

大理阳溪绿色低碳影响生态修复研究

陈建勇

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘要: 小流域入湖河道综合整治是一项复杂系统工程。以大理阳溪综合治理为例,探讨绿色低碳影响生态修复(green low-impact ecological restoration, GLIER)在小流域治理中应用。阳溪为洱海重要入湖河道,面临水土流失、水质恶化及生态退化等问题。传统河道治理方法忽视生态与景观协调,难以实现可持续性和生态修复目标。提出一种基于GLIER理念小流域治理模式,强调恢复河道自然生态功能、改善水质、增强生物多样性、保护生态景观等综合措施。研究表明,阳溪综合治理在恢复自然河道形态同时,强化防洪能力与水质净化效果,为洱海流域生态保护与治理提供有益示范,可为我国湖泊富营养化治理与入湖河道生态修复提供科学依据和技术参考。

关键词: 低影响;生态修复;河道综合治理

中图分类号: TV85

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)09-0310-06

Research on Green Low-impact Ecological Restoration of Yangxi River in Dali

CHEN Jianyong

[Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: The comprehensive management of small watershed entering lake is a complex systematic project. Taking the comprehensive regulation project of Yangxi River in Dali as an example, the application of green low-impact ecological restoration (GLIER) in small watershed management is discussed. Yangxi River, as a major river into Erhai Lake, faces the problems of soil erosion, water quality degradation and ecological deterioration. The traditional river management approaches often fail to address the coordination between ecology and landscape, which is hard to realize the sustainable and ecological restoration goals. A small watershed management model based on the GLIER concept is proposed to emphasize the integrated measures such as restoring the natural ecological functions, improving the water quality, enhancing the biodiversity and protecting the ecological landscape of the rivers. The study demonstrates that the comprehensive management of Yangxi River not only restores the natural shape of the river, but also enhances its flood control capacity and water purification effect, which provides a valuable example for the ecological protection and management of the Erhai Lake basin, and can provide the scientific basis and technical references for the management of lake eutrophication and the ecological restoration of river flowing into lake in China.

Keywords: low-impact; ecological restoration; comprehensive regulation of river

0 引言

当今人类活动与气候变化已经对世界各国造成严重的生态破坏、环境污染和退化等问题^[1]。各国政府相继出台符合本国国情的治理措施,如荷兰的与自然共建(nature-based solution)^[2]、比利时的生态性河流修复(room for the river)^[3]、德国的绿色基础设施(green infrastructure for urban areas)^[4]、英国的绿色

生物多样性框架(biodiversity net gain framework)^[5]、美国的绿色低碳开发(low impact development)^[6]、澳大利亚的生态恢复力框架(eco-resilience framework)^[7]、新西兰的通过自然过程恢复原生态植被(predator-free New Zealand)^[8]、及中国的生态红线政策(ecological red line)^[9]。虽然各国政府的定义有所差异,实施措施也不同,但有着共同的实践理论基础——绿色低碳影响生态修复理念(green low-impact ecological restoration, GLIER)。GLIER是结合生态系统恢复与绿色基础设施理念,通过采取对环境影响较小、自然过程为主导的修复措施,提升生态系统的

收稿日期: 2025-02-22

作者简介: 陈建勇(1981—),男,硕士,高级工程师,从事水利工程规划及设计工作。

功能与服务^[6-8]。其核心理念是通过恢复自然生态功能来应对环境挑战,特别是气候变化、污染及生物多样性丧失。

洱海是我国湖泊生态环境保护试点湖泊之一,不仅为滇西发展提供丰富的淡水资源,也为云南省建成中国面向西南开放重要桥头堡提供战略支撑,具有重要意义^[10]。苍山十八溪是洱海的主要注入水源之一,其上游水质十分优良,水量丰富,出山后流经坝区,水质有所下降。以阳溪为例,在治理前上游河道河床下切和两岸裸露边坡区土壤侵蚀严重,造成了局部河段大量水土流失;沿河两岸有多个排污口分布,农田排水未经处理直接排河,污染河道水体;同时上分布有多个农灌、人饮取水口,无控制性的取水,造成下游河段枯竭;治理前的河道水工设施主要采取防洪单目标工程手法,缺少对河道整体生态及景观的考量。

