



限制条件下自动化集装箱码头改造项目 海绵排水设计

杨粤茗¹, 万立², 王浩冉¹

(1. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007; 2. 上海国际港务(集团)股份有限公司, 上海 200080)

摘要: 港口货种调整与环保政策密切相关, 已成为港口绿色转型的核心路径。针对伴随而来的雨水地表径流量大幅增加、雨水排放路径及规模受多方制约和初期雨水径流污染控制等问题, 开展自动化集装箱改造项目在限制条件下的排水设计研究, 采用定性定量分析、案例研究等方法, 将市政海绵城市“渗、滞、蓄、净、用、排”的排水理念与自动化集装箱堆场作业特点和改造工程实际相结合, 总结出适合港口绿色改造提升的海绵排水设计方案。结果表明, 通过采用箱区间利旧条石铺砌、分散式雨水调蓄池削峰控污、港区排水系统联排联调的设计方案, 可解决雨水径流量排放缺口、实现初期雨水截流处置, 兼顾生态效益与工程可行性, 为同类港口自动化改造项目提供可复用的技术路径。

关键词: 限制条件; 改造项目; 海绵排水; 排水分区; 削峰调蓄; 初期雨水

中图分类号: U652.7

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)S1-0137-07

Sponge drainage design for automated container terminal renovation projects under restrictions

YANG Yueming¹, WAN Li², WANG Haoran¹

(1. CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China;

2. Shanghai International Port(Group)Co., Ltd., Shanghai 200080, China)

Abstract: The adjustment of port cargo types is deeply bound to environmental protection policies, and has become the core path for the green transformation of ports. Aiming at the problems such as the significant increase in surface runoff of rainwater, the multi-party constraints on the path and scale of rainwater discharge, and the control of initial rainwater runoff pollution, we carry out a study on the drainage design of automated container renovation projects under restrictions. Using the methods such as qualitative and quantitative analysis and case studies, we combine the drainage concept of “infiltration, retention, storage, purification, utilization, and discharge” of municipal sponge cities with the operational characteristics of automated container yards and the actual situation of renovation projects, and summarize a sponge drainage design scheme suitable for the green renovation and upgrading of ports. The results show that by adopting the design scheme of using old strip stone paving between containers, decentralized rainwater storage tanks for peak shaving and pollution control, and joint drainage and regulation of the port area drainage system, the problem of rainwater runoff discharge gaps can be solved, the interception and disposal of initial rainwater can be realized, and the ecological benefits and engineering feasibility can be balanced. The results can provide a reusable technical path for the similar port automation renovation projects.

Keywords: restriction; renovation project; sponge drainage; drainage area; peak-cutting regulation; initial rain

随着全球环保政策日益严苛和“双碳”目标持续推进, 港口堆场改造和货种调整需求显著增加。

日照港为推动港区清洁化、绿色化发展, 由以杂货运输为主转型为集装箱综合港^[1]; 福州港为

收稿日期: 2025-05-15

作者简介: 杨粤茗(1993—), 女, 硕士, 高级工程师, 从事给排水设计工作。

适应城市发展需求,部分散杂货运输码头转型为邮轮泊位码头^[2]。港区功能转型、逐步退出干散货运输功能,颠覆了散货作业区现有的雨水收集、利用方式,大幅增加地表径流量、新增初雨径流污染防治需求,致使港区原有排水系统面临严峻考验。

集装箱货物属于高原值货类,堆场区域积水不仅影响正常生产,还会造成严重的经济损失,这些对排水系统的时效性、保障性提出更高的要求。国内外已有多个自动化集装箱堆场开展海绵式排水设计,通过设置渗透设施^[3]、生态排水沟^[4]、箱区透水铺装^[5]等方式提高排水系统效能、减少内涝积水隐患。但相关研究及港口工程实践均以新建港区排水设计为背景,未能针对性解决改造项目的排水瓶颈。

