

山地城市河岸人工湿地系统设计研究

马念^{1,2}, 曾前松¹, 徐永新^{1,2}, 陈栋³, 刘恋¹, 韩璐¹

[1.林同棧国际工程咨询(中国)有限公司,重庆市401121;2.西开普大学自然科学学院地球科学系,南非开普敦;

3.重庆高新开发建设投资集团有限公司,重庆市401329]

摘要:为配合梁滩河上游河岸带修复,以解决山地城市的空间冲突和水环境、水安全及水生态等问题,尝试在河岸带建造人工湿地系统来辅助强化河流水质。设计适应山地城市空间场地约束和近远期城市需求变化,采用“反向设计”和“动态设计”因地制宜地确定设计参数,并对远期运行参数进行校核。湿地系统近期为河水旁路湿地,远期为海绵城市系统的末端雨水湿地。运行结果表明,旁路湿地能使劣V类河水稳定达到V类水水质,除TP外主要指标达到II~III类水质;经校核远期也能满足海绵城市系统雨水调蓄、净化需求。试点说明,河岸人工湿地系统对削减河流污染负荷特别是营养盐的输送具有显著的作用,并同时具有城市防洪、生态及景观过渡带功能,且具有可持续性。设计方法可为类似山地城市河流治理提供借鉴。

关键词:梁滩河;山地城市;城市河流;河岸带;人工湿地系统;海绵城市

中图分类号:X37

文献标志码:B

文章编号:1009-7716(2022)12-0133-06

0 引言

西南山地槽谷流域中的城市河流对水文条件、污染负荷等环境变化极为敏感。大规模城市化改变了流域的空间格局和流域水文特征,同时也带来水环境、水安全及水生态等方面的问题。山地城市土地较为稀缺,建设密度和开发强度大,河流水环境问题更突出。污水收集、处理系统和河流清淤疏浚等是削减污染负荷、保护城市水体水质主要的工程措施,因其投资大、建设周期长,污水收集率和处理率提高难、见效慢,往往需要采用一些辅助、应急的河流水质改善设施,且常采用一些近自然的工艺。人工湿地的去污机理和自然湿地完全一样,但通过人工辅助强化了其物理、化学、生物和微生物过程^[1-3],因其较高的污染负荷去除能力而被广泛用于污水处理、富营养化和微污染水的净化^[4-5],也普遍被用于净化不同条件下的污染河水^[6-9]。这些案例的应用场景和净化目标不同,运行参数差异较大,在山地城市流域的空间和水文、水质条件下怎么确定运行参数值得研究。虽然徐志强等对人工湿地用于汛期和非汛期交替处理初期雨水和高盐环境微污染河水进行了研究并取得较好的效果^[10],但大多数河岸人工湿地只具

有单一的河水净化功能,设施使用的可持续性是个问题,如何设计同时兼顾城市发展不同阶段的动态需求的、功能可以转换的人工湿地系统尚待探讨。在梁滩河上游配合河岸带修复,尝试通过建造人工湿地系统来辅助强化河流水质,并为适应未来城市发展需求,远期设计为海绵城市系统的末端雨水湿地。设计集成了净化功能单元和辅助单元,形成复合“人工湿地系统”;设计采用以场地条件为约束的“反向设计”方法,因地制宜选取设计参数;设计以“动态设计”为思路,设定了湿地系统近远期的不同功能和功能转换模式。试点工程表明人工湿地系统对污染河水净化和抗冲击负荷能力很强,参数也能满足远期海绵城市系统雨水调蓄、净化需求,系统具有可持续性。河岸人工湿地系统对削减河流污染负荷特别是营养盐的输送具有显著的作用,并同时具有城市防洪、生态及景观过渡带功能。

