



引江济淮工程安徽段生态岸坡 防护结构形式综述^{*}

宋有权¹, 杨燕华², 程 奎¹, 许海勇²

(1. 安徽省引江济淮集团有限公司, 安徽 合肥 230601; 2. 交通运输部天津水运工程科学研究所, 天津 300456)

摘要: 运河工程沿线渠道开挖将产生大面积的人工创面, 采用生态岸坡防护工程对创面修复有积极作用。以引江济淮工程安徽段岸坡防护工程为研究对象, 基于设计资料和现场调研梳理了引江济淮工程安徽段生态岸坡防护结构使用情况。结果表明: 引江济淮工程生态结构选型主要受地质条件及特征水位影响, 土质岸坡常水位以上采用 30% 孔隙率的混凝土预制块体结构, 枯水位局部河段试验性采用带有鱼巢功能的水下矩阵块体结构。膨胀土区域采用大框格预制块体结构及柔性水位保持毯材料, 孔隙率分别为 79% 和 95%, 使用区域均位于最高洪水位以上。

关键词: 引江济淮; 护坡; 生态结构; 地质; 水位

中图分类号: U617.8

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)08-0070-07

Summary of ecological bank protection structure in Anhui section of Yangtze-to-Huaihe water diversion project

SONG Youquan¹, YANG Yanhua², CHENG Kui¹, XU Haiyong²

(1. Anhui Provincial Group Limited for Yangtze-to-Huaihe Water Diversion, Hefei 230601, China;

2. Tianjin Research Institute for Water Transport, Tianjin 300456, China)

Abstract: Channel excavation along the canal project will produce large areas of artificial wounds, and the ecological bank slope protection works have a positive effect on wound repair. In this paper, the bank slope protection of Anhui section of the Yangtze-to-Huaihe water diversion project is taken as the research object to comb the use of the ecological bank slope protection structure of Anhui section of this project based on the design data and field survey. The results show that the type selection of the ecological structure of this project is mainly affected by the geological conditions and the characteristic water level. The concrete prefabricated block structure with a porosity of about 30% is mainly used above the normal water level of the soil bank slope, and the underwater matrix block structure with fish spawning nest function is used experimentally in local river sections at low water level. The large-frame prefabricated block structure and flexible water-level retaining blanket material are used in the expansive soil area, with porosity of 79% and 95% respectively, and the using area is above the highest flood level.

Keywords: Yangtze-to-Huaihe water diversion; slope protection; ecological structure; geology; water level

收稿日期: 2022-11-09

*基金项目: 国家自然科学基金 (51979132); 安徽省引江济淮集团有限公司科技项目资助 (YJJH-ZX-20221128512、YJJH-ZX-20220705482、YJJH-ZX-20220705481)

作者简介: 宋有权 (1971—), 男, 高级工程师, 从事水利水电工程研究。

通讯作者: 杨燕华 (1985—), 女, 研究员, 从事港口与航道工程研究。E-mail: yyh200@163.com

运河是一种由人工开挖形成的内河航道, 开挖运河是形成发达的航运网的关键因素^[1]。法国建成了北运河、马恩-莱茵运河、马恩-索恩运河等重要运河航道^[2-3], 运河约占内河航道总里程的55%。荷兰被称为运河上的国家, 运河占荷兰内河航道总里程的40.3%^[4]。中国的京杭大运河全长约1 797 km, 是世界上里程最长、工程量最大的古代运河, 一直使用至今^[5-6]。引江济淮运河沟通长江和淮河流域, 开创了一条平行于京杭大运河的南北水运大通道^[7-8]。与天然航道相比, 运河断面较窄, 当船舶在运河航行时, 船在水面上的行进会对水面形成连续压力冲量扰动, 使得水面产生波动, 形成船行波^[9]。船行波作用于岸坡, 主要表现为波浪不断拍打岸坡, 对岸坡产生较大的波压力, 使岸坡产生破坏或者块体失稳, 直接影响岸坡防护工程的设计^[10-11]。