开展洱海保护与治理,关键环节是入湖河道生态治理^[10]。传统小流域治理主要以河道治理为主体,侧重于防洪功能目标,往往忽视了流域上游和坡面地区的水土保持工作,局限于单一的工程措施^[11]。绿色低影响生态小流域治理是在传统小流域综合治理基础上统筹规划,治沟与治坡相结合,工程措施与植物措施相结合,治理与开发相结合,生态效益与经济效益相结合,建立起从沟头到沟口,从山顶到沟底的立体水土流失防护体系,并将水资源保护、面源污染防治、农村垃圾及污水处理等结合到一起的一种新型综合治理模式^[6-9]。其中河道生态修复目标是沟道侵蚀得到控制、坡面侵蚀强度在轻度及以下、水体清洁且非富营养化、行洪安全、生态系统良性循环。

为贯彻“生态化、景观化、景点化”的总体目标,阳溪治理工程以恢复河道自然生态为核心,提高小流域内陆植物和水生植物的生物多样性和植物覆盖度,对硬化护岸和基底进行生态化改造,增强河道水质的自然净化能力。本研究拟从整体流域视野的生态—社会—经济综合过程角度出发,涵盖工程体系包括防洪综合调控、河道生态修复、生态景观游憩系统构建、水污染综合防治,为入湖河道综合治理工程提供系统、有效的工程系统支撑。本研究以河道防洪能力建设和生态修复的协同治理为重点,结论可为阳溪小流域清水入湖目标提供科学有效的对策,同时也将推动苍山十八溪的生态环境保护与治理工作全面开展提供经验与示范。

1 流域概况

阳溪位于洱海西岸,为该片区 22 条入湖河流之一,全长 14.8 km,流域面积 42.4 km²。河道曲折,地形切割大,上游陡峻,下游平缓。工程范围为 5.805 km,起点为箐口水电站,终点为环湖公路,涉及主河道及两侧约 30 m 生态保护区、水土流失区、农田排灌沟等(见图 1)。工程将着重改善防洪能力、河道生态整治、水质净化和生态景观建设。

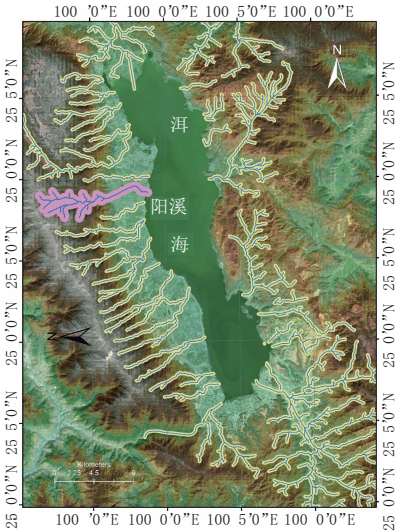


图 1 研究区:洱海空间位置及阳溪俯瞰图

2 数据与方法

2.1 资料来源

资料来源包括大理市 1:50 000 及 1:2 000 地形图、阳溪实测 1:500 地形图和断面测量资料;大理气象站 1963—2012 年间 50 a 的 1、6、24 h 暴雨实测数据;阳溪水文测验断面 2004 年 5 月至 2006 年和 2013—2015 年的洪水实测数据,吊草沟水文站 1964—2008 年期间共 42 a 洪水实测数据。通过综合分析法推算吊草沟设计洪水资料,并使用模比系数 K_p 修正得到阳溪各断面设计洪水成果,设计洪峰流量见表 1。

表 1 阳溪沿程断面设计洪峰流量计算成果

桩号	断面位置	流量/(m ³ ·s ⁻¹)
K0+000	箐口水电站	38.23
K1+000	—	40.54
K2+400	214 国道	43.64
K3+700	大丽路前	46.08
K5+200	凤鸣桥	47.48
K5+600	入湖口	47.82

2.2 河道侵蚀计算

为全面反应阳溪河道动力状况及侵蚀特性,采

用河道侵蚀分析方法对阳溪各河段侵蚀特征执行临界摩阻流速 V_{cr} 、临界剪应力 τ_{cr} 和弯曲河道局部水流状态 τ_{max} 三种参数计算。这些参数在方案比选阶段应用广泛。