1 梁滩河流域及概况及水环境治理对策

1.1 梁滩河流域概况

重庆梁滩河是嘉陵江右岸一级支流,位于川东褶皱带缙云山和中梁山之间槽谷中,干流长度88.7 km,流域面积510.1 km²(见图1,a,b),具有典型的槽谷河流水系特征:一是水系结构呈“叶脉状”,发源于两山的支流流程短、坡降大,降雨时水流泥沙和污染物携带能力强,而位于槽谷中部的干流坡降缓、流速慢,泥沙及污染物易于淤积(见图1,c)。二是卡斯特地区

收稿日期:2022-03-04

作者简介:马念(1969—),男,硕士,教授级高级工程师,主要从事城市管网、城市水环境治理与生态修复设计和研究。

山地河流水文特征,旱季降雨少,流量小,主要靠地下水补给;雨季降雨量大,河水流量大;汛期易发山洪。三是河流形态蜿蜒曲折,河床下切较深,多跌水,大多数河段岸坡陡峭,河岸带较窄。

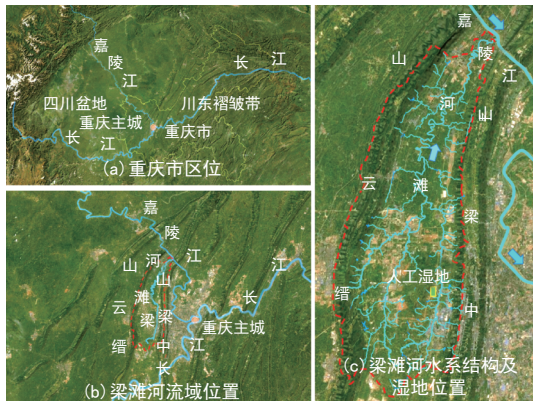


图1 槽谷中的城市及梁滩河水系格局

1.2 水环境风险和对策

近十几年来梁滩河流域迅速城市化,由于山地城市土地稀缺,建设密度和开发强度都极大,使水环境保护和生态修复面临极大挑战:一是城市水系格局变化、不透水下垫面增加、植被退化和水土流失改变了流域水文过程,加速河道的沉积与淤塞,导致河流生境退化和更大的洪涝风险;二是流域内不断增加的生活、生产用水量,加大了污水收集、处理系统的压力,流域水系统面临更大的污染负荷的威胁;三是河岸带被侵占,压缩了水陆过渡缓冲空间,增加了洪涝风险,降低生物多样性水平,使河流环境和生态系统更加敏感,抗冲击能力减弱。

为应对风险,水环境规划中提出了“污水收集和处理”、“清淤疏浚”、“海绵城市建设”等一系列的策略和工程措施,以控制城市点源、面源和内源污染,提升水系过流能力,缓解洪涝灾害。但这些措施一般会随着城市发展逐步实施,且管网覆盖率、污水收集率、处理率提高需要有一个过程,特别是城市空间复杂导致老城区环境设施改造难度极大,因此需要一些辅助性、过渡性的环境改善设施协同作用。为此提出在梁滩河流域进行试点,探讨利用山地河流独特的河岸带空间构建人工湿地系统来弥补城市污水系统收集、处理的不足,使河段水质尽快达到近期考核目标,并能同时兼顾近期河水强化净化功能和远期海绵城市建设的需要。

2 河岸人工湿地设计方法

2.1 试点区选择及场地条件

试点区位于梁滩河上游中段左岸高新区和沙坪

坝区交界处,位于“童善桥”考核断面上游,利于对实施效果进行监测。场地为河流蜿蜒段上不太好用的“边角地”,可用地面积约 120 000 m² (如图 1,c),高程 283.8~293.5 m,50 a 一遇洪水位约为 288.0 m。勘察资料显示,场地原为古河滩,后因河床变化逐渐被堆积抬高,近年又被大量弃土侵占。根据相关部门 2015—2017 年间 36 个月对梁滩河试点区段(童善桥)断面的监测数据(见图 2、图 3),梁滩河上游整体评价为劣 V 类水质,大多数时间 COD、BOD₅ 指标能到到 V 类水要求,而 NH₄⁺-N、TP 指标大多数时间是超标的。

