

河流生态流量适应性管理模式及其应用研究

肖 汐^{1,2}, 张 翔^{1,2*}, 刘 建³, 程西方³, 高仕春^{1,2}, 肖 宜^{1,2}

¹水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉

²武汉大学, 海绵城市建设水系统科学湖北省重点实验室, 湖北 武汉

³淮河流域水资源保护局淮河水资源保护科学研究所, 安徽 蚌埠

Email: 1317234788@qq.com, *zhangxiang@whu.edu.cn

收稿日期: 2021年3月7日; 录用日期: 2021年4月23日; 发布日期: 2021年4月30日

摘 要

生态流量是保障和维持河流健康的基础, 在全球变化和社会经济快速发展的变化环境下, 生态流量的计算和生态流量实施效果具有诸多不确定性。本文介绍了适应性管理的概念, 结合生态流量管理的需求, 讨论了生态流量适应性管理的框架。以淮河流域的沙颍河为研究对象, 从生态保护目标的确定、生态调度方案实施、实施效果监测、调整生态流量方案的过程探讨了沙颍河生态流量适应性管理方案。论文研究成果体现出适应性管理方法对推动社会经济与生态环境协调发展、促进我国河流管理模式的完善和创新具有现实意义。

关键词

生态流量, 适应性管理, 河流健康

Adaptive Management Model of River Ecological Flow and Its Application

Xi Xiao^{1,2}, Xiang Zhang^{1,2*}, Jian Liu³, Xifang Cheng³, Shichun Gao^{1,2}, Yi Xiao^{1,2}

¹State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan Hubei

²Hubei Provincial Key Laboratory of Water System Science for Sponge City Construction, Wuhan University, Wuhan Hubei

³Huaihe Water Resources Protection Institute of Huaihe River Basin Water Resources Protection Bureau, Bengbu Anhui

Email: 1317234788@qq.com, *zhangxiang@whu.edu.cn

Received: Mar. 7th, 2021; accepted: Apr. 23rd, 2021; published: Apr. 30th, 2021

Abstract

Ecological flow is the basis of protecting and maintaining river health. In the changing environment of

作者简介: 肖汐(1998-), 女, 硕士研究生, 主要从事水文学与水资源研究。

*通讯作者。

文章引用: 肖汐, 张翔, 刘建, 程西方, 高仕春, 肖宜. 河流生态流量适应性管理模式及其应用研究[J]. 水资源研究, 2021, 10(2): 157-167. DOI: 10.12677/jwrr.2021.102016

global change and rapid socio-economic development, there are many uncertainties in the calculation and implementation effect of ecological flow. This paper introduces the concept of adaptive management, and discusses the framework of adaptive management of ecological flow combined with the needs of ecological flow management. Taking Shaying River as a case study, the ecological flow adaptive management scheme from the determination of ecological protection objectives, implementation of ecological scheduling scheme, and effect of monitoring and adjusting ecological flow scheme are discussed. The research results show that the adaptive management method has practical significance to promote the coordinated development of social economy and ecological environment, and promote the improvement and innovation of river management mode in China.

Keywords

Ecological Flow, Adaptive Management, River Health

Copyright © 2021 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



1. 引言

随着河流开发程度的不断提高以及水利建设的发展和完善,众多流域修建了闸坝等大量的水利工程设施,这些水利工程在缓解洪涝、干旱、水体污染等问题的同时,淹没、阻隔和径流调节等又对河流生态环境造成了负面影响[1] [2],水生态环境问题日益突出。对于河流而言,生态流量的保障是流域内河流生态保护与修复的关键,也是促进河流系统健康发展和加强生态文明建设的重要因素。

我国幅员辽阔,气候地理条件差异大,不同流域的特点不同,同一流域内不同河段的实际情况和生态状况具有差异,相应的生态流量目标要求并不统一,在实际中河流的生态流量管理常常难以同时协调多个目标[3]。部分河湖需要以生态保护目标为核心,满足水生生物的生存环境需求,而对于没有特殊生态保护目标的中小河流和湖泊则只需满足基本的水位和流量,对于干旱等紧急缺水情况则需要进行应急补水,流域水生态环境管理部门较多,难以统筹协调,因而亟需形成一套立体高效的统筹管理体制。

此外,生态流量管理过程中会受到很多不确定因素的影响,比如气候、人类活动对生态系统的干扰以及管理者对生态系统认知的局限等[4],传统的生态流量管理方法难以协调复杂性成为常态、不确定性大增的实际管理问题[5]。适应性管理作为一种新兴的管理方法,近年来备受关注,该方法旨在通过增加知识和理解来减少不确定性,从而随着时间的推移改进和完善管理决策,在国际上被广泛应用于环境管理和实践中[6] [7] [8]。结合目前我国流域状况和河流管理现状,适应性管理能够更好地应对未来大量不确定的、不可完全预测的变化,实施生态流量适应性管理是解决河流生态保护复杂性问题的有效方法。

我国对适应性管理的研究大部分还停留在理念提出阶段,目前在生态调度[9]、湿地修复[10]、生态系统管理[11]和水资源管理[12]等具有多种不确定因素的管理问题方面均有提及,但缺少较为系统的适应性管理方法和实际应用研究。本研究阐述了适应性管理理念,并系统介绍了流域生态流量适应性管理的内涵、组成及方法,并结合淮河流域沙颍河开展应用研究,对完善河流生态流量适应性管理方法,为生态流量的管理和河流生态保护提供借鉴和参考。

2. 适应性管理理念

“适应性”一词起源于生态学,泛指组织或系统为了生存、繁殖而增强应对环境变化的基因和行动特征[13],

适应性是以自身发展和进步为目的不断提高应对变化能力的一种手段。适应性管理理念最早是加拿大学者 Holling 于 1978 年提出，最初的名称是“适应性环境评估与管理”(Adaptive Environmental Assessment and Management)，用于应对不确定系统和人类认知存在局限性的管理问题[14]，随着理论的丰富和完善，之后被推广应用于水生态系统的修复与保护方面。

