

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.01.024

关于新时代流域水环境治理技术体系的思考

迟国梁

(中交广州航道局有限公司,广东 广州 510320)

摘要:针对当前我国流域水环境治理过程中存在的综合治理逻辑不清、治理单元划分不科学、治理单元技术方案匹配性低和治理单元之间的衔接不足4个弊端,提出了以“治理效果持久化、治理成本经济化、治理体系全局化”的理念作为新时代流域水环境治理技术体系的核心理念,以“系统性诊断、区块化分解、匹配性施治、最优化成效”的治水“四步法”作为新时代流域水环境治理方法,并从源头控制、过程阻断、末端治理的空间维度和污染治理、生态修复的时间维度,分类列举了相应的治理技术子体系,并提出了专项领域的流域水环境治理技术体系。

关键词:流域;水环境治理;技术体系;新时代

中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2022)01-0182-08

Thoughts on water environmental management technology system in watersheds in the new era // CHI Guoliang
(CCCC Guangzhou Dredging Co., Ltd., Guangzhou 510320, China)

Abstract: Aimed at the four problems in the process of water environmental management in watersheds in China, namely ambiguous logic of comprehensive management, unscientific differentiation for management units, mismatch between technical solutions and management units and insufficient connection among management units, the leading concepts of water environmental management in watersheds in the new era is proposed, namely “lasting management effect”, “economic management cost” and “global management system”; four steps of water management method in watersheds in the new era is put forward, including “systematic diagnosis”, “block decomposition”, “matching treatment” and “optimal effect”. The corresponding technology subsystems are classified into source control, process blocking and end governance according to the spatial dimensions, and pollution control and ecological remediation according to the temporal dimensions. The technology system of water environmental management in watershed in the special field is also proposed.

Key words: watershed; water environmental management; technology system; new era

21世纪以来,伴随着城镇化进程,我国水环境整治力度不断加强。2015年4月,国务院颁发了《水污染防治行动计划》(以下简称“水十条”)。“十三五”时期是治水的关键5年,治水主题是地级及以上城市建成区黑臭水体均控制在10%以内,治理重点范围为地级及以上城市建成区的流域或大流域下游的城市建成区段。“十三五”时期我国开展了大量卓有成效的水环境整治,城市污水处理产能及配套管网建设与改造取得长足发展,城市的污水处理率也达到较高水平,用于城镇污染物控源减排和稳定达标的成套技术、产品和设备不断涌现,并逐渐走向集成化、系统化。流域水环境治理从“污水治理、截污纳管”的单一模式向“源头削减、过

程控制、系统治理”全过程协同新模式转变。

随着“水十条”的推进,“十四五”时期流域水环境治理进入第二个5年发展期,地级及以上城市建成区城市水体面临进一步提质增效的治理需求。“十四五”时期也是乡村振兴国家战略推出后的第一个5年,农村水环境治理和改善是重要内容之一。考虑治水工作的延续性和时代需要,“十四五”时期治水主题应为城市建成区水系的水质再提升和广大农村地区的流域上游水环境治理,相比“十三五”时期,治水要求更高、范围更广、难度更大。目前,我国的流域水环境综合整治工作已取得阶段性成果,出现了很多治理模式和成功案例^[1-2],技术体系也不断发展和完善^[3],但仍存在理念和体系建设上的短

基金项目:中国交建科技研发项目(2019-ZJKJ-01)

作者简介:迟国梁(1978—),男,正高级工程师,博士,主要从事流域水环境治理研究。E-mail: 187113477@qq.com

板,如何在“十四五”时期乃至更长的一段时间内科学治水,建设适应新时代发展要求的流域水环境治理技术体系已经提上日程。本文基于当前流域水环境治理的弊端分析,探讨新时代流域水环境治理的理念、方法和技术体系建设,旨在为构建新时代流域水环境治理技术体系提供参考。

1 当前流域水环境治理的弊端

流域内的水循环结构已经整体实现从一元自然水循环到“自然-社会”二元水循环的转化,水循环演变过程中的结构属性和功能属性都发生了变化,以此为基础的治理措施和管理措施也发生了相应变化^[4-6]。

对流域而言,不管是静态的湖库还是动态的江河,都是一个巨大的水生态系统。当这个水生态系统出现污染时,系统结构和功能的完整性均会遭到破坏,甚至会丧失系统自净能力,需要采用系统的治理理念和治理方法,不能“千水一面”,应该是“一水一策”。这里所说的“一策”不是一个简单的治理措施,而是一套符合水情、行之有效的治理措施,需要用系统思维进行设计。

从治理理念和操作层面上看,当前流域水环境治理实践中仍存在以下4个弊端:

a. 未遵循流域水循环理论,综合施治的逻辑不清。健康的流域应以水循环为纽带驱动水沙、水盐、水生态等物质和能量的循环,以维持流域水生态环境的系统平衡^[7]。在流域治理的工程实际操作过程中,缺少流域层面的科学统筹,治水往往就水论水,例如向受酸性矿山废水污染的流域投放生石灰,向磷含量高的流域投放锁磷剂,这些措施属于典型的“头痛医头、脚痛医脚”,没有真正做到干支流、上下游、水陆和城乡一体化治理。除了技术设计本身的问题外,行政区划设置与流域治理单元不吻合的现状及行政多头管理也是重要原因。

b. 未遵循“木桶”理论,对治理单元划分不科学。对于流域的治理单元,其污染负荷的来源和数量、污染治理边界条件以及水文条件等因素都不尽相同,因此需要根据综合要素将流域分解成若干小流域,形成多个基本计算单元,这有利于促进流域综合治理方案确定的针对性和操作性,提升流域治理的网格化、精细化程度^[7-8]。然而在现实中,缺乏对系统问题的全面掌握,很难找准每个治理单元的“短板”所在,而每个单元的“短板”治理措施往往左右整个流域治理的成败,因此好的技术设计必须首先通过系统污染综合性诊断过程合理划分治理单元,并找到问题短板,而现实的解决方案往往是简单