传统的硬质结构对于强水动力作用下的岸坡防护效果较好, 但主要强调工程建设带来的经济效益和工程效果^[12-13], 破坏了河流水系连通性、水汽和营养物质的交换等, 引起水体自净能力降低、生态结构失衡、生物多样性下降等^[14-15], 对河流水生态系统产生消极影响。寻求满足结构安全性、岸坡防护效果及生态功能的结构是岸线防护追求的目标^[16-17]。目前河流及航道治理中研发了多种生态友好型结构, 包括植物防护^[18]、多孔混凝土^[19-20]、网垫材料^[21]、人工块体结构^[22]等。植物防护结构生态效果强, 水流抗冲性较弱, 适用于水流强度较低区域; 多孔混凝土孔隙率大, 但是强度较低, 适用于对结构强度要求不高的情况; 网垫材料具有超大孔隙率、透水性好、施工速度快, 适用于过流频率低的区域; 人工块体结构一般采用预制件, 通过孔洞为动植物提供生存空间, 同时具有较高的结构强度, 在长江等内河航道得到广泛应用。

引江济淮工程是集供水、航运、生态等效益于一体的水资源综合利用工程, 打造绿色、生态、高质量航道是工程建设的目标之一, 沿线采用了

多种生态护坡结构形式, 本文对引江济淮工程安徽段采用的生态岸坡防护结构进行梳理总结, 可为引江济淮二期工程及平陆运河、赣粤运河、湘桂等类似工程的建设提供借鉴。

1 工程概况

引江济淮工程由长江下游上段引水, 向淮河中游地区补水, 是一项以供水、航运为主, 结合灌溉补水和改善水生态的重大水利工程。该工程主体输水线路总长为723 km, 自南向北依次划分为引江济巢(包括菜子湖与西兆河双线引江线路)、江淮沟通、江水北送3段输水及航运线路(图1)。引江济淮工程安徽段总长度为587.4 km, 其中利用既有河湖或输水管道的渠段长度约293.8 km, 需新开河渠或疏浚扩挖的渠段长度约293.6 km。除湖区段外, 大部分工程沿线边坡需要防护, 边坡防护是引江济淮工程的主体工程类型。



图1 引江济淮工程布置

引江济淮工程沿程线路较长, 护坡工程边坡分级根据高程、土质等情况进行设计, 包括一级到八级边坡共8种。其中一、二级边坡为土质岸

坡区域，典型边坡设计断面见图 2；三级及以上边坡为膨胀土边坡或崩解岩边坡，典型边坡设计断面见图 3。在不同的土质和水位条件下，采用的护坡结构形式不同。生态护坡结构一般用于常水位以上。

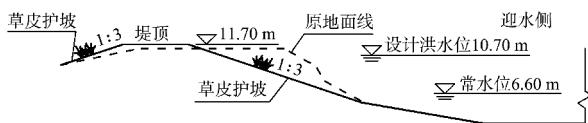


图 2 土质边坡典型设计断面

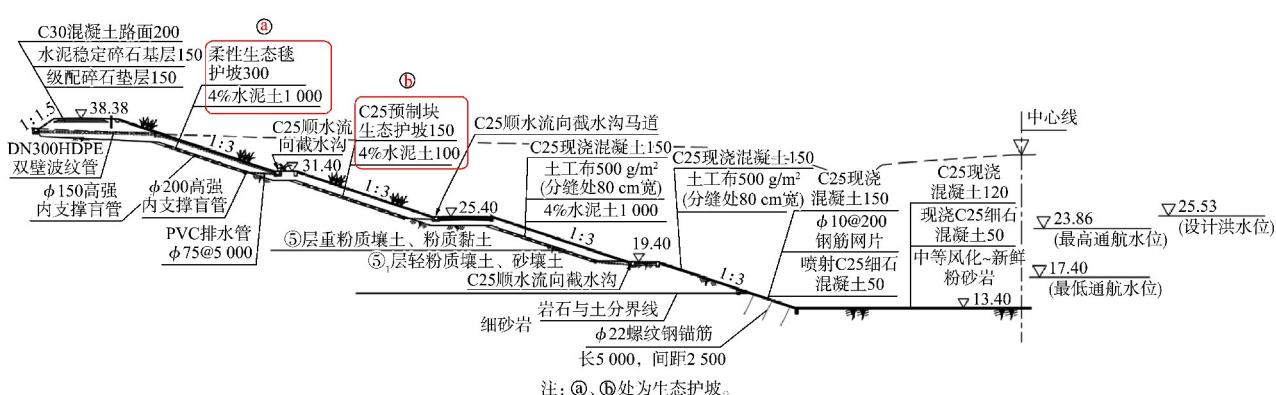


图 3 膨胀土边坡典型设计断面 (高程: m; 尺寸: mm)

