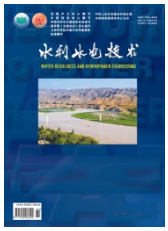

水利水电技术(中英文)
Water Resources and Hydropower Engineering
ISSN 1000-0860,CN 10-1746/TV

《水利水电技术(中英文)》网络首发论文

题目：基于过程进行水文地貌重建的河流生态修复：以美国基西米河为例
作者：陈清琤，赵进勇，丁洋，李志鹏
收稿日期：2024-07-25
网络首发日期：2025-06-04
引用格式：陈清琤，赵进勇，丁洋，李志鹏．基于过程进行水文地貌重建的河流生态修复：以美国基西米河为例[J/OL]．水利水电技术(中英文).
https://link.cnki.net/urlid/10.1746.tv.20250604.1031.002

网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

网络首发时间：2025-06-04 13:16:22　网络首发地址：https://link.cnki.net/urlid/10.1746.tv.20250604.1031.002

基于过程进行水文地貌重建的河流生态修复：以美国基西米河为例

陈清琤，赵进勇，丁洋，李志鹏

（中国水利水电科学研究院，北京　100038）

摘　　要：【目的】基西米河生态修复项目是为应对由于人类干预而导致的生态退化的河流治理方案，目的在于恢复基西米河流域生物多样性与减少对下游湖泊的污染，同时保留其防洪能力。【方法】为了恢复河湖之间与河流与洪泛平原之间水力连通性，基西米河修复通过先回填人工河道将水流重新引入原始河道，后控制上游水库的放水量模拟下游河流历史水文条件，借助水流过程的冲刷作用解决了原始河道的富营养物质堆积问题，同时利用原始河道的自然河道形态与水文过程中的侵蚀沉积作用恢复了河流的蜿蜒性。为恢复流域生物多样性，通过调节上游水库放水量还原了河岸带季节性洪水淹灌现象，重建了下游广阔的河漫滩湿地，为众多动植物与微生物提供栖息空间。【结果】经过二十多年的实施，基西米河生态修复项目取得了显著的成效。水质明显改善，流域生态系统的生物多样性显著提升，河岸湿地的蓄水调洪功能得到了基本恢复，同时净化了天然水体并提供了栖息地。【结论】基西米河生态修复项目不仅纠正了人类对自然环境干预造成的破坏性后果，还成为全球生态管理和修复实践中的重要里程碑。项目的成功实施，不仅提升了生物多样性和水质，还为当地社会经济带来了积极效益，如保护农业发展和促进自然旅游业。基西米河生态修复案例体现了水文地貌的修复在河湖生态修复中的关键作用，项目的底层修复逻辑顺应了当前基于自然的解决方案的原理，将防洪与保护生态环境结合，实现河流生态系统的稳定性和可持续发展。

关键词：基西米河；水文地貌；河流生态系统；去渠道化；生态修复工程；启示；影响因素

中图分类号：TV213.4　　文献标志码：A

River ecological restoration using process-based hydrogeomorphic reconstruction: A case study of Kissimmee River in the United States

CHEN Qingcheng，ZHAO Jinyong，DING Yang，LI Zhipeng

(China Institute of Water Resources and Hydropower Research， Beijing　100038，China)

Abstract: [Objective] The Kissimmee River Restoration Project is a river management solution designed to address ecological degradation caused by human intervention. The aim is to restore biodiversity in the Kissimmee River Basin and mitigate pollution to downstream lakes, while maintaining its flood control capacity. [Methods] To restore hydraulic connectivity between rivers and lakes and between rivers and floodplains, during the restoration of Kissimmee River, water flow was first redirected into the original river channel by backfilling artificial river channels, and then the discharge volume of the upstream reservoir was controlled to simulate historical hydrological conditions of the downstream river. The scouring effect of the water flow addressed the issue of nutrient

收稿日期：2024-07-25 **修回日期：**2025-03-02 **录用日期：**2025-03-03

基金项目：国家重点研发计划项目（2024YFC321090004）；世界银行资助项目“全球河流生态修复现状及路线图制定”(Contract-7205777)；中国水科院“城乡水系生态景观构建理论和技术研究创新团队”项目（WE0145B042021）；三峡后续工作项目（WE0161A042024）

作者简介：陈清琤（2000—），女，硕士研究生，主要从事河流生态保护与修复研究。E-mail：chenqingcheng2022@163.com

通信作者：赵进勇(1976—)，男，正高级工程师，博士，主要从事于河流生态修复、生态水工学等方向的研究。E-mail: zhaojy@iwhr.com

accumulation in the original river channel. Meanwhile, the natural channel morphology of the original river channel and the erosion and sedimentation in the hydrological process were leveraged to restore the meandering of the river. In order to restore the biodiversity of the river basin, the project regulated discharge of the upstream reservoir to reinstate seasonal flood inundation patterns in the riparian zone. Additionally, the extensive floodplain wetlands downstream were reconstructed, providing habitats for numerous animals, plants, and microorganisms. [Results] After more than 20 years of implementation, the Kissimmee River Restoration Project achieved remarkable results. Water quality improved notably, with a significant increase in biodiversity across the river basin ecosystem. Riparian wetlands largely restored their water storage and flood control functions, while also purifying natural water bodies and providing habitats for wildlife. [Conclusion] The Kissimmee River Restoration Project has not only rectified the destructive consequences of human intervention in the natural environment, but has also become an important milestone in global ecological management and restoration practices. The successful implementation of the project has improved biodiversity and water quality, while bringing positive benefits to the local society and economy, such as protecting agricultural development and promoting natural tourism. This case demonstrates the key role of hydrogeomorphic restoration in the ecological restoration of rivers and lakes. The underlying restoration logic of the project conforms to the current principles of Nature-based Solutions, integrating flood control with ecological environment protection to achieve the stability and sustainable development of the river ecosystem.
Keywords: Kissimmee River; hydrogeomorphology; river ecosystem; de-channelization; ecological restoration project; implication; influencing factors

0 引言

上个世纪，河道整治工程中存在自然河流渠道化现象，裁弯取直工程屡见不鲜[1]。21 世纪以来，我国河流管理工作已经开始重视通过适度向生态脆弱地区调水，改善湿地、河流的水文条件，来达到生态系统恢复的目的[1]，生态流量黑河调水工作与永定河生态补水工作目前在恢复河流生态环境方面已取得明显效果[2-3]。

在 2024 年中国水周期间，李国英部长强调了复苏河湖生态环境和坚持系统治理对于保障中国水安全的重要性[4]。他指出，河流治理是生态系统综合治理。河流保护工作的重点从单纯改善水质到修复河流生态系统是河流管理中一次认识的飞跃[1]。 河湖生态修复不仅是水资源管理的一部分，更是维护生态平衡和促进可持续发展的关键措施。通过实施母亲河复苏行动、加强河湖生态流量管理和生态补水、推进河湖水系连通等一系列举措，中国在恢复河湖生命力方面取得了显著成效，形成了适合我国国情、技术可行的流域水污染控制与治理、饮用水安全保障、水环境管理三大技术体系[5]。

在全球河流生态修复从单一工程治理向系统性、自然化治理转型的背景下，基于水文地貌重建的生态修复策略已成为流域可持续发展的重要实践路径。同时，这一趋势与 2025 年我国进一步深化水利改革，推动水利高质量发展的战略导向深度契合[6]，新阶段水利工程改革看重"重塑河流自然禀赋"，通过恢复水文节律与地貌多样性实现生态-社会效益协同，这种理念在美国基西米河生态修复工程案例中得到充分验证。

基西米河（Kissimmee River）生态修复工程是大沼泽地恢复计划的一部分，包括基西米河修复项目、基西米河恢复评估计划以及基西米湖泊链和基西米上游流域监测和评估三部分，其主要生态修复措施是通过回填大型人工运河重建原河道之间以及河道与洪泛平原之间的水力连通性。此前回填通常用于恢复地面高程和减少湿地排水量，且常用于小型河道[7]。在河道物理形态重建方面，其他修复项目多采用挖掘[8]或砾石掩埋[9]的方法处理干涸河道的沉积物问题，而基西米河生态修复项目中原河床基质的恢复与河道蜿蜒度、河曲沙洲再形成涉及到水工结构的拆除与保留和依赖于水文过程的流量管理机制。

1938 年，德国学者先提出了“近自然河溪治理”的理念，指出在完成河道治理任务时应综合考虑近自然、实用、经济、美观等多重原则，标志着河流生态修复领域理论研究的起点。在“近自然治理理念”的发展与指导下，学者们从河流生态系统生态特征、形态特征和水文特征等角度入手展开研究，提出了一系列河流生态修复的工程类技术，包括底泥疏浚、河流横向连通性和纵向连续性修复、断面形态多样性修复、河床

与河岸的生态化修复等[10]。工程修复如以自然仿生型鱼道为主要措施的加拿大丘吉尔河，完整性修复如美国俄勒冈州桑迪河上马莫特坝拆除工程，基西米河也属于大型河流近自然修复工程类技术具有代表性的案例之一。

