

季节性河流及其生态环境治理的理论与技术

褚俊英¹, 原康琦¹, 周祖昊¹, 张云富², 蒋云钟¹, 王英², 唐佐槐¹

(1. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100044;

2. 中建生态环境集团有限公司, 北京 100037)

摘要:在对季节性河流的基本概念、空间分布和主要分类系统阐释的基础上,揭示了季节性河流水量、环境和生态等多要素的动态变化特征;探讨了季节性河流生态环境治理的基础理论,即生态平衡理论、群落演替理论以及生态系统调控理论;给出了季节性河流生态环境治理的基本原则,即问题导向、三方联动和多水统筹;提出了季节性河流生态环境治理“3+6+1”集成化方案的总体框架:“3”为水域、岸带和陆域联动体,“6”为技术层面的6类措施,即配置节约、控源截污、岸线提升、内源治理、织网连通和生态修复,“1”为智慧管理体系建设。基于该框架,提出了季节性河流生态环境治理技术与管理的实施方案,识别了其重点方向和发展趋势。

关键词:季节性河流;流量过程;生态环境治理;集成化方案

中图分类号:TV213.4;X171.4

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2025)03-0046-09

Theory and technology for non-perennial rivers and their ecological environment governance//CHU Junying¹, YUAN Kangqi¹, ZHOU Zuhao¹, ZHANG Yunfu², JIANG Yunzhong¹, WANG Ying², TANG Zuohuai¹ (1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China; 2. China Construction Ecological Environment Group Co., Ltd., Beijing 100037, China)

Abstract: Based on a systematic interpretation of the fundamental concepts, spatial distribution, and major classifications of non-perennial rivers, the dynamic characteristics of multiple elements such as water quantity, environmental conditions, and ecological features in non-perennial rivers are elucidated. The foundational theories for ecological management of non-perennial rivers, including ecological balance theory, community succession theory, and ecosystem regulation theory are explored. The basic principles for ecological environment governance of non-perennial rivers, namely problem orientation, tripartite collaboration, and integrated water resources management are proposed. A comprehensive “3+6+1” integrated framework is presented for ecological environment governance: “3” refers to the coordinated management of three spatial domains, including aquatic zones, riparian zones, and terrestrial areas; “6” represents six technical measures, including water allocation and conservation, pollution source control and interception, shoreline enhancement, endogenous pollution remediation, ecological network connectivity, and ecosystem restoration; “1” denotes the establishment of an intelligent management system. Building upon this framework, specific technical and management solutions for ecological environment governance of non-perennial rivers are proposed, while key priorities and development trends in this field are identified.

Key words: non-perennial river; flow process; ecological environment governance; integrated scheme

与全年都有水流的常流性河流不同,季节性河流反复停止流动或经常干涸,通常历经流动、断流、干涸和再流动的循环过程,维系着独特的生物群落,在推动全球生物多样性保护、生物地球化学循环和人类经济社会发展等方面发挥重要作用,关系到流域水网的稳定性和完整性,其生态价值不容忽视。长期以来,由于人们对于季节性河流的认知和管理

不足,季节性河流普遍面临枯水期时间延长、径流减少、水质恶化以及生态系统失衡等问题,进而对依赖这些河流的经济社会系统带来负面影响。科学识别季节性河流的基本特征并提出管控措施,已成国内外研究前沿和热点^[1]。

在我国针对季节性河流的研究中,研究者多侧重生态流量计算、生态补水方案制定、水质与微生物

基金项目:水利部重大科技项目(SKS-2022070);中国工程院院地合作项目(GS2022ZDI02);甘肃省科技重大专项(25ZDFA010);江西省重点研发计划项目(S20251933);江西省水利厅科技项目(202426ZDKT04);中国建筑股份科技研发项目(CSCEC-2022-K-36)

作者简介:褚俊英(1976—),女,正高级工程师,博士,主要从事节水、水资源规划与管理研究。E-mail:jchu@iwhr.com

的季节性差异等方面^[2-4],尤其关注季节性河流与常流性河流区别、天然季节性河流与人为季节性河流的差异^[5]。在国际上针对季节性河流的研究中,研究者多关注其生态系统服务功能、全球气候变化响应及环境管理制度的建立等方面^[1]。Ayers 等^[6]研究了季节性河流受气候变化和人类活动的影响;Bruno 等^[7]通过采样分析了季节性河流对流域生态系统的支撑作用;Shanafield 等^[8]基于研究结果呼吁重视对季节性河流的生态修复治理。在季节性河流的基本概念和特征方面,目前尚缺乏统一的认知^[9]。季节性河流的生态环境治理多参照常流性河流开展,导致生物多样性和生态系统稳定性降低等问题,亟须针对性地开展生态环境治理工作^[10]。当前季节性河流治理技术的研究多针对特定河流,考虑到季节性河流时空差异较大,技术适用性有待进一步提升。总体上,对季节性河流的理论认知及其生态环境治理技术体系尚未形成。

针对当前定义不清晰的问题,本文系统阐述季节性河流的基本概念和主要分类,分析其流量、环境和生态等要素的动态变化特征;基于季节性河流水量、水质和生态过程特点,提出生态环境治理的基础理论和基本原则;面向多要素系统化、精准化管控的实践需求,提出季节性河流生态环境治理的总体技术框架和具体技术方案。研究成果可为我国季节性河流的生态环境治理规划、管理制度设计以及工程建设和运行提供科学基础和技术支撑。

