



长江中下游钢丝网石笼护坡生态恢复效果评价*

范玉洁¹, 杨中华¹, 邹明哲¹, 李明², 张志永³, 李达¹, 刘建华¹, 刘奇²

(1. 武汉大学, 湖北 武汉 430071; 2. 长江航道规划设计研究院, 湖北 武汉 430040;

3. 水利部中科院水工程生态研究所, 湖北 武汉 430079)

摘要:近年来长江中下游航道整治实施一系列钢丝网石笼生态护坡工程,但是缺少对这些护坡建成后生态恢复效果的跟踪调查评价。基于 2019 年汛前和汛后对 6 个钢丝网石笼护坡植被和基质的调查,开展植被年内以及年际演替分析,并结合水文数据、基质特征及现场观测情况,筛选 4 个植被特征因子以及 17 个环境影响因子做相关性分析。结果表明,经过恢复,护坡区由完工时播种的较为单一的植被演替为以草本植物为主的多物种群落,护坡区现场生态恢复效果良好;护坡建成时间、基质中黏土、粉砂、砂石含量以及淹没历时是影响护坡区植被演替的主要影响因子。

关键词:钢丝网石笼护坡; 植物群落; 生态恢复; 相关性分析

中图分类号: TV 861; U 656.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)01-0129-07

Evaluation of ecological restoration effect of steel wire mesh stone cage revetment in middle and lower reaches of the Yangtze River

FAN Yu-jie¹, YANG Zhong-hua¹, ZOU Ming-zhe¹, LI Ming², ZHANG Zhi-yong³, LI Da¹, LIU Jian-hua¹, LIU Qi²

(1. Wuhan University, Wuhan 430071, China;

2. Changjiang Waterway Institute of Planning and Design, Wuhan 430040, China;

3. Institute of Hydroecology, Ministry of Water Resources, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430079, China)

Abstract: In recent years, a series of steel wire mesh stone cage ecological revetment projects are carried out in the middle and lower reaches of the Yangtze River, but there is no follow-up investigation and evaluation on the ecological restoration effect after the completion of these projects. Based on the investigation of vegetation and matrix of six steel wire mesh stone cage revetments before and after the flood season in 2019, we analyze the annual and interannual successions of vegetation. Combined with the hydrologic data, matrix characteristics and field observation, we screen four vegetation characteristic factors and seventeen environmental impact factors for correlation analysis. The results show that after restoration, the relatively single vegetation succession seeded at the completion of the revetment protection area is replaced by a multi-species community dominated by herbage plants, and the ecological restoration effect of the revetment protection site is good. The time of revetment, the percentage of clay, silt and sand in the matrix and the duration of inundation are the main factors affecting the succession of vegetation in the engineering area.

Keywords: steel wire mesh stone cage revetment; plant community; ecological restoration; correlation analysis

传统内河航道硬性护坡阻止河道水体与自然界的交换,对内河航道水质、生态环境、周边景

观等方面产生较大的影响^[1-3]。随着我国对生态文明建设的要求越来越高,生态护坡逐渐成为现阶段

收稿日期: 2020-04-19

*基金项目: 国家自然科学基金项目(51879199); 湖北省技术创新专项重大项目(2019ACA154)