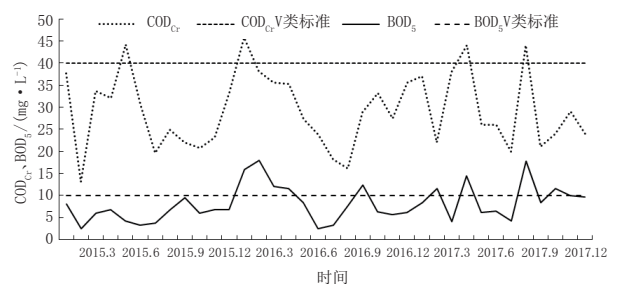


图2 2015~2017年梁滩河河段 COD_{Cr}、BOD₅ 监测值
(单位:mg/L)

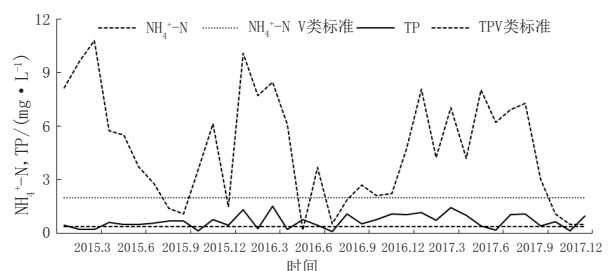


图3 2015~2017年梁滩河河段 NH₄⁺-N、TP 监测值
(单位:mg/L)

2.2 总体目标及设计思路

总体目标:(1)近期作为梁滩河旁路人工湿地以增强河水的净化与循环,使河水水质达到近期管控目标(地表 V 类);(2)远期作为“海绵城市”系统末端的调蓄、净化雨水湿地,将净化后雨水作为梁滩河环境流量(Environmental flow)的补充;(3)修复“城”与“河”的水陆过渡空间,兼顾“环境治理”和“生态修复”目标。

鉴于山地流域空间局促,制定了以“场地条件”为约束的“反向设计”原则:适应场地面积、尺寸、形状等约束,确定单元配置、工艺布置及设计参数;在约束之下,作为河流旁路湿地,具有尽量大的河水净化能力;作为雨水湿地,具有较大的雨水调蓄与净化能力。根据城市发展的需求变化进行“动态设计”:按近期河水湿地功能确定设计参数,按远期雨水调蓄

和净化功能进行参数复核,同时考虑近远期系统功能的转换。

2.3 旁路人工湿地参数设计方法

(1)工艺流程及单元参数

先按照常用工艺组合,确定其核心工艺为“沉砂塘+二级表面流湿地+三级水平潜流湿地+沉淀塘”,河水通过湿地净化后回到梁滩河。因场地不规则,工艺单元之间用一些水体作为辅助单元来进行水流、高程转换或水量分配,同时提供调节容积。工艺单元和辅助单元共同构成复杂的“人工湿地系统”。同时由于山地河岸场地局限,须按照场地大小和形状先确定工艺单元及布置,然后反算各单元几何参数,用几何参数计算工艺参数,并根据相关规范对工艺参数进行校核。

湿地系统布置和工艺流程如图4、图5。占地面积85 420 m²,其中工艺单元面积为53 600 m²,各单元几何参数见表1。山地河流水位涨落幅度很大,湿地系统主要净化单元要求不低于50 a一遇防洪标准,因此,旱季河水经泵站提升后才能进入系统。水泵流量420 m³/h,扬程18 m,功率30 kW,采用一体化泵站,这是旁路系统唯一的能耗单元。