1 季节性河流的基本概念与主要分类

1.1 基本概念

关于季节性河流的基本概念,国内外的研究尚未达成共识。根据《中国大百科全书》,季节性河流也称“时令河或间歇性河流”,是指水源主要由地表径流补给、雨季期间出现水流而旱季可能干枯的河流。许炯心^[11]将季节性河流定义为“一年中某一季节或一个较长时间中干涸无水的河流”,并将人类活动强烈影响下正在或已经演变为季节性河流的称为“人为季节性河流”。在国际上,季节性河流的表达方式呈现极其多样化的态势^[12],权威统一的科学定义尚未形成,如间歇性河流、短暂性河流、临时性河流以及干旱区河流等。用多样化的名称描述类似的概念,在很大程度上阻碍了季节性河流的理论深化、技术创新和高效管理。针对季节性河流提出的概念可以分为两类:①强调了河流断流特征,即停止流动或地表径流缺失。如 Beetle-Moorcroft 等^[13]认为季节性河流是在一年中的某些时候没有地表径流的河流;Steward 等^[14]将季节性河流定义为在某个

时空点停止流动的河流,并认为其根本特征在于季节性发生径流缺失,导致形成独立的水塘或干涸的河道。②强调了断流的周期性和反复性。如 Leigh 等^[15]认为季节性河流是周期性停止流动,并可能完全干涸的河流;Datry 等^[16]认为季节性河流是反复停止流动或经常干涸的河流。可见,当前不同学者对季节性河流的概念各有侧重,但均明确了水流在一定时空条件下发生间断、断流或干涸的现象。

本文认为,季节性河流的基本概念可从广义和狭义两个层面进行理解:广义上,季节性河流指不能常年维持一定流量的河流;狭义上,季节性河流指径流随季节性变化大,呈现周期性断流的河流。该基本概念从流量变化的大小和断流特征上对季节性河流进行界定。通常,季节性河流在干旱季节或冬季断流,而在雨季或融雪季节恢复流动。在湿润地区,河流如全年有水流但由于其他因素偶尔出现短期的断流,不应当被视为季节性河流。

1.2 空间分布

季节性河流在全球分布尤为广泛,研究表明季节性河流长度占全球河网长度的比例超过 30%,一些国家甚至更高,如南非达 44%,美国为 59%,澳大利亚约为 70%^[17-18]。Messenger 等^[19]综合考虑气候、自然地理、土地利用、土壤、地形和地下水等多种因素,基于智能算法预测断流概率,给出了全球季节性河流的空间分布,并得出季节性河流长度占比达 41%。Yuan 等^[20]提出基于分布式水循环模型和随机森林耦合的季节性河流识别技术,并以我国甘肃省黄河流域为例开展计算,结果表明该流域季节性河流长度占比达 49.0%。实际上,当前开展的季节性河流识别研究,由于使用地形图测绘分辨率不同,季节性河流的总数和长度估计值存在较大差异。这些广泛分布的季节性河流,通常流域面积较小(10~100 km²),在很多国家和地区未被视为河流水体,尚未纳入常规的河流管理体系。在我国,水利部印发的《中小河流治理建设管理办法》(水建设〔2023〕215 号)仅纳入了流域面积 200~3 000 km² 的中小河流,其他更小流域面积的河流则不予考虑,近年来仅位于城市建成区的小流域河流引起管理者的关注。从空间分布看,季节性河流几乎遍布全球各大洲各气候带,尤其在温带海洋性气候和温带大陆性气候带较为常见,在地中海气候和半干旱地区水网中占据主导地位。此外,季节性河流也存在于湿润地区和高山地区的河流源头,如我国南方的季节性缺水河流^[21]。随着全球气候变化、土地利用等多种因素影响,未来季节性河流的数量和长度在河网中的占比呈增长趋势。

1.3 主要分类

根据季节性河流形成的主导因素和径流中断特征,对季节性河流进行分类。

1.3.1 按照形成主导因素分类

按照河流形成的主导因素,季节性河流可分为天然型季节性河流和转化型季节性河流两类。①天然型季节性河流在天然状态下为季节性河流,多分布在江河源头的高海拔或多山地区,通常为树枝状支流水系,其流动过程受地形、气温和降水等因素影响^[22]。②转化型季节性河流原本为常流性河流,由于受到气候变化和强人类活动的影响(如水资源开发利用、水利枢纽工程建设等),逐渐转化为季节性河流。该转化过程受到自然和社会影响因素共同作用。在自然方面,降雨、气温、河床孔隙度及地下水位埋深通常是主要影响因子。需要指出的是,高温引发的高蒸发率与土壤的高孔隙率相结合,即使降水量充足,河道仍可处于断流状态。在社会方面,强人类活动导致的下垫面变化、水利工程建设、地表取水和地下水开采等,会导致河流流量的显著减少,引发河流径流不稳定并导致其断流和干涸,从而逐步向季节性河流转化。总体上,转化型河流多位于人类与资产集中的流域中下游地区,其自然的径流衰减和人为扰动产生累积效应,促使常流性河流不断向季节性河流转化^[18]。

1.3.2 按照径流中断特征分类

已有研究^[23-24]按照季节性河流的径流中断特征,将季节性河流分为3类:①间歇性河流,河道径流每年发生季节性断流并持续数月或数周;②暂时性河流,河道径流受降雨或融雪过程影响大,每年仅流动数天或数周;③偶发性河流,河道多处于断流和干涸状态,每年受强暴雨影响仅流动数小时或数天。为便于对季节性河流管理,本文在上述分类基础上,对具有径流经常断流共性特点的后两类予以合并,将季节性河流分为两大类:①间歇性河流,这些河流基本接近常流性河流,通常与地下水互联互通,能够维持较长时间径流,每年流动时间至少有8月;②临时性河流,仅在强降雨、融雪或融冰等特殊时期出现短暂水流,每年流动时间不足8月。