1997 年美国内政部垦务局制定了格伦峡谷大坝适应性管理计划来保护下游生态系统，D.M.库伯利在研究中将适应性管理当做一种“互动式学习”的过程，在管理中承认生态系统受到多种不确定因素的干扰，并且在决策过程中充分利用科学知识，将规划政策视为一种试验并且加以检验，不断完善管理计划[15]。Susan C. Baker 则认为生态系统的适应性管理是学习、描述、预测和实践的循环过程，是一个旨在改变生态系统状态的行动框架，它支持决策制定和资源分配，同时在变化中开展学习和调整[16]。M.F. Summers 等人认为适应性管理是一个结构化的迭代过程，能够有效应对河流系统的复杂性、动态性和不确定性，管理框架被分为四个阶段：集水区概念化和利益相关者参与、确定管理目标和制定方案、监测设计和实施、回顾研究和反馈结果，在管理过程中将决策实践与环境响应联系起来，不断减少不确定性和改进管理结果[17]。

从图 1 可知，适应性管理遵循问题识别 - 政策规划 - 实践 - 监测 - 评估与反馈 - 问题识别的闭环性动态管理方式。其基本思想是依据实际监测和实践来评估管理效果，更新对管理问题的认知，调整管理方向和管理举措，实现运行结果与规划方案的有机结合，采用动态管理的方式不断适应管理对象和降低不确定性，最终达到管理目标要求。与传统的刚性管理方法相比，适应性管理考虑到实际管理过程中常常存在且不容忽视的问题，如管理者对管理系统的认知不全面，导致管理方案无法有效达到预期效果等，是不断更新并修正的柔性管理过程。但需要注意的是，适应性管理并不是单纯的“重复试验”过程，而是强调在行动中学习，用实践去检验管理政策的可行性和合理性，不断提高决策的科学性，达到管理目标，减少利益相关者的冲突。

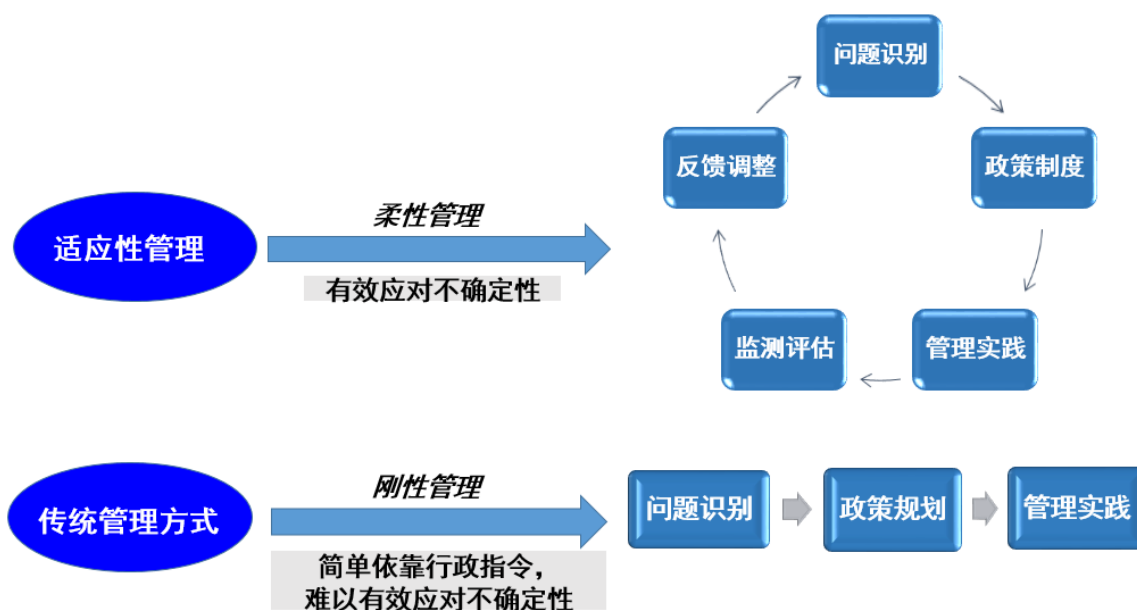


Figure 1. Comparison between adaptive management and traditional management methods

图 1. 适应性管理与传统的管理方法比较

3. 河流生态流量适应性管理概念和框架

3.1. 影响河流生态流量管理的不确定性因素

河流生态流量是控制水资源开发利用强度、维持河流生态功能的关键基础，也是统筹协调生产、生活、生

态用水的重要指标,事关水生态文明建设和水安全保障大局,维系河流生态流量需要科学有效的管理手段。在河流生态流量管理中,存在诸多不确定性,这些不确定性是生态流量管理过程中的重要制约因素。

1) 气候变化带来的水文过程变化

降雨变化存在不确定性,当降雨量偏少,尤其是汛期雨量偏少的情况下,难以满足生态流量要求,此时需要开展生态调度保障河流生态流量。此外,水文过程具有随机性,随着气候变化,流速等与生态系统密切相关的水文要素也具有不确定性。

2) 经济社会发展引发用水矛盾加剧

随着经济社会的快速发展,各方面用水需求增加,水资源供需矛盾凸显。生态流量的保障与经济社会用水出现冲突难以协调时,需要强化管理缓解用水矛盾,尽可能实现经济社会和生态环境的可持续发展。

3) 生态保护目标的不确定性

河流生态流量随河流特性、河段位置和时段范围变化,具有时空动态变化的特征[18]。不同河段具有不同的生态保护目标,计算生态流量时,应针对河流生态系统的特点和河流、湿地等保护对象,对不同的时段和区域进行生态流量需求调查,制定有针对性的生态流量方案,反映河流生态系统对流量的多样需求。

