

袁嘉, 罗嘉琪, 侯春丽, 杨柳青. 长江上游山地城市江岸景观修复设计研究: 以重庆主城为例 [J]. 风景园林, 2021, 28 (7) : 76-82.

长江上游山地城市江岸景观修复设计研究——以重庆主城为例

Research on Restoration Design of Riparian Landscape in Mountainous Cities in Upper Reaches of the Yangtze River: A Case Study of Chongqing Downtown

袁嘉 罗嘉琪 侯春丽 杨柳青

YUAN Jia, LUO Jiaqi, HOU Chunli, YANG Liqing

开放科学 (资源服务)
标识码 (OSID)



中图分类号: TU986.2

文献标识码: A

文章编号: 1673-1530(2021)07-0076-07

DOI: 10.14085/j.fjyl.2021.07.0076.07

收稿日期: 2020-12-29

修回日期: 2021-05-18

袁嘉 / 男 / 博士 / 重庆大学建筑城规学院副教授、博士生导师, 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室研究人员 / 中国科学院成都生物研究所山地生态恢复与生物资源利用重点实验室合作研究人员 / 研究方向为生态景观设计、园林植物应用

YUAN Jia, Ph.D., is an associate professor and doctoral supervisor of the School of Architecture and Urban Planning, and a research fellow at the Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountainous Areas, Chongqing University, and a cooperative research fellow of the CAS Key Laboratory of Mountain Ecological Restoration and Bioresource Utilization, Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences. His research focuses on ecological landscape design, and garden plant application.

罗嘉琪 / 女 / 重庆大学建筑城规学院在读硕士研究生 / 研究方向为江岸生态景观设计

LUO Jiaqi is a master student in the School of Architecture and Urban Planning, Chongqing University. Her research focuses on riparian ecological landscape design.

侯春丽 / 女 / 重庆大学建筑城规学院在读博士研究生 / 研究方向为草本植物景观设计

HOU Chunli is a Ph.D candidate in the School of Architecture and Urban Planning, Chongqing University. Her research focuses on herbaceous plant landscape design.

杨柳青 / 女 / 重庆大学建筑城规学院在读硕士研究生 / 研究方向为小微湿地设计

YANG Liqing is a master student in the School of Architecture and Urban Planning, Chongqing University. Her research focuses on small and micro wetland design.

摘要: 在长江上游众多沿江山地城市中, 复杂地形与水文过程、物质与结构失稳以及生境退化等复杂环境挑战, 导致江岸景观的生态缓冲、生物多样性保育及观赏游憩等重要功能严重衰退。选取长江重庆主城段江岸为研究区域, 针对其典型生态特征与环境挑战, 提出江岸景观修复设计的3项策略: 1) 应对多重水位变化的分层韧性植物筛选; 2) 护坡立体生态种植; 3) 河漫滩“植被—底质—微地貌”耦合设计。在重庆主城典型江岸九龙外滩实施修复实践, 定量评估修复后江岸的植物群落结构及多样性变化, 结果表明: 修复后的江岸景观呈现出优美的立体生态外貌, 群落多样性逐渐提升, 景观韧性与生态服务功能持续优化。可为长江上游流域生态修复及山地城市韧性江岸景观建设提供科学依据和可参考的应用范式。

关键词: 风景园林; 长江上游流域; 山地城市; 城市河流; 江岸景观; 生态修复; 韧性景观; 植物设计

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目 (编号 51808065); 中央高校基本科研业务费 (编号 2020CDJQY-A010); 中国科学院山地生态恢复与生物资源利用重点实验室及生态恢复与生物多样性保育四川省重点实验室开放课题 (编号 KXYSWS2001)

Abstract: Among the mountainous cities along the upper reaches of the Yangtze River, complex environmental challenges including complicated terrains and hydrological processes, material and structural instability, and habitat degradation have led to a serious decline in major functions of the riparian landscape in terms of ecological buffering, biodiversity conservation, and amenities for recreation. This research chooses the riparian landscape of the Yangtze River in downtown Chongqing as the subject. In view of its ecological characteristics and environmental challenges, it proposes three restoration strategies: 1) Selection of resilient plant species for circling-layer structure adapting to complex water level changes; 2) Multi-layered ecological planting for the slope revetment; 3) "Vegetation-sediment-microtopography" integrated design for floodplain ecosystem. It carries out practical restoration of Jiulongwaitan riparian landscape in Chongqing downtown, while conducting quantitative investigations on the structure and diversity changes of the riparian vegetation. The results reveal that the restored riparian landscape presents a visually attractive ecological appearance, the plant community diversity is gradually increased, and the landscape resilience and its ecosystem services are continuously optimized over time. This research can provide a scientific guidance and application paradigm for ecological restoration in the upper reaches of the Yangtze River and resilient riparian landscape construction in mountainous cities.

Keywords: landscape architecture; upper reaches of the Yangtze River watershed; mountainous city; urban river; riparian landscape; ecological restoration; resilient landscape; planting design

Fund Items: Young Scientists Fund of the National Natural Science Fund of China (No. 51808065); Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 2020CDJQY-A010); Open Project of the CAS Key Laboratory of Mountain Ecological Restoration and Bioresource Utilization & Ecological Restoration and Biodiversity Conservation Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences (No. KXYSWS2001)

0 引言

长江上游是指宜昌以上的江段,地跨中国地势的第一、二级阶梯,自然地理条件的垂直分异明显,沿江城市多为山地城市。江岸景观是河流边岸在洪水期最高水位线和枯水期最低水位线之间的线性带状区域^[1]。在长江上游山地城市中,江岸景观作为城市坡地下延到河谷后陆域和水域的交互界面,既提供拦截、缓冲、过滤、净化、生境和生物走廊等关键生态系统服务,又是重要的人类活动场所,在人与自然的相互作用下形成“山地—城市—江岸—河流”的整体生态基础设施和生命综合体。