作者简介: 范玉洁(1996—),女,硕士研究生,从事环境与生态水力学研究。

通讯作者: 杨中华(1977—),男,博士,教授,从事环境与生态水力学、计算水动力学研究。E-mail: yzh@whu.edu.cn。

段及将来护坡形式的发展趋势和新要求^[4-6]，钢丝网石笼护坡结构由于较好的柔韧性、整体性以及固土渗透和生态种植性能等特点^[7]，近年来该结构在长江中下游的航道整治中被广泛利用。钢丝网石笼护坡结构体由经镀高尔凡防腐蚀处理的钢丝编制而成的六边形双绞合钢丝笼及内部填充的块石构成(图 1)，结构体表面粗糙，石笼内泥沙易于落淤，护坡建成初期，通常在护坡钢丝网格内铺设厚度 3~5 cm 原植被生长的天然土，播撒草籽对坡面结构进行绿化，利用植被保护土壤，减少生态护坡区水土流失^[8-10]，在保证坡体结构整体性、稳定性的基础上，实现工程与自然的协调统一。然而，目前对钢丝网石笼护坡建成后生态恢复效果的跟踪调查评价较少，对建成后护坡区生态恢复效果的认识并不清晰。本文通过对 2019 年汛前(4 月中旬)、汛后(10 月上旬)长江中下游 6 个钢丝网石笼护坡区的植被以及护坡基质的调查取样分析，结合护坡区水文泥沙特性，对长江中

下游钢丝网石笼护坡生态恢复效果进行评价，为后续钢丝网石笼护坡先锋植被的选取以及岸坡生态恢复效果评估提供技术支撑。



图 1 钢丝网石笼护坡

1 研究区域概况

此次关于长江中下游钢丝网石笼护坡生态恢复效果共选取宜昌—安庆河段 6 个取样点开展调查，包括戴家洲右缘守护工程、马家嘴护坡、界牌、七里湖高滩守护工程、腊林洲中部护坡、西河铺，取样点分布见图 2。各护坡区基本情况见表 1(按完工时间距此次调查采样历时排列)。



图 2 调查取样点位置分布

表 1 调查取样点基本情况

取样点	河段	先锋植被	施工时间	完工时间
戴家洲右缘守护工程	武汉—安庆	狗牙根、高羊茅	2010 年 12 月	2011 年 8 月
马家嘴护坡	宜昌—城陵矶	自然恢复	2010 年 10 月	2012 年 6 月
界牌	城陵矶—武汉	狗牙根	2012 年 1 月	2013 年 3 月
七里湖高滩守护工程	武汉—安庆	狗牙根、牛鞭草	2012 年 11 月	2014 年 5 月
腊林洲中部护坡	宜昌—城陵矶	狗牙根	2013 年 10 月	2014 年 6 月
西河铺	武汉—安庆	狗牙根、牛鞭草、芦苇	2013 年 1 月	2016 年 1 月

2 研究方法

2.1 现场调查

在调查站点，利用 GPS(全球定位系统)定位并确定高程，根据护坡枯水平台以及坡顶高程并结合历年水文资料以及现场观测情况将护坡坡面

划分为 3 个高程区(护坡上部、护坡中部、护坡下部)，每个高程区随机设置 3 个植被调查样方，草本调查样方边长为 1 m，灌木样方边长为 5 m；在植被调查样方内，用取土钻钻取表层土壤基质(0~20 cm)，封装后带回实验室，测定基质基本

组成(黏土、粉砂、砂石含量)、颗粒大小级配、pH 值、有机质及营养盐。

2.2 群落演替特性测定

群落物种多样性反映不同自然地理条件与群落的相互关系,是群落组织结构的重要特征,揭示生态恢复过程中边坡植物群落的演替变化^[11]。本文选择 4 个指标反映群落的演替特性,包括盖度、平均高度以及 Shannon-Wiener 指数和 Margalef 指数^[12],各样方中植被按照一年生草本和多年生草本进行分类整理记录,通过调查数据计算物种指标。

2.3 基质理化性质测定

在对土样做完晾晒和研磨等处理后,将研磨好的土样分为 2 份,一份配制成浓度适宜的溶液,采用 Microtrac S3500 激光粒度仪对土样进行泥沙级配测量^[13];另一份测量基质的 pH 值以及各养分含量。