4) 水生态系统恢复的不确定性和难以掌控性

生态流量保障方案实施后,生态系统对水文过程的响应效果难以准确预知,需要通过生态监测来评估生态流量是否能满足河流生态系统的需求,管理者对于生态系统的认知在不断更新和变化。

河流生态流量适应性管理是面向不确定性的管理,涉及到确定生态流量和生态用水保障方案、水生态监测、生态流量调整、生态用水配置调整、生态用水保证率调整等多个方面,是生态流量管理实践不断改进的持续过程。生态流量适应性管理承认在河流生态流量的确定和生态用水保障中存在诸多不确定因素,在此前提之下各部门和利益相关者根据生态保护目标确定适宜的生态流量,根据流域水利设施条件制定合理的生态流量调度方案并实施,开展系统性的河流水生态监测并进行科学评估,根据河流水生态恢复的效果不断调整管理目标和措施,最终让生态用水得到充分保障,实现河流水生态系统和经济社会的可持续性发展。

3.2. 单位河流生态流量适应性管理框架

流域生态流量适应性管理框架(如图2)是实现生态流量保护目标、社会经济和生态协调发展的行动指南,是不断学习、反馈和调整的循环过程。从结构上看,适应性管理框架是从问题提出到效果评估的迭代闭环,中间包括政策规划、生态监测、调度实践以及最终的反馈阶段。

具体到框架内的各环节而言,首先要从流域实际情况出发进行问题诊断,分析流域生态环境问题和生态流量需求,深入认识河流水生态系统。第二阶段进行政策规划,即从下游生态保护目标需求、整个河流生态系统的需求出发,研究适宜流域的生态流量过程,确定生态用水保障方案。流域中不同河段常常存在不同的生态流量问题,而适应性管理就是通过不断适应和学习,设定合理的生态流量管理目标。在调控管理阶段,以明确流域的生态管理目标为前提,在保障生态用水的同时也要尽量满足社会、经济用水,实现生态环境与社会经济的可持续发展[19]。在调控管理的准备工作中,相关管理部门需要预估流域的来水趋势,计算满足生态保护需求的生态流量以及河道内生态基流,顺应水量供需平衡态势,通过水-生态-社会系统的耦合模拟合理配置水资源,实现生态保护目标。

然后,重点针对春秋两季开展河流关键河段的水生态监测。一般的监测项目包括流量、水质指标、浮游植物、底栖动物和鱼类等,并根据确定生态流量时制定的生态保护目标进行有针对性的监测。通过监测调查实施生态流量保障的河段的水生态变化情况,为流域生态流量的实施效果评估提供基础数据。在实际中,还可以根据监测数据识别流域生态流量的指示物种并加以密切关注,为探究流域生态与水文之间的响应关系提供依据。

在生态流量实施效果评估阶段，根据水生态系统恢复的状态和生态用水量的保障程度分析，进行生态流量合理性评估和“三生用水”配置的调整，达到生态流量适应性管理的目的。

生态流量适应性管理的动态性、关联性和整体性思维体现在最后的反馈调整阶段，在该阶段需要管理者从生态保护目标的需求出发，探寻社会经济用水的变化、气候和人类开发活动对河流生态系统的影响。流域系统内生态流量未能满足时，管理者需要及时采取科学的行动，提出导致生态流量不能得到保障的原因假设并制定相应的解决方案，对已有的措施和计划进行完善和改进，使之适应气候变化和其他突发性问题等不确定性，科学性提出生态流量管控和生态用水保障的适应性调整和管理机制，通过反馈与调整维持河流健康，最终实现流域内社会、经济与生态环境的协调发展[20]。