在基西米河生态修复工程 2021 年竣工后，目前尚未有文献对其至今为止的成果进行系统的梳理与总结。本文以美国基西米河生态修复工程为例，通过对其修复阶段的解析与工程特点总结，探究了实施河湖生态复苏中修复侧重点与留存水利工程在河湖生态水文修复中的目标与作用，为我国防洪管理如何与保护水生态环境更好结合提供了借鉴。

1 基西米河流域地理特征

美国基西米河位于佛罗里达州中部，由基西米湖流出，向南注入美国第二大淡水湖——奥基乔比湖（Lake Okeechobee），全长 166km，流域面积 7800 平方 km。

基西米盆地作为基西米河-奥基乔比湖生态系统的源头，在佛罗里达州中南部占据重要地位。盆地的上游区域大约 4135 平方 km，拥有 24 个相互连通的湖泊，形成了温带与亚热带之间的生态过渡区。区域中的多样性栖息地，包括松树林、干燥草原、沼泽等，为 75 种珍稀物种提供了生存空间。该地区为亚热带气候区，湿季和干季时长几乎相等，上、下流域的年平均降雨量分别为 1210 mm 和 1140mm。气温在 5℃至 30℃之间波动[11]。流域下游土壤表层富含有机质，覆盖在矿物质亚层之上。河流坡度平缓，流速适中，河床由细沙、淤泥和粘土组成，河岸植被丰富多样[12]。两岸的洪泛区湿地因季节性淹没的特性形成了丰富的动植物群落，这些生物群落与河道水生无脊椎动物群落共同构成了一个复杂动态的生态系统。

基西米盆地及其周边的生态系统，因其独特的地理位置和生物多样性，成为佛罗里达州乃至整个美国东南部的一个重要的自然环境资源。同时，深受海洋影响的亚热带气候和集中于 6—10 月的雨季也使得之前缺少流量调控措施的基西米河水位时常暴涨暴落，埋下容易发生洪涝灾害的风险。

2 基西米河治理历程

2.1 生态修复项目背景

基西米河曾长期处于相对自然化状态，其蜿蜒性河流和湿地生境容纳了 300 多种鱼类和野生动物种群栖息[12]。河道与洪泛区之间具有良好的水流侧向连通性，一年中约有 35%~50%时间河水漫溢到两岸，为水生动植物供给了丰富的有机养分。很多鱼类把洪泛区作为避难、繁殖、觅食和幼鱼成长的场所。河流—洪泛区生态系统中季节性淹没的河漫滩以改变区域河流连通性的方式影响着河漫滩与河道内鱼类与无脊椎类的物种迁徙，从而对河流物种群落结构进行控制。该阶段，由于流域内的径流积累以及随后流域上游的湖水位上升，常出现洪涝灾害频发问题。

19 世纪 40 年代，一系列毁灭性的洪水灾害淹没了基西米河谷的城镇和农场，防洪需求的提升和农业发展的需求促使政府于 1962—1971 年对基西米河进行了渠道化治理。

1962 年，基西米河逐步被改造为一条长 90km、深 9m、宽 100m 的人工运河(见图 1)，并于 1971 年完工。这条运河将基西米河从基西米湖到奥基乔比湖的整个河道切断，排干原河道中的水流，将水直接输送到奥基乔比湖。此外，为满足航运需求沿 C-38 运河建造了 6 级拦河坝，最上游的 S-65 直接控制基西米湖出流，形成 5 级河道型水库。

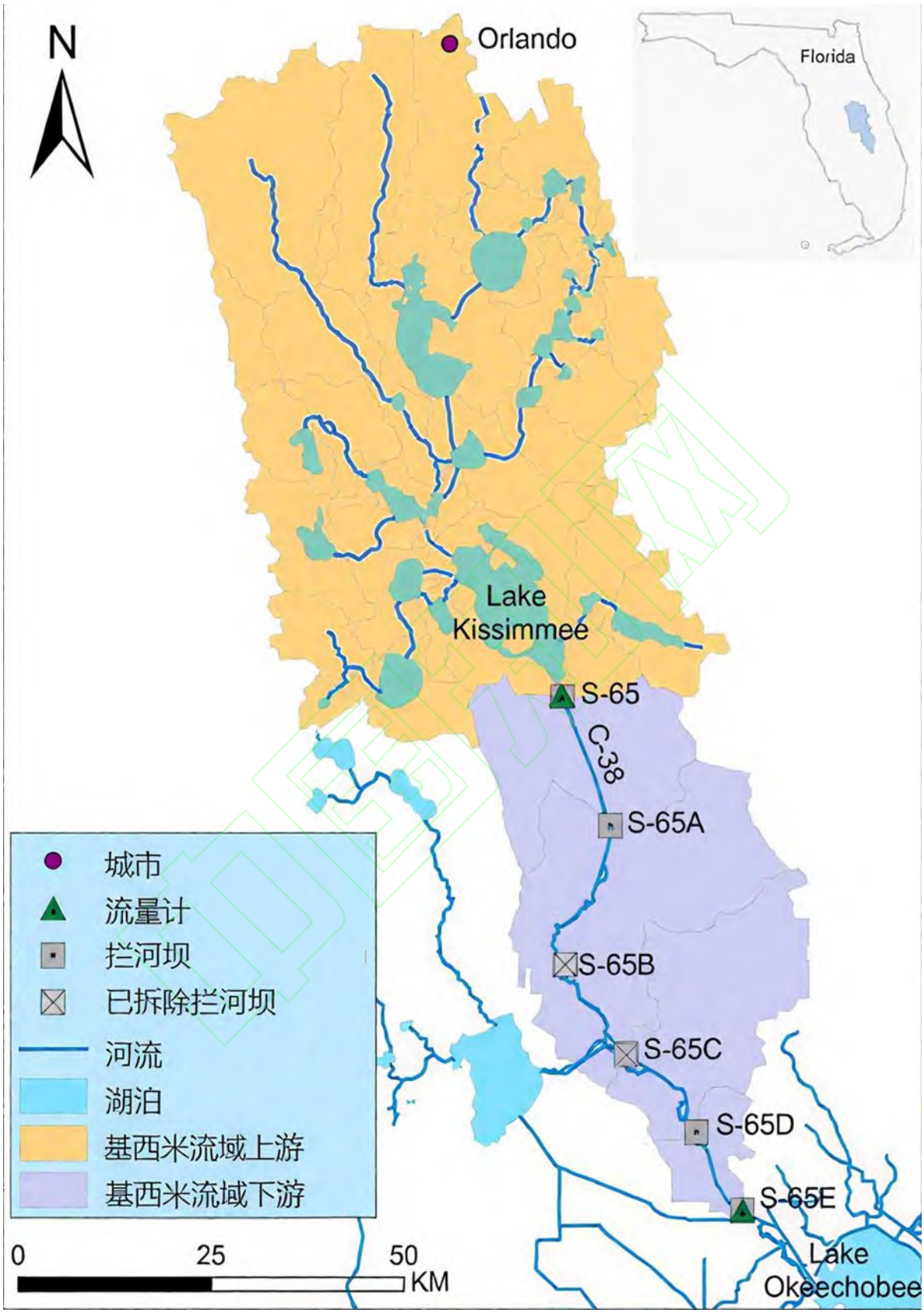

图 1　基西米河渠化工程水工结构位置[13]

Fig.1 Location of hydraulic structure in Kissimmee River channelization project[13]

这些工程措施使基西米河生态系统中生境恶化，失去季节性水位浮动，河漫滩中约 125km^2 湿地由于缺水迅速消失，44%的洪泛区被改造为牧场。此外，河道型水库将原有河道的剩余部分与水流基本隔离，使得其中堆积大量死亡浮游植物有机质。而新建造的人工河道的平顺水流缺乏缓冲作用且曝气率低，河流截面纵向溶解氧含量直线下降（见图 2），造成大量水生生物死亡。