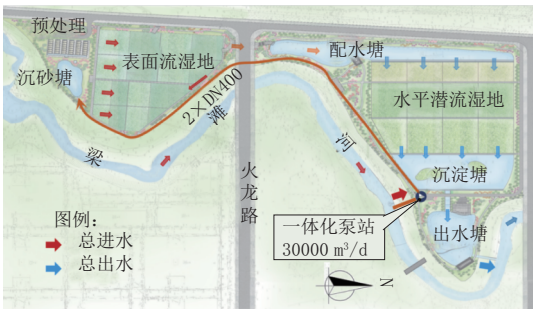


图4 人工湿地系统工艺流程布置图

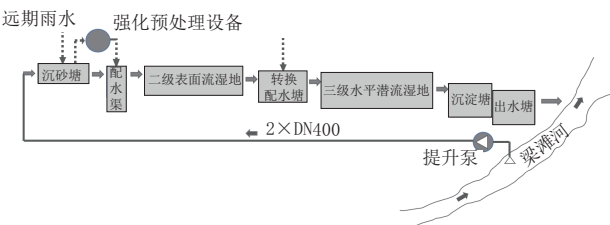


图5 梁滩河人工湿地系统净化工艺流程图

(2)设计水量

根据相关水文记录推算,梁滩河水质最差的枯水期日均流量为40 000 m³/d,最小流量为10 000 m³/d。进入湿地强化净化的水量应为河水流量的一部分以保证湿地取水口、出水口之间河道(约100 m)维持一定基本流量不至断流;同时净化后的水量和未经净化的河水混合后要达到近期达地表Ⅴ类水阶段性控制目标,计算确定人工湿地最大设计进水量为

表1 人工湿地系统各单元几何参数

单元名称	单元面积/m ²	设计水深/m	有效水容积/m ³
沉砂塘	1 000	1.5	15 000
表面流湿地	16 300	0.5	8 150
配水塘	5 700	1.5	8 550
水平潜流湿地	21 100	1.0	7 385
沉淀塘	6 000	1.5	9 000
出水塘	3 500	0.6	2 100
合计	53 600	—	50 185

注:水平潜流湿地深度是指填料高度,有效水容积按35%孔隙率计算。

30 000 m³/d(枯水期日均流量的75%)。实际运行水量根据河道水量、水质变化在10 000~30 000 m³/d之间调整。

(3)进出水水质

本设计根据梁滩河历年水质监测资料、文献值和现场复核值为依据确定进水水质,并重点关注NH₄⁺-N、TP指标。为此设计同时参考王晓峰等于2014年9月、12月和2015年3月、6月对梁滩河本河段表层水采样测定结果^[11]。而出水水质主要根据预定的水质目标确定,同时参照《人工湿地污水处理工程技术规范》(HJ 2005—2010)(以下简称“规范”)^[12]校核污染物去除率(表2)。

表2 人工湿地系统出水水质一览表

指标	BOD ₅	COD _{Cr}	SS	NH ₄ ⁺ -N	TP
进水水质	12	34	10	5.0	0.8
去除率/%	60	60	50	80	60
出水水质	4.8	13.6	5	1.0	0.32
目标水质	10	40	/	2.0	0.4

(4)设计负荷

设计水力负荷和有机负荷参考国内南方地区一些实际处理污染河湖水人工湿地案例中水力负荷取值^[5-6]。本设计按最大设计流量、湿地系统总面积为基础,按照“规范”中3.10的(3)式和3.9的(2)式分别计算,本湿地系统平均水力负荷为0.56 m³/(m²·d),比“规范”推荐值略大;平均BOD₅负荷为39.29 kg/(hm²·d),在“规范”值范围内。

(5)水力停留时间

“规范”推荐人工湿地工程水力停留时间(HRT)参数:表面流人工湿地4~8 d,水平潜流人工湿地1~3 d。实际案例由于环境差异和工艺组合不同,HRT差异很大^[3-6]。本系统各单元水力停留时间(按最大设计流量,其中潜流湿地孔隙率按35%),见表3。