2 季节性河流多要素的动态变化特征

季节性河流是极具活力和多样性的复杂淡水系统,其径流量及其伴随的环境和生态过程有其自身的动态特点。

2.1 流量过程

季节性河流在水量方面最显著的特征为河道径流量随季节显著波动且出现季节性断流现象。以山

东省季节性河流东五龙河来水偏枯的2017年为例,水文站逐日实测流量如图1所示。受到气候变化和人类活动影响,该季节性河流断流62d,主要发生在3—7月。我国北方典型季节性河流不同时期的流量变化具体为:①在枯水期,季节性河流的流量减少、水位降低,部分时间出现断流,但河流水体可接受地下水补给^[25]。随着河道断流时间的持续,河流水体逐渐减少,在河床上形成单个或多个不连续的水塘,直至部分干涸或完全干涸。②在丰水期,受到降雨和气温导致的积雪和冰川融水等方面影响,季节性河流的流量开始显著增大,水位回升,对河道周边地下水进行补给。河道中可出现高强度、短历时洪水过程,具有洪峰尖瘦且峰高、量小的特点,容易发生洪涝灾害^[26]。总体上,季节性河流的水量变化表现为流动、断流、干涸和再流动的动态过程,具有干湿交替特性。正是由于径流量这种变化特点,季节性河流的河道断面特征明显,即河槽宽度较小,以适应枯水期水流减少的特点,河槽与两岸主要岸堤之间的河漫滩面积较大,从而确保丰水期汛期过流安全。未来时期,受到全球气候变化和强人类活动的影响,季节性河流枯水期持续时间将延长,断流发生更为频繁,丰水期洪峰流量将不断增大,如缺乏有效管理,发生洪旱灾害的频率和强度更大,并对河流健康和周边经济社会发展带来威胁。

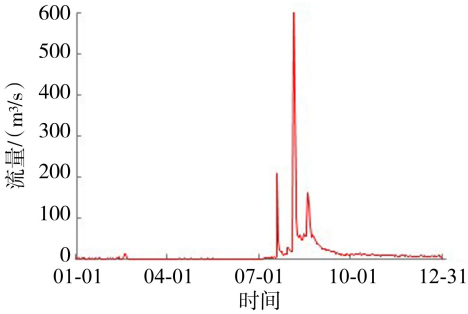


图1 典型季节性河流流量实测值逐日变化(2017年)
Fig.1 Daily variation of measured flow values of typical non-perennial river in 2017

2.2 环境特征

在一些流域和区域,季节性河流是唯一可利用的水源,其水质指标不仅与周边点、面源污染负荷排放密切相关,还受到河道内源污染物的沉积和释放过程的影响。与常流性河流不同,随着流量在枯水期和丰水期动态变化,季节性河流中无机物、有机物和重金属等物质的迁移和转化具有如下特征:①在枯水期,季节性河流河槽和河漫滩之间进行物质交换。随着河道水流的减少,季节性河流携带的物质浓度不断增大。当河道断流或干涸时,河流纵向和横向连通性受阻,使得携带的各种物质在水体中不

断富集和浓缩,水质不断劣化,形成河床污染物沉积层。②在丰水期,受到降雨或融冰、融雪等因素影响,季节性河流水量开始迅速增大,河床积聚的污染物和营养物重新被润湿并向下游输送,污染物的初次冲刷效应尤为显著^[27]。受到降雨对河道沿岸和河床中有机物、营养物和沉积物的冲刷、溶解和携带作用影响,季节性河流中各种物质浓度迅速提高,导致水体水质恶化和生态功能退化,甚至对生态系统和人类健康带来威胁。研究表明,由于季节性河流断流和干涸时河床中沉积物数量庞大,水流再湿润过程中沉积物是溶解性有机物通量的重要来源,贡献率可达 56%~98%^[28]。以山东省季节性河流内夹河为例,2020—2021 年主要水质指标实测值逐月变化如图 2 所示。该河流在 2020 年 9 月至 2021 年 4 月之间断流,陆域、岸带以及水体中各种物质在河床上累积,再湿润被冲刷后进入水体,COD 和总氮指标浓度相对断流前明显提升,分别提高了 64.3% 和 217.5%。

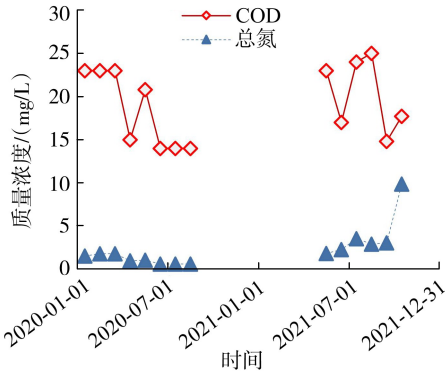


图 2 典型季节性河流主要水质指标实测值逐月变化
Fig. 2 Monthly variation of measured water quality indicators for typical non-perennial river

2.3 生态特征

季节性河流的水生与陆生生态系统紧密耦合,形成了包括浮游植物、大型水生植物、浮游动物、无脊椎动物、鱼类、鸟类和林草植被等多样化的生物群落和栖息地,具有重要的生态系统服务功能。随着季节性河流的流动、断流、干涸和再流动过程的动态变化,各种物质在横向的河道、河滩与陆地,以及纵向的河道上游与下游之间输送和转化,对河流水生生物及岸滩生态系统过程带来影响,关系到其生物多样性、生态系统完整性和生态系统服务功能的发挥。

随着河道水流变化及其伴随物质的迁移转化,季节性河流的生物数量与群落特征动态波动,生态系统呈现“繁荣”与“萧条”的交替特点^[8],具体表现为:①在枯水期,河流来水量逐渐减少,流速减小,泥沙堆积,河床中浅滩和沙洲裸露,形成大面积滩地;