地按照行政区划和属地管理的原则划分治理单元,缺失了系统污染诊断的过程。

c. 未遵循差异化理论,没有对划分出的流域治理单元进行匹配性的技术方案设计。每个治理单元的差异化导致采用的治理技术方案也应有所差异,例如流域相邻的两个治理单元,坡降大的应采取多级堰坝、多级跌水的措施以实现自然增氧,坡降小的应根据污染程度的大小采取微纳米曝气或鼓风曝气等相应措施以实现人工增氧。而现实的解决方案往往千篇一律,工程实施过程中频繁调整设计的事情时有发生,没有真正做到精准的“一水一策”。

d. 未遵循系统均衡理论,没有跳出单元统揽全局。好的技术方案应该与治理工程实施高度契合,在流域化统筹的基础上进行区块化治理,再通过区块化治理过程中的不断优化倒推流域化统筹的合理性,通过各处理单元间的污染物产消平衡,保持每个单元边际成本和效益均衡,最终实现治理的总成本最小、总效益最大^[7,9]。而现实的解决方案往往忽视各个治理单元之间的内在联系,治理措施缺乏连续性,造成治理成本增加而治理效果没有明显提升的局面时有发生。例如,当流域上游治理单元在重点污染源截污前后或得到有效治理前后导致下游水质发生了明显变化,下游治理单元采取的技术措施仍一成不变,或者增加了处理措施反而治理效果有所下降或者未采取保持水质持续改善的更经济有效的措施。

2 新时代流域水环境治理的理念与方法

2.1 新时代流域水环境治理理念

唐克旺^[10]认为治水新方向的核心是水天平的再平衡,即由历史上的过度倾斜社会经济端向自然生态端再平衡,实现“人与自然和谐共生”。新时代的治水是系统综合的,涉及的利益复杂多样,因此所运用的理论应更加丰富,是一种跨学科综合集成的理论体系。

当代的流域水环境治理顶层模式设计已经从传统的水资源单要素跨越到了水资源、水环境、水生态、水安全、水文化等综合要素^[10],从单一水体的定点定时治理延伸至流域全过程、全周期防控,与之匹配的治理措施应贯穿由流域大尺度的宏观调控到支流的中观管治再到末端点源的微观整治整个全程,同时兼顾流域生态系统不同阶段污染状态下的治理技术匹配性。基于流域社会经济与自然条件特点的差异,应构建规范化的适用技术清单,建立兼顾技术效果、经济成本、可靠性与灵活性等多目标的技术综合治理体系^[11]。因此,应以“治理效果持久化、治理

成本经济化、治理体系全局化”的“三化”理念作为未来较长时间内流域水环境治理技术体系的核心理念。当前,流域水环境治理进入了“大保护”的新时代,此处的“新时代”不是简单的时间概念,而是治理理念的跨越。新时代的流域水环境治理应充分纠正当前水环境治理认识上的4个弊端,以“流域化统筹、区块化管治”为战略统筹,处理好整体与局部、规划与实施之间的关系,以“化整为段,分段治理,先次后主,以水治水”(自下而上,以干流、支流、毛细管流的水文特征为要素划分治理单元,边界间进行隔断,先治支流,后治干流,治理到适宜时段打通隔断,恢复连通,重塑水动力,强化自然调控之势,弱化人为治理之力,以治理后的“小水”围“攻”未治理好的“大水”,实现“以水治水”的目的)的治水新思路为战术措施,强化自然调控之势,弱化人为治理之力,全面提升全流域治理在理念、战略和战术3个层面的高度。

2.2 新时代流域水环境治理方法

按照前述当前流域水环境治理的4个弊端,以新时代流域水环境治理的“三化”理念为指导,针对性地采用系统性诊断、区块化分解、匹配性施治和最优化成效的治水“四步法”进行施工技术指导和组织实施。

a. 系统性诊断。系统性诊断除了防洪排涝、水资源、水环境等各类规划研判,与上位相关规划的衔接分析以及流域水文资料、污染源溯源调查等常规工作之外,还应加强流域水生态系统健康评估分析,尤其是水生生物存量变化分析。水生生物的存量变化决定了流域水生态系统的功能完整性,恢复流域生态功能是治水的终极目标。目前,大流域的治理规划中很少涉及此类调查分析。水利部自2010年起组织开展全国重要河湖健康评估试点工作,通过10年的研究探索与实践检验,中国水利水电科学研究院作为负责单位,于2020年6月编制完成了SL/T 793—2020《河湖健康评估技术导则》,同年9月发布,对全国7大流域36个重点河(湖、库)开展了健康评估,形成了河湖健康评估报告,此项工作应尽快在其他流域推广,应考虑将流域的水生态系统健康评估纳入系统性诊断系统。

b. 区块化分解。区块化分解是指在流域化统筹(即干支流、上下游、水陆和城乡一体化治理)的基础上依据流域空间地理单元、污染特征及治理需求进行分片分区治理。为分解落实“水十条”水质目标,生态环境部公布了“十三五”期间343个水质需改善的国控单元信息^[12],并建立了流域-水生态控制区-水环境控制单元三级水生态环境分区管理