本文创新提出“透水铺装+分散调蓄+智慧联调”三位一体的解决方案,将市政海绵城市排水理念与自动化集装箱堆场作业特点、改造工程实际情况相结合,以构建适配港口绿色转型的海绵型排水系统,为促进港口可持续发展提供技术支撑。

1 工程概况

上海港罗泾港区原是上海的杂货、煤炭和矿石装卸港,由于上海市战略调整以及生态环保要求,其煤炭、矿石作业区已相继停产,拟调整为绿色、低碳的自动化集装箱码头。

港区陆域占地面积约 170 万 m^2 ,自西向东依次为罗分、罗矿、罗煤作业区。共设有 2 座雨水泵房,1[#]雨水泵房位于原煤炭作业区北侧,服务于罗煤生产生活辅助区,排水能力为 3 m^3/s ,设有 1 根穿堤排放管,公称直径为 1 200 mm;2[#]雨水泵房位于罗分作业区北侧,服务于罗分钢杂堆场,排水能力为 10.5 m^3/s ,设有 2 根穿堤排放管,公称直径均为 1 800 mm。原矿石、煤炭作业区堆场,雨污水由排水沟收集,处理达标后全部回用于堆场除尘,不设置雨水外排口。港区现有排水设施布置见图 1。上海港罗泾港区集装箱码头改造一期工程(简称罗泾改造一期工程)将原罗泾作业区煤炭功能区全部水域、陆域和矿石功能区部分陆域改造为集装箱功能区。

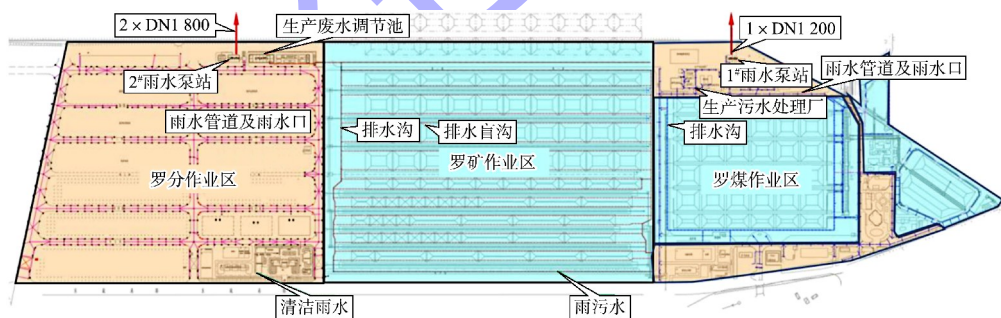


图 1 罗泾港区现有排水设施布置

Fig. 1 Existing drainage infrastructure layout of Luoqing port area

2 排水限制条件分析

2.1 雨水径流量大幅增加

罗煤、罗矿及罗分作业区已于 2007 年以前建成投运,根据 GB 50014—2006《室外排水设计规范》^[6]和上海地区 2004 年版暴雨强度公式^[7],确定原有排水系统雨水量计算参数和管渠泵站设计规模。

罗煤、罗矿作业区功能转型后,港区不透水

地表覆盖率大幅增加,雨水收集、利用方式明显改变。且由于近年来极端天气频发,排水设计标准及暴雨强度公式多次修编,按现行标准计算港区排水系统设计规模,清洁雨水径流总量可达 40 m^3/s ,与港区现状相比增加了近 200%,远超泵房现有雨水排放能力。雨水径流增加量分析见图 2。