2.4 数据分析处理

利用 SPSS 22.0 软件进行植被特征与影响因子的相关性分析^[14]。

3 植被与基质的调查结果分析

3.1 植被调查

3.1.1 护岸植被的演变

长江为季节径流型的河流,水位变幅较大,钢丝网石笼护坡建设完成初期基本选用耐淹性较强的单一狗牙根草籽进行播种^[15]。经过演替,此次调查统计,采样区内一年生草本植物共 36 种,主要有益母草、附地菜、救荒野豌豆、蔊菜、棒头草等;多年生草本植物 34 种,主要有狗牙根、牛鞭草、双穗雀稗、香附、芦苇等;乔木 4 种;藤本植物 3 种。护坡区由完工时播种的较为单一的植被类型演替为以草本植物为主的多物种群落。

3.1.2 植物群落特征

1)盖度与平均高度。经过多年的演替,整体而言,各护坡区取样点的植被生长普遍较为茂盛,各个取样点随着相对高程的升高,植被盖度逐渐增加,护坡上部植被整体生长情况优于护坡下部,

植被平均高度无明显分布规律;汛前,不同高程区域植被盖度相差不大,然而,经过一个汛期以后,除马家嘴外,其余护坡下部区域植被盖度显著降低,坡上部植被盖度明显大于坡下部,见图 3。

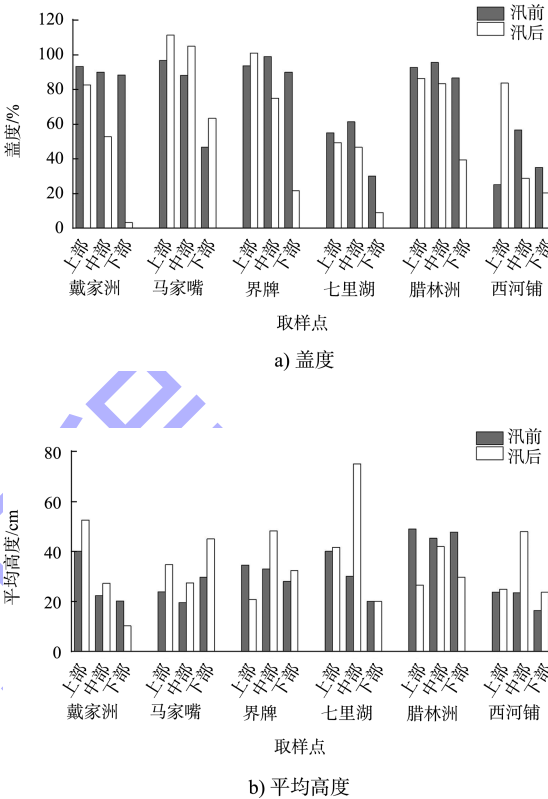
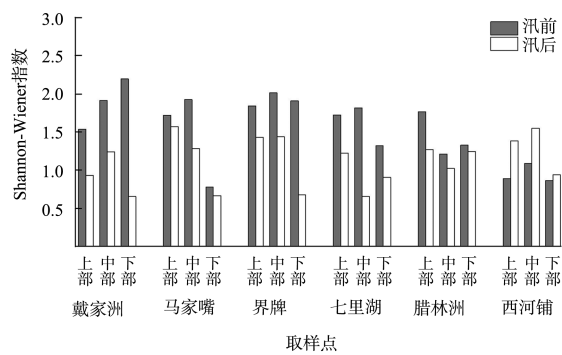
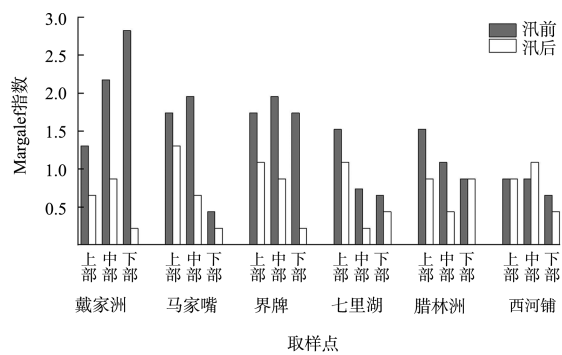