2 生态护坡结构形式及使用区域

引江济淮工程沿线生态护坡结构使用区域及具体形式主要受特征水位和土质等因素影响。特征水位根据通航河段与非通航河段有所不同，通航河段的特征水位从上至下包括洪水位、最高通航水位、常水位、最低通航水位、枯水位，非通航河段的特征水位从上至下包括洪水位、常水位和枯水位。根据岸坡土质，可分为土质和膨胀土岸坡等。土质岸坡河段的生态护坡结构一般用于常水位以上，枯水位以下采用水下铰链排。膨胀土段由于岸坡稳定性风险较大，生态护坡结构一般用于最高洪水位以上。

2.1 土质岸坡河段生态护坡结构形式

引江济淮工程安徽段土质岸坡河段生态护坡结构布设区域一般位于常水位以上，此外在东淝河等局部河段枯水位以下使用了带有鱼巢功能的铰链排结构。引江济淮工程引江济巢段与江淮沟通除供水外，还具有通航功能，因此在最高与最低通航水位之间的生态块体结构受到船行波动力作用。船行波传播到河岸时，沿岸坡爬升后破碎，使岸坡受到较强水动力作用。随着船行波向两岸

的传播，其产生的波压力、爬高及次生流将对近岸区域水流结构、岸坡稳定性等产生影响。因此，孔隙率为土质岸坡生态护坡结构设计过程中的重要参数，孔隙率过大会造成耕植土、碎石等填充材料在船行波作用下被淘刷而吸出，过小虽然有利于结构自身的稳定性，但是由于其所形成的空腔体积小，可盛放的耕植土少，可为绿色植物提供的生长空间也较有限，不利于植物根系的发育。引江济淮工程土质岸坡河段人工预制块体结构的孔隙率在30%左右，施工时采用的生态结构形式包括四叶草结构、铰链联锁结构和水下矩阵块体等。

2.1.1 四叶草结构

四叶草结构又称四边形生态砖、心形砖等。尺寸为0.66 m×0.60 m×0.12/0.15 m(长×宽×厚)，0.12 m厚块体的质量约73 kg/块，用于引江济巢段和江淮沟通段。0.15 m厚块体的质量约91 kg/块，用于江水北送段，通过增加厚度补偿北方地区冻融影响。四叶草结构不同的排列方式会形成不同孔隙率，使用联锁咬合方式铺设时，孔隙率在25%~30%；采用结构散粒体平铺方式时，孔隙率在40%左右(图 4)。



a) 联锁咬合铺设



b) 散粒体平铺

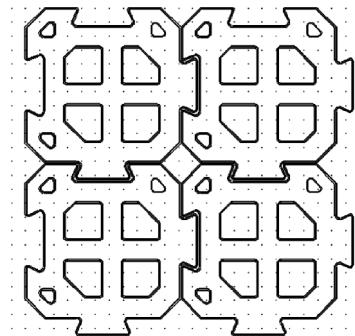


c) 派河口船闸附近护坡结构

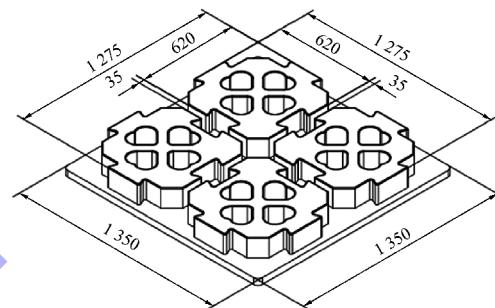
图4 四叶草结构

2.1.2 铰链联锁结构

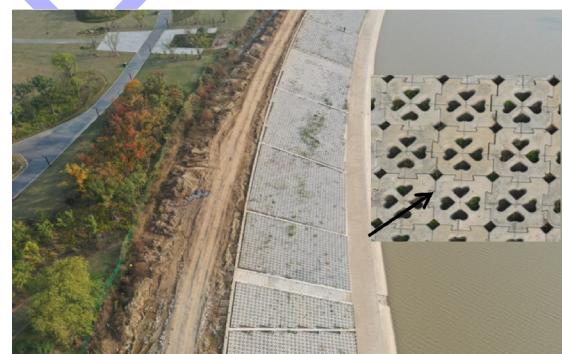
铰链联锁结构(图5)用于肥西J2-2标等河段二级边坡上,部分区域在最高通航水位以下浪击区使用了该结构。初设阶段为联锁结构形式,孔隙率约为30%,该结构中间4个孔的单孔尺寸偏大,在最高通航水位至坡脚处孔内土体和填料在船行波影响下容易被淘刷。为了减轻浪击区船行波对结构下覆土体淘刷的影响,在施工图设计阶段对结构进行了优化,减小原结构单孔尺寸,最终选用心形四面超强联锁结构,尺寸 $620\text{ mm} \times 620\text{ mm} \times 12\text{ mm}$,块体结构质量约71 kg/块,孔隙率27%。