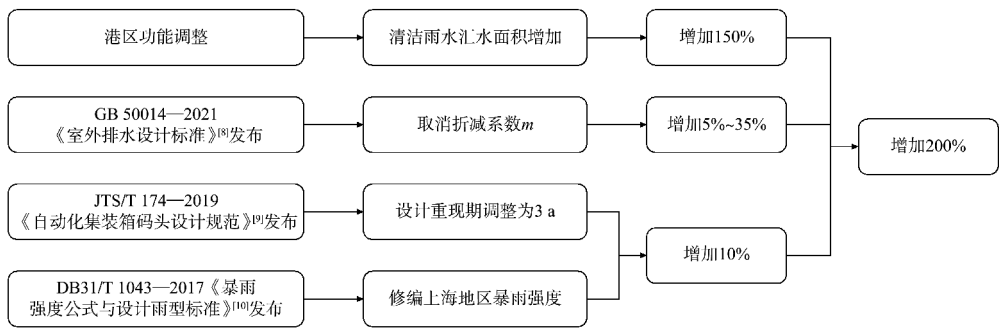


图 2 雨水径流增加量分析

Fig. 2 Analysis of stormwater runoff increase

2.2 雨水排放能力提升水平有限

考虑长江流域水源地保护要求和港外市政配套的实际条件,港区无法新增雨水排口,径流雨水排放只能依靠现有泵房和穿堤排管。现有泵房位于港区北侧、临近长江防汛大堤,由于海塘运行管理规定限制,不具备拆除重建或移位扩建的可行性,仅能基于现有结构条件更换适配泵组,极大地制约了雨水排放能力的提升。

本文通过在轴流泵吸入口底部增设防旋板,充分发掘现有泵房排水潜能;并借助计算流体动力学(CFD)等数值模拟手段,对进水池流态分布进行分析^[11],改造方案参数见表1。对比分析港

区雨水径流增加量,尽管泵房扩容改造可明显提升港区雨水排放能力,但受结构条件制约,其提升水平相对有限,港区雨水径流排放量仍存在较大缺口。

2.3 初雨截流要求明确

根据项目环评报告^[12]和《宝山区城镇雨水排水规划(2021—2035)》^[13],港区需要同步考虑初雨截流控污、按分流制强排系统建设初期雨水收集设施,截污标准不小于5 mm、初期雨水收集量不小于3 600 m³。港区现有雨水泵房不具备初期雨水截流功能,且集水池容积有限,无法改造用于暂存初雨。

表 1 雨水泵房参数

Tab. 1 Parameters of stormwater pumping station

名称	原方案			扩容后		
	泵组数量	单泵流量/(m ³ ·s ⁻¹)	总排水能力/(m ³ ·s ⁻¹)	泵组数量	单泵流量/(m ³ ·s ⁻¹)	总排水能力/(m ³ ·s ⁻¹)
1#雨水泵房	5	0.600	3.0	5	0.78	3.9
2#雨水泵房	4+1(预留)	2.635	10.5	5	3.50和3.89(预留泵)	17.5

3 海绵排水设计研究

港区排水系统的适配性升级旨在解决雨水径流量排放缺口、实现初期雨水的截流处置。本文将海绵城市“渗、滞、蓄、净、用、排”排水理念与自动化集装箱堆场作业特点、改造工程实际

情况相结合,根据具体情况提出“透水铺装+分散调蓄+智慧联调”三位一体解决方案,主要研究内容见图3。2024年9月,强台风“贝碧嘉”登陆上海,港区排水系统运行状况良好,地面未出现明显积水,海绵排水建设取得了较为理想的效果。