河流横向和纵向连通性减弱,河槽与河漫滩断开。河道面临断流且只剩下孤立的水潭时,水生生物集中于残余水池中求生,数量急剧减少,部分生物寻找新的庇护所或进入河底沉积物中休眠,水生生态系统总体处于“萧条”期。②在丰水期,随着河道中流量的增大,主河槽和河漫滩、上游和下游之间联系加强,种子、植物碎片、无机物和有机物不断补充到河道中,鱼类和鸟类不断繁殖,生态系统活跃,总体处于“繁荣”期。

随着季节性河流生物种群在静水、流动水和陆地生境等不同生态系统之间周期性迁移与动态适应,其生物群落和生态系统多样性与常流性河流显著不同^[29]。季节性河流生态系统中生境异质性更大,受河流断流后形成独立水塘等水体迁移限制,物种组成沿着梯度方向空间多样性比常流性河流更高^[30]。一些鱼类在季节性河流中能够保持健康的种群,在生命早期阶段存活率更高且体型更大^[2]。然而,季节性河流的生态系统总体比较脆弱,特别是径流断流期的延长和频发,对水生生物的生存、繁衍和迁移过程带来影响,导致生物多样性降低^[31],并将威胁到河流生态健康。

3 季节性河流生态环境治理的基本理论和基本原则

长期以来,受到理论认知、技术水平和管理制约等多方面因素限制,国内外普遍忽视对季节性河流的生态环境治理。近年来,受到全球气候变化和强人类活动的影响,季节性河流生态系统面临严重退化和失衡,并对经济社会发展带来威胁。因此,实施季节性河流生态环境治理和保护尤为重要且迫切。季节性河流的生态环境治理应以生态平衡理论、群落演替理论和适应性管理理论为指导,坚持问题导向、三方联动和多水统筹的基本原则,以确保治理工作的科学性和有效性。

3.1 基本理论

a. 生态平衡理论。季节性河流的生物在长期的环境适应过程中,通过能量流动、物质循环和信息传递,在生物个体与种群之间、生物与环境要素之间,建立起相互适应、协调和统一的动态平衡联系。季节性河流生态治理应以生态平衡理论为指导,实现 3 方面的均衡与协调,使得生态系统稳定和良性发展,具体包括:①推动收支平衡,通过生态环境治理推动生态系统的物质和能量输出与输入平衡;②促进结构平衡,通过生态环境治理,促进生物与环境之间、生物与生物之间以及环境要素之间的组成结构和空间结构稳定和优化;③促进代谢平衡,通过

生态环境治理促进植物、动物和微生物共同作用下“生产-消费-分解-转化”平衡,保持食物链和食物网稳定。

b. 群落演替理论。随着降雨和气温等因素的动态变化,季节性河流的生物群落随着时间推移发生有规律的物种替代过程。群落演替的实质是群落的物种组成和空间结构发生根本变化。季节性河流生物群落演替主要分为:①进展演替,即季节性河流生物群落由结构简单、稳定性差、对环境利用不充分的类型向结构复杂、稳定性强、对环境利用充分的类型演替;②逆行演替,与进展演替方向相反,季节性河流的生态群落不断退化;③循环演替,也称周期性演替,即季节性河流的生态系统转变为另一类型之后,又恢复到原有类型,如此循环往复。季节性河流的生态治理需要基于群落演替理论,顺应群落演替的规律,推动循环演替和进展演替,减少逆行演替过程,从而提升生态系统的稳定性、多样性和持续性。

c. 适应性管理理论。根据季节性河流的水流、水质及其生态系统特点,基于适应性管理理论,构建具有迭代学习特征的生态环境治理和管理体系^[32-33],有利于促进季节性河流建立自我调节机制,维系生态系统结构稳定性、生态完整性和功能多样性,实现季节性河流的生态复苏。

3.2 基本原则

a. 问题导向原则。识别当前以及未来时期流域面临的突出水生态环境问题,以问题为导向,因地制宜开展综合治理,是季节性河流生态环境治理应当贯彻的基本原则。受到自然和社会多因素综合影响,季节性河流面临的主要水生态环境问题包括:①水资源短缺。由于人类经济社会发展过度引水和蓄水,加上土地利用导致下垫面变化,季节性河流枯季水量急剧减少,生态流量无法保障。一些缺水地区季节性河流的生态基流主要依靠人类经济社会排放的污水进行维持^[34]。②水污染严重。随着枯季来水量减少,季节性河流水环境容量降低,如周边经济发展排放的污染负荷未得到有效控制,季节性河流主要断面水质不断恶化,并对河道水源地安全带来威胁。③水生态退化。随着枯水期水量减少和水质下降,季节性河流食物链、栖息地和繁殖地受到干扰,甚至引发外来物种入侵威胁本地物种,降低生态系统的稳定性和多样性。由于不同季节性河流所处的地理、气候、地形、地貌以及经济社会等方面的差异,其面临的水生态环境问题也明显不同,应根据各河流面临的问题来制定相应的治理措施。季节性河流水生态环境问题的识别,除了基于传统的监测和调查方法,还可借助大数据分析、卫星遥感、物联

网、云计算和人工智能等现代信息手段进行预测和预判,为其生态环境治理提供科学依据和技术支撑。

b. 三方联动原则。季节性河流营养物在水域、岸带以及陆域之间的频繁传输和交换,是维护季节性河流健康和生态平衡的关键。其中,岸带为季节性河流水域与相邻陆域生态系统之间的缓冲带,包括堤岸、河滩、湿地和植被等多种生态系统类型,具有水流干湿交替的特性。季节性河流的生态环境治理是复杂过程,应坚持三方联动的原则,实现水域、岸带和陆域之间的互馈链接和集成治理,促进左右岸、上下游以及水域和陆域等空间协调,提高治理的整体性和精细化水平。

c. 多水统筹原则。季节性河流中水资源、水环境和水生态等多要素紧密联系和相互作用^[35],任一要素出现短板,都会对河流健康带来负面影响。充足的水资源有利于提升水环境容量,促进水生态系统生境的改善;水环境劣化将威胁到水资源利用,并对水生态带来负面影响;水生态的健康稳定有利于维系水资源可再生性,并促进水环境状态的改善。因此,季节性河流生态环境治理应坚持水资源、水环境、水生态多水统筹原则,从流域水循环及其伴生的过程出发,开展从源头到末端的全链条治理,从根本上推动流域的绿色、低碳和可持续发展。