在长江上游山地城市江岸中,地形地貌、水文情势和人类活动干扰产生耦合效应,造成急剧的环境梯度变化、复杂的生态过程以及敏感脆弱的界面生态系统^[2-3]。过去长江上游山地城市的江岸景观实践,缺少对其特殊生态特征和复杂环境挑战的综合考虑,导致江岸生态系统与服务功能衰退,缺乏应对环境变化的韧性。当前,城市江岸景观设计的国外研究主要集中在揭示江岸环境的退化机制与流域规划等方面^[4-5],中国相关工作则更多关注江岸形态结构梳理与水文调控^[6],以及防洪护岸工程建设^[7]。上述国内外研究工作大多基于平原地形及水文特征开展,由于山地城市江岸陡峭且内部地形多变,其水文情势的时空间变化及环境干扰较平原地区更加复杂,导致平原城市江岸的修复经验难以在山地城市江岸得到有效应用。此外,针对退化江岸的生态恢复及其管理方面的工作大多局限于理论总结和定性介绍,缺乏系统性的技术创新和实证性的定量研究^[8]。综上,针对山地城市江岸的特殊生态特征开展修复技术创新,并基于定量研究提供关键科学参考,以应对当前复杂环境变化及高强度人工干扰,是韧性山地景观与长江上游流域生态修复亟待解决的热点问题。

基于此,本研究以长江重庆主城段江岸为例,辨识其中的复杂环境挑战;在此基础上,提出景观修复设计技术框架,选择典型江岸断面实施修复并开展实证研究;对典型断面中的修复区域和未修复区域植被进行定量

分析,完成景观修复效益评估。研究成果旨在为长江上游流域生态修复和山地城市江岸景观优化提供科学依据和可参考的应用范式。

1 长江上游山地城市江岸中的复杂环境挑战

长江上游山地城市中,河谷地带的剧烈高程变化和水利作用,使江岸景观呈现出典型的侧向分层结构。以长江重庆主城段江岸为例,河流下切沿江岸形成多级阶地;同时由于人工修筑水利设施,最终形成江岸高地、护坡护岸、河漫滩及消落带等多种圈层结构。受气候变化与城市建设的复杂影响,长江上游山地城市夏季洪水频发;以重庆主城为例,2018年遭受5年一遇洪水(最高水位184.7 m),2020年则承受了50年一遇的特大洪水(最高水位191.6 m)。同时,山地城市河床窄且比降大、过水断面受限,造成洪水脉冲的最高、最低水位变幅大;汛期洪水陡涨陡落,频繁地淹没、侵蚀江岸或形成淤积^[9]。此外,由于三峡库区在春夏季以145 m低水位运行,秋冬季则以175 m高水位运行,使三峡库区城市江岸形成“夏陆冬水”的水文环境。重庆主城的长江江岸也面临着反季节水位变动影响,冬季水位可达176 m,夏季可消落至159 m以下,形成高差近20 m的消落带。上述河库交替引发的多重水位变化,严重胁迫以重庆主城为例的山地城市江岸景观,使修复设计与管理维护面临巨大挑战。一方面,长期水位变动导致江岸的侧向多圈层结构失稳,诱发次生地质灾害,严重影响居民生存环境和景观质量;另一方面,原有江岸物种难以适应不断变化的水文环境,植物群落敏感脆弱,造成水陆交互界面的生态失衡。

长江上游山地城市江岸中存在大面积的陡坡护岸,既是保障河流岸滩稳定的重要水利设施,也是“城市—河流”生态交换的重要界面。这些江岸护坡一般采用混凝土硬化或使用水泥格框等结构加固坡面,再回填土壤并种植植物。然而,山地城市江岸护坡的物质、结构与植物群落却极不稳定。以长江重庆主城段江岸为例,由于山地河流的高泥沙含量所引起的洪水的冲蚀与淤积作用,江

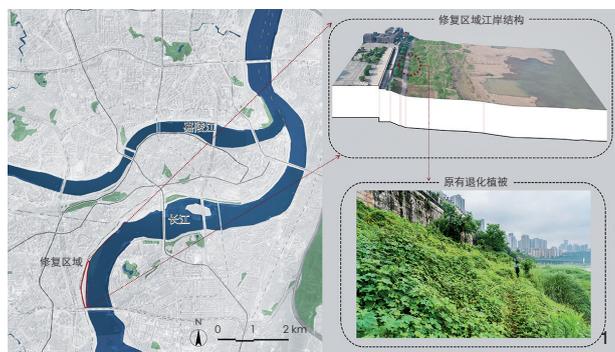
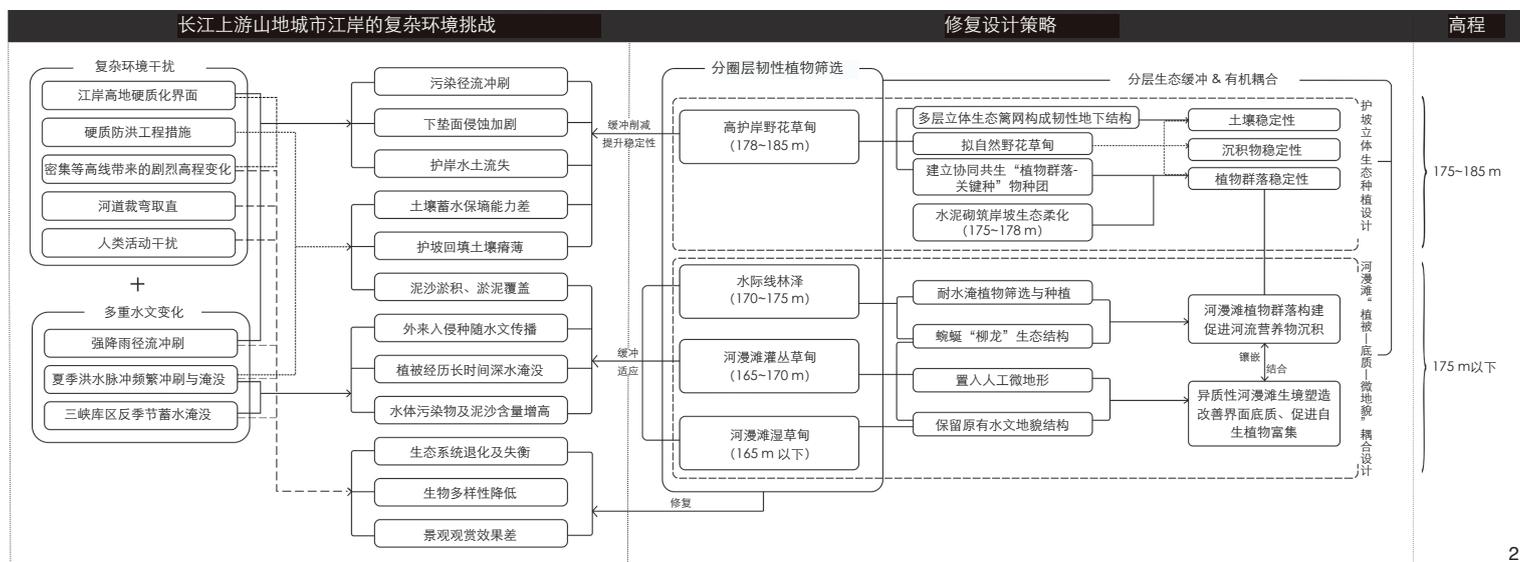
岸护坡的地表沉积物难以维持稳定,影响地表理化性能。山地城市的江岸护坡多为陡峭坡地,回填土壤瘠薄,集雨面积小,产汇流速率快^[10]。强径流造成坡地下垫面侵蚀,土壤深度、渗透性、有机质养分含量及蓄水保墒能力随坡度增加而剧减^[11]。上述原因导致重庆主城长江江岸护坡的植被种植与管护十分困难;护坡植被的退化同时会加剧径流量和冲刷力,使坡地径流中的污染物及泥沙含量增高^[12-13],进而对下方的河漫滩和消落带生态系统造成影响,引发恶性循环。此外,沿江陡坡护岸普遍栽种单一化植被,不仅景观效果单调,而且群落结构与功能难以维持。

