文章编号:1001 - 4179(2025) 10 - 0137 - 09
引用本文:赵进勇,李奥祥,李志鹏,等. 流域水系连通性恢复对洄游鱼类保护的生态效应研究[J]. 人民长江,2025,56(10):137 - 145.

流域水系连通性恢复对洄游鱼类保护的生态效应研究

赵进勇,李奥祥,李志鹏,丁 洋

(中国水利水电科学研究院,北京 100038)

摘要:水系连通性是维持河流生态系统完整性和生物多样性的关键要素。以多瑙河流域为典型案例,系统解析了水系连通性修复对水生生物多样性的影响。研究表明:在两个多世纪的航道工程与水电开发中,多瑙河纵向连通性阻断加速了鲟鱼历史栖息地丧失,横向连通性破坏致使洪泛区生态功能退化,造成本地鲟鱼濒临灭绝和整体生物多样性降低。通过实施“鲟鱼 2020 规划”等系统性修复工程,流域水系连通有序恢复,水生生物多样性显著提升。相关经验可为中国大型河流生态修复提供实践参考,建议根据《长江保护法》和《黄河保护法》要求,在长江、黄河流域推行河流廊道生态修复工作,重点突破闸坝生态化改造技术瓶颈,将鱼类洄游通道修复纳入流域管理规划体系,分区域、分步骤改善流域水系连通性。

关 键 词:水系连通性; 洄游鱼类; 生物多样性; 生态修复; 多瑙河; 长江
中图法分类号: TV85;X171.4 **文献标志码**: A **DOI**:10.16232/j.cnki.1001 - 4179.2025.10.019

0 引 言

连通性是指不同的栖息地或生态系统通过生物体、营养物质和能量的运动而联系在一起的程度[1]。水系连通性是支撑河流生态系统功能完整性的重要因素之一[2-3]。在气候变化和人类活动的双重影响下,全球超过一半的河流水系连通性下降,严重威胁河流生态系统健康[4]。河流纵向连通性可维持上下游物质、能量和生物迁移的连续性,支持鱼类完整生命周期行为[5],提升生物种群的基因交流能力[6];而横向连通性是指物质、能量和水生生物在主河道和洪泛区之间的输移,对维持生物多样性具有重要意义[7-8]。改善流域水系连通性是应对河流水资源匮乏、水环境质量恶化及水生态系统退化等挑战的重要途径[9-10]。

近年来,水系连通性下降成为河流生态退化的主要原因之一,而人类活动是其主导因素[11]。中国拥有丰富的河流资源和悠久的治水历史[12],当前受到大坝建设[13]、江湖阻隔[14]等多重因素耦合影响,河流水系连通性不断降低,直接对水生生物多样性带来严重影响[14-15]。中国通过实施再生水补给[16]、调水工程[17]、拆除拦河设施[18]等措施,在一定程度上促进了水系连通性的恢复。然而,由于缺乏全流域连通性恢复顶层设计,特别是已建闸坝造成的河流阻隔等历史问题普遍难以解决等复杂因素,河流水系连通性恢复成效未达预期,亟需优化现有水系功能,加快河湖水系连通建设[19]。

多瑙河(Danube River)被誉为中东欧的母亲河,近年来栖息地破碎化、水文形态改变及洄游障碍等因素造成该河流连通性下降,引发了鱼类种群灭绝等一系列生态问题[20]:水电开发及航道工程截断了鲟鱼等洄游鱼

收稿日期:2025 - 05 - 14;**接受日期**:2025 - 07 - 20
基金项目:水利部重大科技项目(SKR - 2022052);中国水利水电科学研究院基本科研业务费项目(WE0145B042021)
作者简介:赵进勇,男,正高级工程师,博士,主要从事生态水工学、水生态治理修复等研究。E - mail:zhaojy@iwhr.com

© Editorial Office of Yangtze River. This is an open access article under the CC BY - NC - ND 4.0 license.