4 季节性河流生态环境治理的集成化方案

4.1 总体框架

以当前和未来时期面临的突出水问题为导向,注重技术提升和管理融合,通过集成化方案提升季节性河流治理能力和水平。季节性河流生态环境治理“3+6+1”集成化方案如图3所示,其中,“3”为水域、岸带和陆域的联动体;“6”为技术层面的6类措施,包括配置节约、控源截污、岸线提升、内源治理、织网连通和生态修复;“1”为智慧管理体系建设。具体为:①针对陆域,在水量方面实行水资源高效利用,通过合理配置经济社会用水,减少对季节性河流水资源的过度利用,提高河道生态流量的保障程度;在水质方面实行精准控源和过程拦截,发展循环经济与清洁生产,开展污水处理提质增效,最大限度减少进入季节性河流的污染负荷。②针对岸带,强化污染拦截和生态修复,促进水陆交错地带的生境改善和生态功能提升,构筑季节性河流的生态屏障。③针对水域,实施内源治理、织网连通和生态修复,推动季节性河流水资源、水环境、水生态互馈与协同作用,提升水动力和环境自净能力,促进水生生态系统的良性循环;④在管理方面,通过管理制度建设、管理机制建设以及监管能力提升,促进季节性河流

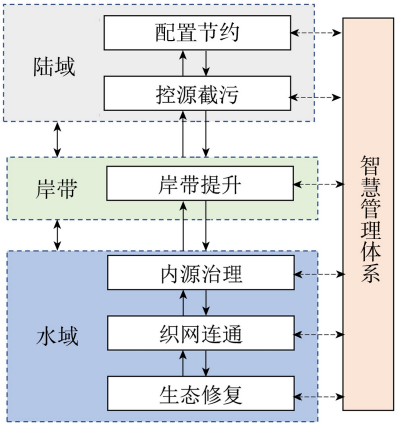


图3 季节性河流生态环境治理集成化方案的总体框架

Fig.3 General framework of integrated scheme for ecological environment governance of non-perennial rivers

4.2 技术与管理具体方案

a. 配置节约。流域经济社会发展取水、用水和退水过程直接关系到作为水源和受纳水体的季节性河流的生态健康,推进水资源高效利用是季节性河流生态环境治理的关键。开展水资源合理配置和水利工程调度,有利于保障河流生态流量、维系水环境容量和促进生态保护。具体为:①实施水资源合理配置。流域经济社会发展应以水资源节约集约利用为前提,优化各层级水资源配置工程,实施“以水定城、以水定地、以水定人、以水定产”^[36],严守季节性河流水资源利用上限,促进经济社会发展与水资源均衡,减少对季节性河流生态用水的挤占。②优化水利工程调度。在生态系统调查基础上,明确季节性河流生态保护对象及其生态流量目标要求,开展水利工程生态调度,强化泄放设施管理,恢复季节性河流的水文情势,保障河流基本形态和重要物种生命周期过程的水量和水质要求。

b. 控源截污。多措并举对经济社会发展过程中污染物的产生和排放过程进行防控,以最大化减少污染物入河量,是季节性河流生态环境治理的根本。具体为:①源头减排。开展水污染问题诊断,识别点源和面源污染负荷来源、强度和路径;推进工业清洁生产,调整产业发展布局和结构,打造循环经济体系;加强农村生活、畜禽养殖、农田径流、水土流失和城镇径流污染控制,推进化肥农药减量增效和海绵城市建设,通过处理、拦截和资源化利用等方式降低各类污染负荷。②过程拦截与阻断。实施雨污分流的地区,应减少雨水和污水管网的混接、错接,对于混接、错接的排水管网应进行定期检查和修复;在有条件的地区,推进初期雨水的收集、处理和资源化

利用,通过设置调蓄池、截流管等方式,降低初期雨水污染^[37]。③污水处理提质增效。开展排水管网的排查检测,分步分级实施改造;推进污水处理厂提标改造,通过截流或调蓄设施,控制城市雨季溢流污染的超标频次^[38];优化集中和分布式污水处理厂布局,提高污水处理后再生利用水平。

c. 岸带提升。季节性河流在枯水期和丰水期水量具有显著差异,推进有干湿变化特点的岸线提升,有利于构建多样化和生态化的滨水空间,是季节性河流生态环境治理的亮点。具体为:①建设多介质生态岸坡。建设斜坡式、直立式等近天然复式断面,提升季节性河流岸坡稳定性和生态性;驳岸可采用耐久性好的柔性材料^[39]或宾格石笼等方式,以抵抗水流冲刷和涌浪水力侵蚀,并适合植物生长和繁殖。②构建生境多样的湿地。保护天然湿地系统,对受到破坏的湿地进行生态修复,建立自然保护区保护湿地中的珍稀濒危物种;建设人工湿地,利用湿地基质填料、微生物、植物和水生动物之间的协同作用,实现截污净化。③消落区生态修复。针对季节性河流消落区特点,建立不同类型、高程和生境条件下的植物群落。