由河流侧向迁移与洪水漫堤的沉积作用形成的河漫滩,是长江上游山地城市江岸中动植物群落生存与河流能量转换的重要场所。作为江岸生态系统中的典型群落过渡带,河漫滩需要丰富的生物生境类型,从而激活河流生物生产力^[14]。以长江上游重庆主城段江岸为例,河道裁弯取直现象较多,使河流侧向与纵向水生态过程遭受破坏,严重影响了河漫滩的结构与功能,导致河漫滩植物群落多样性大幅减少,引发生境退化^[15]。同时,过度的游憩与开发等人为干扰,对河漫滩界面底质造成破坏,迫使生物多样性下降^[16]。此外,多重水位变化、面源污染、泥沙淤积与入侵植物等因素,也对河漫滩植物的生长发育形成胁迫,进一步加剧了重庆主城段江岸生态系统服务的损失。

2 修复区域概况及修复设计框架

2.1 修复区域

本研究选取长江上游重庆主城江岸的代表性断面——九龙外滩为案例地,实施修复并开展实证性研究。该区域位于长江干流左岸、九滨路东侧,规划总面积约70 hm²,整体沿长江主河道南北向延伸(图1)。修复区域具备典型的侧向多圈层结构,从高到低依次为:城市广场(191 m)、直立式硬质挡墙(185~191 m)、菱形水泥格框护坡(178~185 m)、完全硬化的水泥砌筑岸坡(175~178 m)、以泥沙和卵石为主要底质的大型河漫滩消落带区域(175 m以下)。护坡最大高程低于重庆主城区防洪标



1 九龙外滩区位、江岸结构及原有退化植被 Location of the Jiulongwaitan, structure of the riparian landscape, and degraded riparian vegetation before the restoration
2 应对复杂环境挑战的长江上游山地城市江岸景观修复设计技术框架 Landscape restoration design framework to cope with complex environmental stress in the riparian landscape of mountainous cities in the upper reaches of the Yangtze River

(170~175 m)、河漫滩灌丛草甸 (165~170 m) 以及河漫滩湿草甸 (165 m 以下)。实现韧性应对多重水位变化目标的关键，在于针对江岸侧向结构中的复杂水文情势，分圈层筛选适生并具备良好韧性的植物种类，为营建不同韧性圈层提供有效的植物资源库 (表 1)。

175~185 m 高程的菱形水泥格栅护坡坡度陡峭，其中仅回填 20 cm 营养贫瘠的砂质土壤，加上夏季洪水和坡面径流的频繁淹没与冲蚀，乔木与灌丛难以定植，并容易被强力的洪水冲断或拔起。针对这些特殊环境挑战，研究选择具有强健根系的阔叶草花与观赏禾草进行坡面生态修复 (表 1)。一方面，草本植物的根系能够良好适应厚度较低的回填土壤，生长发育迅速并完整覆盖坡面，且纤维柔韧不易被洪水折断；另一方面，相比乔木和灌丛，草本植被覆盖的坡面所产生的径流中泥沙含量更低，能够有效平衡径流削减与蓄水保墒^[7]。

为适应夏季的频繁洪水淹没和淤积以及秋冬季的长时间深水淹没，175 m 高程以下的河漫滩消落带区域，需要选用耐淹性强并能够迅速生长恢复的植物种类，以维持出露季节的河漫滩地表覆盖与植物群落结构稳定。研究利用 170~175 m 河漫滩区域的深厚淤积质土层，种植爆竹柳、池杉、枫杨、落羽杉、乌桕、中山杉等乔木及秋华柳等灌木，并采用三角桩进行固定^[8]，从而建立具有良好生态缓冲能力的水际线林泽。在 165~170 m 高程种植秋华柳灌丛，以及荻、卡开芦、芦苇、

准的 5 年一遇设计洪水位 (185.9 m)；由于三峡库区的反季节蓄水，修复区域内的河漫滩和消落带每年面临长达 6 个月的秋冬季深水淹没。江岸整体坡度较大，其中，178~185 m 高程之间的菱形水泥格栅护坡，平均宽度不足 10 m，护坡坡度达 30.3°，175~178 m 水泥砌筑岸坡坡度约 26.4°；175 m 以下的河漫滩区域中，170~175 m 之间平均坡度约 5.8°，165~170 m 平均坡度约 6.9°。场地内部人行交通以马道形式修建，二级马道位于 185 m 高程，一级马道位于 178 m 高程，两级马道之间由梯步连通。受前文所述的多重水位变化、护坡系统失稳及河漫滩植被衰退等复杂环境影响，修复前江岸生境恶劣且退化严重；菵草 (*Humulus scandens*)、喜旱莲子草 (*Alternanthera philoxeroides*) 等恶性杂草随水传播迁入，迅速扩散并占据群落优势地位 (图 1)；江岸整体生物多样性与生态系统服务水平低下，景观效果单调。