体系,逐一明确了1784个控制单元的地理范围和1940个考核断面的水环境目标,首次形成了覆盖全国范围流域的水生态控制区^[9],这一清单可作为以水质改善为目标划分流域治理单元的重要依据。如目标不同,划分治理单元的依据和结果也不同,如以太湖、巢湖和滇池三大湖泊的蓝藻治理为目标,则应综合考虑流域内源头控磷和主湖体蓝藻打捞两个因素,按照相对封闭局域湖体—湖岸线—湖心的先后顺序分片区打捞蓝藻^[13-15]。

c. 匹配性施治。针对性施治是指针对不同处理单元的地形地貌、水文情势、水质现状与目标、治理周期和资金安排5个要素制定技术组合方案,每项技术还要考虑工程实施中对应工艺工法的优化调整,力求做到技术门类少而精,工艺设计多而细。例如对于排污口处理技术,当排放的污染物含工业废水时,可采用多级围堰内的复合微生物降解工艺;当排放的污染物为生活污水时,如河道行洪要求不高,可采用在河道一侧构建迂回式生态砾石床和强势植物净化组合的处理工艺。

d. 最优化成效。最优化成效是指逐次研判同系列相邻处理单元、同系列所有处理单元、不同系列相邻处理单元和所有系列处理单元之间在相应技术实施后是否可以实现每个单元污染物的产生和削减相平衡。如果做不到,则可将其与相邻的2个或3个单元联防联控或调整技术设计,最大限度地保障每个单元的边际成本和边际效益相对均衡以实现最大限度地节省成本。单元污染物负荷平衡,即每个单元的污染物增量与污染物存量负荷之和要小于该单元降解污染物的能力。通过最优化成效分析可以最大程度地让每个单元对污染物降解作出贡献,整个流域系统就能持续降低污染物负荷,从而逐渐实现流域的水环境治理目标^[9]。

3 新时代流域水环境治理技术的体系建设

新时代的流域水环境治理技术体系建设首先需要充分总结和借鉴消化国内外已经形成并经过工程推广应用的治水理念、单项技术及工艺工法^[16-17],在这个基础上再结合我国的水情演变趋势、各地发展需求提炼和优化各项技术,最终形成全新的技术体系。

从水污染全过程防控角度看,治污技术分源头减排、过程阻断、末端治理3个方面。一般意义上讲源头减排是指通过污染溯源,确定污染物种类及产污排污规律,科学制定排污标准,同时推动清洁生产技术和工艺的使用,调整产业结构和产品结构;过程阻断则强调对社会水循环中工业、农业、生活等各类用户用水后排水造成的污染,在经由社会水循环流

至自然水循环的迁移转化路径上进行层层阻断^[9]、源头减排和过程阻断主要是对陆域污染的控制,末端治理则是主要针对水域污染的治理,通过源头减排、过程阻断、末端治理完成对流域污染的水陆一体化治理。

河流四维模型强调从纵向(河流上游一下游)、横向(河流洪泛区—高地边缘过渡带)、竖向(河床—基底)和时间尺度(三维方向的时间变化)研究流域尺度的河流生态修复^[18]。本文借鉴河流四维理论,结合上述水污染全过程防控的理念,按照流域空间结构和时间结构双要素划分流域水环境治理技术体系。“源头”对流域而言主要是流域集雨范围内的边界区域和流域上游污染点源区域;“过程”是源头区域到流域水域蓝线之间的地带;“末端”是流域蓝线区域。流域生态系统从崩溃状态到健康状态的转化一般要经历污染治理和生态修复两个过程,即系统从崩溃状态到自净能力恢复的污染治理期和系统自净能力恢复到系统自我良性运转的生态修复期。前者需要人为正向干扰,后者一般不需要人为正向干扰,当进行正向干扰时,进程会加快。两个时期的分界点就是系统自净能力与系统内各类污染物污染总负荷之间的动态平衡时间点,因流域特征、治理有效性的不同而不同,因此判断流域生态系统处在污染治理期还是生态修复期主要看系统自净能力与系统内污染物污染总负荷的大小关系。流域生态系统自净能力可通过水体自净系数即有机物降解系数来表征,有机物降解系数可通过实测法、试验测定法和类比法^[19]以及更为精准的纳污河道自净容量的计算公式^[20]求得。

本文按照源头控制、过程阻断和末端治理的流域治理空间维度和污染治理、生态修复的流域治理时间维度两个维度,将当下最新的水环境治理技术划分为6个子体系,每个子体系都有其实施边界。下面以河流为代表的动态系统和以湖泊为代表的静态系统为例,按照上述的时空维度分类列举流域水环境治理技术体系,并对其共性技术进行比选,筛选出简单有效的核心技术组合。

