石剥落、钢筋锈蚀、表面裂缝的 *U* 值判定分级见表 5。

表 5 护岸塌陷、混凝土及块石剥落、钢筋锈蚀、表面裂缝的 *U* 值判定分级

Tab. 5 Classification of *U*-value determination for bank collapse, concrete and stone spalling, steel reinforcement corrosion, and surface cracks

病害类型	病害状况描述	<i>U</i> 值
护岸塌陷	对结构整体无影响	1
	对结构整体较小	2
	塌陷已影响结构完整性	3
	已影响结构完整性并继续发展	4
混凝土及块石剥落	无影响	1
	剥落位置在墙身处	2
	剥落位置在变形缝处	3
	剥落位置在结构受力较大处	4
钢筋锈蚀	对结构整体无影响	1
	已初步影响结构受力	2
	已影响结构受力并继续发展	3
	严重影响结构受力	4
表面裂缝	对结构整体无影响	1
	裂缝发生在局部,不影响结构	2
	双缝长度达结构的 1/3~1/2	3
	裂缝长度超过结构的 1/2	4

2.2.5 护岸健康状态综合评价指标

护岸健康状态评价最终通过综合指标 (百分制) 表示。基于 DERU 方法, 用完好无损得分减去劣化评分得到护岸当前健康状态评价得分。护岸健康状态综合评价得分 W_i 是对护岸各项健康状态得分的加权平均, 其计算公式如下:

$$W_i = 100 - 100 \times \frac{\sum_{i=1}^4 (D_i + E_i) R_i}{(4 + 4) \sum_{i=1}^4 R_i} \quad (1)$$

式中: D_i 为第 i 个构件的损坏程度; E_i 为第 i 个构件的损坏范围; R_i 为第 i 个构件对整体结构的影响。

2.3 护岸健康状态综合评价标准

JTS/T 320—2021《航道养护技术规范》将整治建筑物技术状况分为五类。在护岸健康状态评价时, 对不再发挥整治功能的护岸不予考虑。因此, 针对需要维持健康状态的护岸, 将其健康状态分为四类, 具体情况见表 6。

表 6 护岸健康状态综合评价标准
Tab. 6 Comprehensive evaluation criteria for health status of bank protection

综合健康状态评价	取值范围	具体损毁状况
一类	90~100	护岸基本无损毁, 健康状态良好
二类	80~<90	护岸某部位有少量的损毁, 对其健康状态有较小影响
三类	60~<80	护岸某部位有较明显的损毁, 对其健康状态影响较大, 尚能发挥其整治功能, 但需要及时修复
四类	0~<60	护岸某部位出现明显损毁或较大缺陷, 已经或即将失去其整治功能, 需要马上进行修复

3 案例分析验证体系的有效性

为验证护岸多维度健康状态监测及评估指标体系的实际应用效果, 选取长江中游某重力式护岸工程作为研究对象, 结合其近 3 a 的监测数据, 进行健康状态综合评价, 并与传统人工评估结果对比分析。

3.1 工程概况

目标护岸位于长江中游某限制性航道, 全长 2.3 km, 为重力式混凝土结构。近年来, 该护岸因长期受水流冲刷及汛期高水位影响, 出现局部混凝土剥落、表面裂缝扩展及底部轻微冲刷等问题。传统监测主要依赖人工巡检与单点传感器, 存在数据分散、时效性差等不足。

3.2 数据采集与处理

基于“水陆空天”多源感知技术, 采用以下监测手段: 1) 岸基视频监控。实时捕捉护岸表面裂缝及剥落情况。2) 无人机遥感。通过激光点云技术生成护岸三维模型, 量化塌陷面积。3) 分布式光纤传感器。监测护岸内部应力应变及沉降位移。4) 无人船搭载多波束声纳。扫描河床地形, 识别底部冲刷深度。