a) 原结构



b) 心形优化结构(单位: mm)



c) 肥西县城铰链联锁结构

图5 铰链联锁结构

2.1.3 水下矩阵块体结构

水下铰链排位于枯水位以下区域,原水下铰链排采用水下矩阵预制块体结构形式,块体中间部分为凸出结构。结构尺寸为 $0.64\text{ m} \times 0.61\text{ m} \times 0.12\text{ m}$,质量约55 kg/块,块体之间串钢绞线连接,内置穿钢绞线孔直径0.02 m(图6)。

考虑增加生态效果,施工图阶段对水下矩阵块体结构进行优化,提出带有鱼巢功能的水下生态砖。方案将块体设置3条贯通缝,增加生态性的同时,减轻了块体质量(图7)。

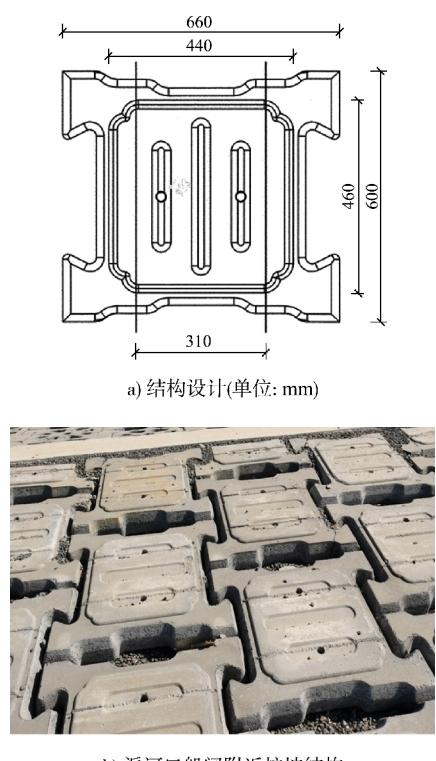


图 6 原水下矩阵块体结构



图 7 水下矩阵块体结构优化方案

东淝河 J10-2 标段水下排体采用了该结构优化方案，排体尺寸 $500 \text{ mm} \times 560 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$ ，质量为 60 kg。采用铺排船开展水下预制块铺设现场试验。施工时铺排船甲板上展铺排布，在排布上编排预制块单体，通过绑扎将其固定在排布上，形成整体的软排体，通过铺排船将其铺设到指定的水下岸坡位置。施工中开展了块体平铺及咬合 2 种方式的现场试验对比，平铺方式块体破损率低于咬合方式，且平整度也优于咬合方式（图 8）。