2.2.1 临界摩阻流速 V_{cr}

临界摩阻流速 V_{cr} 可反映不同河道底床物质对水流的抵抗力与水流拖曳力达到平衡极限状态,即不发生侵蚀条件下水流最大流速,也称为允许流速,可用公式计算:

$$V_{cr} = \sqrt{ghS_f}$$

式中: g 为重力加速度; h 为河道水深; S_f 为河床平均坡降。

2.2.2 临界剪应力 τ_{cr}

临界剪应力 τ_{cr} 为沿水流方向单位面积上应力,是传统国际性导则对河道岸坡抗侵蚀稳定性评价采用的定量描述方法^[12],可采用下列公式进行计算:

$$\tau_{cr} = \gamma R S_f$$

式中: γ 为水的容重; R 为水力半径(过水断面面积与湿周的比值); S_f 为河床平均坡降或坡能。

对于直径为 d 和休止角为 φ 土颗粒,其临界剪应力也可根据Shield(1936)确定临界剪应力的经典实验测算值进行判定。

2.2.3 局部最大剪应力 τ_{max}

阳溪整治后河道较为蜿蜒曲折,局部曲率较大河道水流侵蚀力需考虑瞬时最大剪应力,可指导凹岸护岸加固措施选取^[12]。根据阳溪整治设计后河道形态,选取曲率较大河道断面计算最大剪应力,计算公式为:

$$\text{顺直河道: } \tau_{max} = 1.5 \tau_0$$

$$\text{蜿蜒河道: } \tau_{max} = 1.52 \tau_0 (RW)^{-0.5}$$

式中: R 为河弯曲率半径; W 为弯曲河段河道横断面顶宽度。

2.3 护岸措施工具库构建

2.3.1 自然缓坡护岸

适用于水流较弱、坡度较缓河段。通过本土草类植被覆盖土体,增强岸坡抗侵蚀能力,防止水流冲刷^[13]。岸坡与常水位线交界处种植湿生植物及挺水植物,保护坡脚,宽度500~1 500 mm。河底散置河滩石($\phi 50 \sim 100$ mm)以保护河底免受水流侵蚀。

2.3.2 抛石护岸

适用于流速较快、水流侵蚀较强岸线^[14]。岸顶自然放坡至抛石带,岸坡植被保持多样性,并覆盖耐涝草类。抛石带位于水位线变动范围内,宽度500~

2 000 mm,近常水位线处用大石块护脚。河底散置河滩石($\phi 50 \sim 100$ mm)以保护河底。

2.3.3 柴捆护岸

适用于河岸侵蚀较严重、河岸植被需要修复的岸线^[15]。用活体枝条($\phi 10 \sim 25$ mm)加工成柴捆($\phi 250 \sim 300$ mm),将木桩($\phi 80 \sim 120$ mm)打入柴捆间土中,用松土填满枝条间空隙,轻微夯实以促进生根。多段柴捆有效搭接,搭接处枝条用麻绳加固。河底散置河滩石($\phi 50 \sim 100$ mm)以保护河底。

2.3.4 活体树枝护坡

适用于河岸侵蚀严重、有一定空间、河岸植被和河生境需要修复的岸线^[15]。采用活体木桩(长0.8~1 m, $\phi 50 \sim 60$ mm)与麻绳($\phi 10 \sim 25$ mm)固定枝条,增强岸坡稳定性。枝条与湿土填埋夯实,以促进生根,活体木桩间隔600~900 mm,捆绑枝条进行锚固。活体树枝护坡可与抛石护岸组合使用。

2.3.5 浆砌石护岸

适用于水流侵蚀较强、且河岸空间受限的岸线。使用毛石砌筑,毛石间用混凝土坐浆填实间隙,毛石需选择石质坚固、结构密实、不易风化的硬质耐用石料。考虑土压力和沉降不均,设置沉降缝和伸缩缝,确保结构稳定。压顶采用混凝土或大块石,宽度30~50 cm。