d. 内源治理。通过水面漂浮物清理、底泥污染治理和底泥资源化利用等方式减少内源污染,是季节性河流生态环境治理的基石。具体为:①水面漂浮物清理。采用自动保洁船、智能保洁船等设备,定期清理水面垃圾、水生动植物残体等漂浮物。②底泥污染治理。开展底泥勘测和污染状况评估,明确污染底泥中污染物的分布和污染特征;对于受氮磷、重金属和其他有毒有害物质污染较重且污染层较厚的底泥,可采用绞吸挖泥船、气力泵、环保抓斗等方式进行环保疏浚;对于污染较轻的底泥,可采用底质改良或原位生态修复技术,包括底泥覆盖、氧化、固化、钝化等物理化学措施,以及微生物制剂等生物措施等。③底泥资源化利用。清理出的底泥经过脱水浓缩后,可用于制造建工材料(如陶粒、砖和水泥等),也可用于堆肥和土地修复等方面。

e. 织网连通。综合运用水系连通、生态补水和生态调度等综合措施盘活水系,提升枯水期的水动力和自净能力,降低丰水期的生态系统破坏风险,是季节性河流生态环境治理的重点。具体为:①推进水系连通成网。实现河湖水系互联互通,构建国家和省、市、县等多层级水网体系^[40],不断完善水网结构和综合功能,改善季节性河流生态环境质量,提升其水旱灾害防御能力。②建设生态补水系统。以水库水、河道水和再生水为水源,开展季节性河流水系生态补水,促进受损生态系统的恢复。

f. 生态修复。采用生态河床构建、复氧曝气和生物调控等措施进行水质提升和生态修复,是季节性河流生态环境治理的核心。具体为:①生态河床构建。在季节性河流城市段建设梯级蓄水生态透水坝^[41],减少季节性河流来水量偏小和河道断流问题,并对水质进行净化^[42-43];通过微地形生态化改造,重塑深槽、浅滩、沙洲交错的河道微地形单元,营造洲、湾、溪、滩和涧等异质性生境系统,促进季节性河流食物链的构建^[44];季节性河流枯水期较长的乡村段,可采取“封河育草”“以绿代水”“以绿固沙”等技术,建设河流水系生态廊道。②曝气增氧。通过鼓风机、高压水泵、叶轮、微孔扩散器以及气浮等方式,向季节性河流水体中注入空气,增加水体溶解氧浓度,提高水体透明度,减少污染物浓度,抑制厌氧过程,促进水生生物的生存和繁衍。③生物调控。选择本土物种进行植被群落修复,通过投放鱼类或底栖动物等实现动物群落构建,提升食物链和食物网的稳定性,促进动植物生境的整体恢复。

g. 智慧管理。通过完善管理制度、健全管理机制和提升监管能力实现适应性管理,是季节性河流生态环境治理的保障。具体为:①完善管理制度。制定季节性河流保护的相关法律法规,针对季节性河流的特点,实施更为严格的用水总量控制、入河污染物控制以及生态流量保障。②健全管理机制。建立季节性河流生态环境治理的政府、市场和利益相关方等多主体协同机制已成为重要发展趋势^[45];③提升监管能力。水量、水质和生态监测体系不完善已成为制约季节性河流生态环境治理的限制因素。应充分融合大数据、物联网和人工智能等现代信息技术^[46-48],建立季节性河流“感知-传输-决策-控制”的智慧水务体系,以极大提高其生态环境治理的监管能力和现代化水平。

5 结 语

季节性河流具有独特且重要的生态服务价值,但长期以来未得到足够重视。随着季节性河流面临的水资源短缺、水环境污染和水生态退化问题日益凸显,开展季节性河流生态环境治理重要且迫切。本文从宏观和微观视角给出了季节性河流的基本概念,揭示了其水量及其伴随的环境和生态要素动态变化特征,并进一步探讨了生态环境治理的基础理论和基本原则,系统提出了“3+6+1”集成化方案总体框架。研究成果可为我国季节性河流的生态复苏和环境改善提供理论基础和技术支撑。

未来时期借助具有物理机制的水文模型和机器学习模型,对季节性河流的动态特征进行识别已成

为重要趋势。针对季节性河流面临的生态环境问题,实现多学科交叉融合,实行分区、分类和分期的差异化、精准化管控是关注焦点,亟须针对季节性河流特点研发水资源优化配置方法和分季节污染物总量控制技术,制定生态环境治理的适用技术清单、技术指南、技术规范,创新生态环境管理模式,从而为季节性河流更为高效、可持续的生态保护和环境改善提供科学指导和实践支撑。

参考文献:

[1] ACUÑA V, DATRY T, MARSHALL J, et al. Why should we care about temporary waterways? [J]. Science, 2014, 343(6175):1080-1081.

[2] 刘晋, 苟少杰, 李兴拼, 等. 季节性河流生态补水方案制定与研究:以北方 DY 河为例[J]. 中国农村水利水电, 2024(3):41-49. (LIU Jin, GOU Shaojie, LI Xingpin, et al. Research on the ecological water replenishment scheme for seasonal rivers:taking the DY river in the north as an example[J]. China Rural Water and Hydropower, 2024(3):41-49. (in Chinese))

[3] 程鹏, 孙明东, 宋晓伟. 人为-自然因素交互作用对季风河流水质影响的季节性差异研究[J]. 环境科学学报, 2024, 44(5):218-227. (CHENG Peng, SUN Mingdong, SONG Xiaowei. Seasonal variations in the impacts of human-natural interaction on monsoon river water quality [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2024, 44(5):218-227. (in Chinese))

[4] 肖满义, 王衫允, 李祎飞, 等. 季节性河流好氧氨氧化微生物的时空分布及网络互作研究:以漕河为例[J]. 环境科学学报, 2023, 43(12):238-249. (XIAO Manyi, WANG Shanyun, LI Yifei, et al. Spatiotemporal distribution and network interactions of aerobic ammonia-oxidizing microorganisms in seasonal rivers:a case study of the Cao River[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2023, 43(12):238-249. (in Chinese))

[5] 梁恒德. 辨析祖厉河季节性性与常年性河流问题[J]. 水资源开发与管理, 2024, 10(11):39-43. (LIANG Hengde. Analysis of the issues between seasonal and perennial rivers in the Zuli River[J]. Water Resources Development and Management, 2024, 10(11):39-43. (in Chinese))

[6] AYERS J R, YARNELL S M, BARUCH E, et al. Perennial and non-perennial streamflow regime shifts across California, USA[J]. Water Resources Research, 2024, 60(4):e2023WR035768.