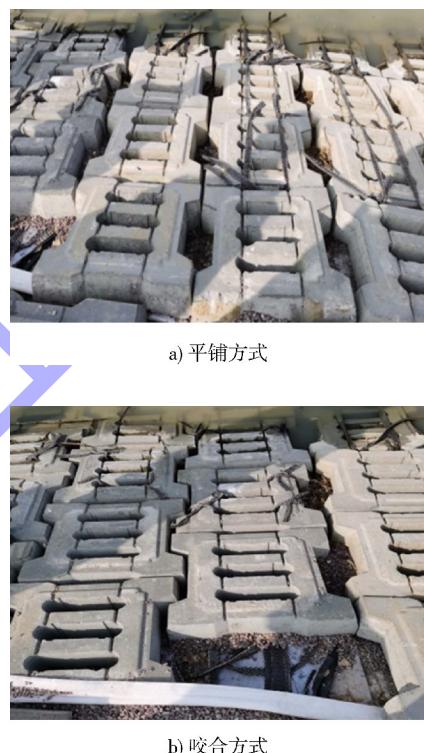


图 8 东淝河 J10-2 标段水下预制块铺排现场试验

2.2 膨胀土及崩解岩岸坡河段生态护坡结构形式

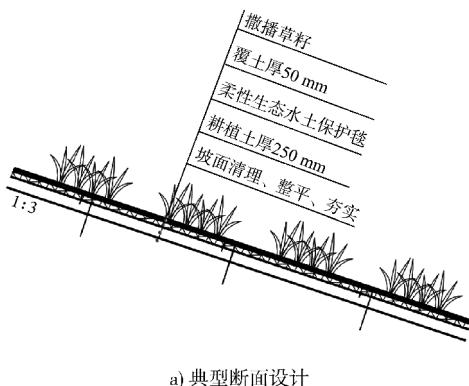
膨胀土吸水膨胀软化、失水收缩干裂，具有胀缩显著、裂隙发育和超固结等特点，经反复干湿交替后，土体发生吸水膨胀与失水收缩变形从而产生胀缩裂隙^[23]，极易发生边坡失稳危险。引江济淮工程沿线膨胀土及崩解岩约占所在输水线路总长度的 35%，主要分布在菜巢、江淮分水岭。

受旱季和雨季特征影响，引江济淮膨胀土段裂隙发育明显，原生裂隙及次生裂隙多，长大裂

隙与小裂隙并存, 边坡变形滞后性和长期危害性突出。2020年5月江淮沟通段河渠左岸发生四级边坡滑坡, 同时有近平行的多条微小张拉裂隙, 坍塌面积 160 m^2 , 滑坡长约30 m, 宽5~10 m, 滑坡体隆起高度约0.30 m, 轴线方向与河道近垂直, 滑坡后缘最大拉张裂缝长度16 m、宽度1.0 m、深度0.8 m。

为保护膨胀土区域边坡稳定, 引江济淮工程范围内膨胀土边坡的总体处理方案为: 膨胀土过水断面以下换填4%水泥改性土, 以隔绝膨胀土与外部水体的水分交换, 预防膨胀土发生裂缝和膨胀^[24]。换填改性土的厚度按照土体的膨胀性强度确定, 弱膨胀土区域换填1.0 m厚改性土, 中、强膨胀土区域换填1.5 m厚改性土。在一、二级边坡换填土表面上设置0.15 m厚现浇混凝土板护坡; 三级及以上边坡在换填改性土上铺设柔性生态水土保持毯或生态联锁块大框格等。引江济淮工程膨胀土河段由于换填了水泥改性土, 一定程度上阻隔了改性土下层土体与上层护坡结构之间的水分交换, 植被生长所需水分主要依靠生态护坡结构回填的有限体积的耕植土供给, 因此采用大孔隙率的柔性生态水土保持毯(孔隙率约95%)和生态联锁块大框格(孔隙率约75%), 使用区域为最高洪水位之上。

柔性生态水土保持毯采用图9所示的Enkamat毯, 它是一种开孔的三维网垫, 由聚酰胺纤维单丝制成, 孔隙率超过95%。现场施工过程中, 首先在换填改性土上铺设0.10 m厚的耕植土, 然后铺设0.02 m厚的水土保持毯, 再在毯子上覆盖0.03~0.05 m厚的耕植土, 而后种植植被。



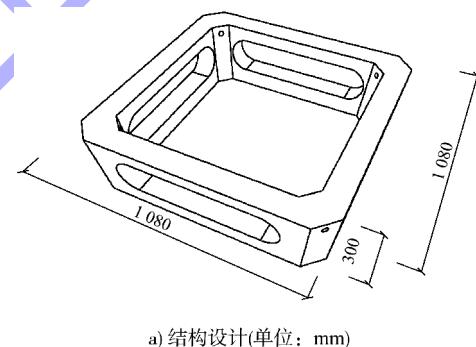
a) 典型断面设计



b) 柔性生态水土保持毯小庙试验段

图9 引江济淮工程膨胀土典型断面生态结构布置

图10为生态联锁块大框格结构, 简称大框格, 又称预制格式结构、预制格构结构, 结构为中空正方形框格, 框格间横向螺杆柔性连接, 每格尺寸为1 080 mm×1 080 mm×300 mm, 孔隙率约79%, 框格内先填种植土后植草皮。对于膨胀土段, 大框格结构由于体积大、厚度大, 可以盛放足够的耕植土, 对于膨胀土段换填土一定程度隔绝上下土体水分交换的情况, 具有较好的适应性。



a) 结构设计(单位: mm)



b) 小庙试验段

图10 生态联锁块大框格结构

3 结论

1) 长距离运河工程岸坡防护结构的选型主要与工程地质条件、特征水位等因素密切相关。引

江济淮工程安徽段沿线地质条件按土体性质可分为土质边坡、膨胀土边坡等。特征水位通航段与非通航段有所区别，两者均包括洪水位、常水位和枯水位，通航段最低与最高通航水位之间的浪击区由于受船行波作用强烈为重点防护区域。