3.1 河流水环境治理技术体系

以河流为代表的动态水域生态系统在遭到污染破坏时,可以快速自我修复,系统对污染阻抗的阈值边界宽。当超出系统自我修复阈值时,系统会发生自崩溃,此时的系统治理必须借助外力,应采用物理、化学、生物三者联合的强化处理措施进行污染治理;在系统自我修复阈值内时,应采用以生物、生态为主要手段的长效休养措施进行生态修复。表1和表2为通用的河流水环境治理技术分类。在技术实

施过程中,因水质改善存在一定的滞后性,这两个过程的切换很难准确而及时地把握,加之有些技术如曝气、微生物等措施兼具污染治理和生态修复的功

效,因此,河流污染治理技术体系与生态修复技术体系存在共性技术。

表 1 河流污染治理期水环境治理技术体系
Table 1 Technology system of water environmental management in the period of river pollution control

空间分类	技术体系
源头控制	农作物种植结构调整、畜禽养殖调整或关停、生活垃圾中转站建设、生态农业建设、入户式小型污水处理+片式污水一体化处理+集群式污水一体化处理、生活/工业污水处理厂提标改造+污染企业入园集聚+清洁生产+中水回用、截污纳管、分散式处理、点源排污口物化处理、海绵城市技术(生态草沟、卵石沟)、缓冲带、滚水坝等
过程阻断	截污纳管、截洪沟、生态护岸(常规生态护岸、塑钢板桩护岸、高陡坡绿植护岸等)、蓄水台阶、缓冲带、前置库、海绵城市技术(临河生态草沟、卵石沟、雨洪收集利用组合技术等)、灌溉-排水-湿地农田管理技术、农业面源阻断技术等
末端治理	内源清淤、分散式处理、点源排污口归并+强化处理、引水稀释、物理曝气(超微曝气、微纳米曝气等)、物理除藻、化学除藻、投撒生物菌剂、自然湿地、人工/自然水草、生态浮床、原位净化(底泥原位削减+移位利用、固载微生物等)、滚水坝、气盾坝等

表 2 河流生态修复期水环境治理技术体系
Table 2 Technology system of water environmental management in the period of river ecological restoration

空间分类	技术体系
源头控制	农作物种植结构和畜禽养殖结构调整、农村生活污水和垃圾收集系统完善、工业废水减排提质、截污纳管优化、点源排污口生态处理、缓冲带、人工湿地、海绵城市技术(生态草沟、卵石沟)、生态型沟渠、自然滚水堰坝等
过程阻断	截污纳管优化、沿河缓冲带/生态型沟渠(农村河流)、新型生态护岸、河道旁路缓冲系统+自然/人工湿地、海绵城市技术、灌溉-排水-湿地农田管理系统等
末端治理	水系连通、河道主路“点治”系统(点源排污口生态处理)、河道河床底面自然塑形系统、底质改良、湿生植物种植配置、生态浮床、稳定塘、滚水坝、气盾坝、河道平面蜿蜒形态设计(凸凹岸设计)、生态河道纵断面形态设计(深潭-浅滩结构设计、缓坡式W形滚水坝设计、J形坝和S形坝等自然滚水堰坝与江心洲设计等)、生态河道横断面形态设计(复式断面设计、不规则断面设计等)、河道栖息地设计(生态丁坝和潜坝设计、掩蔽物设计、砾石群设计等)

3.2 湖泊水环境治理技术体系

依据荷兰瓦赫宁根大学 van Nes 等^[21]提出的浅层湖泊交替态循环转换理论,对以湖泊为代表的静态水域生态系统,当系统的外在驱动力(外源营养盐输入、湖滨带破坏、人为干扰、生态链条缺环等)超过内在恢复力(外源营养盐输出、湖滨带植被稳定、生态系统结构和功能完整等)时,系统会“灾变”,由清水态向浊水态转变;反之,系统会“恢复”,

由浊水态向清水态转变。表3为湖泊生态系统由浊水态向清水态转变的系统重建技术体系。

表3 湖泊生态系统重建技术体系

Table 3 Technology system of lake ecosystem reconstruction

空间分类	技术体系
源头控制	入湖支流集雨范围内工业企业集聚+清洁生产+中水回用、农作物种植结构调整、控制农药化肥施用量、禁止含磷洗涤剂使用、设置畜禽禁养区、严控围湖造田、围网养殖、入湖支流截污纳管、分散式处理、点源排污口生态处理、人工湿地、海绵城市技术(生态草沟、卵石沟)、缓冲带、滚水坝等
过程阻断	沿湖截污纳管、沿湖截洪沟/生态型沟渠建设、沿湖植被带、新型生态护岸、人工湿地、海绵城市技术、灌溉-排水-湿地农田管理技术、农业面源阻断技术等
末端治理	内源清淤、多元除藻、大型水生植物种植除营养盐、生物操控(经典生物操控+非经典生物操控+上行/下行效应)、物理曝气(超微曝气、微纳米曝气、底层曝气、景观曝气等)、原位净化(底泥原位削减、固载微生物、新式生态浮岛、沉水植物生态净化等)、强势水生植物前处理、投撒生物菌剂、生态网膜、人工循环、底面自然塑形等