2.2 修复设计技术框架

本研究提出 3 项设计策略：1) 适应多重水位变化的分圈层韧性植物筛选；2) 以修复护坡物质、结构与生物群落为目标的护坡立体生态种植设计；3) 为恢复河漫滩结构完整性与提高生物生境丰富度的河漫滩“植被—底质—微地貌”耦合设计。所有设计策略顺应山地城市江岸生态界面的典型立体特征与环境梯度，并且有机耦合、协调互补，形成对复杂环境挑战的多重分层生态缓冲，从而组织起有效的江岸景观修复设计技术框架 (图 2)。自 2018 年 4 月起，实施九龙外滩江岸景观修复，工程于当年 5 月末竣工。

2.2.1 应对多重水位变化的分圈层韧性植物筛选

研究顺应江岸多级阶地及其高程变化进行植被设计，建立结构与功能有机耦合的韧性植物圈层系统以实现分层生态缓冲，包括：高护岸野花草甸 (178~185 m)、水泥砌筑岸坡生态柔化 (175~178 m)、水际线林泽

五节芒等高草与沿阶草, 形成团块状河漫滩灌丛草甸, 能够有效应对洪水冲击, 并在退水期迅速生长并覆盖地表。165 m 以下受河库交替淹没的干扰频率最高, 主要通过保护原有土壤底质, 促进种子库自然萌发建立湿草甸群落, 形成江岸与长江水体之间的最后一道生态屏障(表 1)。

2.2.2 护坡立体生态种植

为有效应对 175~185 m 高程下陡岸护坡中的坡面物质与结构不稳定、人工植被快速衰退以及入侵植物竞争等复杂挑战, 研究基于稳定护坡沉积物、稳固土壤和修复植物群落稳定性的目标, 设计立体生态种植系统进行护坡界面的生态调控与景观优化。

在 178~185 m 高程种植野花草甸覆盖护坡, 通过冠层截流与蒸腾作用降低坡面径流影响; 野花草甸既能缓冲洪水侵蚀, 其地上生物量又明显低于木本植物群落, 能有效减少每次洪水脉冲造成的泥沙淤积, 有利于坡面沉积物稳定。在 175~178 m 完全硬化的水泥砌筑岸坡中, 打入金属膨胀螺丝并张拉耐腐蚀的镀锌钢丝网, 种植地锦、葡萄、秋华柳与常春油麻藤等耐水淹灌木、悬垂或攀缘植物。多种植物在镀锌钢丝网上生长盘错, 有利于洪水沉积物在水泥岸坡的附着和积累, 实现硬质护坡界面的生态柔化并加强缓冲功能。

研究设计生物篱网, 稳固菱形水泥格框护坡内的回填土壤。在频繁遭受夏季洪水侵蚀的 178~181 m 水泥格框护坡, 取出 15 cm 深土壤, 铺设当地常见绿化小乔木(如桂花 *Osmanthus fragrans* 等)的枯枝, 形成第一层枯枝篱网, 在枯枝篱网上覆盖 10 cm 深土壤。采用秋华柳带根幼苗(株径 1~2 cm)编制鲜枝篱网, 并覆盖 5 cm 深土壤。2 层生物篱网能有效提高土壤孔隙度, 增强垂向的土壤水分渗透, 并与野花草甸的植物根系相互盘结形成稳固的地下韧性结构, 有效增强护岸土壤稳定性^[9]。在相对较少遭受洪水脉冲影响的 181~185 m 高程, 仅采用枯枝篱网, 为根系生长预留更多空间, 以此增加种植植物的丰度和多度。

高护岸野花草甸使用了 36 种具有不同花期、高度和叶序形态的草本植物(表 1), 具有高物种丰富度和丰富的垂直亚层结构, 并

表 1 分圈层韧性植物筛选表
Tab. 1 List of resilient plant species for the buffer layers

韧性圈层结构	植物种类
高护岸阔叶野花草甸 (178~185 m)	菖蒲 (<i>Acorus calamus</i>)、红毛草 (<i>Melinis repens</i>)、花菱草 (<i>Eschscholzia californica</i>)、黄金菊 (<i>Euryops pectinatus</i>)、黄秋葵 (<i>Cosmos sulphureus</i>)、秋葵 (<i>C. bipinnatus</i>)、假龙头花 (<i>Physostegia virginiana</i>)、蓝花矢车菊 (<i>Cyanus segetum</i>)、柳叶马鞭草 (<i>Verbena bonariensis</i>)、马鞭草 (<i>V. officinalis</i>)、落新妇 (<i>Astilbe chinensis</i>)、墨西哥鼠尾草 (<i>Salvia leucantha</i>)、鼠尾草 (<i>S. japonica</i>)、千屈菜 (<i>Lythrum salicaria</i>)、山桃草 (<i>Gaura lindheimeri</i>)、蓍草 (<i>Achillea millefolium</i>)、匙叶冠鼠麴草 (<i>Gamochaeta pensylvanica</i>)、松果菊 (<i>Echinacea purpurea</i>)、天竺葵 (<i>Pelargonium hortorum</i>)、勿忘草 (<i>Myosotis alpestris</i>)、萱草 (<i>Hemerocallis fulva</i>)、沿阶草 (<i>Ophiopogon bodinieri</i>)、长药八宝 (<i>Hylotelephium spectabile</i>)、紫苏 (<i>Perilla frutescens</i>)
高护岸高草野花草甸 (178~185 m)	滨菊 (<i>Leucanthemum vulgare</i>)、大滨菊 (<i>L. maximum</i>)、翅果菊 (<i>Lactuca indica</i>)、地毯草 (<i>Axonopus compressus</i>)、黑心金光菊 (<i>Rudbeckia hirta</i>)、花叶麦冬 (<i>Liriope spicata</i> var. <i>variegata</i>)、狼尾草 (<i>Pennisetum alopecuroides</i>)、稷斗菜 (<i>Aquilegia viridiflora</i>)、美国薄荷 (<i>Monarda didyma</i>)、墨西哥羽毛草 (<i>Nassella tenuissima</i>)、肾蕨 (<i>Nephrolepis cordifolia</i>)、细叶芒 (<i>Miscanthus sinensis</i> 'Gracillimus')
水泥砌筑岸坡生态柔化 (175~178 m)	地锦 (<i>Parthenocissus tricuspidata</i>)、葡萄 (<i>Vitis vinifera</i>)、秋华柳 (<i>Salix variegata</i>)、常春油麻藤 (<i>Mucuna sempervirens</i>)
水际线林泽 (170~175 m)	爆竹柳 (<i>Salix fragilis</i>)、池杉 (<i>Taxodium distichum</i> var. <i>imbricatum</i>)、落羽杉 (<i>T. distichum</i>)、枫杨 (<i>Pterocarya stenoptera</i>)、秋华柳、杉木 (<i>Cunninghamia lanceolata</i>)、乌桕 (<i>Triadica sebifera</i>)、中山杉 (<i>Taxodium</i> 'Zhongshanshan')
河漫滩灌丛草甸 (165~170 m)	荻 (<i>Miscanthus sacchariflorus</i>)、五节芒 (<i>M. floridulus</i>)、卡开芦 (<i>Phragmites karka</i>)、芦苇 (<i>P. australis</i>)、秋华柳、沿阶草
河漫滩湿草甸 (165 m 以下)	狗牙根 (<i>Cynodon dactylon</i>)、牛鞭草 (<i>Hemarthria sibirica</i>)、水蓼 (<i>Polygonum hydropiper</i>)、酸模叶蓼 (<i>P. lapathifolium</i>)