[7] BRUNO D, HERMOSO V, SÁNCHEZ-MONTOYA M M, et al. Ecological relevance of non-perennial rivers for the conservation of terrestrial and aquatic communities[J]. Conservation Biology, 2022, 36(6):e13982.

- [8] SHANAFIELD M, BLANCHETTE M, DALY E, et al. Australian non-perennial rivers: global lessons and research opportunities [J]. *Journal of Hydrology*, 2024, 634:130939.
- [9] UYS M C, O' KEEFFE J H. Simple words and fuzzy zones: early directions for temporary river research in South Africa [J]. *Environmental Management*, 1997, 21 (4): 517-531.
- [10] 刘晓波,董飞,王威浩,等. 季节性河流生态环境复关关键问题研究 [J]. *中国水利*, 2024 (21): 29-36. (LIU Xiaobo,DONG Fei,WANG Weihao, et al. Studies on key issues in the ecological recovery of seasonal rivers [J]. *China Water Resources*, 2024 (21): 29-36. (in Chinese))
- [11] 许炯心. 人为季节性河流的初步研究 [J]. *地理研究*, 2000, 19 (3): 234-242. (XU Jiongxin. A preliminary study of man-induced seasonal rivers: examples from China [J]. *Geographical Research*, 2000, 19 (3): 234-242. (in Chinese))
- [12] BUSCH M H, COSTIGAN K H, FRITZ K M, et al. What's in a name? patterns, trends, and suggestions for defining non-perennial rivers and streams [J]. *Water*, 2020, 12 (7): 1980.
- [13] BEETLE-MOORCROFT F, SHANAFIELD M, SINGHA K. Exploring conceptual models of infiltration and groundwater recharge on an intermittent river: the role of geologic controls [J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2021, 35: 100814.
- [14] STEWARD A L, VON SCHILLER D, TOCKNER K, et al. When the river runs dry: human and ecological values of dry riverbeds [J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2012, 10 (4): 202-209.
- [15] LEIGH C, BOULTON A J, COURTWRIGHT J L, et al. Ecological research and management of intermittent rivers: an historical review and future directions [J]. *Freshwater Biology*, 2016, 61 (8): 1181-1199.
- [16] DATRY T, BOULTON A J, FRITZ K, et al. Publisher correction: non-perennial segments in river networks [J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2024, 5 (1): 75.
- [17] TOOTH S. Process, form and change in dryland rivers: a review of recent research [J]. *Earth-science Reviews*, 2000, 51 (1/2/3/4): 67-107.
- [18] GOODRICH D C, KEPNER W G, LEVICK L R, et al. Southwestern intermittent and ephemeral stream connectivity [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2018, 54 (2): 400-422.
- [19] MESSEAGER M L, LEHNER B, COCKBURN C, et al. Global prevalence of non-perennial rivers and streams [J]. *Nature*, 2021, 594 (7863): 391-397.
- [20] YUAN K, CHU J, ZHOU Z, et al. Identifying non-perennial river reaches: a hybrid model combining WEP-L and random forest [J]. *Sustainability*, 2024, 16 (23): 10543.
- [21] 高玉琴,刘钺,赵晨程,等. 南方季节性缺水河流逐月保证率设定法的改进 [J]. *水资源保护*, 2021, 37 (2): 95-101. (GAO Yuqin, LIU Yue, ZHAO Chencheng, et al. Improvement on monthly guarantee rate setting method for seasonal water shortage rivers in south China [J]. *Water Resources Protection*, 2021, 37 (2): 95-101. (in Chinese))
- [22] BENSTEAD J P, LEIGH D S. An expanded role for river networks [J]. *Nature Geoscience*, 2012, 5 (10): 678-679.
- [23] SKOULIKIDIS N T, SABATER S, DATRY T, et al. Non-perennial Mediterranean rivers in Europe: status, pressures, and challenges for research and management [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 577: 1-18.
- [24] LEONE M, GENTILE F, PORTO A L, et al. Ecological flow in southern Europe: status and trends in non-perennial rivers [J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 342: 118097.
- [25] GÓMEZ-GENER L, SIEBERS A R, ARCE M I, et al. Towards an improved understanding of biogeochemical processes across surface-groundwater interactions in intermittent rivers and ephemeral streams [J]. *Earth-science Reviews*, 2021, 220: 103724.
- [26] ZIPPER S, POPESCU I, COMPARE K, et al. Alternative stable states and hydrological regime shifts in a large intermittent river [J]. *Environmental Research Letters*, 2022, 17 (7): 074005.
- [27] ARCE M I, SÁNCHEZ-MONTOYA M D M, GÓMEZ R. Nitrogen processing following experimental sediment rewetting in isolated pools in an agricultural stream of a semiarid region [J]. *Ecological Engineering*, 2015, 77: 233-241.
- [28] SHUMILOVA O, ZAK D, DATRY T, et al. Simulating rewetting events in intermittent rivers and ephemeral streams: a global analysis of leached nutrients and organic matter [J]. *Global Change Biology*, 2019, 25 (5): 1591-1611.
- [29] CORTI R, DATRY T. Terrestrial and aquatic invertebrates in the riverbed of an intermittent river: parallels and contrasts in community organisation [J]. *Freshwater Biology*, 2016, 61 (8): 1308-1320.
- [30] SCHRIEVER T A, LYTLE D A. Convergent diversity and trait composition in temporary streams and ponds [J]. *Ecosphere*, 2016, 7 (5): e01350.
- [31] TORNÉS E, RUHÍ A. Flow intermittency decreases nestedness and specialisation of diatom communities in Mediterranean rivers [J]. *Freshwater Biology*, 2013, 58 (12): 2555-2566.
- [32] WILLIAMS B K. Passive and active adaptive management: approaches and an example [J]. *Journal of*