3.3 河湖生态系统不同时空维度下的技术比选

动态的江河生态系统放在大流域层面看,水文过程基本都是通过各级支流不断汇聚最终入海;静态的湖库生态系统放在大流域层面看,水文过程基本都是通过各级河流支流不断汇聚最终汇入大中型湖泊或水库,因此河流和湖泊流域生态系统的源头区域和中间流域范围地理、水文、污染特征相似,因而污染治理技术也有很大的相似性。两者区别主要在于流域的末端,水文水动力条件、地形地貌、生物多样性差别较大,导致水质状况、系统自净能力也不同,因此采用的治理技术体系也差别较大。本文将前述的河流生态系统和湖泊生态系统的治理技术体系在不同流域空间、不同治理时序上的共性技术进行比较,以实现对水环境治理共性技术体系的“优中选优”,从而在一定程度上简化工程实施前的方案设计。

3.3.1 源头控制

在源头控制技术体系中,筛选出截污纳管、分散式处理、点源排污口处理、海绵城市技术和滚水坝5项共性技术。截污纳管是控制外源污染进入流域的最重要的措施之一已属业界共识,在流域空间范围内,截污纳管的区域较广,应该说涵盖了除流域水域蓝线之外的所有区域。分散式处理主要针对流域内重要污染区域的应急处理,流域污染的不确定性导致其分布范围较为分散,主要用于治理流域上游污染点源的外排污水和流域蓝线内的水体。在流域源头区域,点源排污口处理主要针对大中型污染点源如畜禽和水产养殖废水非达标排放的治理,滚水坝则主要拦截污染点源排放的污水。海绵城市技术的

作用是就地消纳污染点源排放的污水,可用于流域水域蓝线之外的所有区域。参照河道生态治理技术筛选的指标和权重,结合流域治理的特点和要求,从技术可行性、经济合理性和治理效果3个要素,以及对应的成熟度、实施难易、管理难易、见效周期、投资成本、运行成本、环境效果、生态效果和景观效果9项指标对上述5项技术进行权重设计^[22],并对各个指标划分“优、良、中、差”4个级别,对应赋分为5分、4分、3分和1分,半定量评价上述5项技术的优劣,经分析推荐点源排污口处理、海绵城市技术和滚水坝3项技术,有条件推荐截污纳管和分散式处理2项技术。

3.3.2 过程阻断

在过程阻断技术体系中,筛选出缓冲带、人工湿地、截洪沟、生态护岸和海绵城市技术5项共性技术。截洪沟和生态护岸界限清晰,是拦截外源污染进入水体的最后防线;缓冲带和人工湿地形式多样,功能也多样,需求不同,设置也不同,两者互为包含与被包含关系,主要功能是拦截外源污染物,并净化地表径流,减缓流域污染负荷压力,也可用于流域上游的源头点源污染控制。海绵城市技术属于依托海绵城市建设的技术范畴,主要功能为“渗、蓄、滞、净、用、排”,主要表现形式包括雨水花园、透水铺装、下沉绿地、生态草沟、人工或自然湿地等。海绵城市技术多以点状设计,分布较散,尺度更大,可在流域上游源头区域和中间过渡地带的点状区域实施。按第3.3.1节评价方法,经分析推荐生态护岸和海绵城市技术2项技术,有条件推荐缓冲带、人工湿地和截洪沟3项技术。

3.3.3 末端治理

在末端治理技术体系中,筛选出内源清淤、原位净化、物理曝气、投撒生物菌剂和河道河床底面自然塑形5项共性技术。在流域水域蓝线范围内使用的技术均应属于流域末端治理的技术范畴,内源清淤和原位净化主要针对底泥污染问题;物理曝气和投撒生物菌剂主要用于激活微生物净水功能;河道河床底面自然塑形主要通过微地形重塑,增加生境的多元化进而提升水生生物的多样性和生态系统功能完整性。按第3.3.1节评价方法,经分析推荐原位净化、物理曝气和底面自然塑形3项技术,且在流域污染治理过程中主推原位净化和物理曝气技术,在流域生态系统重建过程中主推河道河床底面自然塑形技术。

3.3.4 技术核心组合体系

通过对源头控制、过程阻断和末端治理常用技术的比选,推荐滚水坝、点源排污口处理、生态护岸、

海绵城市技术、原位净化、物理曝气和河道河床底面自然塑形 7 项技术为核心技术。另外人工湿地造价高,可用于后期建设;分散式处理可短期应急施用;截污纳管造价虽高,但控污效果突出,可贯穿流域治理全过程;缓冲带和截洪沟在土地使用条件满足的情况下可长期使用,截洪沟后期可改变为生态型沟渠。因此推荐以上 12 项技术作为技术核心组合。

从上述核心技术实施的空间分布看,截污纳管还可用于污染物的过程阻断,分散式处理还可用于流域末端水域蓝线内的水体净化,滚水坝和点源排污口处理可用于除中间过渡地带的所有区域;缓冲带、人工湿地和海绵城市技术还可用于流域源头点源污染控制。因此综合考虑流域治理的时空特征,推荐在流域不同空间和不同时序上的技术核心组合体系如表 4 所示。

表 4 技术核心组合体系
Table 4 Core technology combination system

空间分类	污染治理(短期)	生态重建(长期)
源头控制	截污纳管、分散式处理、滚水坝、点源排污口强化处理、缓冲带、海绵城市技术	截污纳管、滚水坝、点源排污口生态处理、生态型沟渠、缓冲带、人工湿地、海绵城市技术
过程阻断	截污纳管、截洪沟、缓冲带、生态护岸、海绵城市技术	截污纳管、生态型沟渠、缓冲带、生态护岸、人工湿地、海绵城市技术
末端治理	分散式处理、原位净化、物理曝气、滚水坝、点源排污口强化处理	河道河床底面自然塑形、滚水坝、点源排污口生态处理