通过不同种类交错混栽、塑造镶嵌分布的水平格局, 有效增加了坡面植被的群落多样性, 有利于保持群落稳定性并提升景观效果。同时, 利用植物配置形成 2 种“植物-动物关键种”物种团, 分别是: 1) 以蜜粉源丰富的滨菊、黑心金光菊、山桃草、蓍草等阔叶草本种类为优势种的“阔叶野花集群-传粉昆虫”物种团; 2) 以狼尾草、细叶芒等较为高大的观赏禾草为优势种的“高草野花集群-草丛鸟”物种团(图 3)。2 种物种团能够吸引和保育具有授粉、植物传播等重要生态功能的动物种群, 强化坡面植物群落的自我维持功能。

2.2.3 河漫滩“植被-底质-微地貌”耦合设计

在原本植被与生境退化严重的 175 m 以下河漫滩, 充分利用山地河流的不均匀冲刷与沉积等不同水力方式交互作用所产生的丰富微地貌、界面底质和多变的水湿条件, 与植物群落的种植设计形成耦合系统, 从而恢复河漫滩的生态结构完整性并优化生物生境, 为河漫滩生态系统的长期稳定提供保障。

在 170~175 m 高程的水际线林泽中, 将

乔木种植成蜿蜒的“柳龙”形态(图 4), 在顺直型水泥砌筑岸坡(175~178 m)之外, 重塑江岸的自然蜿蜒形态。乔木“柳龙”结构能够增加水力粗糙度, 在洪水期间减缓水流冲击并形成小区域的回水, 促进淤泥与河流中营养物质的沉积, 改善河漫滩土壤肥力条件^[9], 为植被生长建立良好基础。

山地河流通过运移、侵蚀和堆积等水力方式, 在河漫滩上塑造出浅沼、水塘、洄水洼地、卵石滩等多种微型地貌结构。设计充分保留了这些界面底质、土壤湿度、水位高度、营养成分和光照条件上特征各异的微型环境单元, 并在它们之间的空隙空间置入一系列大小、形状、深浅不一的人工凹地形。丰富的河漫滩微地貌与种植的多种耐水淹灌丛草甸以及自生湿草甸群落组合出类型繁多的高异质性生境, 并形成水平格局上的复杂镶嵌(图 5), 优化了河漫滩生物走廊的生态结构。

3 江岸景观修复效果评估

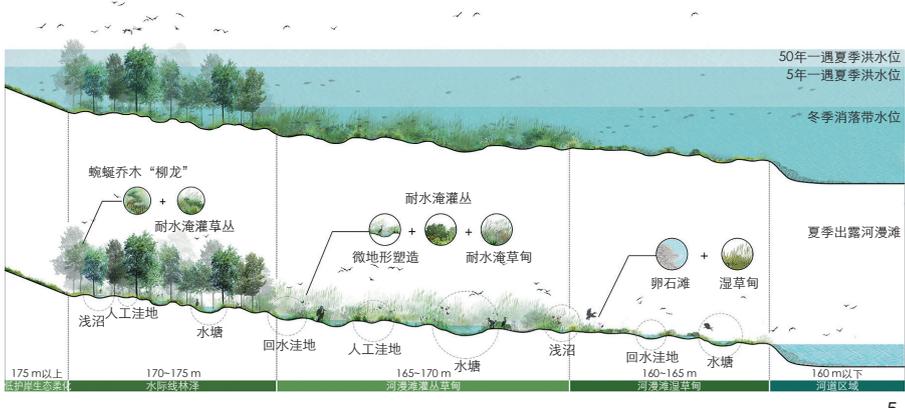
3.1 调查及统计方法

2020 年 5 月, 本研究选择九龙外滩江岸

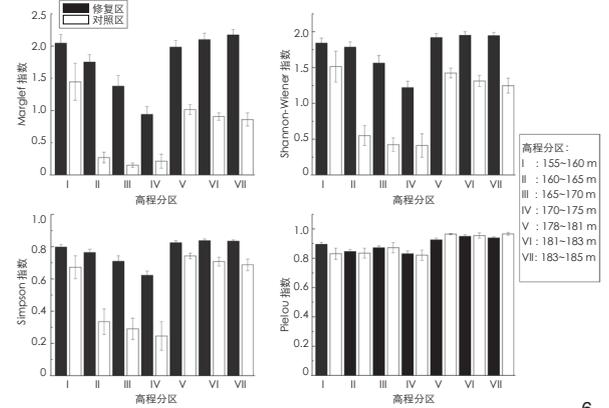


3

4



5



6

- 3 178~185 m 高护岸的野花草甸
Wildflower meadow on the upper revetment between 178-185 m
- 3-1 阔叶野花草甸
Forb-rich and wildflower meadow
- 3-2 高草野花草甸
Tall grass and wildflower meadow