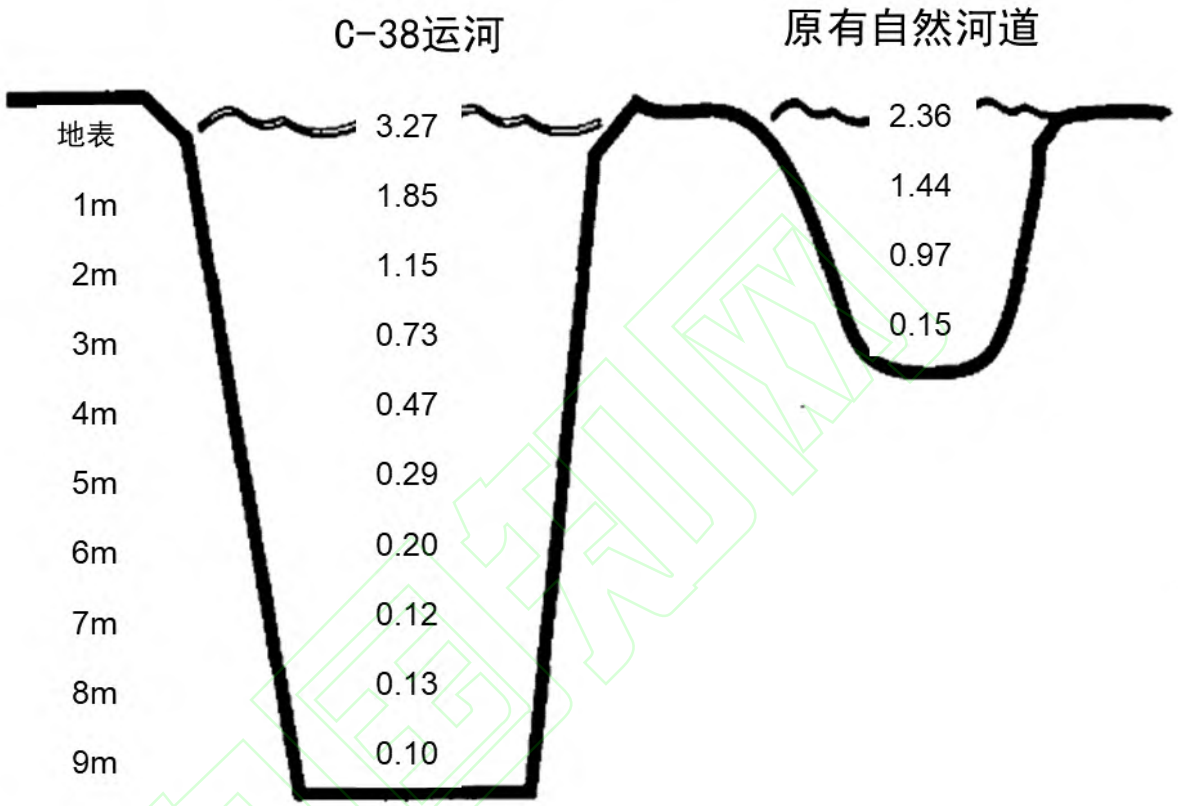

图 2 1989 年 C-38 和残留河道典型的夏季-秋季溶解氧剖面图[14]

Fig.2 Typical summer-autumn dissolved oxygen cross-section of C-38 and residual channels in 1989[14]

总体来看，修建人工运河的强干预措施虽然解决了一些短期问题，如洪水危机，但也造成了长期的生态环境影响，大规模人工河道的开挖完全破坏了河漫滩原始自然状态，硬质化堤岸阻隔了河流横向水文连通性。湿地萎缩也导致流域物种锐减，此后在短短几年内，水禽的数量下降了 90%，秃鹰的数量下降了 70%，部分鱼类、鸟类和哺乳动物物种直接消失[15]。物种消失既有栖息地遭到直接物理破坏的原因，也有水文条件改变的原因。同时人工运河河道过流能力提升、水力停留时间的缩短也导致河流中的污染物得不到有效净化，直接影响了下游奥基乔比湖水质。数据显示，基西米河在渠道化之前并不是下游奥基乔比湖的重要污染源，但 1970 年后，它所带来的污染物大量增加，流入该湖的氮和磷，分别有 25%和 20%是来自基西米河[11]。

2.2 生态修复阶段

2.2.1 生态修复工程前期研究（1972—1998 年）

20 世纪 70 年代，由于河道渠化造成的基西米河流域生态破坏问题开始受到联邦政府重视。1976 年，佛罗里达州议会通过了《基西米河生态修复法案》从而确立了对基西米河生态系统修复的尝试。为此，南佛罗里达水管理机构启动了三项主要的修复和规划研究，分别为第一次联邦可行性研究（1978—1985 年）、示范项目（1984—1990 年）和第二次联邦可行性研究（1990—1991 年）[11]。

在第一项可行性研究中，联邦政府公开向社会上的公共与私人环境保护机构征询了基西米河的环境问题与修复目标。起初在经过可行性分析后，由美国陆军工程团确定了 6 种修复措施。在协调委员会要求下，最终确定为部分回填 C-38 运河与建造组合式湿地作为修复手段。

1983 年，政府征购了洪泛平原的大部分私人土地，随后得到批准后的基西米河示范工程开始投入试验。示范工程包括 4 个组成部分：

（1） C-38 上建造三个钢板桩堰，通过分流至原有剩余河道来模拟回填的影响，将水流重新引回邻近的河道和洪泛区。评估中发现这些堰在高流量期间能分流多达 60%的 C-38 流量，但在流量低于 28 m^3/s 时，分流比例明显降低。同时模拟实验证明了，如图 3 所示，回填新河道可以使原河道重新引入的水流通过逐步冲刷或覆盖河底有机沉积物，恢复其以沙为主的典型河道基质特征。在对堰附近的 10 个河道截面监测中，河道截面形态从均匀浅碟形变为有沙洲的较深的 U 形，表明重新引入的水流恢复了河流蜿蜒性。

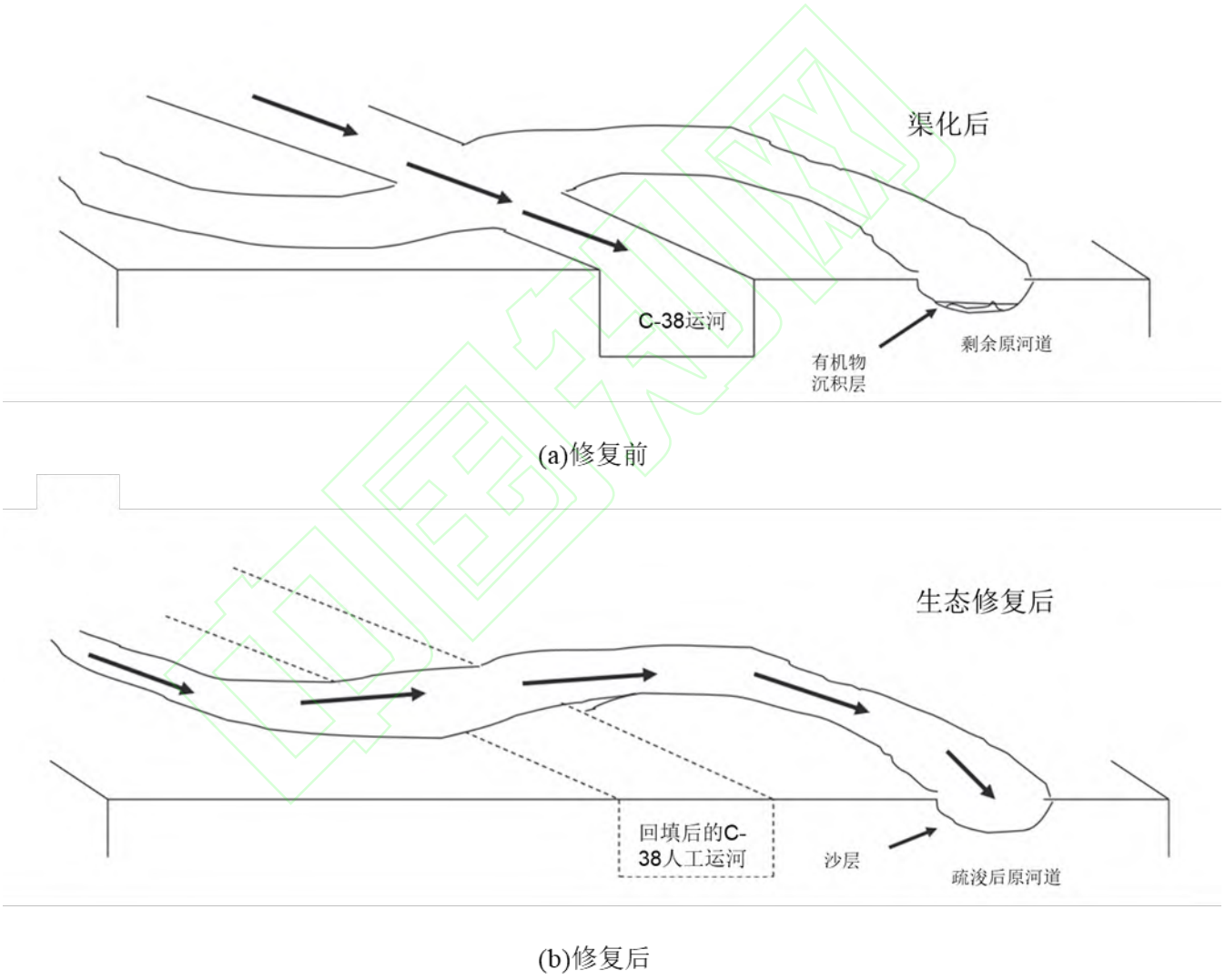

图 3 生态修复前后河流流动与河床变化示意图[16]

Fig.3 Schematic diagram of river flow and riverbed changes before and after ecological restoration[16]

（2）重建项目地点附近的季节性洪泛区，这一步通过增加丰水期 S-65A 和 S-65B 之间的水库 B 的泄水量与人工运河的分流共同完成。

（3）构建过流湿地系统，示范工程在 S-65A 以东的大堤上修建双筒滑道闸门结构。其设计目的是将水流输送到 B 库上游，从而形成过流湿地。并在运河 C-38 东岸修筑了 8000 英尺高的护堤，防止湿地的地