a) 结构锈蚀



b) 坍塌滑坡

图 2 护岸病害表现形式

Fig. 2 Manifestations of bank protection diseases

3.3 健康状态评估过程

3.3.1 指标量化与权重分配

基于 AHP, 确定准则层权重: 安全性 (u_1) 占 60%, 耐久性 (u_2) 占 40%。指标层权重通过专家

打分法确定,例如混凝土剥落(权重 0.25)、表面裂缝(权重 0.20)、底部冲刷(权重 0.15)等。

3.3.2 DERU 评估与综合得分计算

依据表 6 的分级标准,对 4 项核心病害进行评估:1)混凝土剥落。局部剥落面积 15%($D=2$, $E=2$, $R=1$, $U=2$)。2)表面裂缝。裂缝宽度 0.2 mm($D=2$, $E=1$, $R=1$, $U=1$)。3)护岸塌陷。无塌陷($D=1$, $E=1$, $R=1$, $U=1$)。4)钢筋锈蚀。局部锈迹($D=2$, $E=1$, $R=1$, $U=1$)。

代入式(1)得出 $W_i=62.5$ 。

3.3.3 结果对比

传统人工评估将该护岸归类为“二类”(80~90分),认为仅需要局部修补;而本文体系综合得分为 62.5 分,判定为“三类”(60~80分),提示需要 1 a 内修复。后续维护中发现 1 处隐蔽裂缝扩展至 0.8 mm,验证了新体系预警的准确性。

3.4 有效性分析

通过长江中游某重力式护岸工程的案例分析,验证了多维度健康状态监测及评估体系的实际应用价值。相较于传统人工巡检,该体系通过整合“水陆空天”多源感知技术(如岸基视频、无人机激光点云、分布式光纤传感器及无人船声呐扫描),显著提升监测的全面性与精度。例如,无人机遥感技术成功识别出人工巡查未发现的隐蔽塌陷区域,分布式光纤传感器实时捕捉到护岸内部应力异常,弥补了传统单点监测的不足。DERU 评估模型通过量化损坏程度(D)、范围(E)、影响(R)及紧迫性(U),将主观经验转化为客观评分,案例中综合得分 62.5 分(三类状态)与传统评估结果(二类)的差异,揭示了新体系在风险预警中的更高敏感性——后续维护中发现的裂缝扩展问题证实了其预警准确性。

此外,实时数据采集与动态分析使风险评估效率较传统年度巡检有显著提升。传统人工巡检须依托年度定期巡查,单次评估耗时 15~20 个工

作日,且数据采集依赖人工记录与事后整理,时效性差。本文构建的“水陆空天”多源感知体系通过岸基视频、无人机激光点云、分布式光纤等设备实时同步采集数据,单次全面监测耗时缩短至 3~5 个工作日,数据采集效率提升约 60%;基于 DERU 模型与 AHP 的量化评估算法,自动完成指标权重计算与健康状态分级,较传统人工评分流程效率提升 50%;传统年度巡检全流程(数据采集+分析+报告)需要 30~40 d,新体系仅需 18~22 d,风险评估效率提升幅度为约 40%。

然而,该体系仍存在一定局限性,如分布式光纤布设成本较高,复杂环境(如强降雨或湍流)可能影响无人船声呐数据的稳定性,需要进一步优化技术经济性与环境适应性。

人工巡检依赖目视判断,对隐蔽病害(如底部冲刷深度 >1.5 m、裂缝宽度 <0.5 mm)的识别准确率仅为 60%~70%,且评估结果受主观经验影响,均方误差约为 18.5。无人机激光点云对表面裂缝的识别精度达 0.1 mm,无人船声呐扫描底部冲刷深度误差 ≤ 0.3 m,数据采集精度提升 40%;基于 DERU 模型的量化评估将主观因素影响降至最低,经 10 组平行试验测算,均方误差降至 13.8。因此对比传统人工评估与新体系的误差率为 25.4%。

4 结语

1) 本文成功整合“水陆空天”多源感知技术,包括岸基视频、无人机、无人船、分布式光纤及北斗导航等,构建了全方位的护岸结构监测网络,实现了对护岸工程的全面监测,显著提升监测的效率和精度。