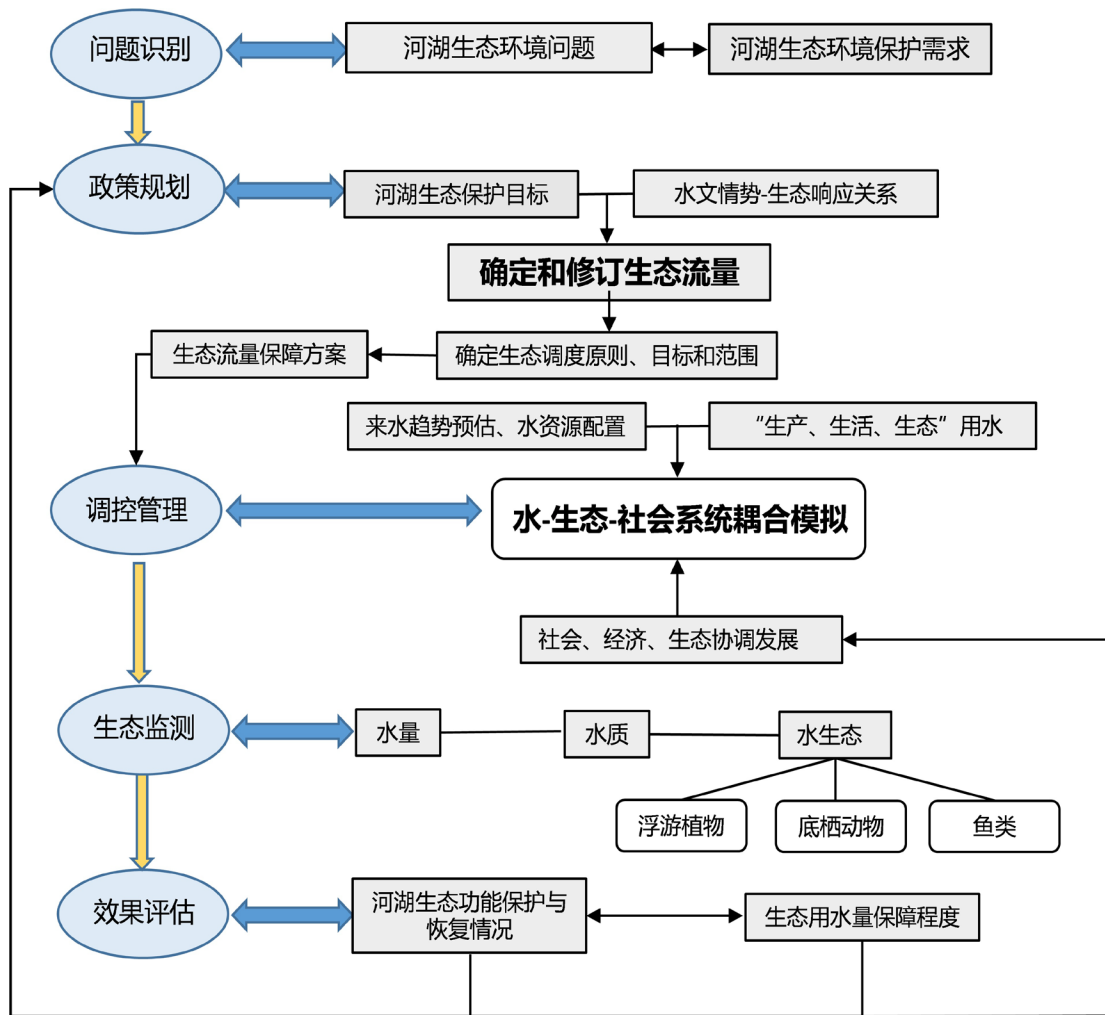


Figure 2. Adaptive management framework of river ecological flow
图 2. 河流生态流量适应性管理框架

4. 实例研究

4.1. 研究区概况

沙颍河是淮河的最大的支流，位于北纬 32°31'~34°59'、东经 111°56'~116°31'之间，北临黄河，西毗黄河支流伊洛河和汉江支流唐白河，南与洪汝河、东与涡河相邻，流域面积 34,480 km²，跨河南和安徽两省，见图 3。

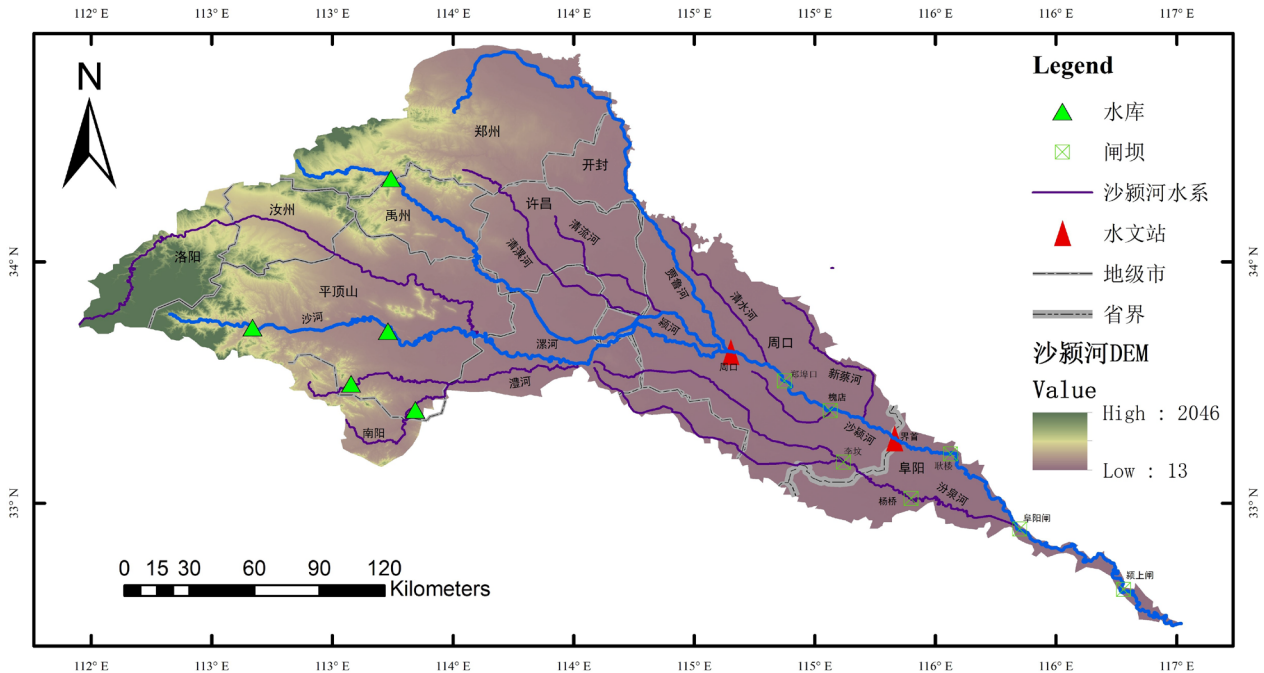


Figure 3. Sketch map of Shaying River basin and river network
图 3. 沙颍河流域及水系示意图

沙颍河流域位于南北气候过渡带，冷暖气流交汇频繁，降雨年内分配不均，夏秋多、冬春少，洪涝干旱灾害易发生，并且呈现南部大、北部小、山区大、平原小的地域分布特征。过去，沙颍河流域河流闸坝密集，改变了河流天然水文情势，造成河流天然基流匮乏，流域水环境水生态破坏严重[21]。通过收集文献资料和实地调研，了解目前沙颍河流域主要干支流生态环境问题，如表 1 所示。