中国知网 https://www.cnki.net

类迁徙通道,使部分鱼类种群功能性灭绝;防洪堤坝与河岸硬化工程切断了河流与洪泛区、湿地的自然联系,破坏了水生生物产卵、育幼及觅食的关键栖息地。为此,多瑙河流域(Danube River Basin,DRB)启动“鲟鱼2020规划”(Sturgeon－2020)“MEASURES”“We Pass”等项目,以改善流域水系连通性为核心目标,显著提高了生态系统的恢复力和韧性,使多瑙河成为流域河流水系连通和鱼类洄游通道恢复的典型案例之一[18]。

本文以多瑙河这一典型跨境河流为例,系统解析其治理历程中水系连通性修复实践对流域生态环境的影响,揭示多瑙河流域水系连通性修复的成功经验,以期为改善中国大型河流的水系连通性提供理论支撑与实践参考。

1 多瑙河及其水系连通性治理历程

多瑙河位于欧洲东南部,是欧洲第二大河,也是最具自然、历史和经济重要性的国际河流之一[21]。它发源于德国黑森林山区,干流自西向东流经德国、奥地利、斯洛伐克等10个国家,最后注入黑海,是世界上干流流经国家最多的河流[20],多瑙河及其流域范围如图1所示。

多瑙河全长2 857 km,年平均流量6 460 m^3/s,多年平均径流量2 030亿 m^3,流域面积801 463 km^2。多瑙河流域是欧洲第二大流域,约29.0%在罗马尼亚境内,各国占流域总面积的比例见图2。多瑙河流域拥有丰富的生态多样性,是欧洲淡水生物多样性最高的区域[22]。多瑙河支流众多,形成了密集的水网,连接着不同的生物栖息地,是重要的物种迁移走廊[18,23]。多瑙河上游为德国多瑙河源头至斯洛伐克的布拉迪斯拉发;中游为布拉迪斯拉发至铁门峡谷;下游为铁门峡谷以下,并在罗马尼亚的图尔恰附近分成3个主要支流,形成面积约6 500 km^2 的多瑙河三角洲。

鲟鱼是多瑙河的自然遗产,对环境压力非常敏感,可作为河流生态状况及环境功能的关键指标和指示物种。几乎所有鲟鱼物种都是洄游鱼类,需要在海洋和淡水栖息地之间迁移[24]。目前,多瑙河流域6种本地鲟鱼中,1种已经灭绝,1种功能性灭绝,3种濒临灭绝,1种被认为受到威胁(表1)。

多瑙河是世界上开发利用最早、强度较高的流域之一。其水系连通性治理历程可概括为河道整治与航道工程建设时期、水坝建设与水电开发时期、国际协作与系统治理时期以及生态修复与水系连通性恢复时期4个阶段。图3列出了多瑙河流域水系连通性治理历程中关键时间点及其对应的事件。