2.4 雨水人工湿地参数校核

“海绵城市”控制目标一般为总量控制、峰值控

表 3 梁滩河人工湿地系统水力停留时间

单元名称	沉砂塘	表流湿地	配水塘	潜流湿地	沉淀塘	出水塘	总 HRT
HRT/h	1.20	6.52	6.84	5.91	7.2	1.68	29.35

制、污染控制和雨水资源化利用控制^[13]。梁滩河雨水人工湿地通过其调蓄、净化功能实现这些目标。由于雨水湿地是未来的功能,仅在设计目标下对系统参数进行校核。一是调蓄容积,系统调蓄容积为 50 185 m³,由前端调蓄(沉砂塘、表面流湿地等)、中段调蓄(配水塘、潜流湿地等)和后端调蓄(沉淀塘、出水塘等)组成。二是净化处理流量,取决于净化周期,这跟降雨周期、降雨特征和雨水利用的规律有一定关系,因此在最大处理能力内是可变的。三是雨水水质,对重庆市类似新开发区不同采样点降雨水径流监测结果表明,雨水水质变化随机性非常大^[14]。根据上述监测水质及相关文献中雨水调蓄池污染物质浓度^[15]拟定了梁滩河人工湿地系统净化雨水进水水质参考指标,COD 为 80 mg/L,BOD₅ 为 20 mg/L(雨水 BOD₅ 按 0.25 COD_{Cr}^[16-17]),NH₄⁺-N 为 3.0 mg/L,TP 为 0.25 mg/L。预测湿地系统可适应这个进水水质。因为兼具水质净化和资源利用的目标,在具体场次降雨中可根据实际情况确定接纳水量或弃流量并调节水质,而实际水力负荷、有机负荷、停留时间等可随调蓄容积和净化周期进行调节,还可采用智能化系统进行管控。

2.5 湿地填料和功能植物

人工湿地通过湿地基质的选择和植物配置对去污机制进行强化。主要利用介质对污染水的过滤、沉淀、吸收吸附等物理作用和其中多种微生物在厌氧、缺氧、好氧复杂条件下对污染物的消化降解作用来净化污染水^[3]。关于湿地植物的作用,一般认为维管束植物的根对水中可利用态的营养物质、吸附和富集重金属及一些有毒有害物质可直接吸收利用,还可改善基质孔隙率以增强水力传输,并为根区好氧微生物输送氧气^[3-4];植物腐殖质和根分泌物还可以增加系统碳源利于反硝化脱氮^[4]。本人工湿地系统设计表流湿地分 2 级、4 个平行单元;水平潜流湿地分 3 级、4 个平行单元,填料及植物配置如表 4。

2.6 配集水系统

本设计配、集水系统的调节目标:使水流在介质中均匀分布;根据植物、微生物生长过程及其对基质渗透系数的影响,调整水位和浸润线,使湿地系统在多种工况下运行;为便于系统维护操作,每个单元(或每一纵列)进出水最好能够单独管控。

表 4 人工湿地主要净化单元基质和植物配置

湿地单元	表面流湿地	潜流第一级	潜流第二级	潜流第三级
基质类型 / 厚度 /mm	种植 /450+ 碎石 /150	沸石 /1000	沸石 /1000	陶粒 /1000
粒径 /mm	碎石 20~30	8~15	8~15	8~15
密度 / (g·cm ⁻³)		>1.4	>1.4	>1.2
植物配置	再力花 + 旱伞草	水生美人蕉	旱伞草	黄花鸢尾

2.7 生态修复与景观设计

河岸带是水生生态系统与陆地生态系统进行物质循环、能量流动、信息传递的一个重要过渡带,生境异质性使得生物多样性的水平高^[18]。借鉴一些成功的修复理念^[19],以人工湿地系统为核心对河岸带生态系统结构、功能和系统自我维持能力进行修复,其中包括:移除弃土,对地形进行重塑;改善植被结构,为水生、陆生动物及两栖类动物营造良好生境;用乡土种植物替代场地原有的大量的空心莲子草等外来物种,减少今后人工干预工作量以实现自我维持。