图 3 汛期前后取样点植被盖度及平均高度

2) Shannon-Wiener 指数和 Margalef 指数。汛前,各护坡取样点上部 Shannon-Wiener 指数、Margalef 指数均值分别为 1.26~1.90、1.15~1.75,坡中部均值分别为 1.29~2.03、0.88~2.04,坡下部均值分别为 1.89~1.91、0.35~2.03。汛后,各护坡取样点上部 Shannon-Wiener 指数、Margalef 指数均值为 1.10~1.50、0.77~1.19,坡中部均值分别为 0.91~1.49、0.40~0.98,坡下部均值分别为 0.64~1.06、0.17~0.63。无论汛前或汛后,从护坡下部到上部,随着相对高程的增加,物种多样性逐渐增加,相对高程较高的护坡中上部区域植物群落的物种丰富度优于护坡下部,而在经历一个汛期以后,随着一年生植被的衰亡,护坡区下部多样性指数显著减小,物种多样性显著降低,见图 4。



a) Shannon-Wiener指数



b) Margalef指数

图 4 汛期前后采样点 Shannon-Wiener 指数及 Margalef 指数

3) 植被汛前汛后特征差异。对汛前、汛后不同高程区的植被盖度和 Shannon-Wiener 指数进行分析, 经历一个汛期以后, 护坡上部植被平均盖度增加 9.67%, 而护坡中下部区域盖度及多样性明显降低, 尤其是在护坡下部, 平均盖度降低了 36.61%, 多样性(Shannon-Wiener 指数)降低 0.549。根据现场调查, 在 6 个护坡区选择两个典型坡面进行对比, 在腊林洲护坡区, 经历汛期河水的不断冲刷以后, 覆盖在坡体表层基质大量流失, 钢丝网裸露, 尤其是护坡下部一年生植被汛后大量减少, 坡面出现明显的分界线; 而马家嘴护坡区由于河势控制工程修建历史较长, 护坡附近以淤积为主, 基质覆盖层厚度达到 1 m, 多年生植被覆盖度高, 汛期植被根系的固土作用导致基质具有较强的稳定性, 所以马家嘴护坡无论是汛前、汛后植被均生长比较茂盛, 生态恢复效果较好, 见图 5。



a) 腊林洲 (汛前)



b) 腊林洲 (汛后)



c) 马家嘴 (汛前)



d) 马家嘴 (汛后)

图 5 汛期前后典型护岸坡面对比

3.2 基质分析

3.2.1 基质成分组成

土壤样品的成分中的粉砂和砂石是主要成分。土样成分中砂石占比平均值为 53.64%，粉砂占比平均值为 43.08%，黏土占比平均值为 3.28%，黏土占比最大的为戴家洲右缘守护工程低位置处取得的土样，黏土占比为 13.76%，部分土样中黏土占比接近于 0。基质中不同粒径成分组成见图 6(未列出的腊林洲中部、下部以及西河铺中部数据是在基质成分测量过程中导致的数据丢失)。

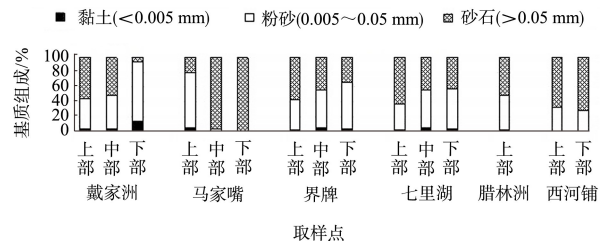


图 6 基质中不同粒径成分组成

3.2.2 土壤养分

护坡区各高程区域 pH 值、有机质、营养盐(全氮、碱解氮、全磷、速效磷、全钾、速效钾)的含量均值分布如图 7 所示。整体而言，护坡区上部土壤中的养分含量高于护坡的中下部区域，护坡区上部每年经历淹没时间较短，植被的生长情况较好，植被腐败后的营养成分更容易留存于土壤中，如此常年积累，造成护坡区上部的土壤养分含量高于中部的的水位变动区和下部的淹没区。然而，基质中各营养成分含量均值沿相对高程的增高不具有统一的规律性，例如有机质的含量随着相对高程的升高不断增加，而碱解氮含量明显呈现出护坡中部小于护坡上部与下部的分布。