1.1 河道整治工程与航运工程建设时期

20世纪以前,多瑙河的治理聚焦于防洪、灌溉和航运等需求,呈现出以工程手段为主导,重塑河道结构的特点[25]。例如奥地利自18世纪后期开展河岸加固

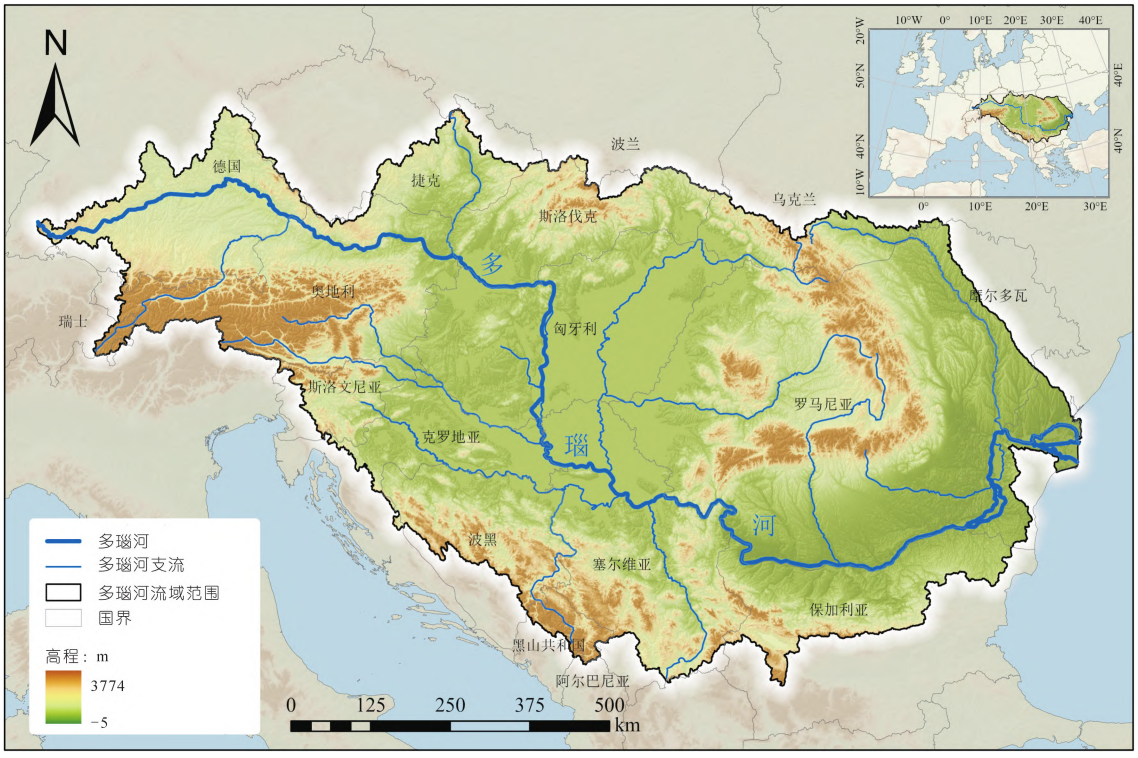

图1 多瑙河及其流域范围

Fig. 1 Map of the Danube River and its basin range

中国知网 https://www.cnki.net

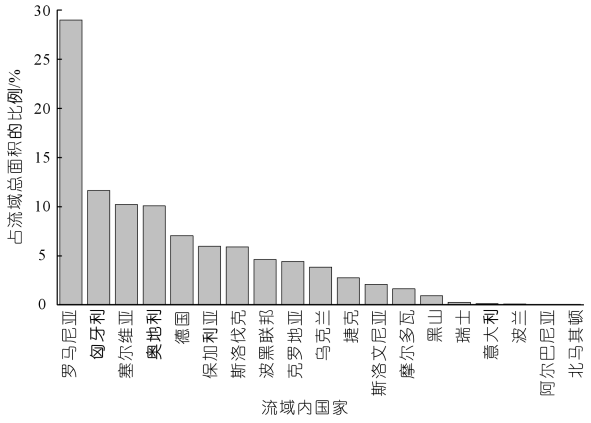

图 2　多瑙河流域各国占流域总面积比例

Fig. 2　Proportion of each country in the Danube River Basin to the total area of the basin

表 1　多瑙河鲟鱼种类、现状和变化趋势

Tab. 1　Sturgeon species, current situation and variation trend in Danube River

物种		状态	趋势
中文名	拉丁学名		
俄罗斯鲟	*Acipenser gueldenstaedtii*	极度濒危	减少
裸腹鲟	*Acipenser nudiventris*	已灭绝	减少
小体鲟	*Acipenser ruthenus*	濒危	减少
闪光鲟	*Acipenser stellatus*	极度濒危	减少
欧洲大西洋鲟	*Acipenser sturio*	已灭绝	减少
欧洲鳇	*Huso huso*	极度濒危	减少