表径流回流至运河。

（4）水文和水力建模研究，包括室内物理模型的搭建，以评估示范工程可行性、防洪影响和沉积问题。

由加州大学伯克利分校进行的为期三年的物理和数学建模研究，基于示范工程开展[14]。采用一维及二维数学模型分析和模型试验相结合的研究方法。模型试验采用的模型尺寸为 0.6 和 3.7 m宽的水槽，垂直比尺 为 14：0，水平比尺为 16：0，为定床试验。模拟范围为人工运河、原有保留河道和洪泛平原。模型试验结果与现场河道控制泄流试验的实测数据相对照，研究确定了放置在 C - 38 中的回填土壤可以抵抗洪水的侵蚀。同时研究也表明，残存的运河段会造成原有河道流速过高、洪泛区水位快速回退、洪泛区淹没不充分，严重限制了修复工作的开展[14]。

示范工程中的一系列试验发现适当重建原有水文条件，包括恢复水位波动与分流至剩余自然河道的措施，引发了河道和河漫滩动植物群落对流量、水深和淹没频率的细微变化和主要变化的积极响应。河流和河漫滩生境中历史植被特征开始迅速恢复的现象证实了重建河流生态结构功能的可行性。

1990 年美国陆军工程兵团负责展开了第二次可行性研究，以确定回填的河段以及联邦政府的参与程度。研究确定以该二级回填计划为基础，主要集中在如何具体实施基西米河大规模生态修复工程并对其效果进行跟踪观测。二级回填计划包括 C-38 从 B 水库的中游持续回填至 S-65E 以北两 km 处。该计划预计将拆除 S-6SB、S-6SC 及其他水工建筑结构，包括溢洪道、水闸和堤坝。

2.2.2 **生态修复工程实践期（1998—2021 年）**

（1）河道蜿蜒性修复。该部分修复主要由回填人工运河与建造新河道组成，目标为将水流重新引入蜿蜒性良好自然河道，恢复河床如图 4 所示，在基西米盆地的运河回填工程按照 I， IVA， IVB， 和 II，III 的区域顺序进行。

图 4 基西米河生态修复工程项目图[17]

Fig.4 Map of Kissimmee River Restoration Project[17]

从 1998 年开始第一期主体工程，包括连续回填 C-38 号运河 38km、开挖新的河道以恢复原有自然河道连通性。新开挖的河道完全复制原有河道的形态，包括长度、断面面积、断面形状、纵坡降、河湾数目、

河湾半径、自然坡度控制以及河岸形状。期间，量化了施工活动对水质（浊度、总磷流量加权浓度、总磷负荷和溶解氧浓度）的影响。在施工上游和下游的站点以及施工区内的四个站点收集数据，确定了运河回填和建造 4.2 km 的新河道不会对当地和下游的水质产生显著负面影响[17]。

（2）河流水文连通性修复。针对基西米河的纵向连通性修复主要通过拆除部分水工建筑物与闸坝生态调度手段完成。如图 4 所示，项目分别于 2001 年与 2017 年移除拦河坝 S-65B 与 S-65C，通畅了其物质和能量的纵向流动。

基西米河的闸坝生态调度基于 TOTH 等[18]于 1998 年提出的一种新的流量管理方案，以基西米河自然阶段历史流量数据为保障河流生态功能的标准，当断面流量等于或小于生态流量目标时，开放上游闸门，大型水库进行水量下泄。通过调节上游水库的水量排放节律，确保下游河道的持续生态流量。该调节方案的数据设计基于上游湖泊链的连续模拟模型[19]，该模型通过模拟每日流量和各湖泊的水位变化，考虑了子流域的降雨量、温度和太阳辐射等因素，计算蒸散发和降雨径流过程。该流量调节方案允许基西米河产生过岸流的同时保留了防洪功能。这一步加强了干流与洪泛区的连通性，修复措施引起的一系列河道洪泛区栖息地物理、化学和生物的变化，改善了鱼类生存条件，重现宽叶林沼泽栖息地，使涉水禽和水鸟可以充分利用。

（3）生物多样性恢复。工程前期，生物恢复工作重点在于进行水文恢复时考虑淹没范围增加上游流域湖泊沿岸洪泛湿地的数量，为鱼类和野生动物提供充足的栖息地[20]。同时对流域内濒危和受威胁物种开展保护工作，使工程对原生物种的潜在威胁降到最低。后期，随着施工部分逐渐结束，生物恢复工作转为由佛罗里达鱼类与野生动物保护委员会负责，集物种保护，栖息地管理，公共休闲于一体，委员会同时制定了详细各个主要鱼类种群保护的新计划[21]。

2.2.3 生态修复工程成效

科学家选取 1935—1962 年基西米河流域情况为参考期，1972—1999 年数据为基准期，2001 年后数据为过渡期开展了修复区域内水文，水质，溶解氧和生物对生态修复工程响应的研究工作。

（1）VAN 等[22]通过对流域内残留湿地中指示物种及其繁殖体的存在性调查肯定了水文恢复后重建河漫滩植被的可能性，并强调了残余湿地在生态修复工程中保留原有物种的重要作用。

（2）COLANGELO 等[23]于 2014 年研究了一期工程恢复流量对基西米河生态系统新陈代谢的影响，发现恢复流量后的河段与第一阶段前的相比，溶解氧浓度从 2.2 mg / L 显著增加到 4.9 mg / L，逐渐与参考数值趋近。河道内溶解氧浓度情况的改善为原始鱼类种群的恢复提供了良好的生存环境。

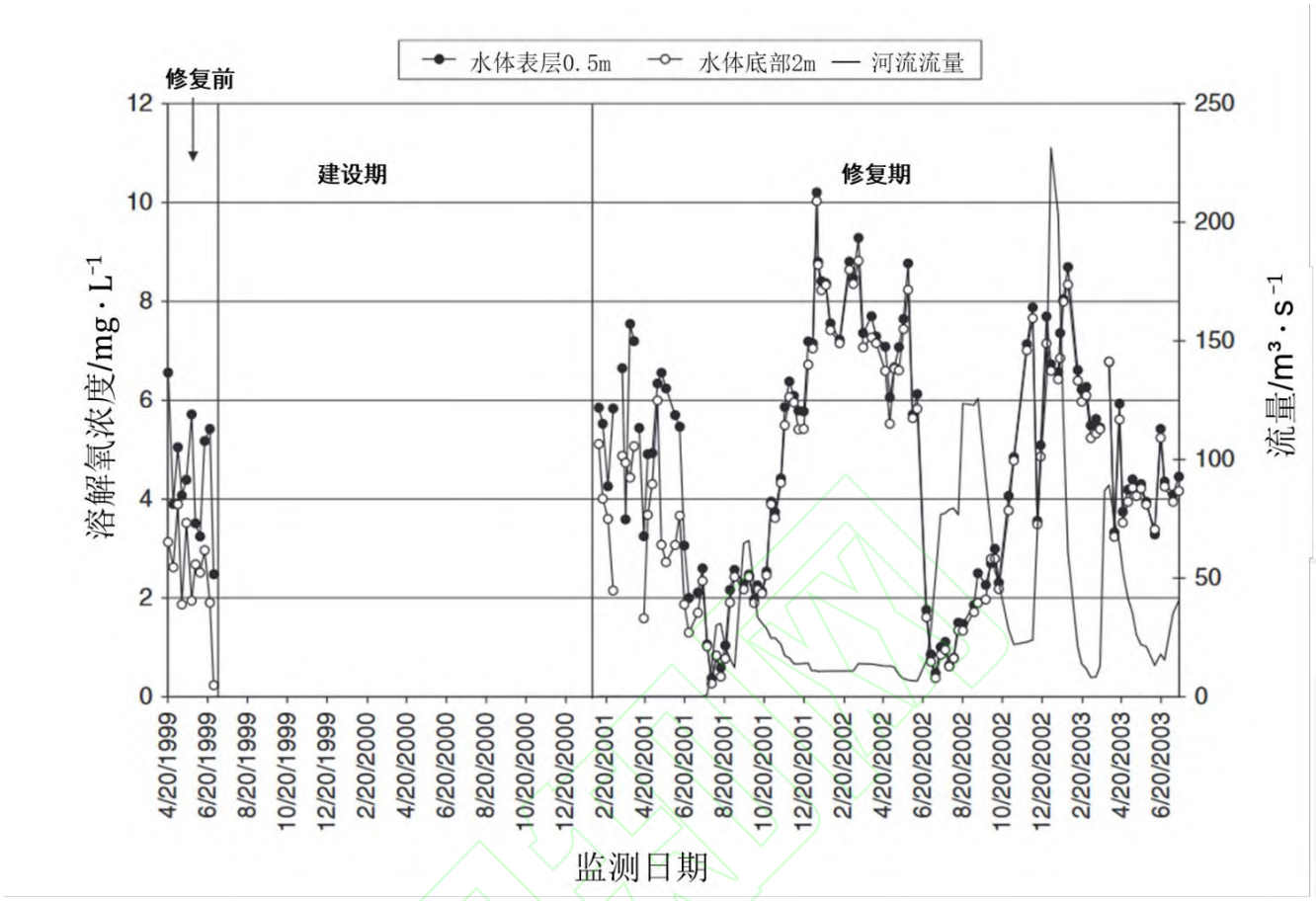

图 5 修复开始前后表层水体与底层水体溶解氧浓度变化[23]