2.4 生态修复措施布置与竖向设计原则

不同河道护岸材料因其物理结构差异,具有不同的抗侵蚀能力。在选择生态修复措施布置方案时,也需要基于修复后河道断面形态、河床糙率和河道平面曲率等参数,评估各河段侵蚀性以及弯曲河道局部水流状态(τ_{max})。根据不同护岸材料能够承受摩阻流速 V_{cr} 和剪应力 τ_{cr} ,选定适合各河段侵蚀特性护岸材料,从而在实施生态修复的同时,提升河道岸坡抗侵蚀能力(见图2)。

对于阳溪的生态修复,竖向设计是关键手段之一,旨在平衡防洪功能需求。竖向设计基本原则是在确保各专项设计要求前提下,尽可能尊重场地形态现状,并根据地形条件设定防洪堤路及其相接场地标高。以此标高和周围道路标高为基准,推算出整个设计方案中其他部分竖向标高。

3 结 果

3.1 河道侵蚀计算结果

根据阳溪各河段纵向横向特性和水文情势,计

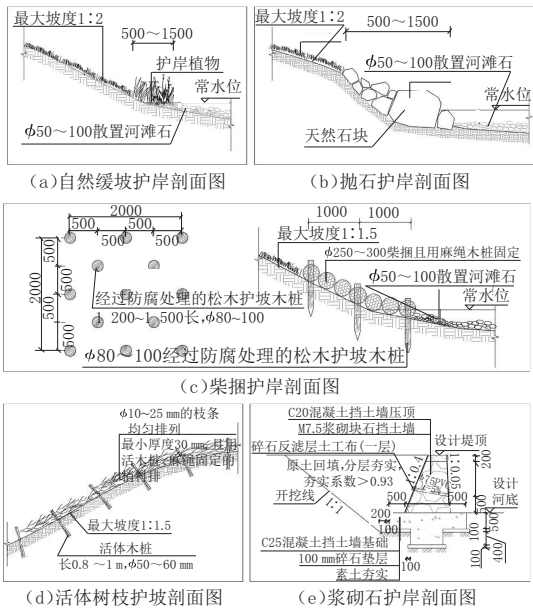


图2 护岸措施设计剖面

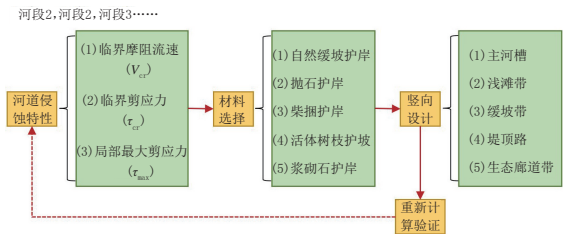


图3 阳溪河道护岸方案适宜性分析流程

算得到修复后河道在 10 a 一遇洪水标准下的流速(计算结果见表 2),该结果为选择河道护岸材料提供依据。通过分析不同护岸材料临界剪应力和临界阻摩流速,并结合阳溪各河段侵蚀性参数,确定 10 a 一遇洪水条件下,各河段不发生侵蚀的适宜护岸材料。有关各类护岸材料及加固技术的抗侵蚀参数,可参见表 3。

表2 阳溪河道水力计算表

桩号	水深/m	河底高程/m	水位高程/m	断面面积/m ²	坡降	糙率	流速/(m·s ⁻¹)
K0+000	1.88	2 077.06	2 078.94	19.43	0.006	0.050	1.97
K1+000	1.65	2 018.85	2 020.50	21.93	0.006	0.050	1.85
K2+400	1.12	1 986.38	1 987.50	28.66	0.005	0.050	1.52
K3+700	2.23	1 972.43	1 974.66	21.21	0.006	0.050	2.17
K5+200	2.18	1 966.65	1 968.83	22.24	0.002	0.050	2.14
K5+600	2.67	1 963.47	1 966.14	45.16	0.001	0.050	1.06