景观设计包括:通过场地高程梳理,湿地辅助单元进行空间转换,配合植物搭配、形态设计营造多层次、多功能的滨水空间,实现湿地系统内部单元之间及湿地系统与城市和河流之间自然过渡和衔接;生态美学设计也是“自然再生”设计的重要内容^[19],遵循生态化、景观化、本地化原则进行植被搭配;为体现生态系统服务价值,湿地周边、沿河及人工湿地单元内部设置步道、栈道使湿地系统开放、可进入,可开展游览和科普宣教等活动。

3 湿地系统实施效果及讨论

3.1 人工湿地设计参数汇总

人工湿地系统的设计参数汇总如表 5。

3.2 旁路湿地水质净化效果及分析

对旁路湿地运行近 3 a(29 个月)运行数据(见表 6、图 6 至图 8)进行分析可以看出:(1)湿地出水总体优于 V 类并趋于稳定,除 TP 外的其余指标可达地表水 II~III 类标准,对保证湿地下游童善桥监控断面总体达 V 类水质起了重要作用;(2)湿地出水水质随河水水质波动,但系统具有显著的缓冲作用;(3)流域其他治理措施使河水水质正在逐步改善,人工湿地系统为河流提供了更大的环境容量,也为系统功能转换准备了条件。

跟参考案例和“规范”值比起来,本项目设计负

表5 人工湿地系统工艺参数

项目	设计水量 /(m ³ ·d ⁻¹)	设计水质/(mg·L ⁻¹)				水力负荷/ [m ³ ·(m ² ·d) ⁻¹]	有机负荷/ [kg·(hm ² ·d) ⁻¹]	水力停留 时间/h
		指标	进水	出水	去除率			
参数值	10 000~30 000	BOD ₅	12	4.8	60%	0.56(总面积平均)	39.29(总面积平均)	29.35(总)
		COD _{Cr}	34	13.6	60%			
		SS	10	5	50%			
		NH ₄ ⁺ -N	5.1	1.0	80%			
		TP	0.8	0.32	60%			
参考值	案例					0.01~0.62	4~60	18.1h~7d
	规范					<0.01(表) <0.5(平潜)	15~50(表) 80~120(平潜)	4~8 d(表) 1~3 d(平潜)

表6 2019年6月~2021年10月人工湿地系统监测总平均值

项目	COD _{Cr}	高锰酸盐指数	NH ₄ ⁺ -N	TP
平均进水浓度/(mg·L ⁻¹)	34.59	6.46	2.16	0.61
平均出水浓度/(mg·L ⁻¹)	19.35	3.54	0.10	0.37
去除率	44.0%	45.1%	95.5%	39.6%

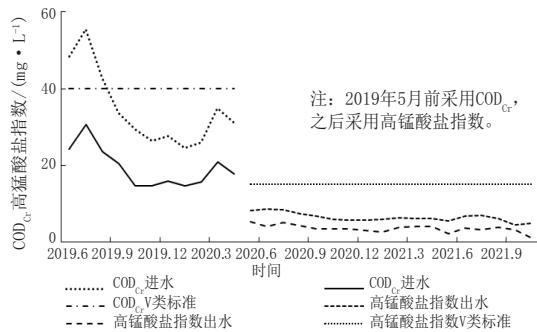


图6 湿地系统进出水COD_{Cr}、高锰酸盐指数监测值(2019年6月至2021年10月平均值)(单位:mg/L)

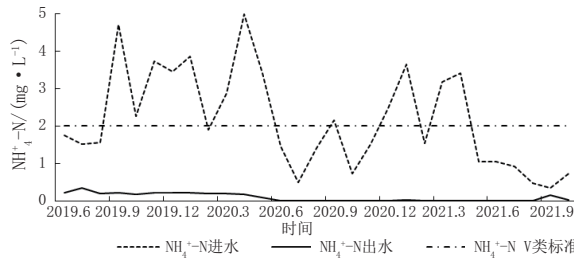


图7 湿地系统进出水NH₄⁺-N监测值(2019年6至2021年10月平均值)(单位:mg/L)