根据 12 项核心技术的特点及工程使用过程中的表现,针对其中分散式处理、缓冲带、生态护岸、原位净化、物理曝气和河道河床底面自然塑形 6 项核心技术遴选出相应的有潜力的新型技术,包括立式混凝气浮技术/高分子材料定制化净水技术、新型旁路净水湿地技术、塑钢板桩/高陡坡绿植护岸技术、固载微生物技术、超微曝气技术和近自然工法共 8 项技术,这些技术随科技创新的进步需不断优化提升。在治理具体流域时,需根据对目标水体的水文、地质、水质、污染源等现状调查和数据分析作出适当调整。

3.4 新时代流域水环境治理专项技术

3.4.1 流域农业面源污染治理技术

随着“十三五”时期各大流域内污水管网的快速建设和雨污分流排水体制的日趋完善,流域内点源污染已得到控制,但地处流域上游的大量农业面源尚未得到有效控制,可以预见农业面源将是“十四五”时期乃至很长一段时间内流域水环境治理中最重要的污染源之一。

流域农业面源污染包括农田典型污染物径流污染、农村雨污合流污染、农村固体废弃物污染

等^[23-25]。从源头控制的层面看,上述面源污染的治理技术应着重优化调整种植业结构和畜禽水产养殖业结构,推行“种植业-养殖业”循环模式^[26],针对农村村居分布格局实现区域性污水管网建设与小型污水处理设施的匹配性组合,并因地制宜加大生活垃圾中转站建设;从过程阻断的层面看,应加强缓冲带配置、生态护岸设计及海绵城市技术的综合使用;从末端治理的角度看,应加强对入河(湖)口污染物的强化去除,组合采用物理曝气和高效固载微生物等技术及河湖水面保洁设备化等措施,实现流域农业面源污染的全过程治理^[27]。

3.4.2 流域末端水质改善技术

很多流域的末端处于城市建成区,且多以黑臭水体形式存在。虽然按照“水十条”要求,地级及以上城市建成区的黑臭水体在 2020 年底控制在 10% 以内,但由于历史原因,雨污合流制的城市排水体制仍大量存在,流域点源污染治理存在一定的滞后性,加之流域上游大量农业面源污染的存在,对处于城市建成区的流域末端的水质仍是潜在的巨大隐患^[28]。

对于未完全纳入市政污水管网的流域支流,遴选适宜的生态修复技术组合将是保障现阶段流域末端治理整体长效性效果的关键。选取以污水处理厂尾水水质提升及以排污口处理为代表的点源治理技术,以有条件构建蜿蜒有度的自然岸线结构及以构筑人工岸滩+天然综合型湿地作为旁路缓冲系统为代表的线性优化技术,以全水域范围内的水体增氧+微生物活化组合处理及以河道河床底面自然塑形提升系统复氧能力为代表的面式修复技术,从点、线、面三个维度实现流域末端水质改善和健康水生态系统构建。

3.4.3 流域智慧化管理技术

流域治理的关键点在于如何有效治理好污染水体,并能保持长制久清。在流域治理过程中,应加强科学管理和高效管理,从“技术智慧化”到“管理智慧化”,建立流域智慧化管控系统作为新时代流域治理技术实施效果的保障,即构建立体式的智能管理系统实现全流域水质动态监管,构建流域水资源总量控制与定额管理指标体系、基于物联网与云平台的水环境监测与预警系统、流域水环境智慧诊断评估系统和以 GIS+BIM 水环境模拟系统为代表的互联网+流域管理模式等,这些技术将构成智慧流域的关键技术。

4 结 语

流域水环境治理是多学科、多链条、多体系的系统工程,涉及理念、技术、工程、管理等多个环节。其

中,流域水环境治理技术体系的科学构建在全周期实践过程中尤其重要,它上承治理的顶层理念设计,下接具体的方案设计和工程实施,其体系建设的合理性直接决定了流域水环境治理的成败,当前相关研究还处于探索阶段。本文对当前我国流域水环境治理过程中普遍存在的4个弊端进行了分析,针对这些弊端提出了指向性的治水方法(“四步法”),并提出以“治理效果持久化、治理成本经济化、治理体系全局化”的“三化”理念作为流域水环境治理技术体系核心理念,从理念和方法两个层面阐述了新时代流域水环境治理的技术内涵。

在技术体系建设层面,借鉴国内外治理经验,结合我国水情,从源头控制、过程阻断、末端治理的空间维度和污染治理、生态修复的时间维度分类构建了相应的治理技术子体系,并对3个空间维度的共性技术进行了多因素比选,推荐了12项技术作为技术核心组合,再通过对这些技术实施边界的特征分析,形成了在流域不同空间和不同时序上的技术核心组合体系,并对当下热点的流域农业面源污染治理、流域末端水质改善和流域智慧化管理3个专项技术体系初步构建提出了新见解。