表3 固岸护砌材料的临界剪应力和临界流速

边界分类	边界类型	临界剪应力/(N·m ⁻²)	临界流速/(m·s ⁻¹)
砾石/漂石	2.5 cm	15.79	0.76~1.52
	5.0 cm	32.06	0.81~1.83
	15 cm	95.70	1.22~2.29
	30 cm	191.40	1.68~3.66
植被	A 级草皮	177.04	1.83~2.44
	矮本土丛生禾草	33.50~45.46	0.91~1.22
	高本土草类	57.42~81.34	1.22~1.83
	芦苇	4.78~28.74	—
	阔叶树	19.62~119.62	—
抛石	15 cm d ₅₀	119.62	1.52~3.05
	22.5 cm d ₅₀	181.83	2.13~3.35
	30 cm d ₅₀	244.03	3.05~3.96
	45 cm d ₅₀	363.65	3.66~4.88
	60 cm d ₅₀	483.28	4.27~5.49
土体加固生态工程技术	枝条	9.57~47.85	0.91
	柴捆护岸	28.71~59.81	1.52
	活树桩	100.48~148.33	0.91~3.05
硬质表面防护	石笼	478.49	4.27~5.79
	混凝土	598.12	5.49

3.2 各河段治理策略与护岸措施布局

根据河道坡降、水力、泥沙特征及周边环境现

状,阳溪绿色低影响生态修复工程可分为 3 个区段,并针对上、中、下游不同河道特性分别制定治理策略,并采用相应的护岸措施(见图 4)。

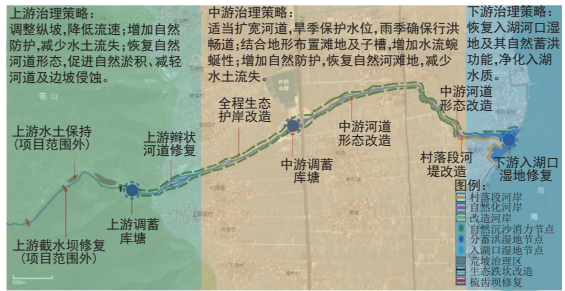


图4 阳溪各河段生态治理措施工程布局

(1)上游整治策略(K0+000~K0+500 箐口段、K0+500~K2+400 自然形态恢复段)

箐口段河段位于山高坡陡地区,河流落差大、水流湍急、河床及边坡侵蚀破坏严重,生态治理措施为调整纵坡、降低流速,主要采用抛石护岸、活体树枝护岸对河流水陆交错带进行植被恢复,稳固上游水土流失段边坡并减少土壤流失。

自然形态恢复段属于箐口陡峭段向下游平缓段过渡河段,坡降较大,汛期水流流速较快,治理措施为对河道整体形态进行生态化改造,引导河流向多

心滩和支流的辫状河道演化,以促进河流自然淤积,减缓水流流速,减轻河道及边坡侵蚀并优化生态环境。护岸措施以抛石护岸与柴捆护岸、活体树枝护坡结合,起到固坡植被作用。

(2)中游整治策略(K2+400~K5+200河道形态改造段)

此段河道坡降变缓,水流侵蚀作用减弱,但河道护岸基本全部人工化,河床淤积严重。生态治理措施包括:对现状河道进行适当扩宽,旱季保持水位,雨季确保行洪畅通;结合地形适当布置部分滩地及子槽;增加水流蜿蜒性;增加自然防护,恢复自然河滩地,减少水土流失。结合河道形态的改造,将原单一功能的浆砌石护岸拆除改为抛石、柴捆及自然缓坡型驳岸,并保留现状堤岸乔木,形成水生—陆生植被过渡带。通过增加河底、横断面和纵断面的差异化,恢复消落带植被,保障枯期河道生态效果,进一步恢复自然生态。

(3)下游整治策略(K5+200~K5+805,村落段)

此段河道流速较慢,河床淤积严重,且河道与滨湖水湿地的水流联系被阻断。治理措施主要为恢复入湖河口湿地及其自然蓄洪功能。护岸措施上,将浆砌石护岸改为自然缓坡型驳岸,对河流水陆交错带进行植被恢复;边坡冲刷较大区域采取活体树枝护岸;村落水街段河道护岸采取浆砌石护岸,增加入水台阶等亲水设施。修复入湖口湿地,恢复过渡带结构,发挥其拦截污染物、净化水质及洪水调蓄功能,同时保持湖滨带生境。入湖口湿地面积约 1.6 hm^2 ,具有重要防洪调蓄和生态景观功能,并为游人提供湿地参观体验栈道,增强环湖景观的自然风貌。