注:数据来源于世界自然保护联盟(IUCN)。

与局部裁弯工程;德国巴登 – 符腾堡州于 1820 ~ 1890 年间在多瑙河实施了大规模的截流工程、防洪堤建设和河岸加固工程,河道缩短超过 70%;巴伐利亚河段通过疏浚和爆破进行河道加深改造,河道缩短 15%;维也纳河段在 1770 ~ 1920 年间大规模建设防洪堤、封闭侧翼支流和开展岸坡稳定措施;匈牙利河段修建了多处截流工程、防洪堤和河岸加固工程,河道长度缩短 18%;塞尔维亚与奥地利在 19 世纪 90 年代主导铁门峡谷爆破工程,清除航道礁石;多瑙河河口的苏利纳水道从水深 2.4 m 加深到约 7.3 m,并进行了裁弯取直和渠化处理。这些工程标志着多瑙河从自然河流向工业化水道转型,实现了航运效率提升和洪水控制,但也导致了生态系统的碎片化和洪泛区面积的大幅减少。

1.2　水坝建设与水电开发时期

20 世纪初,奥地利与德国开展水电开发,修建了一系列水坝[26-28]。这些工程有效应对了洪水威胁、提高了河道航运能力,但同时也破坏了河流自然形态和河岸带生态功能,河流连通性下降,许多生物赖以生存的水生生境消失,给多瑙河埋下了生态隐患。

为开发丰富的水能资源,多瑙河干支流修建了大量的水库、水坝和水电站等设施,大大调节了多瑙河的流量[29],阻断了河流纵向连通性,严重威胁洄游鱼类生存和繁殖并引发生态问题[18]。其中对比影响最大的是铁门大坝系统,由铁门Ⅰ坝(1964 ~ 1972 年)和铁门Ⅱ坝(1977 ~ 1984 年)两座大型水坝组成,是欧洲最大的水电设施之一,大坝阻断了黑海 – 多瑙河上游鱼类自然洄游通道,破坏了鱼类产卵场、育幼场和觅食场的自然连通性,对流域生态完整性构成威胁[30]。1992 年投运的加布奇科沃水电站不仅破坏了 230 km^2 湿地,还阻断了多瑙河上游与中下游鲟鱼种群的连通性,既导致洪泛平原生态环境发生变化[31],又使鲟鱼种群因连通性丧失而遗传隔离,加剧濒危风险。

1.3　国际协作与系统治理时期

1985 年,8 个多瑙河沿岸国家签署了《多瑙河国家关于多瑙河水管理问题合作的宣言》(又称《布加勒斯特宣言》),确立了“共同监测 – 数据共享 – 联合行动”的制度路径。该宣言为 1994 年《多瑙河保护公约》的国际协作治理奠定了制度雏形。此后,多瑙河国际治理框架进一步深化,沿岸国家成立“多瑙河特别工作组”,启动联合治理,开启了国际协作与系统治理的序幕。20 世纪 90 年代以后,合作成为流域各国治理多瑙河的主旋律。1994 年,多瑙河流域 11 国及欧盟签署了《多瑙河保护与可持续利用合作公约》(简称《多瑙河保护公约》,Danube River Protection Convention,DRPC),为多瑙河流域的保护指明方向。为落实缔约国义务,4 a 后成立了多瑙河保护国际委员会(International Commission for the Protection of the Danube

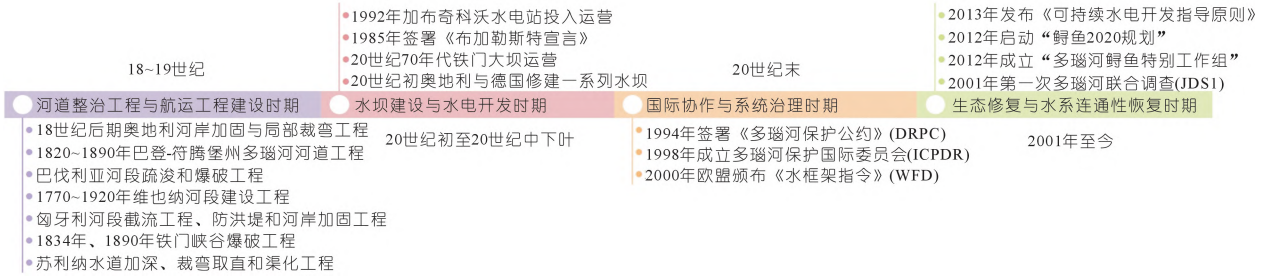

图 3　多瑙河流域水系连通性治理历程关键时间点及对应事件

Fig. 3　Key time points and corresponding events in the governance process of water system connectivity in the Danube River Basin