随着国家乡村振兴战略等一系列国家顶层制度的出台,可以预见在未来很长一段时间内,自然、健康、循环的流域水生态系统构建的需求更加深入,流域水环境治理进入了新的时代,相应对治水技术的要求也将日益精准化、体系化。环保技术日新月异,作为治水的科技工作者和实践者,应对治水新技术不断探索,持续革新,以不断更新的技术体系保障治水效果的稳定,实现流域的可持续发展。

参考文献:

- [1] 罗亚娟.生态嵌入视角下地方政府动员型水环境治理的实践逻辑及优化路径[J]. 河海大学学报(哲学社会科学版),2020,22(2):96-104. (LUO Yajuan. Practical logic and optimizing path of water environmental governance mobilized by local government from the perspective of ecological embeddedness [J]. Journal of Hohai University(Philosophy and Social Sciences),2020,22(2):96-104. (in Chinese))
- [2] 王文君,黄道明.国内外河流生态修复研究进展[J]. 水生态学杂志,2012,33(4):142-146. (WANG Wenjun, HUANG Daoming. Research progress of river restoration research at home and abroad [J]. Journal of Hydroecology,2012,33(4):142-146. (in Chinese))
- [3] 刘欢,杨少荣,王小明.基于河流生态系统健康的生态修复技术研究进展[J]. 水生态学杂志,2019,40(2):1-6. (LIU Huan, YANG Shaorong, WANG Xiaoming. Research progress on ecological restoration technology based on river ecosystem health [J]. Journal of

- Hydroecology,2019,40(2):1-6. (in Chinese))
- [4] 王浩,贾仰文.变化中的流域“自然-社会”二元水循环理论与研究方法[J]. 水利学报,2016,47(10):1219-1226. (WANG Hao, JIA Yangwen. Theory and study methodology of dualistic water cycle in river basins under changing conditions [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2016,47(10):1219-1226. (in Chinese))
- [5] 王浩,杨贵羽.二元水循环条件下水资源管理理念的初步探索[J]. 自然杂志,2010,32(3):130-133. (WANG Hao, YANG Guiyu. Preliminary study on the new concept of water resources management under the dualistic water cycle condition [J]. Chinese Journal of Nature,2010,32(3):130-133. (in Chinese))
- [6] 秦大庸,陆垂裕,刘家宏,等.流域“自然-社会”二元水循环理论框架[J]. 科学通报,2014,59(4/5):419-427. (QIN Dayong, LU Chuiyu, LIU Jiahong, et al. Theoretical framework of dualistic nature-social water cycle [J]. Chinese Science Bulletin,2014,59(4/5):419-427. (in Chinese))
- [7] 褚俊英,王浩,周祖昊,等.流域综合治理方案制定的基本理论及技术框架[J]. 水资源保护,2020,36(1):18-24. (CHU Junying, WANG Hao, ZHOU Zuhao, et al. Basic theory and technical framework for formulation of integrated watershed management plan [J]. Water Resources Protection,2020,36(1):18-24. (in Chinese))
- [8] 赵越,王东,马乐宽,等.实施以控制单元为空间基础的流域水污染防治[J]. 环境保护,2017,45(24):13-16. (ZHAO Yue, WANG Dong, MA Lekuan, et al. Taking control unit as the spatial foundation for water pollution prevention and control in river-basins [J]. Environmental Protection,2017,45(24):13-16. (in Chinese))
- [9] 王浩,孟现勇,林晨.黑臭河道治理关键技术及其应用[J]. 人民长江,2020,51(11):1-9. (WANG Hao, MENG Xianyong, LIN Chen. Key technology and practice of black-odor river regulation [J]. Yangtze River,2020,51(11):1-9. (in Chinese))
- [10] 唐克旺.中国治水已进入大保护的新时代[J]. 水资源保护,2018,34(1):16-17. (TANG Kewang. A new era of great protection for water governance in China [J]. Water Resources Protection,2018,34(1):16-17. (in Chinese))
- [11] GRIT R, JÖRG L, STEFFEN D, et al. Integrated urban water management: development of an adapted management approach [J]. Environmental Earth Sciences,2015,73(2):709-718.
- [12] 环保部公布“十三五”期间水质需改善控制单元信息清单[EB/OL]. (2016-06-27) [2020-07-31]. http://www.gov.cn/xinwen/2016-06/27/content_5085901.htm
- [13] 王鸿涌,张海泉,朱喜,等.太湖蓝藻治理创新与实践[M]. 北京:中国水利水电出版社,2012.
- [14] 朱喜,胡明明,孙阳,等.中国淡水湖泊蓝藻暴发治理与预防[M]. 北京:中国水利水电出版社,2014.
- [15] 刘玉生,郑丙辉,戴树桂,等.滇池富营养化及其综合治理技术研究[M]. 北京:海洋出版社,2004.
- [16] 董哲仁,孙东亚,赵进勇,等.生态水工学进展与展望[J]. 水利学报,2014,45(12):1419-1426. (DONG