- Environmental Management,2011,92(5):1371-1378.
- [33] WILLIAMS B K. Adaptive management of natural resources: framework and issues [J]. Journal of Environmental Management. 2011,92(5):1346-1353.
- [34] LUTHY R G, SEDLAK D L, PLUMLEE M H, et al. Wastewater-effluent-dominated streams as ecosystem-management tools in a drier climate [J]. Frontiers in Ecology and the Environment,2015,13(9):477-485.
- [35] 廖雅,侯晓姝,任晓红. “三水”统筹视角下京津冀地区城市水生态环境保护策略分析[J]. 环境科学,2022,43(4):1853-1862. (LIAO Ya, HOU Xiaoshu, REN Xiaohong. Analysis of the urban water eco-environment protection strategy in the Beijing-Tianjin-Hebei region from “three waters” overall planning [J]. Environmental Science,2022,43(4):1853-1862. (in Chinese))
- [36] 王浩,许新发,成静清,等. 水资源保护利用“四水四定”:基本认知与关键技术体系[J]. 水资源保护,2023,39(1):1-7. (WANG Hao,XU Xinfu,CHENG Jingqing,et al. “Basing four aspects on water resources” in water resources protection and utilization: basic cognition and key technology system [J]. Water Resources Protection, 2023,39(1):1-7. (in Chinese))
- [37] 曹甜甜,朱洪涛,王振北,等. 我国西南地区城市水环境综合整治对策与路线图[J]. 环境工程技术学报,2022,12(2):500-512. (CAO Tiantian,ZHU Hongtao,WANG Zhenbei,et al. Study on the comprehensive improvement countermeasures and roadmap of water ecological environment in urban area of Southwest China[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2022,12(2):500-512. (in Chinese))
- [38] 于磊,黄瑞晶,李容,等. 基于河道纳污能力的北运河城市副中心段合流制溢流污染控制研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(5):41-48. (YU Lei,HUANG Ruijing,LI Rong,et al. Research on pollution control of combined sewer overflow in Beijing municipal administrative center section of north canal based on the ability to decontamination of the river [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022,50(5):41-48. (in Chinese))
- [39] 靳忠强,裴如龙,刘卓. 北方地区季节性河道生态修复治理[J]. 甘肃科技,2023,39(10):31-34. (JIN Zhongqiang, PEI Rulong, LIU Zhuo. Seasonal river ecological restoration in northern China [J]. Gansu Science and Technology, 2023,39(10):31-34. (in Chinese))
- [40] 李原园,赵钟楠,姜大川. 国家水网各层级协同建设思考[J]. 中国水利,2024(19):31-36. (LI Yuan Yuan,ZHAO Zhongnan,JIANG Dachuan. Establishment of collaboration for national water network construction at all levels[J]. China Water Resources,2024(19):31-36. (in Chinese))
- [41] 张雄. 基于自然的解决方案在北方缺水地区河流生态修复实践[J]. 山西水利,2023,39(6):37-40. (ZHANG Xiong. Nature-based solutions for river ecological restoration in northern part of China water-scarce areas [J]. Shanxi Water Resources, 2023,39(6):37-40. (in Chinese))
- [42] 沈志伟,张晓雷,余亮,等. 基质组配、填充方式及水力负荷对生态滤坝净化效果的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(6):37-43. (SHEN Zhiwei,ZHANG Xiaolei,YU Liang,et al. Effects of substrate combination, packing arrangement and hydraulic loading on the purification performance of ecological filter dam [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023,51(6):37-43. (in Chinese))
- [43] RAJ A R A, MYLSAMY P, SIVASANKAR V, et al. Heavy metal pollution of river water and eco-friendly remediation using potent microalgal species [J]. Water Science and Engineering, 2024,17(1):41-50.
- [44] 陈文龙,吴琼,李一平. 城市河流低水位运行生态修复机制与实践效果[J]. 水资源保护,2024,40(2):16-22. (CHEN Wenlong, WU Qiong, LI Yiping. Ecological restoration mechanism and practical effects of low water level operation in urban rivers [J]. Water Resources Protection,2024,40(2):16-22. (in Chinese))
- [45] DATRY T, LARNED S T, TOCKNER K. Intermittent rivers: a challenge for freshwater ecology [J]. BioScience, 2014,64(3):229-235.
- [46] ASSENDELFT R S, VAN MEERVELD H J I. A low-cost, multi-sensor system to monitor temporary stream dynamics in mountainous headwater catchments [J]. Sensors,2019,19(21):4645.
- [47] JAEGER K L, OLDEN J D. Electrical resistance sensor arrays as a means to quantify longitudinal connectivity of rivers [J]. River Research and Applications, 2012,28(10):1843-1852.
- [48] KAPLAN N H, SOHRT E, BLUME T et al. Monitoring ephemeral, intermittent and perennial streamflow: a dataset from 182 sites in the Atttert catchment, Luxembourg [J]. Earth System Science Data,2019,11(3):1363-1374.

(收稿日期:2024-11-11 编辑:施业)