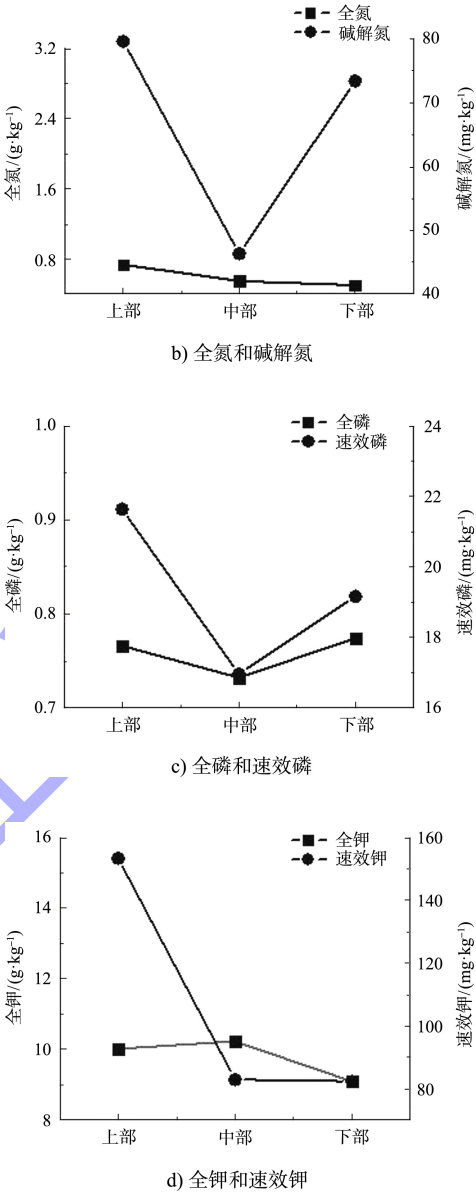
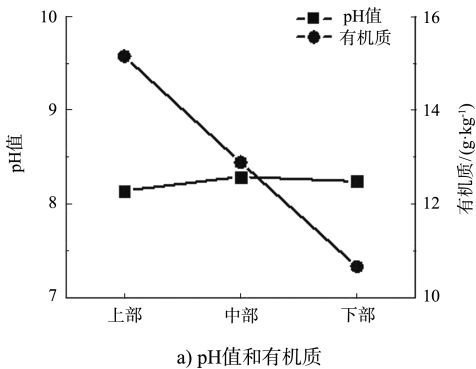


图 7 不同高程区土壤中 pH 值、有机质及氮、磷、钾养分含量

3.3 相关性分析

根据现场观测调查取样以及试验数据，结合护坡区水文及设计资料，对采样点植被以及基质数据计算分析，选取 4 个生物指标(盖度、平均高度、Shannon-Wiener 指数、Margalef 指数)、17 个影响因子(淹没历时、护坡发展时间、采样点相对高程以及 6 个基质物理影响因子:黏土、粉砂、砂石含量百分比、中值粒径、最大粒径、非均匀系数;8 个基质化学影响因子:pH 值、有机质、全氮、全磷、全钾、速效磷、速效钾、碱解氮)，进行相关性^[16-18]分析，找出影响护坡区植被演替的主要影响因子。



a) pH值和有机质

分析发现建成历时、基质中黏土、粉砂、砂石含量百分比、淹没时间等与植被特征具有显著的相关性，见表 2。皮尔逊相关系数的绝对值越大，皮尔逊相关性越大；Sig.（双尾）表示相关性是否显著，可判断变量间相关性程度。可以看出，护坡建成历时与植被的盖度、Shannon-Wiener 以及 Margalef 指数呈正相关。护坡建成时间越久，植被的演替时间就越长，相应的植被的丰富度和盖度越好，群落的复杂程度越高；黏土、粉砂、砂石含量与物种的丰富度具有显著的相关性，一年生