- 4 “柳龙”林泽
“Willow-dragon” wooded swamp
- 4-1 夏季出露期
Summer emergence period
- 4-2 夏季洪水期
Summer flood period
- 4-3 冬季蓄水期
Winter impoundment period

- 5 河漫滩“植被—底质—微地貌”耦合设计
“Vegetation-sediment-microtopography” integrated design for floodplain ecosystem
- 6 研究区域植物群落多样性特征
Diversity characteristics of plant communities in the research area

中实施生态修复的区域(简称修复区),并将修复区以北、未实施生态修复的相邻区域作为对照区,开展定量调查。在垂直河流方向设置8条样线:修复区6条,对照区2条,每条样线之间间隔100 m。其中,进行立体生态种植的江岸护坡区域(178~185 m)沿海拔高程每隔2~3 m设置一个采样梯度,使每条样线上分布3个采样点;175 m高程以下的河漫滩区域沿海拔高程每隔5 m设置1个采样梯度,使每条样线上分布4个采样点。针对草本植物群落,每个采样点设置5个1 m×1 m样方;针对170~175 m高程的木本植物群落,每个采样点设置1个10 m×10 m样方;记录样方内的植物种类、数量、平均高度和盖度。

研究选取 Margalef 丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 优势度指数和 Pielou 均匀度指数描述植物群落结构特征,运用 SPSS 20.0 软件中的方差分析和 Tukey 法比较修复区和对照组中不同高程的植物多样性指数的差异。以植物出现频率与平均盖度均大于15%为依据,筛选生态护坡区域和河漫

滩区域内的优势种植物;以重要值数据为基础进行植物群落的组成分析,计算公式为:

$$\text{重要值}(IV) = (\text{相对高度} + \text{相对盖度}) / 2 \times 100\% \quad (1)$$

3.2 修复效果评价

研究区域共发现高等维管植物43科113属135种,其中,修复区植物种类明显增加,共记录42科106属129种;未修复区域植物仅发现17科38属40种。研究结果显示,修复区内植物群落的 Margalef 丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数和 Simpson 优势度指数显著高于对照区(图6),证明分圈层韧性植物筛选并构建植物资源库有效应对了研究区域复杂高程变化及水文情势;生态修复后的江岸植被不仅建立了应对多重水位变化、物质与结构失稳及生境退化等复杂环境胁迫的良好韧性,群落结构与多样性也不断优化。修复区植物群落的 Pielou 均匀度指数相较对照区没有显著差别(图6),表明研究采用的修复措施,能够在引入大量具有良好生态功能的植物种类、提升群落多样性的同时维持植

物个体数量分布的均匀程度,在优化植被结构和功能的同时有效维持了群落稳定。

图7展示了护坡植被中15个优势种的分布情况,其中,横轴显示了不同物种的重要值;对不同物种的重要值进行对数处理,缩小数据差异后进行显著性检验,分布点颜色越深代表该物种的在群落中的相对重要性越高;同时,分布点的面积与其频度正相关。结果显示,菵草这一恶性入侵杂草在未实施修复的对照区中占据绝对优势,同时与蜈蚣尾蕨(*Pteris vittata*)、牛筋草(*Eleusine indica*)、蛇床(*Cnidium monnieri*)和小蓬草(*Erigeron canadensis*)等少数杂草形成贫乏化的均质群落。采用立体生态种植修复后的护坡植物群落的优势种数量及出现频率均明显高于对照区群落,且不同高程梯度中的优势种分布差异较大,表明修复后的护坡植物群落类型相较对照区更为丰富。修复区内滨菊、黑心金光菊、山桃草、肾蕨、薹草和细叶芒等栽培植物占据群落优势地位,既有效抑制了菵草等入侵植物的扩繁,又能够为传粉昆虫和草

7 护坡修复区与对照区优势物种分析

Analysis of dominant species in the restoration area and contrast area of the slope revetment