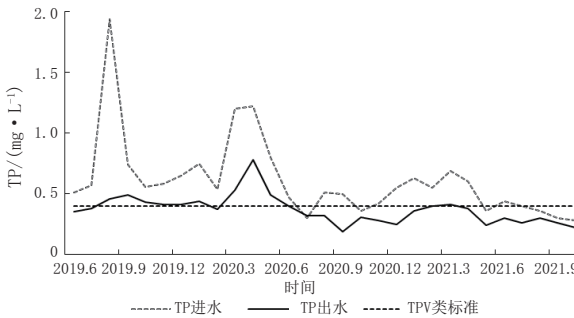


图8 湿地系统进出水TP监测值(2019年6月至2021年10月平均值)(单位:mg/L)

荷都偏高,而总停留时间较短,但完全达到了设计预期效果,说明本设计参数选择也是较为合适的。除了

各自的环境条件和工艺组合的差异,还可能是由于:(1)复杂系统的净化单元与辅助单元协同作用,湿地系统对进水水质、水量的缓冲、调节能力很强;(2)系统流速较低,各种介质(包括填料、植物及其它介质)表面积大,使系统可以“捕获”污染物质后逐步加以降解^[4];(3)系统中较为复杂的水流流态、溶解氧条件、日照等环境下,辅助单元同样发挥了很强的净化作用;(4)极端条件下,预处理设施的辅助强化使净化能力得到提升,提供了一定的抗冲击能力。

3.3 雨水人工湿地系统与城市雨水系统适应性

除了参数要合适,排水体制对雨水人工湿地影响也很大。雨污分流制更适合采用人工水质净化的方式将城市雨水管网中的雨水进行就近净化消纳^[20],因此利于城市雨水资源的再生与再用。梁滩河流域新区采用雨污分流制,老旧城区的雨污分流改造成为雨水利用的关键,包括收集、输送管网、泵站等湿地的“外部系统”。另外,人工湿地用作雨水湿地时人工湿地系统需进行一些调整、转换。可能包括预处理设施和湿地各单元配水系统,以适应雨量随机性而采用不同运行工艺参数的要求,兼顾水量调蓄与净化效果。

3.4 人工湿地系统对流域治理的作用

(1)对流域环境治理的作用

河流是点源和面源污染物的重要接纳体和汇流通道,是河流下游湖、库乃至整个流域营养物质传输的重要途径^[11]。据测算,本湿地系统每年可减少约22.6 t NH₄⁺-N和2.6 t TP向下游输送,这不但对探索梁滩河流域环境治理有很大帮助,也为改善嘉陵江干流及长江三峡库区的水体质量提供了一种解决方案。

(2)防灾减灾效果

以人工湿地湿地系统为核心的梁滩河河岸带生

态修复,能有效控制河岸的冲蚀,减少水土流失和河道的淤塞。汛期人工湿地系统部分单元可被淹没,“平时是公园、汛期是泄洪通道”,保证了河流的行洪能力,使河岸带成为城市与河流之间的防洪安全屏障。

(3) 修复自然生态格局

作为河岸带修复工程中的核心内容之一,人工湿地系统强化了河岸带的水质净化等功能。随着植被恢复形成了结构较为复杂的水陆交错系统,提高了场地生境异质性,为河岸带生物多样性保育奠定了基础。工程完工一年后,在没有人工干预的情况下,鲫鱼、餐条鱼、泥鳅等梁滩河流域本土鱼种通过进水系统、洪水淹没和湿地尾水溯流进入湿地水系并被观测到,湿地系统和河流生态系统正在“融合”。景观打造扩充了城市功能,为市民提供了良好休憩空间、同时成为满足湿地科普教育功能的“网红打卡点”。通过河岸带的过渡实现城市与自然的和谐相生,缓解了城市化造成的“城”与“河”的矛盾,保护了槽谷地带“山、水、林、田、湖、城”景观格局。