3.3 竖向设计与防洪适应性设计

根据防洪、道路、河流形态和节点设计的要求,将场地划分为3类竖向等级,具体分析如下。

3.3.1 主河道及浅滩带

该区域位于河底至10 a一遇洪水位线之间。当洪水流量不超过 $47.9\text{ m}^3/\text{s}$ (10 a一遇)时,外河道不会发生淹没。10 a一遇洪水水深在 $0.81\sim 2.97\text{ m}$ 。本区域包括浅滩、调蓄库塘及树岛等自然设施。其中K0+000~K5+200,河道将对现状顺直形态河道进行自然恢复或改造,增加河道蜿蜒性,扩大滩区面积。结合现有地形,增设湿地库塘,以减缓流速、促进淤积、调蓄洪水、防止河床抬升,从而缓解河流冲蚀问题。

3.3.2 缓坡带

该区域位于河道及浅滩至堤顶高程之间,拆除

现有浆砌石堤岸,形成软质河道边坡,坡比 $1:1.5\sim 1:6$ 。桩号K0+000~K2+400之间设置抛石护岸、柴捆护岸及活体树枝护岸,并结合固坡植被进行生态修复。K2+400~K5+805之间河段流速较慢,以布置自然缓坡护岸为主,在水流侵蚀较严重区域,局部采用活体树枝护岸加固。

3.3.3 堤顶道路及生态廊道带

现状为沿河道路和农田,设计后将形成河道两岸的堤顶道路以及生态廊道带,恢复乡土植物,提升生物多样性。河道北岸设置 3 m 和 2 m 宽的慢行道路,满足人行、骑行及紧急通行的需求;河道南岸设置 4.5 m 宽的车行道,以支持人行、骑行及车辆通行,必要时设置过河的桥梁。道路设计注重与河道景观的融合,贯穿于生态林带与观赏性农田之间,展现自然景观。生态林带以乡土乔木、经济林木及灌木为主,提供鸟类、小型哺乳动物等生物的栖息空间。

设计方案充分考虑防洪需求与生态环境平衡,力求通过自然修复和可持续工程措施,提升防洪能力与生态功能。

3.4 河道植物群落异质化设计

在植物群落配置上,也根据河段形态与水文特性进行异化设计,以提高河流栖息地质量及河道生态多样性。

上游箐口及自然形态恢复段:(1)对裸露区补植本土植物高山栎、淀青冈、旱冬瓜、山柳、马桑、狗牙根等;(2)将河道周边 50 m 范围植被盖度提高至 90% ;以防止水土流失、增强生境稳定性。

中游河道形态改造段:(1)河道内构建苦草、菹草、水蕴草、眼子菜等水草群落;(2)河道两岸 20 m 区域构建本土植物盖度为乔:灌:草 $=1:1:2$ 的隔离带,总盖度 $\geq 90\%$,植物种数 ≥ 8 ;以增强水体净化能力,提供物种良性生境。

下游入村庄及湖口段:(1)构建水体植物海花菜、芦苇、菖蒲、水葱、菹草等群落盖度 $\geq 70\%$;(2)两侧河岸 50 m 灌草盖度 $\geq 80\%$;(3)投放草食鱼类以提升河道及环湖生态走廊栖息地质量,增强生态功能。

以此营造生态景观,达到防洪能力建设的同时,有效改善沿河生态环境,提升阳溪休闲与游憩价值。

4 结 语

人类与河流之间是相互依存关系,河道整治与稳定是实现人河和谐共存关键^[16]。然而过去几十年,传统河道整治多以单一安全目标为导向,忽视河

流生态功能,使得河道生态遭受严重退化,已不符合当前生态文明建设要求。针对阳溪小流域生态问题,本研究基于低影响治理理念,以河道防洪能力建设和生态化治理为核心,同时开展沿河农田低污染水处理和生态景观建设,旨在实现阳溪小流域绿色低影响生态修复目标。