- Zheren, SUN Dongya, ZHAO Jinyong, et al. Progress and prospect of eco-hydraulic engineering [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45 (12): 1419-1426. (in Chinese))
- [17] 彭文启, 刘晓波, 王雨春, 等. 流域水环境与生态学研究回顾与展望[J]. 水利学报, 2018, 49 (9): 1055-1067. (PENG Wenqi, LIU Xiaobo, WANG Yuchun, et al. Review and prospect of progress in water environment and water ecology research [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49 (9): 1055-1067. (in Chinese))
- [18] 孙东亚, 赵进勇, 董哲仁. 流域尺度的河流生态修复[J]. 水利水电技术, 2005, 36 (5): 11-14. (SUN Dongya, ZHAO Jinyong, DONG Zheren. River rehabilitation on watershed scales [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2005, 36 (5): 11-14. (in Chinese))
- [19] 冯建中, 乔苏亚. 水体自净系数计算[J]. 山西化工, 1993 (2): 51-53. (FENG Jianzhong, QIAO Suya. Calculation of self purification coefficient of water body [J]. Shanxi Chemical Industry, 1993 (2): 51-53. (in Chinese))
- [20] 蒲迅赤, 赵文谦. 纳污河道水环境自净容量的精确计算方法[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2001, 33 (1): 1-4. (PU Xunchi, ZHAO Wenqian. Accurate calculation of capacity of aquatic self-purification in polluted river [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2001, 33 (1): 1-4. (in Chinese))
- [21] VAN NES E H, RIP W J, SCHEFFER M. A theory for cyclic shifts between alternative states in shallow lakes [J]. Ecosystems, 2007, 10: 17-27.
- [22] 高婷, 赵彦伟, 常国梁, 等. 北方平原区中小河道生态治理技术筛选[J]. 环境工程, 2020, 38 (10): 41-46. (GAO Ting, ZHAO Yanwei, CHANG Guoliang, et al. Screening of ecological management technologies for small and medium rivers in the northern plain area [J]. Environmental Engineering, 2020, 38 (10): 41-46. (in Chinese))
- [23] 武升, 张俊森, 张东红等. 小流域农业面源污染评价与综合治理研究进展[J]. 环境污染与防治, 2018, 40 (6): 710-716. (WU Sheng, ZHANG Junsen, ZHANG Donghong, et al. Advances of agricultural non-point source pollution evaluation and comprehensive treatment in small watershed [J]. Environmental Pollution & Control, 2018, 40 (6): 710-716. (in Chinese))
- [24] 谢娟. 基于小流域综合治理的农业面源污染防治设想[J]. 中国资源综合利用, 2009, 27 (12): 22-23. (XIE Juan. The vision of agricultural non-point source pollution control based on the comprehensive management of small watershed [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2009, 27 (12): 22-23. (in Chinese))
- [25] 崔键, 马友华, 赵艳萍, 等. 农业面源污染的特性及防治对策[J]. 中国农学通报, 2006, 22 (1): 335-340. (CUI Jian, MA Youhua, ZHAO Yanping, et al. Characteristic and countermeasures for control and prevention of multiple area-pollution in agriculture [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2006, 22 (1): 335-340. (in Chinese))
- [26] 谢飞, 吴俊锋, 任晓鸣. 新形势下对太湖流域水环境治理的思考[J]. 水资源保护, 2016, 32 (3): 153-156. (XIE Fei, WU Junfeng, REN Xiaoming. Thoughts on water environmental management in Taihu Basin under new conditions [J]. Water Resources Protection, 2016, 32 (3): 153-156. (in Chinese))
- [27] 马莉. 农业面源水环境污染治理思路[J]. 环境与发展, 2020, 32 (8): 46-47. (MA Li. Thoughts on the treatment of agricultural non-point source water pollution [J]. Environment & Development, 2020, 32 (8): 46-47. (in Chinese))
- [28] 张列宇, 王浩, 李国文, 等. 城市黑臭水体治理技术及其发展趋势[J]. 环境保护, 2017, 45 (5): 62-65. (ZHANG Lieyu, WANG Hao, LI Guowen, et al. Management technology and development trend for urban black and odorous water body [J]. Environmental Protection, 2017, 45 (5): 62-65. (in Chinese))

(收稿日期: 2021-02-16 编辑: 熊水斌)

· 征订启事 ·

《水资源保护》征订启事

《水资源保护》(ISSN 1004-6933, CN 32-1356/TV)是教育部主管、河海大学和中国水利学会环境水利专业委员会共同主办的科技期刊, 针对我国水资源短缺、水污染严重、水环境恶化等突出问题, 探讨水资源保护工作中的基础研究、宏观管理及水环境治理、水生态修复等问题, 主要栏目有“特约专家论坛”“水资源”“水环境”“水生态”等。

《水资源保护》1985年创刊, 经过30多年的努力, 《水资源保护》办刊成绩斐然, 目前是美国《工程索引》(EI)收录期刊、中国科学引文数据库(CSCD)来源期刊、中文核心期刊、中国科技核心期刊、RCCSE中国权威学术期刊、中国精品科技期刊、中国高校百佳科技期刊、华东地区优秀期刊, 同时被荷兰《文摘与引文数据库》(Scopus)、美国《化学文摘》(CA)、波兰《哥白尼索引》(IC)等数据库收录。

《水资源保护》长期以来一直都是水利界和环保界备受关注的重点期刊, 是国内较有影响的水利期刊之一, 主要读者对象是全国从事与水资源保护工作有关的科技人员、管理人员以及大专院校师生。

《水资源保护》现为双月刊, 30元/册, 全年共计180元, 每逢单月20日出版。邮发代号: 28-298。

地址: 210098 南京市西康路1号 电话: (025) 83786642

电子信箱: bh1985@vip.163.com; bh@hhu.edu.cn