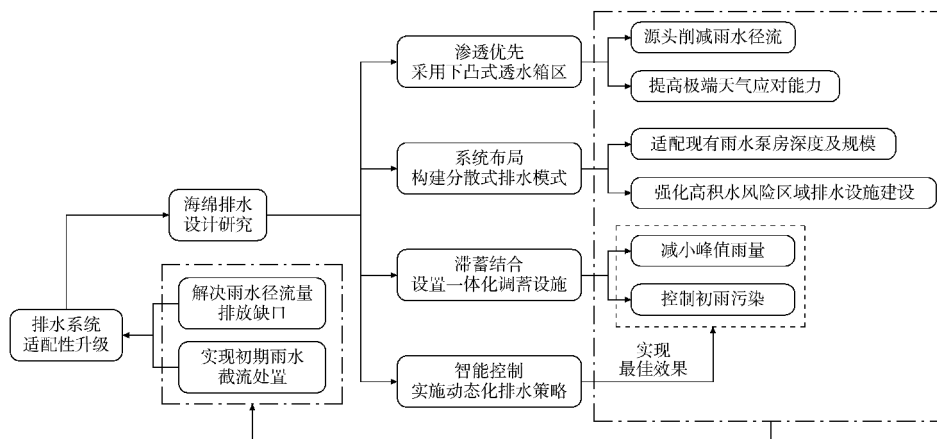


图3 研究内容

Fig. 3 Research components

3.1 下凹式透水箱区

自动化集装箱港区由于作业荷载需求大、设备精度要求高，难以大规模应用市政透水铺装。而堆场区主要由箱角梁条基承担集装箱箱角荷载，箱区铺面具备采用高排水性能但承载能力有限的工程结构的可行性。青岛港前湾港区通过在箱角梁条基空挡区域设置级配碎石，使堆场地表径流量明显降低，对节约灰色基础设施工程投资、缓解排水系统压力起到了一定的工程参考作用^[14]。

本文工程为拆改项目，原矿石、煤炭堆场拆除产生了大量的花岗岩条石，考虑铺设于新建集装箱堆场的条基间区域，见图4；不仅可利用条石缝隙渗透排水、使堆场箱区径流系数降低35%左右、实现雨水源头减排，而且可二次利用拆除废料、节约工程外运处置成本、助力港区实现建筑垃圾“零外运”。此外，本文借鉴广州港南沙港区下凹式堆场设计方案，适当降低堆场区高程，利用条基顶与堆场地面之间的高差作为调蓄空间，提高极端天气的应对能力^[15]。



图4 条基间区域

Fig. 4 Area between strip foundations

3.2 排水系统布局

本文围绕港区现有的2座雨水泵房进行排水系统布局。为实现与北侧防汛大堤、南侧利旧保留的生产辅助区及市政道路的高程衔接，港区地势北高南低，而雨水泵房位于港区北侧，导致雨水主干管逆地面坡度敷设、管网系统末端埋深相对偏大。由于雨水泵房主体框架均为已建结构，对雨水管道接入高程、最大辐射半径均存在限制因素。

考虑雨水泵房排放能力与区域径流量不匹配，本文工程借鉴市政工程经验设置削峰雨水调蓄池，实现错峰排水。有研究表明^[16-17]，分散式调蓄池布设灵活，可更好地适应地形与土地利用需求，且与集中式布置相比积水改善率更为优异。因此，本文拟采用分散式排水模式，分区域设置雨水调蓄设施。

南侧利旧保留的生产辅助区地势低洼，如布置在管网起始端，不仅会使末端管网高程进一步降低，影响与泵房进水管道的衔接；而且在极端气候条件下，受下游管网顶托影响，容易造成排水不畅，区域内存在较高的积水风险。因此，遵循“高水高排、低水低排”的设计原则，将横三路以南区域单独划分为汇水分区，设置调蓄、强排设施，同时在相交路口设置双道截水沟，对客水进行拦截，避免雨水在不同分区混排。

综合考虑雨水泵房的设计规模、辐射半径以及区域排水需求，拟将罗泾改造一期工程划分为

5 个汇水分区、分为 2 个雨水系统: 1[#]雨水系统, 收水范围为分区 3、4, 系统内设置 1[#]雨水调蓄池、1[#]雨水泵房; 2[#]雨水系统, 收水范围为分区