Fig.5 Changes in dissolved oxygen concentration in surface water and bottom water before and after restoration[23]

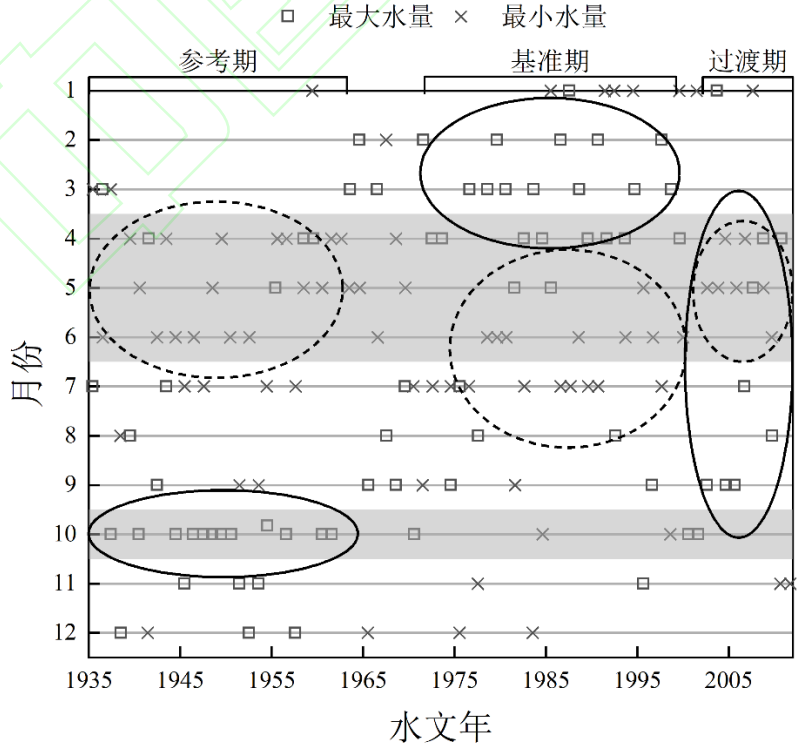

图 6 参考期、基准期和过渡期的基西米河 S-65 处每个水年的最大和最小月平均排水量月份[24]

Fig.6 Months of maximum and minimum monthly average discharge per water year at S-65 in Kissimmee River during reference, baseline, and transition periods[24]

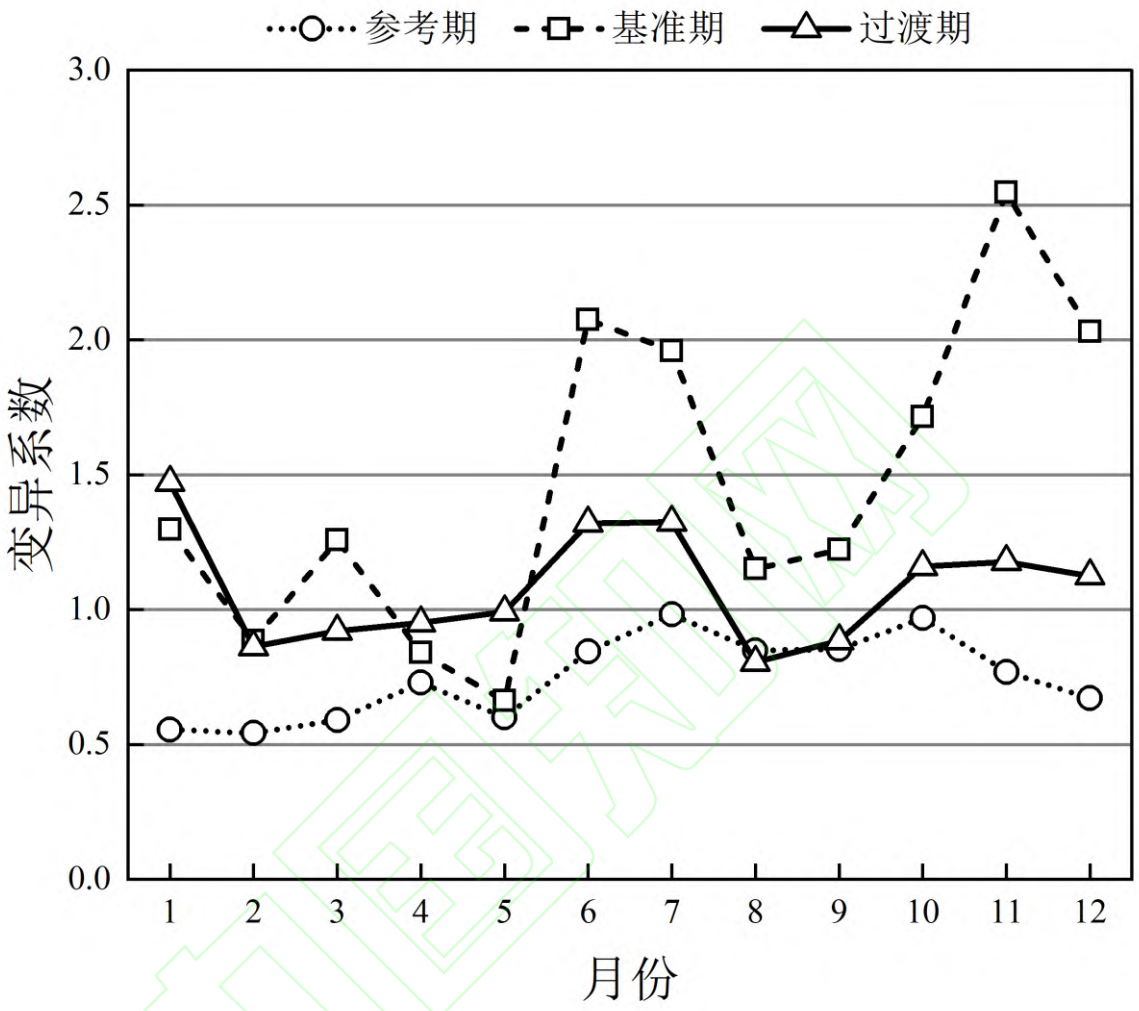

图 7 月平均排水量变异系数[24]

Fig.7 Coefficient of variation of monthly average discharge[24]

（3）ANDERSON 等[24]于 2014 年分析了工程开始十年后的区域水文数据与之前对比，如在图 6 所示，阴影表示根据参考期的高浓度值，4、5、6 月为最小水量月份，10 月为最大水量月份。圆圈表示基准期、基线期和中期的月平均排放量最大值（实线）和最小值（虚线）。可以看出自工程开始后，过渡期内的最大水量月份逐渐向参考期的 10 月接近，最小水量月份则稳定在 4—6 月份。图 7 则可以明显看出过渡期月平均排放水量的变异系数比基准期更类似参考期的变化规律，河流水文情势向渠道化前靠拢。

（4）在 2023 年基于 DBHYDRO 数据库对基西米河流域总氮总磷的输出统计[25]中发现，总氮年流量加权平均浓度在工程开始后整体呈下降趋势（见图 8），而总磷年流量加权平均浓度则未满足预期的修复效果，持续成为下游深受藻华污染的奥基乔比湖的磷来源之一。磷输出提高可能是由于长期的水力连通性切断削弱了洪泛区固存养分的能力，且回填用土大部分来自基西米河原河漫滩土的弃土堆，这些土壤具有高磷和低氮的特征，造成后续土体中磷酸盐进入河流成为营养源加剧了下游湖泊富营养化的问题[26]。但该研究也表明随着修复进程的完成，基西米河磷年累计负荷增长速率在 2019 年开始减缓。