Table 1. Ecological status of main trunk and tributaries in Shaying River basin
表 1. 沙颍河流域部分主要干支流生态状况表

| 序号 | 河流 | 河流主要生态问题 |
|----|-----|--|
| 1 | 沙颍河 | 纵向连通性差，生态流量满足率较低，TP 污染严重，浮游生物、底栖动物多样性差；周口段河岸硬质化，生境类型单一 |
| 2 | 沙河 | 浮游生物多样性差；漯河段栖息地有一定程度的破坏 |
| 3 | 北汝河 | 上游水质较好，下游河道内流量不足，造成生物多样性不足，河道沿岸景观效果较差 |
| 4 | 颍河 | 水资源匮乏、生态流量满足率低，断流频率 > 40%；许昌段 COD 和 TP 超标严重 |
| 5 | 汾泉河 | 河道内水量不足，现状水质较差，浮游动物多样性相对较低 |
| 6 | 黑茨河 | 周口段上游段 COD、氨氮和 TP 等均严重超标；周口段中下游段浮游植物、浮游动物等生物多样性低 |
| 7 | 贾鲁河 | 水质较差，栖息地破坏、生物多样性差，开封段河岸带受到侵蚀 |
| 8 | 清颍河 | 闸坝分布广泛，水动力不足，生境单一，浮游动物、底栖动物生物多样性差 |

基于沙颍河流域的现状调查和分析，综合考虑河流生态恢复的历程与生态环境保护发展的要求、沙颍河流域总体特点以及河流间水量、水质、水生态的差异，沙颍河流域河流/河段可划分为三大类型：基流匮乏型、生态脆弱型、近自然型，如表 2。

Table 2. Classification of main rivers in Shaying River basin

表 2. 沙颍河流域主要河流分类

| 类型 | 河段/河流 | 起始断面 | 终止断面 | 总长(km) |
|-------|--------|--------------|--------------|--------|
| 基流匮乏型 | 北汝河下游 | 郟县石桥乡吕寨村北公路桥 | 襄城县入沙河口 | 70.3 |
| | 颍河中下游 | 禹州市后屯 | 沈丘县槐店闸下 | 216.8 |
| | 汾泉河 | 漯河市翟庄 | 沈丘县李坟闸 | 136.8 |
| 生态脆弱型 | 黑茨河 | 太康县逊母口镇老达庙河源 | 郸城县候楼闸 | 90 |
| | 黑泥河 | 漯河市市区 | 沈丘县李坟闸 | 113.4 |
| | 贾鲁河 | 新密市圣水峪 | 周口市贾鲁河闸入颍河口 | 233.9 |
| | 澧河 | 孤石滩水库(坝上) | 漯河市橡胶坝 | 163 |
| | 清潁河 | 新郑市辛店 | 西华县入颍河 | 106 |
| | 沙河中下游 | 白龟山水库大坝 | 周口市周口闸 | 219 |
| | 颍河上游 | 登封市大金店镇 | 禹州市后屯 | 66.9 |
| 近自然型 | 北汝河中上游 | 汝阳县竹园乡八里滩公路桥 | 郟县石桥乡吕寨村北公路桥 | 95.2 |
| | 沙河上游 | 鲁山县昭平台水库大坝 | 白龟山水库大坝 | 66 |

4.2. 沙颍河生态流量适应性管理目标

适应性管理是解决和应对不确定性的管理方式，为能够有效的通过生态流量管理来实现流域内具有不同水生态环境特征的河流健康可持续发展，需要结合河流水生态改善需求，分类明确生态保护目标，分期估算不同类型河流的生态流量目标值，以期实现流域水生态环境整体逐步改善，见表 3。

Table 3. Adaptive management objectives of ecological flow in Shaying River basin

表 3. 沙颍河流域生态流量适应性管理目标

| 类型 | 生态保护目标 | 生态流量调控目标计算 |
|-------|--|---|
| 基流匮乏型 | 保障生态基流，维持河流生态系统健康。重点关注河流沿河取水口生态环境用水被挤占的问题，特别是在枯水期。 | 1、7~11 月份采用最小生态径流频率法计算，3~6 月份采用月保证率法计算，2 月、12 月份采用 10% 多年平均径流计算结果。 |
| 生态脆弱型 | 保障适宜水生生物生存的水位和流量，为生物提供良好的生存环境。重点关注入河排污口的污染物入河量超出河道的水环境纳污能力问题。在汛前期，发生小洪水时，当闸门无序开启，会出现污水集中下泄的情况。 | 分别采取段首+段尾控制法、月保证率法及 10% 多年径流法计算所需生态流量，选取结果较大值作为所需生态流量。 |
| 近自然型 | 保障的目标是扩大流域内水生生物栖息地空间，提高水生生物多样性，延拓食物链结构。研究流域内河流水生生物繁殖等对河流生态流量的需求过程。 | 确定河段保护目标种群以及产卵繁殖期所需的流速和水深，开展河道栖息地模拟，以达到最大栖息地面积确定丰水期 6 月~8 月、平水期 4 月~5 月、枯水期 3 月所需生态流量，9~12 月采用最小生态径流逐月频率法计算；1 月~2 月采用 10% 多年平均径流计算。 |

生态流量管理受到多种不确定因素的制约，生态流量适应性管理的主要目的是根据未来变化的不确定性，调整生态流量及其保障措施，因此为实现沙颍河生态流量适应性管理的目标，必须深入认识沙颍河流域水量、水质、水生态和水资源供需的不确定性特征。

1) 沙颍河流量的不确定性。平顶山和周口市集中了沙颍河流域内一半以上的地表水和地下水资源，沙河与北汝河提供了流域内 1/3 的河库取水量，而颍河流域水资源极度匮乏，气候变化带来的降雨量变化使得入河水量具有不确定性，枯水期断流现象明显，影响生态用水保证率。

2) 沙颍河水质不确定性。沙颍河流域存在水质分化严重且流域水资源开发利用差异化明显等问题，北汝河、沙河、澧河的水质大部分能达到地表水 III 类水，而贾鲁河、黑茨河等中小型河道受沿途郑州、许昌、漯河等地