1、2、5、已建罗分作业区、在建货棚, 系统内设置 2[#]和 3[#]雨水调蓄池、2[#]雨水泵房。汇水分区布置见图 5。

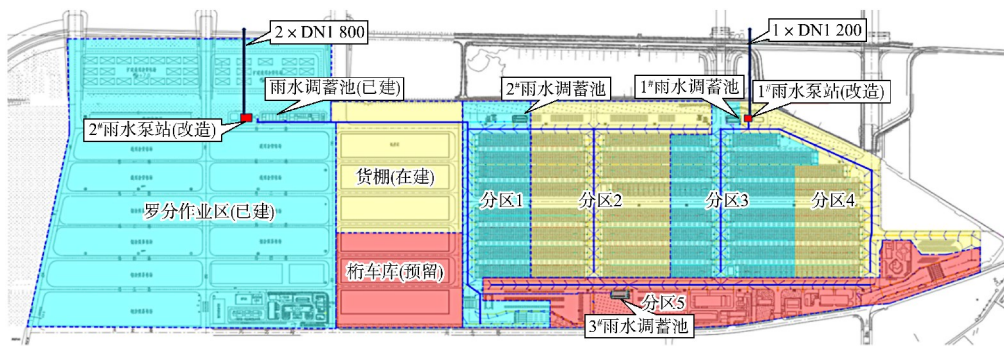


图 5 汇水分区布置

Fig. 5 Catchment zoning layout

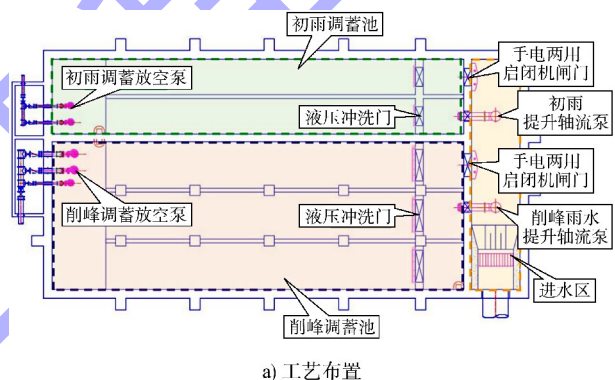
3.3 一体化调蓄池

3.3.1 调蓄池布置方案

调蓄池按主要功能及应用场景分为削峰型调蓄池、合流制溢流污染控制调蓄池和初雨调蓄池^[18]。调蓄池在市政排水工程中应用较多, 如上海陆家嘴张家浜设置削峰调蓄池实现雨水系统提标改造、缓解城市水涝^[19], 深圳市东深河上游设置初雨调蓄池降低面源污染、改善雨季东深河水质^[20], 但多数是为以单目标为基础进行的专项功能调蓄池。

需要同步考虑减小峰值雨量、控制初雨污染, 若单独建造专项功能雨水调蓄池, 不仅增加用地面积及基建投资, 而且不便于后续集约化管理。而港区北侧临近防汛大堤, 规划布置有换电站、变电所等功能区域, 排水设施建设空间受限, 宜设计为一体化雨水调蓄池、兼顾双重目标要求。

综合考虑汇水分区布置和雨水系统建设目标, 本文共设置 3 座雨水调蓄池, 均采用钢筋混凝土沉井结构, 内部设有隔墙划分为独立调蓄区, 通过在线水位监测与进水闸门联动控制, 实现功能切换, 工艺布置见图 6。



a) 工艺布置



b) 调蓄池沉井结构施工

图 6 雨水调蓄池工艺布置及施工

Fig. 6 Process layout and construction of rainwater storage pool

3.3.2 调蓄容积计算

削峰雨水调蓄有效容积按脱过系数法计算, 公式为:

$$V_1 = \left[- \left(\frac{0.65}{n^{1.2}} + \frac{b}{t} \frac{0.5}{n+0.2} + 1.10 \right) \lg(\alpha + 0.3) + \frac{0.215}{n^{0.15}} \right] Q_i t$$

(1)

式中： V_1 为削峰调蓄有效容积， m^3 ； n 、 b 为暴雨强度公式参数，分别取 0.656、7； t 为降雨历时，min； α 为脱过系数，取值为调蓄池下游和上游设计流

量之比； Q_i 为调蓄池上游设计流量， m^3/min 。
控污雨水调蓄有效容积按初期径流厚度法计算，公式为：

$$V_2 = 10\delta F$$

(2)