4 结 语

通过人工湿地系统辅助河岸带修复项目试点,结果表明:

(1) 梁滩河人工湿地系统在改善河流水质方面效果显著,能一定程度上弥补城市污水收集、处理设施的不足,用于山地河流水质净化抗冲击能力很强,可对梁滩河流域水环境治理和保护嘉陵江、三峡库区水环境和水生态发挥重要作用,值得在流域内进行推广。

(2) 梁滩河人工湿地系统兼顾城市近远期不同的功能需求,可确保城市环境基础设施可持续利用。

(3) 湿地系统的设计充分适应山地城市空间和流域水文特点采取“反向设计”和“动态设计”方法,兼顾河流环境治理、生态系统修复、雨水资源利用、防洪安全、生态修复和景观等多个目标,同时取得了环保效益、生态效益及社会效益,可以为类似的流

域治理提供借鉴。

参考文献:

- [1] 陆健健,何文珊,童春富,等.湿地生态学[M].北京:高等教育出版社,2006.
- [2] 李军.水质控制生态工程[M].北京:化学工业出版社,2018.
- [3] 汪俊三.植物碎石床人工湿地污水处理技术和我的工程案例[M].北京:中国环境科学出版社,2009.
- [4] EPA/625/R-99/010, Manual: Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters, [S].
- [5] 汪俊三,覃环.植物碎石床人工湿地处理富营养化水和微污染水体实验研究[M].北京:中国环境科学出版社,2009.
- [6] 钟林,郑蕾,丁爱中,等.人工湿地在我国污染河水治理中的应用及去除效果统计分析[J].北京师范大学学报(自然科学版),2012,48(1):66-73.
- [7] 熊家晴,杜晨,郑于聪,等.污染河水人工湿地生态净化工程设计[J].中国给水排水,2014,30(24):89-92.
- [8] 陈思莉,易皓,魏清伟,等.河道旁路人工湿地处理系统设计实例[J].中国给水排水,2015,31(24):56-59.
- [9] 满丽.洮水河滩人工湿地水质净化工程设计[J].中国给水排水,2017,33(14):66-69.
- [10] 徐志强,秦忠强,杜浩为,等.人工湿地处理滨海盐碱地区初期雨水和微污染河水[J].中国给水排水,2016,32(13):6-9.
- [11] 王晓锋,袁兴中,刘红,等.三峡库区梁滩河水体营养盐时空分布及输出风险[J].三峡生态环境监测,2017,2(1):21-27.
- [12] HJ 2005—2010,人工湿地污水处理工程技术规范[S].
- [13] 刘然彬,赵亚乾,沈澄,等.人工湿地在“海绵城市”建设中的作用[J].中国给水排水,2016,32(24):49-53,58.
- [14] 蒋荣廷.重庆市悦来新城典型下垫面雨水径流水质特性的初步研究[D].重庆:重庆大学,2017.
- [15] 王超维,刘臻,任鑫森,等.人工湿地系统处理初期雨水在浦东科技园区的应用[J].中国科技信息,2021(5):72-75.
- [16] 莫文锐,田森林,黄建洪,等.百年一遇大旱后城区降雨径流污染时空差异与可生化性[J].地球与环境,2012,40(2):227-231.
- [17] 林原.雨水水质变化分析及可处理性研究[D].西安:西安建筑科技大学,2011.
- [18] 董哲仁.河流形态多样性与生物群落多样性[J].水力学报,2003(11):1-6.
- [19] 龟山章,仓木宣,日置佳之.自然再生:生态工程学研究法[M].北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [20] 吴丹子,李鑫,张文杰,等.管网雨水补给河道用水的人工湿地水质净化流程研究[J].风景园林,2019,26(12):91-96.