市工业废水排放的影响，河流污染较为严重。

3) 沙颍河水生态系统恢复的不确定性和难以预知性。沙颍河流域内水生态现状差异显著，流域内不同河流水文条件差异较大，从而对水生生物分布产生了一定程度的影响。水量和流速较多样的沙河、贾鲁河的浮游生物种类较多，而颍河水系水资源匮乏，修建的闸坝众多，颍河干流几乎无流动现象，其支流的截留情况也十分严重，水生生物相对也较少。同时，流域内河流水质不同，其水生生物种类差别也较大。水质较好的北汝河和沙河的底栖动物类型多以清洁种蜉蝣和纹石蚕为主；而黑茨河和贾鲁河因水质较差，其底栖动物种类多为摇蚊幼虫、水丝蚓等耐污种，采取生态流量调度方案后需要通过系统性的监测来认知生态系统与水文过程的响应关系。

4) 沙颍河流域经济社会和生态用水矛盾的不确定性。沙颍河流域包含大型水库 5 座，对流域内 10 个城市用水户——郑州、开封、许昌、洛阳、汝州、平顶山、南阳、漯河、驻马店与周口的灌溉、工业及城镇生活供水等方面起到重要作用。经济社会的快速发展和人们生活水平的提高，使得社会经济用水和生态用水需求矛盾凸显，需要结合实际情况适当调整地表水资源的分配方案。

4.3. 沙颍河生态流量适应性管理方案及其效果评价

明确沙颍河生态保护需求以及管理中的不确定因素之后，为实现生态保护目标制定生态流量保障方案，根据调度权限统筹协调生态流量适应性管理工作，制定沙颍河生态流量适应性管理方案，并根据监测结果开展效果评价。

以上游重要控制断面周口断面为例，在保障生活用水的同时，也要尽量满足周口断面生态流量，保障河流生态系统健康安全。参与生态调度的水源工程选择对兴利效益影响较小的工程，优先考虑蓄水量大、水环境质量好的大型水库工程。综合考虑库容和调水线路，沙颍河周口断面以上主要水源工程有昭平台水库、白龟山水库、孤石滩水库、白沙水库、燕山水库，重要控制闸坝有大陈闸、马湾拦河闸、漯河闸和周口闸。

生态流量的库-闸调度方案如表 4 所示，当断面流量等于或小于该月生态流量目标时，开启距离周口断面最近的周口闸泄水，使得周口断面流量达到生态流量保护目标。当周口闸的可调水量不能满足调水需求，考虑由周口闸和沙河漯河节制闸开展生态调度，若仍不能满足调水需求时，则要考虑利用第三级水源工程进行调度，依次递推。当河道蓄水工程蓄水量和调度水库蓄水量无法满足设计目标时，依距离远近依次调度上游大型水库进行水量下泄。

Table 4. Application sequence and priority of Shaying river ecological regulation water source project

表 4. 沙颍河生态调度水源工程运用先后顺序及优先级

| 级别 | 具体方案 |
|-----|---|
| 第一级 | 周口闸 - 目标断面 |
| 第二级 | 沙河闸 - 周口闸 - 目标断面 |
| 第三级 | 白沙水库 - 周口闸 - 目标断面 |
| 第四级 | 马湾拦河闸 - 沙河闸 - 周口闸 - 目标断面 |
| 第五级 | 孤石滩水库 - 沙河闸 - 周口闸 - 目标断面 燕山水库 - 沙河闸 - 周口闸 - 目标断面 |
| 第六级 | 白龟山水库 - 马湾拦河闸 - 沙河闸 - 周口闸 - 目标断面 大陈闸 - 马湾拦河闸 - 沙河闸 - 周口闸 - 目标断面 |
| 第七级 | 昭平台水库 - 白龟山水库 - 马湾拦河闸 - 沙河闸 - 周口闸 - 目标断面 玉马水库 - 大陈闸 - 马湾拦河闸 - 沙河闸 - 周口闸 - 目标断面 (前坪水库) - 大陈闸 - 马湾拦河闸 - 沙河闸 - 周口闸 - 目标断面* |

*注：生态调度线路还包括不同线路的组合，以低级别线路确定组合线路的级别。

管理过程中实时监测重点控制断面的流量和水生生物数据，初步建立起生态流量与水生生物种群、栖息地保护目标之间的响应关系。考虑到降雨等气象因素的不确定性，在监测过程中发现生态流量不达标时采取应急调度，保障重点河段的生态基流。

2018年1月至2018年底，在常规调度的同时，通过生态监测效果发现河道内生态流量尚不能为水生生物提供较适宜的生存和繁殖环境，在重点保障河段生态基流的前提下，管理部门各成员单位积极配合，根据监测数据调整下泄流量，适应性调整原有调度方案，适应性调度的具体时间段、放水流量如表5所示。2018年度通过白龟山水库共计放水6次满足生态流量管理目标，随着适应性管理实践的不断深入，管理部门结合监测数据进一步学习生态系统与流量之间的响应关系，使得生态补水量和补水效果为水生生物提高良好的生存空间。

Table 5. Adaptive regulation of ecological water supplement in Shaying River basin in 2018

表 5. 2018 年沙颍河流域生态补水适应性调度

| 放水次数 | 起始时间 | 结束时间 | 放水流量(m ³ /s) | 备注 |
|------|------------|----------|-------------------------|--|
| 1 | 1月29日16时 | 2月4日12时 | 41.4 | |
| 2 | 2月8日16时 | 3月5日15时 | 17.7 | |
| 3 | 3月30日10时 | 4月6日10时 | 11.6 | |
| 4 | 4月26日11时 | 5月25日11时 | 29 | 生态补水过程中燕山水库根据来水科学调度，在按照水库设计生态流量 5 m ³ /s，根据来水情况控制发电机组开启量，保证均匀放水，拉长放水时间，保证下游河道生态用水需求 |
| | 5月25日11时 | 6月21日18时 | 45.4 | |
| | 6月21日18时 | 6月27日10时 | 97 | |
| 5 | 7月2日17时 | 7月6日8时 | 52 | |
| 6 | 9月25日18:30 | - | 16.6 | |