式中： V_2 为控污调蓄有效容积， m^3 ； δ 为初期径流厚度，m，取 0.005 m； F 为汇水面积， m^2 。

雨水调蓄池设计参数见表 2。

表 2 雨水调蓄池参数
Tab. 2 Parameters of rainwater storage pool

名称	有效容积/ m^3		布置位置	所属排水系统
	削峰调蓄	初雨调蓄		
1 [#] 雨水调蓄池	2 600	1 400	横一路北侧,已建大堤的堤内坡脚外侧 20 m 线南侧	1 [#] 雨水系统
2 [#] 雨水调蓄池	2 200	1 600		2 [#] 雨水系统
3 [#] 雨水调蓄池	3 800	650	横三路南侧	2 [#] 雨水系统

3.4 排水系统智能控制

调蓄池为实现削峰、截污最佳效果，一般与排水管道、雨水泵房共同调度。本文根据降雨阶段、调蓄池及泵房进水池实时液位建立智能运行调度流程，见图 7。雨水优先进入初雨调蓄池，完成初雨截流后汇至雨水泵房提升排放；泵房按照

设定液位依次启泵，当达到设计负荷时，同步汇入削峰调蓄池暂存；待降雨高峰过后，再实施外排。实现雨水管网、调蓄池、泵房各排水单元间的联动控制，初雨截流、削峰调蓄、雨水排放等各项流程的动态切换。

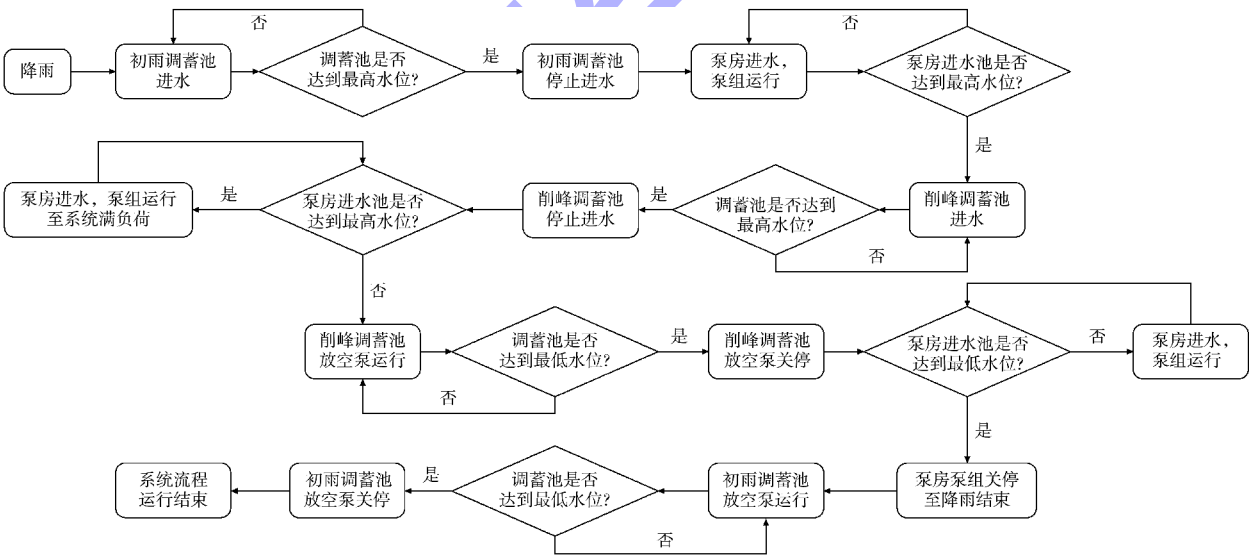


图 7 雨水系统运行调度流程

Fig. 7 Operational management process of stormwater system

4 结语

1) 排水系统的适配性升级重点在于解决雨水径流量排放缺口、实现初期雨水的截流处置。对于限制条件较多的改造项目，应基于港区实际情

况分析确定现有排水系统的薄弱环节及重要节点，从雨水排放能力提升、雨水径流量源头及过程削减、初雨精准截流收集等方面针对性地开展设计。

2) 箱脚梁条基空挡区域因地制宜采用利旧条

石铺砌,可有效从源头减少雨水的径流产流量,并实现拆除废料的二次利用。

3) 系统合理地规划排水分区及管道布置,设置分散式地下调蓄池等设施,建立排水系统智能运行调度流程,可实现雨水错峰收集、控制初雨污染,有效降低港区积水风险。

参考文献:

- [1] 谭凤,马小江,李大功,等.绿色港口规划设计思路[J].水运工程,2021(10):104-110.
TAN F, MA X J, LI D G, et al. Planning and design ideas for green port [J]. Port & waterway engineering, 2021(10): 104-110.
- [2] 杨振凯,杨晓光.国内老港区城市化转型发展对策[J].中国港口,2021(2):22-28.
YANG Z K, YANG X G. Countermeasures for urbanization transformation and development of domestic old port areas[J]. China ports, 2021(2): 22-28.
- [3] 唐玮,康昀,杨粤茗,等.基于SWMM模型的集装箱港区海绵化排水设计[C]//《环境工程》编委会,工业建筑杂志社有限公司.《环境工程》2019年全国学术年会论文集.北京:《环境工程》编辑部,2019:365-368.
TANG W, KANG Y, YANG Y M, et al. SWMM Modeling drainage infiltration design of container yard[C]//Editorial Board of *Environmental Engineering*, Industrial Construction Magazine Agency Co., Ltd. Proceedings of the National Academic Annual Conference on *Environmental Engineering* 2019. Beijing: Editorial Department of *Environmental Engineering*, 2019: 365-368.
- [4] 孙龙,阮晓波.集装箱港区低影响开发径流控制研究[J].水运工程,2020(4):59-65.
SUN L, RUAN X B. Study on runoff control of low impact development in container port area[J]. Port & waterway engineering, 2020(4): 59-65.
- [5] 罗佳文,李彬,钟良生.广州港南沙港区四期工程海绵港口设计[J].水运工程,2022(10):13-17.
LUO J W, LI B, ZHONG L S. Sponge port design of phase IV project of Nansha Port area of Guangzhou Port[J]. Port & waterway engineering, 2022(10): 13-17.
- [6] 室外排水设计规范:GB 50014—2006[S].北京:中国计划出版社,2006.
Code for design of outdoor wastewater engineering: GB 50014-2006[S]. Beijing: China Planning Press, 2006.
- [7] 北京市市政工程设计研究总院有限公司.给水排水设计手册 第5册 城镇排水[M].2版.北京:中国建筑工业出版社,2004.
Beijing General Municipal Engineering Design & Research institute Co., Ltd. Handbook of water supply and drainage design volume 5: urban drainage [M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2004.
- [8] 室外排水设计标准:GB 50014—2021[S].北京:中国计划出版社,2021.
Standard for design of outdoor wastewater engineering: GB 50014-2021[S]. Beijing: China Planning Press, 2021.
- [9] 自动化集装箱码头设计规范:JTS/T 174—2019[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2019.
Design code of automated container terminal: JTS/T 174-2019 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2019.
- [10] 暴雨强度公式与设计雨型标准:DB31/T 1043—2017[S].北京:中国标准出版社,2017.
Standard of rainstorm intensity formula and design rainstorm distribution: DB31/T 1043-2017 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [11] 杨粤茗,唐玮,王浩冉.基于现有结构扩容改造泵房的优化设计研究[J].水电能源科学,2024,42(3):152-155.
YANG Y M, TANG W, WANG H R. Optimization design on the expansion project of pumping station based on existing structure[J]. Water resources and power, 2024, 42(3): 152-155.
- [12] 中海环境科技(上海)股份有限公司.上海港罗泾港区集装箱改造一期工程环境影响报告书[R].北京:中海环境科技(上海)股份有限公司,2022.
China Shipping Environment Technology (Shanghai) Co., Ltd. Environmental impact assessment report for the first phase renovation project of container terminal in Luojing port area, Shanghai Port [R]. Beijing: China Shipping Environment Technology (Shanghai) Co., Ltd., 2022.

(下转第166页)