中国知网　https://www.cnki.net

River,ICPDR),负责公约的实施和流域层次合作的协调,为持续地利用多瑙河水资源和综合水资源的管理提供了一个平台。2000 年,罗马尼亚境内一处金矿氰化物泄漏[32],100 000 m^3 剧毒废水汇入多瑙河并扩散,造成生态灾难,直接推动沿岸国家加强对污染源的治理以及建立严格水质监测的制度。同年颁布的欧盟《水框架指令》(Water Framework Directive,WFD)为多瑙河流域治理提供了统一的跨国治理框架,促进了多瑙河治理从局部管控转向全流域综合可持续发展。

1.4 生态修复与水系连通性恢复时期

21 世纪以来,多瑙河流域治理在 ICPDR 的统一管理下持续推进,治理目标向水生态系统修复方向演进[33]。2001 年起,ICPDR 每 6 a 对多瑙河进行一次全面的水质及污染情况调查——多瑙河联合调查(Joint Danube Survey,JDS),系统采集全流域水样,分析化学污染物、微生物及新兴污染物等,并依托 2002 年建立的跨国监测网络(Trans - National Monitoring Network of the Danube River Basin,TNMN)实现数据标准化,以全面、准确掌握其水质数据。目前,ICPDR 正与多瑙河鲟鱼特别工作组(Danube Sturgeon Task Force,DSTF)协同推进 JDS5 中的栖息地监测,以确保保护措施与水电开发指导原则的整合。

为了应对多瑙河水文形态改变及湿地割裂导致的生态连通性下降,自 2003 年起,多瑙河流域的生态修复工作聚焦于系统性生境重建,形成了一个系统性的生态修复框架,涵盖湿地恢复、植被恢复、生态廊道建设等多个方面,旨在改善生态系统并推动可持续发展。

2012 年,ICPDR 开始关注鲟鱼保护,成立 DSTF 并启动“鲟鱼 2020 规划”。2013 年发布的《可持续水电开发指导原则》提出通过鱼道建设和生态流量管理等技术建议,缓解水电开发对鱼类迁移的阻碍,同时要求成员国优先修复历史工程造成的河流纵向连通性破坏。“鲟鱼 2020 规划”将改善多瑙河流域水系连通性、恢复鱼类洄游通道作为核心目标,拟通过优先推进铁门大坝鱼道建设、促进洪泛区湿地生态功能恢复以及构建跨部门协作机制,系统性重构流域水系连通性,旨在重建多瑙河 - 黑海生态系统的完整性,为濒危鲟鱼种群恢复完整生命周期条件[34]。同时,多瑙河将鲟鱼洄游通道修复纳入欧盟《生物多样性战略 2030》目标,通过《多瑙河洪水风险计划》(Danube Flood Risk Management Plan,DFRMP)资金整合机制,确保修复工程与航运、水电基础设施的兼容性。

此外,ICPDR 还通过其他跨国项目保护多瑙河及其支流。“We Pass”项目(2018 ~ 2021 年)[35]是一项旨在促进多瑙河流域鱼类洄游的倡议,其重点是保护和重建多瑙河及其支流,特别是铁门的濒危鱼类洄游路线;“We Pass 2”(2021 ~ 2024 年)[36]项目以恢复多瑙河纵向连通性为核心目标,旨在通过建设鱼道设施缓解铁门Ⅰ坝和Ⅱ坝对洄游鱼类的物理阻隔,该项目在重新连接多瑙河鱼类迁徙路线方面取得重大进展;“MEASURES”项目对多瑙河流域的鲟鱼栖息地和迁徙障碍进行了汇编,对泛欧鲟鱼行动计划(Pan - European Action Plan for Sturgeons,PANEUAP)的实施起到推动作用;DANUBE4all 计划[37]旨在改善多瑙河流域生态状况、生物多样性和生态系统连通性。