2019年1月至2019年11月底，通过监测发现吴家渡断面实测流量长期不满足生态流量目标，分析其原因主要是受断面以上降雨量偏少且蚌埠闸承担了周围城市抗旱供水任务的影响。河南省水利厅、安徽省水利厅、河南省沙颍河流域管理局及蚌埠闸工程管理处高度重视，及时组织调度保障控制断面生态流量，蚌埠闸工程管理处于6月1日、7月10日~9月8日、9月8日~11月30日进行生态补水，及时应对了气候变化的不确定性。

此外，对监测资料整合分析后了解到周口断面有21天流量为0，并且不达标天数全部发生在汛期，分析原因主要是今年沙颍河流量汛期降水较少，流域旱情较为严重。为了维持河流水生态环境健康，保证断面生态流量，河南省沙颍河流域管理局及时预警并上报河南省水利厅，周口水利局积极配合协调，根据调度职责和流程开展了三次(2019年6月1日、7月9日和9月17日)协调调度工作：6月1日通过贾鲁河后槽开闸放水，7月9日燕山水库放水，9月17日贾鲁河开闸放水对周口断面生态流量进行补充，同时漯河节制闸开闸放水，补充漯河周区间沙河水量。至9月20日，沙颍河周口断面生态流量恢复。沙颍河流域管理局通过监测及时掌握了流域生态流量问题并适应了当地气候条件对河流生态流量的影响，通过适应性管理进行科学调度，有效缓解了今年较为严峻的河道水情形势，使下游生态流量得到了有效保障。

采用现状资料与历史资料相对比的方法对适应性管理前后流域的生态状况进行分析与评估，结果显示流域整体的水生态状况有较大程度的改善。具体体现为对水环境要求较高的滤食者淡水壳菜(湖沼股蛤)等生物变得较为常见，寡毛类和水生昆虫占比增加以及河蚬和方格短沟蜷种群均有增长，说明流域生态系统不断向好。后续可将高流量指示种作为重要指示种予以重点关注，密切关注种群动态变化，可以较快地初步识别生态流量调度方案的实施效果。综上可知，沙颍河流域生态流量适应性管理工作取得成效。

5. 结论

保障流域河湖生态流量是维持河流生态功能的关键基础, 事关流域水生态安全、国家生态文明建设大局。我国河湖生态流量管理仍处于起步阶段[22] [23] [24], 生态流量管理的各项工作仍有待进一步完善。本文指出了传统生态流量管理的局限性, 借鉴国内外河流先进的管理经验将适应性管理方法引入到流域生态流量管理中, 系统性阐述了适应性管理理念、流域生态流量适应性管理的内涵并给出了管理框架, 适应性管理在沙颍河流域生态流量管理的实践中取得了良好成效, 为河流生态流量管理模式的完善与创新提供了参考。

适应性管理为河流生态流量管理提供了科学合理的理论基础, 未来对于适应性管理理论在实际生态流量管理中的可行性、实用性还需要更多的实践来探索, 河湖生态流量管理方法也亟需从流域水资源优化配置、河流生态流量闸坝调度、生态与水文之间的响应关系、生态流量目标的确定方法等方面进一步完善和深化。

基金项目

国家重大水专项课题资助(2017ZX07602)。

参考文献

- [1] 孟钰, 张翔, 夏军, 高仕春, 王俊钊, 吴比. 河道内生态用水保证率的概念、内涵与计算分析[J]. 应用基础与工程科学学报, 2018, 26(2): 229-238.
MENG Yu, ZHANG Xiang, XIA Jun, GAO Shichun, WANG Junchai and WU Bi. Concept, connotation and calculation analysis of guarantee rate of ecological water use in river channel. Journal of Basic Science and Engineering, 2018, 26(2): 229-238. (in Chinese)
- [2] 孟钰, 张翔, 夏军, 吴绍飞, 王俊钊, Christopher J. Gippel. 水文变异下淮河长吻鮠生境变化与适宜流量组合推荐[J]. 水利学报, 2016, 47(5): 626-634.
MENG Yu, ZHANG Xiang, XIA Jun, WU Shaofei, WANG Junchai and CHRISTOPHER J. Gippel. Recommendation of habitat change and suitable flow combination of *leiocarpus longirostris* in Huaihe River under hydrological variation. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(5): 626-634. (in Chinese)
- [3] 谢悦, 夏军, 张翔, 柏慕琛. 基于淮中游鱼类不同等级生境保护目标的生态需水[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(5): 76-81+133.
XIE Yue, XIA Jun, ZHANG Xiang and BAI Muchen. Ecological water demand based on different levels of fish habitat protection objectives in the middle reaches of Huaihe River. South-to-North Water Transfers and Water Science and Technology, 2017, 15(5): 76-81+133. (in Chinese)
- [4] 王俊钊, 张翔, 吴绍飞, 朱才荣, 刘建峰. 基于生径比的淮河流域中上游典型断面生态流量研究[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(5): 71-77.
WANG Junchai, ZHANG Xiang, WU Shaofei, ZHU Cairong and LIU Jianfeng. Study on ecological flow of typical section in the middle and upper reaches of Huaihe River basin based on the ratio of generation to diameter. South-to-North Water Transfers and Water Science and Technology, 2016, 14(5): 71-77. (in Chinese)
- [5] 葛怀凤. 基于生态-水文响应机制的大坝下游生态保护适应性管理研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2013.
GE Huaifeng. Study on adaptive management of ecological protection in downstream of dam based on ecological hydrological response mechanism. Ph.D. Thesis, Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2013. (in Chinese)
- [6] WILLIAMS, B. K. Passive and active adaptive management: approaches and an example. Journal of Environmental Management, 2011, 92(5): 1371-1378. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.10.039>
- [7] JENSEN, T., HYLLAND, K. Environmental adaptive management: application on submarine mine tailings disposal. Integrated Environmental Assessment & Management, 2019, 15(4): 575-583. <https://doi.org/10.1002/ieam.4134>
- [8] RASEKH, A., BRUMBELOW, K. A dynamic simulation-optimization model for adaptive management of urban water distribution system contamination threats. Applied Soft Computing, 2015, 32: 59-71. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2015.03.021>
- [9] 袁超, 陈永柏. 三峡水库生态调度的适应性管理研究[J]. 长江流域资源与环境, 2011, 20(3): 269-275.
YUAN Chao, CHEN Yongbai. Study on adaptive management of ecological operation of Three Gorges reservoir. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2011, 20(3): 269-275. (in Chinese)
- [10] 杨薇, 裴俊, 李晓晓, 孙涛, 王文燕. 黄河三角洲退化湿地生态修复效果的系统评估及对策[J]. 北京师范大学学报(自然