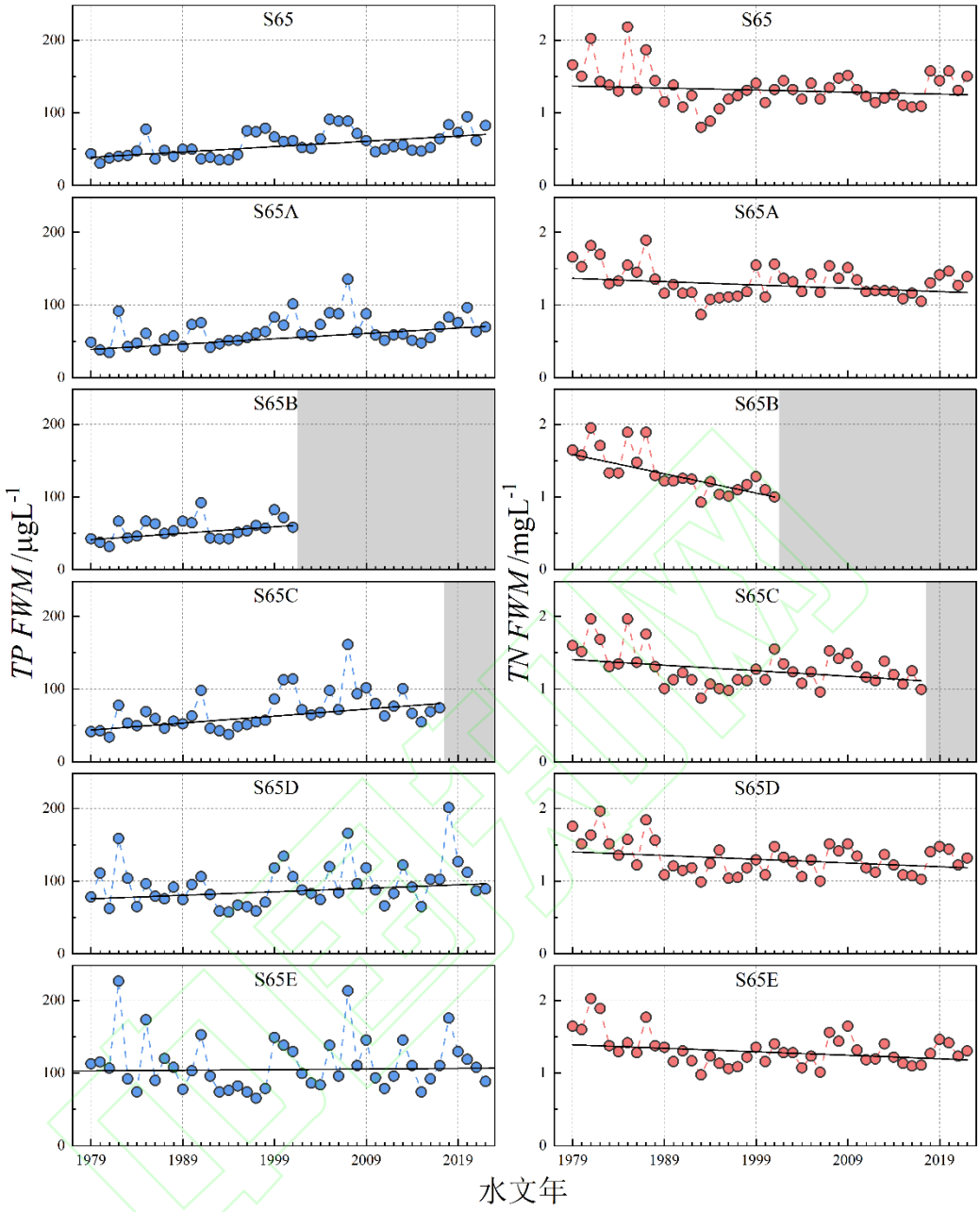

图 8 基西米河各拦河坝处 1979 — 2022 年水年(5 月—次年 4 月)的总磷(TP)和总氮(TN)年流量加权平均浓度趋势图（灰色阴影区域表示该拦河坝已被拆除）[25]

Fig.8 Trends in flow-weighted annual average concentrations of total phosphorus (TP) and total nitrogen (TN) at dams along Kissimmee River during water year from 1979 to 2022 (May-April of the following year) (grey-shaded areas indicate that dams have been demolished)[25]

（5）生态评估方面，基西米河及其洪泛区的生态修复项目取得了显著成效，部分指标甚至超出了预期。2017—2021 五年的监测数据显示 [17]，湿地植物，包括马尾藻、慈姑、卡罗来纳柳和纽扣花回归洪泛区；入侵的漂浮植物和垫状植物被原生植物取代；河底有机物沉积减少了 71%，沙洲形成，为岸鸟和无脊椎动物（包括本地蛤）提供了新的栖息地；河道溶解氧增加，有利于对于鱼类和其他水生生物的生存，溶解氧的含量最高的地点较修复工程前增加了六倍；原有鱼类大口黑鱼和太阳鱼的数量增加：现在这些鱼类占鱼类群落的 63%，而在修复前仅占 38%；长腿涉水禽类种群显著增加，包括白鹮、大白鹭、小白鹭和小蓝鹭等；八种消失的鸻鸟类回归河流和洪泛区，包括繁殖期的黑颈长脚鹬。

2021 年 7 月 29 日，基西米河生态修复工程举行了竣工仪式，对河道的回填正式完成。2022 年的伊恩飓风来袭时，基西米河已恢复的湿地容纳了数十亿加仑的暴雨，成功避免了佛罗里达中部地区洪水灾害。

2.3 系统提升阶段（2021 年至今）

2021 年基西米河的生态修复工程竣工之后，通过对上游水库的调节控制下游河流水文的计划还在继续。南佛罗里达州 2024 环境报告[27]提出，基西米河修复工程的竣工为逐步实施新的基西米河源振兴计划（KISSIMMEE RIVER HEADWATERS REVITALIZATION SCHEDULE，HRS）奠定了基础，该计划将作为基西米河生态治理的最后一阶段，2021 年开始开发，预计 2024 年获得批准。 HRS 将分阶段实施，以增加基西米湖、赛普拉斯湖（Lake Cypress）和哈奇内哈湖（Lake Hatchineha）水容量，以基西米河重返历史流量，同时保证不低于目前的防洪能力为目标。预计夏季和冬季将调节计划标高提高到比当前高约 0.5 英尺。 期间进行密集监测，以评估水位变化的影响。管理计划的预计分阶段在 2026 年前提升源头湖（基西米湖、赛普拉斯湖和哈奇内哈湖）水位，届时 HRS 将全面实施。HRS 的目的是通过增加 S-65 拦河坝的出流量，为下游提供足够的蓄水，进一步重建渠化前基西米河的水文条件。南佛罗里达水资源管理区预估，该计划中的水位提升措施也将有望进一步改善湖泊沿岸带的生境。

3 基西米河生态修复工程总结与借鉴

基西米河生态修复项目是对人类历史上干预自然环境后果的一种纠正，同时也是对未来生态管理和修复实践的一个示范。通过研究探讨此类成功案例，可以研究如何更好地平衡人类活动与水生态系统的健康和可持续性，寻求生态系统保护与修复的目标。

3.1 重建河流水文地貌中的水利工程生态化改造

河流生态恢复的任务有 4 大项：一是水文情势的改善；二是河流地貌景观修复；三是水质改善；四是生物群落多样性的维持与恢复。水文情势的改善和河流地貌景观修复是河流生态修复中的两大重要任务[28]。基西米河生态修复工程中，最主要的工程措施在于对历史基西米河水文条件和基于水文过程的地貌修复[29]。官方 2005 年对基西米河生态修复项目修复期望中与水文地貌相关的目标如表 1 所列[30]。

表 1 对基西米河生态修复后水文地貌反应的恢复预期

Table 1 Restoration expectations for hydrogeomorphic responses after Kissimmee River ecological restoration

No.	生态修复目标预期
1	使恢复的自然河道每水文年中流量等于 0 的天数为零
2	年内月平均流量与历史的季节流量接近，并具有年际变化(变异系数 < 1.0)
3	河道水位每水文年将超过地面平均高程 180 天，水位波动 3.75 英尺
4	重新恢复每年一次的长期退水事件，持续时间大于 173 天，在雨季（6 月至 10 月）达到高峰期，在旱季（11 月至 5 月）退至低谷期，退水速度不超过每 30 天 0.30 m
5	一年中至少有 85% 的时间，主河道内的平均流速介于 0.2 - 0.6 m/s 之间
6	在原始残存河道中，基底覆盖河床沉积物的平均厚度将减少>65%，无基底覆盖河床沉积物的样本百分比将增加>165%，河谷基底覆盖河床沉积物的厚度将减少>70%
7	弧角> 70° 的河道弯道内侧会形成河曲沙洲

目标中不仅涉及对河道内水文地貌情势的恢复，还涉及到对河道内或河道外河漫滩侵蚀或沉积形成的地貌区域的恢复，预设了两岸洪泛区淹没频率、淹没水深和流速。恢复方法不采用单纯的形态塑造，而是重新激活塑造这些形态的水文过程。通过允许河漫滩的淹没来强调河流侵蚀与沉积过程的重新运作与自然修复，试图通过最少的控制与干预来修复韧性生态系统，以推动河流的自然修复。在这方面，基西米河的流量管理方案的成功证明了以环境生态效应为目标的水利工程枢纽使用可以加速修复已被强烈扰动的河

湖水文情势，在其水文过程无法自然恢复时通过开闸放水进行水位调节，从而优化其水力连通性格局。

中国也有着许多发挥重要功能的洪泛湿地，以鄱阳湖和洞庭湖为代表的长江中游通江湖泊是我国最重要的洪泛湿地湖群，其独特的水文条件繁衍了极其丰富的生物多样性[31]。近些年来受建闸影响，许多湖泊因此失去了河湖之间的水力联系和生态联系，洪泛湿地逐渐退化。因此在鄱阳湖地区拟建水利工程引发了不少对干扰湖区洪水脉冲的变化形式与程度，影响湖泊生态系统稳定性的担忧。但如基西米河示范工程的成功建立在对已有水利工程的生态化改造与利用，对鄱阳湖及周围的生态水文过程的充分研究并利用水利工程保护其稳定性才能应对持续发展带来的新问题。