草本主要通过淹前留存、散播发育成熟的种子来应对长江干流水位的年内涨落，砂性土容易被河水冲蚀而掏空，基质的粒径越小，越容易保留汛期留下草本植物的种子，来年种子萌发，从而物种的丰富度越高；淹没时间^[19-20]与植被高度呈较显著的负相关，相对高程较高的部位对应淹没历时少，那么植被的生长周期较长，植被平均高度越高。淹没时间虽然与其他指数没有呈现显著的相关性，但整体而言，淹没时间与其他群落特征的相关性均为负相关。

表 2 植被特征因子与主要影响因子相关分析

特征因子	参数	主要影响因子				
		建成历时	淹没时间	黏土含量	粉砂含量	砂石含量
盖度	皮尔逊相关系数	0.709	-0.270	0.367	0.362	-0.372
	Sig.（双尾）	0.003 **	0.330	0.178	0.184	0.173
平均高度	皮尔逊相关系数	0.021	-0.602	-0.143	-0.021	0.038
	Sig.（双尾）	0.940	0.018 *	0.610	0.942	0.894
Shannon-Wiener 指数	皮尔逊相关系数	0.538	-0.101	0.557	0.541	-0.556
	Sig.（双尾）	0.039 *	0.720	0.031 *	0.037 *	0.031 *
Margalef 指数	皮尔逊相关系数	0.564	-0.068	0.671	0.528	-0.560
	Sig.（双尾）	0.028 *	0.810	0.006 **	0.043 *	0.030 *

注：* 小于 0.05（双尾），相关性显著；** 小于 0.01（双尾），相关性非常显著。

4 结论

1) 钢丝网石笼护坡建成初期，护坡生态恢复中植物物种的选择以单一物种狗牙根或者以自然恢复为主，此次调研发现，经历几年的演替，护坡区由完工时播种的单一的植被演替为以益母草、附地菜、救荒野豌豆等一年生植被和狗牙根、牛鞭草、双穗雀稗、芦苇等多年生草本植物为主的多物种群落。整体而言，钢丝网石笼护坡生态恢复效果良好。

2) 针对年内演替规律，汛前护坡区均有较好的盖度与多样性，经历汛期后，护坡上部植被平均盖度增加，而护坡中下部区域盖度及多样性明显降低，尤其是在护坡下部，平均盖度降低 36.61%，多样性（Shannon-Wiener 指数）降低 0.549，一年生植被大量减少，多年生草本植物成为汛后护坡区的主要植被。

3) 根据相关性分析，护坡建成后生态恢复的时间、基质中黏土、粉砂、砂石含量、每年汛期

护坡经历的淹没时间等都是影响护坡区植被演替的重要因子。淹没时间和小粒径基质含量对植被生长的影响很大，经历一个汛期以后，护坡区砂性土容易被河水冲蚀而掏空，而粒径较小的黏性土更容易保留汛期留下草本植物的种子，高坡位区的植被淹没冲刷时间较短，低坡位的植被淹没时间较长，调查区植被明显呈现出高坡位恢复优于低坡位的现象。

参考文献：

[1] 朱荣.生态护坡技术在生态河道建设中的应用研究[J]. 低碳世界, 2016(33): 90-91.

[2] 王文野, 王德成.城市河道生态护坡技术的探讨[J]. 吉林水利, 2002(11): 24-26.

[3] 黄迪.大沽河生态护岸技术的试验与评价研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2016.

[4] 朱伟, 杨平, 龚森.日本“多自然河川”治理及其对我国河道整治的启示[J]. 水资源保护, 2015, 31(1): 22-29.

[5] CARRE C, HACH J P, CONINCK A D, et al. How to integrate scientific models in order to switch from flood control river management to multifunctional river management? [J]. International journal of river basin management, 2014, 12(3): 231-249.