2 恢复多瑙河流域水系连通性的主要做法

2.1 在流域尺度开展鱼类洄游通道规划与实施项目多准则优先排序

多瑙河流域在鱼类洄游通道规划与优先排序中采取了一套系统化的多准则决策方法[18]。其核心做法包括:

(1) 构建多维度评估准则体系,基于洄游生态特征与工程特征,设定洄游鱼类栖息地类型、第一障碍物位置、距河口距离、重新连通栖息地长度以及是否位于“欧洲保护自然 2 000 网络”保护区(European Natura 2 000 Network)5 项排序准则。

(2) 采用改良的多准则多权重分级计分法,按公式 $PI = M \times (1 + F + D + L + P)$ 计算优先排序指数(PI 取整处理),其中洄游栖息地计分(M)作为基础值,其余准则(F、D、L、P)为叠加权重,强化关键生态因子影响。

(3) 实施 5 个优先级管理,将流域内 671 处障碍物划分为最高($PI > 13$)、很高($PI = 10 \sim 12$)、高($PI = 7 \sim 9$)、中等($PI = 4 \sim 6$)、低($PI = 1 \sim 3$)共 5 个等级,确定了 29 处最优先排序,99 处中等排序,543 处低等级障碍物排序,未参与排序障碍物多位于河源或人工渠道(图 4)。

(4) 制定分阶段实施路径,依据技术可行性、资金条件与欧盟 WFD 分期推进重点工程,优先处理干流下游段障碍物以恢复长距离洄游通道,同时兼顾栖息地连通长度与保护区保护效益。该方法通过量化评估障碍物的生态影响强度与修复效益,实现了流域尺度修复项目的科学排序与资源优化配置。

2.2 大坝生态化改造与栖息地修复

多瑙河干支流水电设施的建设导致鱼类洄游通道受阻,其中影响最大的是 1972 年建成的铁门大坝系统。ICPDR 调查报告显示,现存欧洲鳇(*Huso huso*)种群因无法抵达上游砾石基质产卵区,繁殖成功率大幅

中国知网 https://www.cnki.net

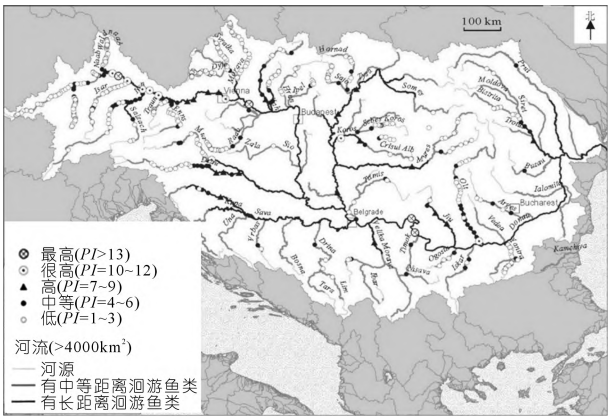

图 4　多瑙河洄游鱼类障碍物优先排序 PI 值分布

Fig. 4　PI value distribution of obstacle priority sorting for migratory fish in Danube River

下降。为此,多瑙河在铁门大坝建设“垂直狭槽鱼道+仿自然旁路河道”组合通道,设计参数严格匹配成年鲟鱼的水力学需求,确保俄罗斯鲟(*Acipenser gueldenstaedtii*)、欧洲鳇(*Huso huso*)等长距离洄游鱼类重新进入中游产卵场。同时,多瑙河流域新建水电项目需严格遵循《可持续水电开发指导原则》,在环评中量化评估鲟鱼洄游及栖息地需求,并将鱼道运维纳入《多瑙河流域管理计划》(Danube River Basin Management Plan,DRBMP)。工程治理层面,ICPDR 通过“关于恢复洄游鱼类的通道”等跨国合作项目,拟实施识别鲟鱼关键栖息地、逐步恢复洪泛区连通性等一系列措施。这些系统性举措对接欧盟《生物多样性战略 2030》中“恢复 25 000 km 自由流动河流”目标。