2) 本文基于 AHP 与 DERU 评估模型,建立涵盖损坏程度、范围、影响及紧迫性的量化评价框架,实现了护岸健康状态的动态分级,为护岸工程的实时监测与精准维护提供科学依据,有效提升风险评估的客观性和准确性。

3) 未来研究方向包括探索低成本传感器与边缘计算技术、引入机器学习算法、拓展应用场景至斜坡式护岸和生态护岸等多样化结构,以及结合更多工程案例完善 DERU 分级阈值,推动行业评估标准统一,为航道基础设施智能化管理提供更有力的支持,助力水运工程的安全和可持续发展。

参考文献:

- [1] 黄召彪,王朋超,陈一梅.长江中下游护岸服役状态评价[J].水道港口,2022,43(4):471-476.
HUANG Z B, WANG P C, CHEN Y M. Evaluation of service performance of revetment in the middle and lower reaches of the Yangtze River [J]. Journal of waterway and harbor, 2022, 43(4): 471-476.
- [2] 丁俊.渠道生态护岸结构形式研究与评价[D].南昌:南昌大学,2023.
DING J. Research and evaluation on the structural type of ecological revetment on canals [D]. Nanchang: Nanchang University, 2023.
- [3] 刘叶双.河道生态治理工程后期监测评价研究[D].大连:大连理工大学,2017.
LIU Y S. Study on the post-monitoring and evaluation of river ecological management project [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017.
- [4] 邓彩云,李凌云,朱勇辉.河岸稳定性评估指标体系初探[J].长江科学院院报,2019,36(10):127-130.
DENG C Y, LI L Y, ZHU Y H. Preliminary study on riverbank stability evaluation index system [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, 36(10): 127-130.
- [5] 廖斌,张继学,李涛.护岸检测的分析与评估[J].价值工程,2010,29(31):119-120.
LIAO B, ZHANG J X, LI T. Analysis and evaluation for inspection of revetment [J]. Value engineering, 2010, 29(31): 119-120.
- [6] 航道养护技术规范:JTS/T 320—2021[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2021.
Technical code of waterway maintenance: JTS/T 320-2021 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2021.
- [7] 王悦.城市景观河道健康评价指标体系研究[D].上海:同济大学,2009.
WANG Y. Study on health evaluation index system of urban landscape rivers [D]. Shanghai: Tongji University, 2009.
- [8] 张兵,刘鸣洋,朱颖涛,等.宽肩台斜坡堤堤头稳定性试验研究[J].水道港口,2022,43(1):35-42.
ZHANG B, LIU M Y, ZHU Y T, et al. Stability study on the wide-berm breakwater head by model experiment [J]. Journal of waterway and harbor, 2022, 43(1): 35-42.
- [9] 王一航,张金凤,张娜,等.生态护岸在水利工程中的研究及应用进展[J].水道港口,2020,41(2):210-217.
WANG Y H, ZHANG J F, ZHANG N, et al. Literature review on the progress of ecological revetment research and application [J]. Journal of waterway and harbor, 2020, 41(2): 210-217.
- [10] 卢志楷.格形钢板桩结构稳定性计算研究[J].水道港口,2024,45(5):747-754.
LU Z K. Research on stability calculation of the cellular steel sheet pile structure [J]. Journal of waterway and harbor, 2024, 45(5): 747-754.
- [11] 蒋雅君,陶双江,杨露,等.基于DERU评价方法的运营公路隧道土建结构技术状况综合评价技术研究[J].隧道建设(中英文),2017,37(10):1239-1245.
JIANG Y J, TAO S J, YANG L, et al. Study of comprehensive evaluation system for operation highway tunnel structure technical conditions based on DERU evaluation method [J]. Tunnel construction, 2017, 37(10): 1239-1245.
- [12] 罗资清,周睿,骆俊晖,等.岩溶区公路隧道土建结构DERU检测评估技术研究[J].现代隧道技术,2023,60(5):243-253.
LUO Z Q, ZHOU R, LUO J H, et al. Study on DERU testing and evaluation technology for civil structures of highway tunnels in karst areas [J]. Modern tunnelling technology, 2023, 60(5): 243-253.