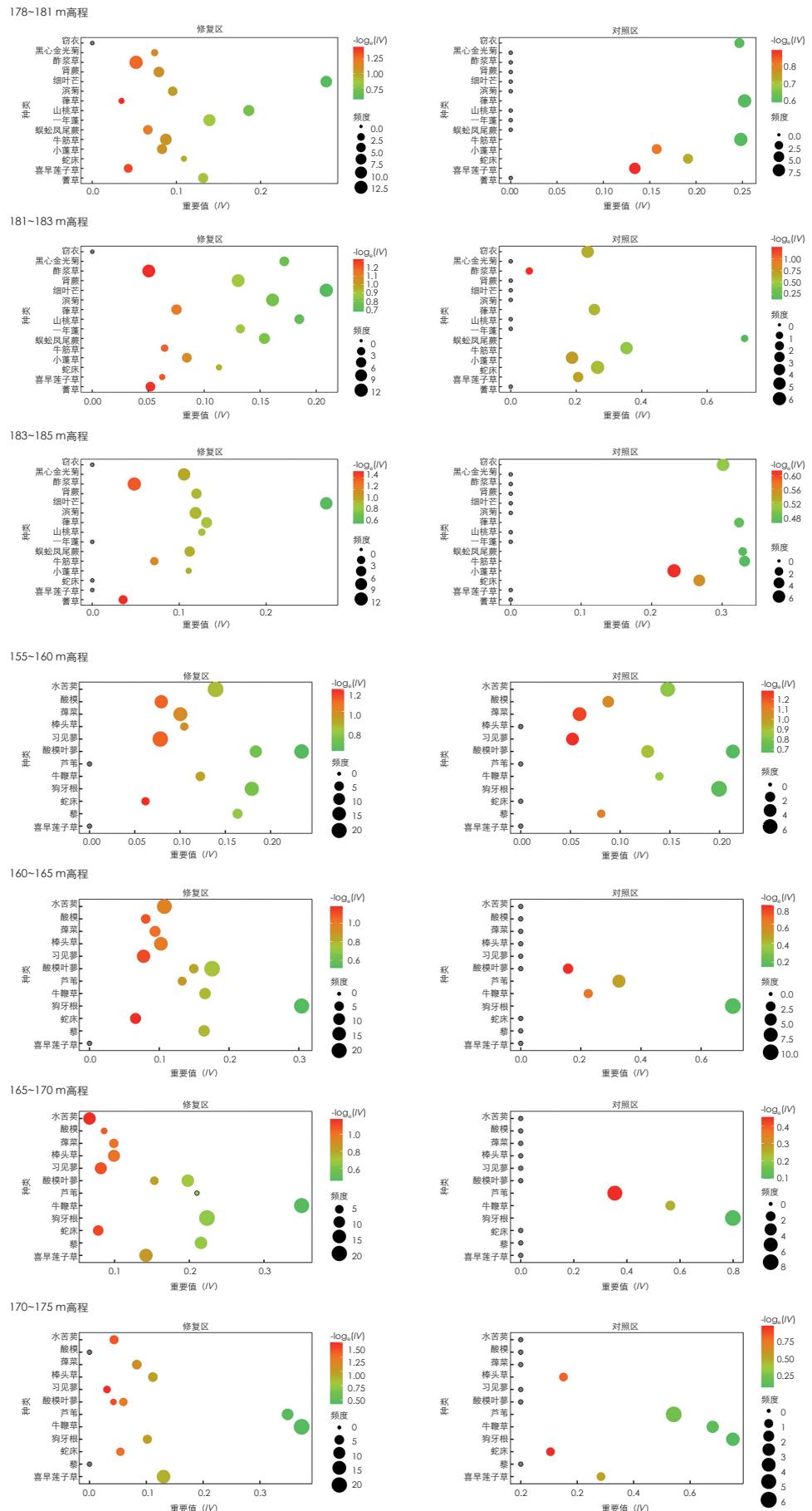
8 河漫滩修复区与对照区优势物种分析

Analysis of dominant species in the restoration area and contrast area of the floodplain area

丛鸟等动物关键种提供更加适宜的取食和庇护条件，有利于保障并提升江岸护坡的生物多样性和景观自我维持功能。

图 8 展示了河漫滩植被中 12 个优势种的分布情况。结果显示，对照区植被中狗牙根、芦苇和牛鞭草占据绝对优势，群落组成极度单一。修复区内优势种群数量及其分布的均匀程度均明显高于对照区，说明采用“植被—底质—微地貌”耦合设计进行生态修复后的河漫滩植被能够有效应对多重水位变化和人类干扰，逐步形成合理分布的稳定格局，增加了江岸植被连续性。随着高程增加，修复区植被的优势种群逐渐从一年生小型湿生草本过渡成多年生禾草，地上生物量和生产力显著提高，群落结构更加稳定。尽管 165 m 以下河漫滩区域仅采用自然修复，没有进行人工种植，但修复区内群落多样性仍明显优于对照区。这一结果表明，165~175 m 的乔木“柳龙”林泽和灌丛草甸等生态种植群落，有效缓冲了多重水位变化等环境胁迫，改善了 165 m 以下河漫滩区域的生境条件。同时，研究在河漫滩区域保留自然微地貌和置入人工凹地形，能够作为出露季节的雨水储留空间，维持河漫滩垂向梯度的水文流和补足地下水层^[21]，为夏季江滩出露时的植物生长修复提供适宜条件；另一方面，凹地形在洪水及冬季蓄水淹没过程中，有利于溶解有机碳等河流营养物质和植物种子的富集，为自生植被发育提供适宜的河漫滩基质，进一步提升河漫滩生物多样性^[22-23]。

修复后九龙外滩江岸景观改善显著，连续 3 年（2018—2020 年）承受了夏季洪水脉冲的反复冲蚀、淤积及冬季深水淹没，提供了持续全年的良好景观效果（图 9）。原本植物种类单一、景观单调的菱形水泥格框护坡中，形成了层次与色彩丰富、季相多变的野花草甸。“水际线林泽—灌丛草甸—湿草甸”复合



7

8



9 江岸景观修复效果
Restoration effect of the riparian landscape
9-1 修复前
Before the restoration
9-2 修复后
After the restoration

群落与丰富的河漫滩微地貌有机镶嵌形成复合格局, 呈现出优美的立体生态外貌; 同时增加了江岸垂直结构的丰富度, 能够满足更多鸟类和昆虫栖息繁衍的生态位和实际微生境需求^[24]。170~175 m 的河漫滩林泽复合群落能够发挥滞洪削峰的生态屏障作用^[25], 并防止上游来水中携带的入侵植物繁殖体向护坡空间扩散^[26]。修复后的河漫滩植物群落发育良好, 显著增加的净初级生产力能够促进浮游动物和无脊椎动物生长, 为随夏季洪水和冬季蓄水迁徙至此的鱼类提供丰富饵料, 并吸引鸟类前来取食, 有效完善了河漫滩景观内的食物网结构, 有利于长期可持续的江岸生物多样性保育。

4 结论

本研究针对长江上游山地城市江岸中的复杂环境挑战提出修复设计技术框架, 并通过重庆九龙外滩江岸的实证性修复研究, 检验了技术方法的可行性。设计修复后的江岸景观能够有效适应场地的复杂逆境胁迫, 优化了江岸界面中物种流、营养流及水文流的交互作用与生态联系, 这些创新技术的系统性应用、定量监测和集成示范在长江流域尚属首次。研究区域是长江上游山地城市江岸的代表性景观空间, 这一区域江岸复杂问题的技术瓶颈攻关, 对整个长江上游江岸生态修复与景观综合整治具有积极的参考价值和普遍适用性。

在今后的研究与实践中, 需要进一步明确山地城市江岸景观系统的关键调控因子及其梯度变化特征, 探究在水文变化以及高强度人工干扰影响下的江岸景观环境适应机制。通过定量数据收集, 分析山地城市江岸生态系统的演变规律以及与水陆交汇过程中物种流、营养流及水文流的交互作用, 从而完善