3.2 长期监测与评估

生态系统的修复需要时间，且其效果可能不是立即可见的。基西米河的案例强调了持续监测和评估的重要性，以便及时调整策略。由于人工运河建设期间导致的环境恶化，出现反对声音与非官方组织的环境监测活动，促使在运河建设结束的第五年就通过了《基西米河修复法案》。与其他生态修复案例相比，虽然前期的渠道化工程时效性短，经济成本巨大，但因此保留了部分原生物种，可借助残余湿地进行植被重建[22]，这在后续的生态修复中发挥了重要作用。如果原生生态系统在工程前已完全破坏或退化，会增加生态修复中对生物物种恢复部分的难度。在生态修复工程后续工作中，持续性的监测也占据重要地位。目前在南佛罗里达水管理区的官方网站上，通过 DBHYDRO 数据库可以下载到基西米河流域监测站点的地理位置信息与实时水文水质数据[32]。生态修复中也制定了评估的定量标准，以 60 分为期望值，各个因子分别为：栖息地特性（含地貌、水文和水质）占 12 分，湿地植物占 10 分，基础食物（含浮游植物、水生附着物和无脊椎动物等）占 13 分，鱼类和野生动物占 25 分[33]。评估对于反馈修复项目的社会、经济和环境影响至关重要。它不仅包括生态和环境方面的评价，还涉及社会经济效益的分析，如修复工作对当地社区的影响、旅游业的促进以及生态服务的价值。通过全面的评估，可以确保河流修复项目在生态治理的同时，也顾及到社会经济发展和居民生活质量的提升。

在中国河湖生态复苏行动中，监测和评估也是确保河流修复项目有效性和可持续性的关键环节。可以通过对河流的水质、生物多样性、沉积物运动、流域生态健康状况等方面进行持续的监测，及时了解修复措施的效果。尤其是为大型流域系统建立类似 DBHYDRO 的即时数据库，有助于科学家和决策者更好地理解河流系统的复杂性和动态变化，从而做出更合理的管理和干预。此外，在中国的河流生态修复实践中，方案设计人员应提前考虑到使用修复材料的特征是否会加剧污染物的输出，是否对修复后的河流水质产生负面影响这一问题。

3.3 采用基于自然的生态修复策略与洪水管理办法

基于自然的解决方案(Nature-based Solutions，NbS)利用自然或经过改造的生态系统来管理径流和洪水，可以解决这两方面的潜在问题，有助于减少洪水风险，同时促进河流生态系统的保护或恢复及其社会和环境效益。基西米河生态修复项目是基于自然的解决方案在流域治理方面运用解决水污染与生物多样性危机的一个重要案例。一方面，修复方案强调对于河流生态系统自身功能的调动，通过恢复河流的水文节律，洪泛区的重现和维持。另一方面，项目在建设过程中也尽可能地考虑到对本土物种的栖息地的保护，注重生态环境的可持续性，使该区域能够再次支持多种水生生物、鸟类和其他野生动物的生存。基西米河项目拆除下游拦河坝保留上游拦河坝用以调节水位与规避洪涝风险。同时政府鼓励居民迁离洪区，恢复原本被占用的洪泛区，使其重新发挥蓄洪的缓冲作用，减少下游地区的洪水风险。

近年来，基于自然的解决方案引起国际社会普遍关注，世界自然联盟（IUCN）将此理念吸纳到 7 项社会挑战的应对中[34]。近自然方法在国际范围内已在多个国家取得显著成效，二十一世纪以来，包括法国、西班牙、瑞典、芬兰、爱沙尼亚和英国在内的国家均开展了对大坝、堰和屏障的移除工程。这些河流在大坝拆除后能够迅速恢复其自然流动，改善了营养物和沉积物的运输，有助于增强流域的整体恢复能力和适应气候变化的韧性。河流生态系统的物种多样性，如迁徙鱼类和水生无脊椎动物，都得到了显著的恢复。这表明近自然河流修复在提高生物多样性、改善水质、增强生态系统韧性方面的巨大潜力。

基于自然水流状态与过程的生态流量调节方案是我国对 NbS 的实践，其中长江上游大型梯级水电站多目标、多任务、多尺度的联合调度已成为闸坝生态调度技术实施的典范。由于中国地域辽阔，河流系统贯

穿自然、乡村与城市，连接高地与海洋，具有巨大的地域差异性与多样性，因此具体实践中的河湖生态修复需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，深入认识不同类型水生态系统。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。流域中不同河段与不同水文年常存在不同的生态流量问题，需因地制宜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[35]。而在洪水管理方面，中国宜采用更新、更广泛的方法来管理洪水和河流——“多目标洪水管理”，其中包括非结构性（例如避免在洪水易发地区进行分区开发政策）、结构性（例如堤坝）、NbS（例如湿地恢复）和综合项目。这些干预措施的组合在整合多个目标的系统中能够进行更高效的规划和管理。

3.4 以流域为单元的管理

20 世纪 80—90 年代，美国环保部门逐渐认识到以流域为基本单元的水环境管理模式十分有效，开始在流域内协调各利益相关方力量以解决最突出的环境问题。1996 年，美国环保局颁布了《流域保护方法框架》，通过跨学科、跨部门联合，加强社区之间、流域之间的合作来治理水污染。框架实施过程中，结合排污许可证发放管理、水源地保护和财政资金优先资助项目筛选，有效地提高了管理效能。基西米河生态修复工程是一个整体流域出发的系统修复工程[36]，目前南佛罗里达水管理区不仅关注河道的修复，还综合考虑整个流域内的养分削减、水资源管理和土地利用等多方面因素[37]。我国自党的十八大以来基于流域的生态文明建设观念深入人心，一直立足于流域的系统性、水流的规律性统筹规划，有效提升流域水安全保障能力，愈加重视从流域尺度出发的整体生态修复。

4 结论

基西米河生态修复项目的实施为我国未来生态修复提供了以下经验：

（1）生态修复方面，开展河流生态修复的第一步，是从流域水文、地形地貌、生态生境等方面开展现状调查，了解河流退化的根本原因和修复需求。重视对河岸地貌与河道形态的塑造，河道空间形态越复杂，河道生态水力性能越好[38]。加深对河流历史水文地貌的研究，以确保更准确捕捉到河流恢复过程中产生的复杂水文模型，应用在对修复预期的规划中。基西米河案例在生态修复实践中针对不同修复目标明确划分参考期与基准期，使得后续的生态修复有目标预期与理论参考。

（2）原有传统水工建筑物在生态修复中应该有新目标与作用，基西米河工程通过大规模流量实验与对预期修复目标的把握，研究健康的河流水文节律，遵循节律拆除与保留部分传统水利工程，使其在后续水文恢复中发挥重要作用。我国在生态修复中应合理地使用传统水工建筑，规划洪泛区或者河岸带湿地，发挥其优化河湖水力连通性的作用。将防洪与河湖生态环境复苏有效结合，保障河湖健康与人民安全。

（3）采用以流域为单元的多目标河湖管理办法，分区建立即时动态数据库监测重要水质水文指标，持续评估流域内河湖健康状态，评估需要综合考虑整个流域内的生态系统健康、水资源管理和土地利用状况。

基西米河生态修复项目不仅是人类对自然环境干预造成破坏性后果的一次成功纠正，也是全球生态管理和修复实践中的重要里程碑。项目的实施不仅大幅提升了生物多样性和水质，还为当地社会经济带来积极效益，保护了当地的农业发展同时增强了该地区作为自然旅游目的地的吸引力。案例中主要采用了恢复水文地貌多样性的方法修复河流生态系统，也符合了对水生态系统五大要素的定义[39]。

目前随着生态文明理念逐步深入，我国相关行业部门研究定了多部河湖生态保护与修复的相关标准，涉及规划、评估、工程等多个环节，包括评价计算、单项工程技术、规划编制、系统性工程技术导则和生物多样性影响等多个方向。但河湖生态系统本身演替的动态性、影响因素的复杂性以及生态治理的阶段性等特征，令河湖生态保护与修复工作加复杂。随着长江大保护、黄河流生态保护与高质量发展等战略与政策的推进，相关技术标准体系存在 “跟不上、不全面、难落地”等问题，仍需进一步完善与加强[40]。

基西米河治理过程凸显了跨学科合作和综合管理策略的重要性与生态修复项目的持续成功需要技术创新、政策支持和公众参与，为全球应对环境变化、生物多样性减少等挑战提供了宝贵的经验，。这一案例的经验为中国乃至全球其他地区在河流生态修复和可持续发展领域的努力提供了重要的启示和借鉴。

参考文献：

[1] 董哲仁. 河流保护的发展阶段及思考[J]. 中国水利, 2004(17):16-17.

DONG Z R. Stages of river protection development and considerations[J]. China Water Resources, 2004(17):16-17.

[2] 卢振园, 唐德善, 郑斌, 等. 黑河下游调水及近期治理生态影响后评价[J]. 环境科学学报, 2011, 31(7): 1556-1561.

LU Z Y, TANG D S, ZHENG B, et al. Post-evaluation of the ecological impact of water diversion and recent management in the downstream Heihe River[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, 31(7): 1556-1561.