[6] 李冬, 潘美元. 生态护坡技术在长江航道工程中的应用[J]. 中国水运(下半月), 2013, 13(7): 162-164.

[7] 熊小元, 余新明, 李明, 等. 一种新型植生型钢丝网格护坡结构研究[J]. 水道港口, 2018, 39(5): 567-572.

[8] 李立新. 水利工程护坡生态化设计技术研究[J]. 科学技术创新, 2019(25): 122-123.

[9] 黄奕龙, 朱闻博, 胡仁贵. 河道护岸结构型式对生态修复影响试验研究[C]//中国环境科学学会. 中国环境科学学会学术年会 2013 论文集. 北京:《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社, 2013: 274-282.

[10] 张桂荣, 张家胜, 王远明, 等. 河流冲刷作用下石笼网生态护坡技术研究[J]. 水利水运工程学报, 2018(6): 112-119.

[11] 刘赛, 蒋进, 李中邵, 等. 北疆引水干渠边坡生态恢复效果的调查与评价: 以新疆克拉玛依市西干渠工程黄旗坝段为例[J]. 水土保持通报, 2016, 36(5): 248-254+2.

[12] 卢洋. 漓江江心洲植被演替及其修复机制研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2016.

[13] 雷斯越. 不同地形条件下退耕草地植被恢复与土壤理化性质分异特征[D]. 西安: 西北农林科技大学, 2019.

[14] 罗琰. 辉河湿地河岸带植物组成和多样性与土壤特征的相互关系[D]. 北京: 北京林业大学, 2019.

[15] 薛爽, 张天成. 浅谈长江航道整治生态护岸中植物的选择[J]. 科技经济导刊, 2019, 27(16): 121-122.

[16] 刘丰阳, 刘林双, 王家生, 等. 荆江河段不同植被生态护坡的水流试验及应用[J]. 水运工程, 2018(9): 9-14, 37.

[17] 李武斌. 岷江上游大沟流域主要植被生物量组成及影响因子研究[D]. 重庆: 西南大学, 2007.

[18] PEREIRA A S, DAMASO-RODRIGUES M L, AMORIM A, et al. Aquatic community structure in Mediterranean edge-of-field waterbodies as explained by environmental factors and the presence of pesticide mixtures [J]. Ecotoxicology, 2018, 27(6): 661-674.

[19] 姚鑫, 杨桂山, 万荣荣, 等. 水位变化对河流、湖泊湿地植被的影响[J]. 湖泊科学, 2014, 26(6): 813-821.

[20] MORANDI B, PIEGAY H, LAMOUREUX N, et al. How is success or failure in river restoration projects evaluated? Feedback from French restoration projects[J]. Journal of environmental management, 2014, 137: 178-188.

(本文编辑 王璁)

(上接第 128 页)

[8] 邢振贤, 王雅楠, 谢琰. 混凝土生态护岸试验与工程效果分析[J]. 中国农村水利水电, 2013(10): 51-53, 56.

[9] 许土国, 石瑞花, 黄保国, 等. 平原河道生态护坡工程评价和方案决策方法[J]. 水利学报, 2008, 39(3): 325-331.

[10] 边博, 李磊, 周凌辉. 砌块式生态护坡实施的生态效应研究[J]. 环境科学与技术, 2014, 37(4): 26-30, 123.

[11] TIAN Y, GUO Z, ZHONG W, et al. A design of ecological restoration and eco-revetment construction for the riparian zone of Xianghe Segment of China's Grand Canal[J]. International journal of sustainable development & world ecology, 2016, 23(4): 333-342.

[12] 杨玉宝, 潘毅, 徐振山, 等. 现浇型生态混凝土护岸抗水力冲刷性能试验研究[J]. 水利水电技术, 2017, 48(11): 122-127.

[13] 刘怀汉, 杨胜发, 曹民雄. 长江黄金航道整治技术研究构想与展望[J]. 工程科学与技术, 2017, 49(2): 17-27.

(本文编辑 郭雪珍)