科学版), 2018, 54(1): 98-103.

YANG Wei, PEI Jun, LI Xiaoxiao, SUN Tao and WANG Wenyan. Systematic assessment and countermeasures of ecological restoration effect of degraded wetlands in the Yellow River Delta. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science Edition)*, 2018, 54(1): 98-103. (in Chinese)

- [11] 孙建, 张振超, 董世魁. 青藏高原高寒草地生态系统的适应性管理[J]. *草业科学*, 2019, 36(4): 933-938+915-916.
SUN Jian, ZHANG Zhenchao and DONG Shikui. Adaptive management of alpine grassland ecosystem in Qinghai Tibet Plateau. *Pratacultural Science*, 2019, 36(4): 933-938+915-916. (in Chinese)
- [12] 张雪蕾. 气候变化背景下干旱内陆河流域适应性水资源管理研究[D]: [博士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2017.
ZHANG Xuelei. Adaptive water resources management in arid inland river basin under the background of climate change. Ph.D. Thesis, Lanzhou: Lanzhou University, 2017. (in Chinese)
- [13] LUDWIG, D. Barriers and bridges to the renewal of ecosystems and institutions. *Ecological Economics*, 1996, 19(2): 185-188.
[https://doi.org/10.1016/0921-8009\(96\)84161-9](https://doi.org/10.1016/0921-8009(96)84161-9)
- [14] HOLLING, C. S. Understanding the complexity of economic, ecological, and social systems. *Ecosystems*, 2001, 4(5): 390-405.
<https://doi.org/10.1007/s10021-001-0101-5>
- [15] D.M. 库伯利, 夏智翼, 胡云鹤. 美国格伦峡谷坝的适应性管理[J]. *水利水电快报*, 2011, 32(1): 4-6.
KUBLEY D. M., XIA Zhiyi and HU Yunhe. Adaptive management of Glen Canyon Dam. *Express Water Resources & Hydropower Information*, 2011, 32(1): 4-6. (in Chinese)
- [16] BAKER, S. C., READ, S. M. Variable retention silviculture in Tasmania's wet forests: Ecological rationale, adaptive management and synthesis of biodiversity benefits. *Australian Forestry*, 2011, 74(3): 218-232.
<https://doi.org/10.1080/00049158.2011.10676365>
- [17] SUMMERS, M. F., HOLMAN, I. P. and GRABOWSKI, R. C. Adaptive management of river flows in Europe: A transferable framework for implementation. *Journal of Hydrology*, 2015, 531: 696-705. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.10.057>
- [18] 罗毅君. 湖南省生态流量管理的探索与思考[J]. *中国水利*, 2020(15): 70-71.
LUO Yijun. Exploration and thinking of ecological flow management in Hunan Province. *China Water Resources*, 2020(15): 70-71. (in Chinese)
- [19] 罗昊, 黄亮, 张强, 许衡. 关于生态流量保障管控与调度目标的思考[J]. *水利规划与设计*, 2020(6): 29-31+62.
LUO Hao, HUANG Liang, ZHANG Qiang and XU Heng. Thoughts on ecological flow control and scheduling objectives. *Water Resources Planning and Design*, 2020(6): 29-31+62. (in Chinese)
- [20] 左其亭. 水资源适应性利用理论及其在治水实践中的应用前景[J]. *南水北调与水利科技*, 2017, 15(1): 18-24.
ZUO Qiting. Theory of adaptive utilization of water resources and its application prospect in water control practice. *South-to-North Water Transfers and Water Science and Technology*, 2017, 15(1): 18-24. (in Chinese)
- [21] 夏冬, 梁丹丹. 淮河流域重要河流生态流量(水量)保障性分析[J]. *治淮*, 2018(12): 31-33.
XIA Dong, LIANG Dandan. Ecological flow (water quantity) security analysis of important rivers in Huaihe River basin. *Zhi-huai*, 2018(12): 31-33. (in Chinese)
- [22] 陆海明, 丰华丽, 邹鹰. 美国萨凡纳河生态流量管理实践案例研究[J]. *中国水利*, 2019(5): 25-29.
LU Haiming, FENG Huali and ZOU Ying. Case study on ecological flow management of Savannah River in USA. *China Water Resources*, 2019(5): 25-29. (in Chinese)
- [23] 王建平, 李发鹏, 孙嘉. 关于河湖生态流量保障的认识与思考[J]. *水利经济*, 2019, 37(4): 9-12+75.
WANG Jianping, LI Fapeng and SUN Jia. Understanding and thinking on ecological flow guarantee of rivers and lakes. *Journal of Economics of Water Resources*, 2019, 37(4): 9-12+75. (in Chinese)
- [24] 连煜. 生态流量与河流生态适应性管理研究[J]. *中国水利*, 2020(15): 33-34.
LIAN Yu. Study on ecological flow and river ecological adaptive management. *China Water Resources*, 2020(15): 33-34. (in Chinese)