[3] 邵惠芳, 刘军梅, 刘培斌, 等. 永定河北京段生态补水调配方案研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2021, 52(7): 62-72.

SHAO H F, LIU J M, LIU P B, et al. Study on allocation scheme of ecological water supply in Beijing section of Yongdinghe River[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2021, 52(7): 62-72.

[4] 李国英. 为以中国式现代化全面推进强国建设、民族复兴伟业提供有力的水安全保障: 在 2024 年全国水利工作会议上的讲话[J]. 水利发展研究, 2024, 24(1): 1-10.

LI G Y. Improved water security for China’s efforts to build itself into a stronger country and rejuvenate the Chinese nation on all fronts by pursuing Chinese modernization: Speech at the 2024 National Water Conservancy Work Conference[J]. Water Resources Development Research, 2024, 24(1): 1-10.

[5] 吴丰昌. 我国水体污染控制与治理成效、科技支撑与展望[J]. 水利发展研究, 2023, 23(12): 1-8.

WU F C. Effectiveness, scientific and technological support, and prospects for water pollution control and management in China[J]. Water Resources Development Research, 2023, 23(12): 1-8.

[6] 李国英. 进一步全面深化水利改革 为推动水利高质量发展、保障我国水安全作出新的贡献: 在 2025 年全国水利工作会议上的讲话[J]. 水利发展研究, 2025, 25(1): 1-12.

LI G Y. Further comprehensively deepen water conservancy reform to promote high-quality development of water conservancy and safeguard national water security: A speech at the 2025 national water conservancy work conference[J]. Water Resources Development Research, 2025, 25(1): 1-12.

[7] BAUSTIAN J J, EUGENE TURNER R. Restoration success of backfilling canals in coastal Louisiana marshes[J]. Restoration Ecology, 2006, 14(4): 636-644.

[8] HENRY C P, AMOROS C, ROSET N. Restoration ecology of riverine wetlands: a 5-year post-operation survey on the Rhône River, France[J]. Ecological Engineering, 2002, 18(5): 543-554.

[9] SARRIQUET P E, BORDENAVE P, MARMONIER P. Effects of bottom sediment restoration on interstitial habitat characteristics and benthic macroinvertebrate assemblages in a headwater stream[J]. River Research and Applications, 2007, 23(8): 815-828.

[10] 许继军, 景唤. 河流生态修复理念与技术研究进展[J]. 农业现代化研究, 2022, 43(4): 691-701.

XU J J, JING H. Research progress of river ecological restoration concept and technology[J]. Research of Agricultural Modernization, 2022, 43(4): 691-701.

[11] South Florida Water Management District. Kissimmee River Restoration Studies: Volume I - Establishing a Baseline: Pre-Restoration Studies of the Channelized Kissimmee River [R]. Florida: SFWMD, 1992.

[12] South Florida Water Management District，US Army Corps of Engineers. Kissimmee River Restoration Study [R]. West Palm Beach, FL: SFWMD, 1992.

[13] CHEN X, WANG D B, TIAN F Q, et al. From channelization to restoration: Sociohydrologic modeling with changing community preferences in the Kissimmee River Basin, Florida[J]. Water Resources Research, 2016, 52(2): 1227-1244.

[14] KOEBEL JR J W. An historical perspective on the Kissimmee River restoration project[J]. Restoration Ecology, 1995, 3(3): 149-159.

[15] PERRIN L S, ALLEN M J, ROWSE L A, et al. A report on fish and wildlife studies in the Kissimmee River Basin and recommendations for restoration [R]. Okeechobee, FL: Florida Game and Fresh Water Fish Commission, 1982.

[16] ANDERSON D H. Geomorphic responses to interim hydrology following phase I of the Kissimmee River restoration project, Florida[J]. Restoration Ecology, 2014, 22(3): 367-375.

[17] US Army Corps of Engineers. Kissimmee River Restoration Project: Facts and Information [R]. Washington, DC: US Army Corps of Engineers, 2021.

[18] TOTH L A, OBEYSEKERA J T B, PERKINS W A, et al. Flow regulation and restoration of Florida’s Kissimmee River[J]. Regulated Rivers: Research & Management, 1993, 8(1): 155-166.

[19] FAN A. A routing model for the upper Kissimmee chain of lakes [R]. West Palm Beach, FL: South Florida Water Management District, 1986.

[20] South Florida Water Management District. Fish and Wildlife Coordination Act Report [R]. West Palm Beach, FL: South Florida Water Management District, 1994.

[21] Florida Fish and Wildlife Conservation Commission. Fish, Wildlife, and Habitat Management Plan [R]. Tallahassee, FL: FWC, 2022.

[22] VAN DER VALK A G, TOTH L A, GIBNEY E B, et al. Potential propagule sources for reestablishing vegetation on the floodplain of the Kissimmee River, Florida, USA[J]. Wetlands, 2009, 29(3): 976-987.

[23] COLANGELO D J, JONES B L. Phase I of the Kissimmee River restoration project, Florida, USA: Impacts of construction on water quality[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2005, 102(1): 139-158.

[24] ANDERSON D H. Interim hydrologic responses to phase I of the Kissimmee River restoration project, Florida[J]. Restoration Ecology, 2014, 22(3): 353-366.

[25] JULIAN P, OSBORNE T Z, ELLIS R. Evaluation of biogeochemical changes in channelized and restored portions of a subtropical floodplain[J]. Hydrobiology, 2023, 2(1): 1-18.

[26] SHIN S, HER Y, MUÑOZ-CARPENA R, et al. Quantifying the contribution of external loadings and internal hydrodynamic processes to the water quality of Lake Okeechobee[J]. Science of The Total Environment, 2023, 883: 163713.

[27] South Florida Water Management District. 2024 South Florida Environmental Report Highlights [R]. West Palm Beach, FL: South Florida Water Management District, 2024.

[28] 董哲仁, 孙东亚. 生态水利工程原理与技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
DONG Z R, SUN D Y. Principles and Technologies of Eco-Hydraulic Engineering[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2007.

[29] WOHL E, RATHBURN S, DUNN S, et al. Geomorphic context in process-based river restoration[J]. River Research and Applications, 2024, 40(3): 322-340.

[30] ANDERSON E D H, BOUSQUIN S G, WILLIAMS G E, et al. Defining success: expectations for restoration of the Kissimmee River [R]. West Palm Beach, FL: South Florida Water Management District, 2005.

[31] 徐力刚, 谢永宏, 王晓龙. 长江中游通江湖泊洪泛湿地生态环境问题与研究展望[J]. 中国科学基金, 2022, 36(3): 406-411.
XU L G, XIE Y H, WANG X L. Ecological environment problems and research prospect of flood wetlands of Yangtze River-connected Lake in the middle reaches of Yangtze River[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2022, 36(3): 406-411.

[32] KOEBEL JR J W, BOUSQUIN S G. The Kissimmee River restoration project and evaluation program, Florida, U.S.A[J]. Restoration Ecology, 2014, 22(3): 345-352.

[33] 董哲仁. 美国基西米河生态恢复工程的启示[J]. 水利水电技术, 2004, 35(9): 8-12, 19.
DONG Z R. The enlightenment from the Kissimmee River ecological restoration project[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2004, 35(9): 8-12, 19.

[34] 彭静, 张建立, 史源. 国际河湖管理经验概述[J]. 中国水利, 2023(12): 11-14.
PENG J, ZHANG J L, SHI Y. Review of international river and lake management experiences[J]. China Water Resources, 2023(12): 11-14.

[35] 肖汐, 张翔, 刘建, 等. 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(2): 157-167.
XIAO X, ZHANG X, LIU J, et al. Adaptive management model of river ecological flow and its application[J]. Journal of Water Resources Research, 2021(2): 157-167.

[36]TOTH L A, ARRINGTON D A, BRADY M A, et al. Conceptual evaluation of factors potentially affecting restoration of habitat structure within the channelized Kissimmee River ecosystem[J]. Restoration Ecology, 1995, 3(3): 160–180.

[37] TARABIH O M, ARIAS M E, SANTOS A L, et al. Effects of the spatial distribution of best management practices for watershed wide nutrient load reduction[J]. Ecological Engineering, 2024, 201: 107211.

[38] 唐杰, 陈垚, 程麒铭, 等. 河道形态改造对城市河流生态水力性能的影响[J]. 水资源保护, 2022, 38(6): 185-193.
TANG J, CHEN Y, CHENG Q M, et al. Influence of river course form transformation on ecological hydraulic performance of urban rivers[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(6): 185-193.

[39] 董哲仁. 论水生态系统五大生态要素特征[J]. 水利水电技术, 2015, 46(6): 42-47.
DONG Z R. On features of five dominant ecological components of aquatic ecosystem[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2015, 46(6): 42-47.

[40] 赵进勇，于子铖，张晶，等. 国内外河湖生态保护与修复技术标准进展综述[J]. 中国水利, 2022(6): 32-37.
ZHAO J Y, YU Z C, ZHANG J, et al. Progress of technical standards for ecological protection and restoration of rivers and lakes[J]. China Water Resources, 2022(6): 32-37.