2) 引江济淮工程安徽段土质河段生态岸坡防护结构一般用于常水位以上及枯水位以下 2 个区域，常水位以上广泛使用了 30% 左右孔隙率的混凝土预制块体结构，包括四叶草结构、铰链联锁结构等。枯水位以下在东淝河等局部河段试验性布设了带有鱼巢功能的水下矩阵块体结构，现场试验显示，水下矩阵块体平铺方式的破损率和平整度均优于咬合方式。

3) 引江济淮工程安徽段膨胀土河段生态结构主要采用了大框格结构和柔性生态水土保护毯，考虑到膨胀土边坡失稳危险易发，最高洪水位以下均采用硬质混凝土面板，生态结构使用区域均位于最高洪水位以上。大框格结构为预制混凝土结构，其具有的大体积及大孔隙率(79%)为耕植土和植物根系提供了更多的空间。柔性生态水土保护毯为一种绿色护坡材料，具有超大孔隙率(95%以上)、施工便捷等优点。大框格结构和柔性生态水土保护毯的大孔隙率可一定程度缓解膨胀土边坡换填水泥改性土后耕植土内水分含量不足的问题。

参考文献：

- [1] 邵琪, 沈建霞. 战略叠加效应下苏皖豫高等级航道联网分析[J]. 水运工程, 2020(3): 86-91.
- [2] 王思凯, 张婷婷, 高宇, 等. 莱茵河流域综合管理和生态修复模式及其启示[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(1): 215-224.
- [3] SCARGILL D I. New hope for the Rhone-Rhine waterway[J]. Geography, 1976, 61(3): 157-160.
- [4] LOENEN A, XU M. Forecasting and predictive control of the dutch canal network [J]. Transport of water versus transport over water: exploring the dynamic interplay of transport and water, 2015, 58: 75-94.
- [5] 俞孔坚, 李迪华, 李伟. 论大运河区域生态基础设施战略和实施途径[J]. 地理科学进展, 2004, 23(1): 1-12.
- [6] 俞孔坚, 李迪华, 李伟. 京杭大运河的完全价值观[J]. 地理科学进展, 2008, 27(2): 1-9.
- [7] 刘涛, 彭东方. 引江济淮工程航运功能研究[J]. 人民长江, 2020, 51(1): 154-159.
- [8] 童庆国. 引江济淮结合通航构建淮河水系第二入江通道[J]. 中国水运(下半月), 2013, 13(7): 30-31, 155.
- [9] NOBLESSE F, HUANG F X, YANG C. The neumann-michell theory of ship waves [J]. Journal of engineering mathematics, 2013, 79(1): 51-71.
- [10] 潘军宁, 王登婷, 吴美安, 等. 波浪作用下混凝土砌块护坡稳定性试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2005, 33(4): 476-481.
- [11] 刘健, 齐泊良, 胡南琦, 等. 船行波作用下联锁混凝土块护坡面层稳定性分析[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(6): 179-185, 189.
- [12] EAST A E, PESS G R, BOUNTREY J A, et al. Large-scale dam removal on the Elwha River, Washington, USA: river channel and floodplain geomorphic change [J]. Geomorphology, 2015, 228(1): 765-786.
- [13] ALAM G M, ALAM K, MUSHTAQ S, et al. Vulnerability to climatic change in riparian char and river-bank households in Bangladesh: implication for policy, livelihoods and social development [J]. Ecological indicators, 2017, 72(1): 23-32.
- [14] 肖庆华, 钱红露, 程稳, 等. 长江中游生态护岸工程的岸坡植被分布特征研究[J]. 水运工程, 2021 (2): 84-88.
- [15] 陈丙法, 黄蔚, 陈开宁, 等. 河道生态护岸的研究进展[J]. 环境工程, 2018, 36(3): 74-77, 168.
- [16] 黄小鹏, 谢军. 河道整治中常用生态护岸类型[J]. 水运工程, 2017(11): 109-113.
- [17] 刘长波, 李明. 长江生态航道的建设实践与探索[J]. 水运工程, 2021(2): 79-83, 108.
- [18] RECKING A, PITON G, MONTABONNET L, et al. Design of fascines for riverbank protection in alpine rivers: insight from flume experiments [J]. Ecological engineering, 2019, 138: 323-333.
- [19] 刘利. 芜申航道南京高淳段护岸结构形式的探讨[J]. 水运工程, 2006(2): 79-82.

(下转第 113 页)