山地城市韧性江岸生态系统的科学设计, 实现其生态缓冲、生物生境及观赏游憩等多功能服务目标。

参考文献 (References):

- [1] NAIMAN R J, DÉCAMP S H. The Ecology of Interfaces: Riparian Zones[J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1997, 28(1): 621-658.
- [2] 黄光宇. 山地城镇规划建设与环境生态[M]. 北京: 科学技术出版社, 1994.
- [3] 胡澄, 渠光华, 毛瑞勇. 山地城市水安全问题的思考[J]. *环保科技*, 2013, 19(5): 7-10.
- [4] GONZÁLEZ E, FELIPE-LUCIA M R, BOURGEOIS B, et al. Integrative Conservation of Riparian Zones[J]. *Biological Conservation*, 2017, 211: 20-29.
- [5] DEL TÁNAGO M G, GURNELL A M, BELLETTI B, et al. Indicators of River System Hydromorphological Character and Dynamics: Understanding Current Conditions and Guiding Sustainable River Management[J]. *Aquatic Sciences*, 2016, 78(1): 35-55.
- [6] 章光新, 陈月庆, 吴燕锋. 基于生态水文调控的流域综合管理研究综述[J]. *地理科学*, 2019, 39(7): 1191-1198.
- [7] 元媛, 黄继刚, 张细兵, 等. 库岸整治工程防洪安全评价指标体系初步研究[J]. *水利水电快报*, 2017, 38(11): 114-118.
- [8] 韩路, 王海珍, 于军. 河岸带生态学研究与展望[J]. *生态环境学报*, 2013, 22(5): 879-886.
- [9] 徐洁, 凌旋. 重庆市微型流域设计洪水计算方法[J]. *水资源研究*, 2020, 9(6): 664-670.
- [10] YUAN J, ZHANG G X, CHEN L, et al. Experiment Using Semi-Natural Meadow Vegetation for Restoration of River Revetments: A Case Study in the Upper Reaches of the Yangtze River[J]. *Ecological Engineering*, 2021, 159: 106095.
- [11] CHEN J C, CHANG N B, FEN C S, et al. Assessing the Stormwater Impact to an Urban River Ecosystem Using Estuarine Water Quality Simulation Model[J]. *Civil Engineering and Environmental Systems*, 2004, 21(1): 33-49.
- [12] 王栋栋, 王占礼, 张庆玮, 等. 草地植被覆盖度坡度及雨强对坡面径流含沙量影响试验研究[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(15): 119-125.
- [13] 朱冰冰, 李占斌, 李鹏, 等. 草本植被覆盖对坡面降雨径流侵蚀影响的试验研究[J]. *土壤学报*, 2010, 47(3): 401-407.
- [14] 李一帆, 马彦, 田国行. 基于河漫滩生态修复的城市河流治理探索: 以平顶山香山沟治理工程为例[J]. *中国水土保持*, 2017(5): 26-31.
- [15] PROMINSKI M, STOKMAN A, STIMBERG D, et al. River Space Design: Planning Strategies, Methods and Projects

for Urban Rivers[M]. Basel: Birkhäuser, 2017.

[16] SUNIL C, SOMASHEKAR R K, NAGARAJA B C. Impact of Anthropogenic Disturbances on Riparian Forest Ecology and Ecosystem Services in Southern India[J]. *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management*, 2011, 7(4): 273-282.

[17] LIU Y F, DUNKERLEY D, LÓPEZ-VICENTE M, et al. Trade-Off Between Surface Runoff and Soil Erosion During the Implementation of Ecological Restoration Programs in Semiarid Regions: A Meta-Analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 712: 136477.

[18] 袁兴中, 袁嘉, 高磊, 等. 三峡库区城市滨江消落带生态修复与景观优化示范研究[J]. *上海城市规划*, 2018(6): 132-136.

[19] 袁嘉, 陈炼, 罗嘉琪, 等. 立体生态景观的适应性重构: 山地城市河流护岸草本植物群落生态种植[J]. *景观设计学*, 2020, 8(3): 44-57.

[20] NILSSON C, BERGGREN K. Alterations of Riparian Ecosystems Caused by River Regulation: Dam Operations Have Caused Global-Scale Ecological Changes in Riparian Ecosystems. How to Protect River Environments and Human Needs of Rivers Remains one of the Most Important Questions of Our Time[J]. *BioScience*, 2000, 50(9): 783-792.

[21] TIWARI T, LUNDSTRÖM J, KUGLEROVÁ L, et al. Cost of Riparian Buffer Zones: A Comparison of Hydrologically Adapted Site-Specific Riparian Buffers with Traditional Fixed Widths[J]. *Water Resources Research*, 2016, 52(2): 1056-1069.

[22] STEIGER J, TABACCHI E, DUFOUR S, et al. Hydrogeomorphic Processes Affecting Riparian Habitat Within Alluvial Channel-Floodplain River Systems: A Review for the Temperate Zone[J]. *River Research and Applications*, 2005, 21(7): 719-737.

[23] BENDIX J, HUPP C R. Hydrological and Geomorphological Impacts on Riparian Plant Communities[J]. *Hydrological Processes*, 2000, 14(16-17): 2977-2990.

[24] OLSON D H, ANDERSON P D, FRISSELL C A, et al. Biodiversity Management Approaches for Stream-Riparian Areas: Perspectives for Pacific Northwest Headwater Forests, Microclimates, and Amphibians[J]. *Forest Ecology and Management*, 2007, 246(1): 81-107.

[25] FISCHER R A, FISCHENICH J C. Design Recommendations for Riparian Corridors and Vegetated Buffer Strips[R]. Washington, D.C.: Army Engineer Waterways Experiment Station Vicksburg Ms Engineer Research and Development Center, 2000.

[26] SWANSON W M, JAGER N D, STRAUSS E A, et al. Effects of Flood Inundation and Invasion by Phalaris Arundinaceon Nitrogen Cycling in an Upper Mississippi River Floodplain Forest[J]. *Ecohydrology*, 2017, 10(7): e1877.

图表来源 (Sources of Figures and Table):

文中图表均由作者绘制; 图3、4、9由作者自摄; 图1底图来源于谷歌地图(2018-05-12)。

(编辑 / 肖书文 王一兰)