在阳溪生态治理过程中,结合项目特性和目标,优先选择生态性和景观性较强护岸方案,以植物、抛石、砾石河床等措施替代传统混凝土结构,不仅有效防止冲刷,稳定河床,还促进了水土自然交换。经过生态化治理,原本杂乱、接近荒废河道焕然一新,恢复后的自然生态状态,与苍山景色融为一体,生动展示了绿色低影响生态修复成果和魅力(见图5)。



(a)工程前状况 (b)工程后效果

图4 阳溪生态治理工程前后对比

阳溪小流域生态治理实践表明,通过采取绿色低影响生态修复理念和措施,尽可能采用曲线化、自然化岸线布局、采用更“柔”性护岸材料以及防护措施,可以在达到河道水系整治目的的同时,更多赋予一条河流生态功能,实现河流生态平衡和自然印象回归,并持之以恒加强管理和维护,确保治理效果长效性。这一实践为新时期小流域低影响生态治理提供有力示范与路径。

参考文献:

[1] ZHAI G, REN P, ZHANG R. *et al.* Evaluation of land ecological security and driving factors in the Lower Yellow River Flood Plain based on quality, structure and function[J]. Scientific Reports, 2025 (15): 2674.

[2] PASTINA S, PEETERS E T H M, DAUMAL M. *et al.* Patterns in Plant Species Diversity and Composition of a Restored Nature-Based

Solutions Floodplain. Aquatic conservation: marine and freshwater ecosystems[J]. 2024, 34(12): 70023.

[3] GOETHALS P, DE PAUW N. Development of a concept for integrated ecological river assessment in Flanders[J]. Belgium. Journal of Limnology, 2001, 60(S1): 7-16.

[4] Federal Agency for Nature Conservation. Federal Green Infrastructure Concept[Z]. Bonn: Federal Agency for Nature Conservation, 2022. https://www.bfn.de/sites/default/files/2022-02/bkgi_broschuere_englisch.pdf

[5] ROCIO M C, BEN S, RICHARD M, *et al.* Functional connectivity modelling and biodiversity Net Gain in England: Recommendations for practitioners[J]. Journal of Environmental Management, 2023 (328): 116857.

[6] Unite States Environmental Protection Agency. Case Studies Analyzing the Economic Benefits of Low Impact Development and Green Infrastructure Programs[Z]. Washington, DC: Unite States Environmental Protection Agency, 2015. https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-10/documents/lid-gi-programs_report_8-6-13_combined.pdf.

[7] FENG M Y, PAN L, C X M, *et al.* Understanding the Resilience of Soil Moisture Regimes[J]. Water Resources Research, 2019, 55 (9): 7541-7563.

[8] MEURK C D, SULLIVAN J, MCWILLIAM W. Vegetation Structure and Function at Multiple Spatial, Temporal and Conceptual Scales [M]. Berlin: Springer Nature, 2016.

[9] 中国国土勘测规划院. 中国生态保护红线蓝皮书(2023年)[M]. 北京: 中国大地出版社, 2023.

[10] 储昭升, 高思佳, 庞燕, 等. 洱海流域山水林田湖草各要素特征、存在问题及生态保护修复措施 [J]. 环境工程技术学报, 2019, 9(5): 507-514.

[11] 吴国宏. 河北省滦平县安纯沟小流域综合治理研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2018.

[12] TOLHURST T J, BLACK K S, SHAYLER S A, *et al.* Measuring the in situ erosion shear stress of intertidal sediments with the Cohesive Strength Meter (CSM)[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1999, 49(2): 281-294.

[13] 罗鑫. 城市水景生态驳岸设计研究[J]. 智能建筑与智慧城市, 2020, (1): 94-96.

[14] 徐后涛. 上海市中小河道生态健康评价体系构建及治理效果研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2016.

[15] 应强, 张幸农, 陈长英, 等. 河岸生态修复的主要方法[J]. 水利水电科技进展, 2006, 26(增刊1): 96-100.

[16] WU X L, FENG X M, FU B J, *et al.* Managing erosion and deposition to stabilize a silt-laden river[J]. Science of the Total Environment, 2023(881): 163444.