2.3　硬质堤岸生态化改造与河流 – 洪泛区水文联系重建

防洪堤和河道整治工程切断了主河道与洪泛平原的横向联系,是破坏横向连通性的主要因素。它导致产卵场和育幼场丧失、鱼类栖息地破碎化,加剧了鲟鱼对主河道的依赖,降低了其适应环境变化的能力。因此,多瑙河横向连通性修复聚焦于恢复漫滩湿地生态功能,通过拆除硬质堤岸、重建河流 – 洪泛区动态水文联系,提升多瑙河中下游洪泛区的自然蓄洪能力,为鲟鱼幼体提供避难所与摄食场,促进裸腹鲟(*Acipenser nudiventris*)等濒危物种的种群恢复。

多瑙河横向栖息地网络重建以基于自然的解决方案(Nature – based Solution,NbS)为核心,重点恢复河流自然形态与生物多样性。通过一系列跨国合作项目增强河流生态韧性,平衡开发与保护需求。如维也纳等沿岸城市通过改建生态河堤、恢复两岸储水湿润带及植物群落,将传统混凝土护岸改造为植被覆盖型生态堤防,同步提升防洪能力与生物多样性;斯洛文尼亚提出 NbS 评估体系,将洪泛区保护、河道拓宽纳入洪水项目管理标准;LIFE Danube Floodplains 项目通过重建被道路涵洞阻碍的纵向通道、疏浚支流渠道并定期模拟洪水以恢复河道与洪泛区的水文互动,提升匈牙利与斯洛伐克边境的洪泛区连通性;LIFE WILDisland 项目旨在增强多瑙河生态连通性,保护其自然栖息地走廊。此外,流域治理采用空间异质性策略,如维也纳市政府依据水文特征将河道划分为主河道、老多瑙河、新多瑙河及多瑙运河 4 类功能单元,差异化开发防洪、生态、休闲与经济功能,实现生态保护与城市发展的动态平衡。

多瑙河横向连通性恢复实践表明,NbS 与技术治理的耦合,能够有效破解流域尺度的生态治理碎片化难题,为大型河流生态重建提供了系统性解决方案。

2.4　涵盖法律框架、组织架构与技术创新的流域综合管理机制

水系连通性修复是复杂的系统工程,面临跨境协调、制度壁垒、数据割裂等多重挑战,其成效不仅取决于工程技术的合理性,更依赖于流域治理体系的支撑能力。多瑙河流域治理实践表明,构建涵盖法律框架、组织架构与技术创新的多尺度综合治理体系是十分必要的。

(1) 高效协同的跨国管理机构。1998 年 10 月成立的 ICPDR 是欧洲最大的流域管理国际组织,具备完善的组织结构(图 5)[38]。ICPDR 通过完善组织架构、制定行动规划、推动生态修复和强化监测评估等一系列关键举措,为多瑙河流域的可持续发展奠定了坚实基础。ICPDR 通过《多瑙河流域管理计划》明确了恢复河流连续性的目标,尤其关注鲟鱼等洄游鱼类的迁徙通道修复,同时还通过 DSTF 整合 11 个成员国及黑海国家的政策行动,推动跨境栖息地连通性项目。这种跨国管理机构的作用体现在整合流域内各国的生态保护需求,推动统一行动,确保生态恢复目标的达成。

(2) 健全的法律体系与国际公约。目前,多瑙河流域各国已建立了覆盖全流域、权责分明的流域管理法律体系,为水系连通性修复工作提供了法律保障。例如,“We Pass”项目将鲟鱼保护与建设鱼道以恢复河流连通性纳入法律框架;“鲟鱼 2020 规划”以欧盟 WFD 为法律框架的核心,强调通过立法强制恢复河流连通性;《ICPDR 关于内河航行与环境保护的联合声明》明确要求航道基础设施项目需减少对鱼类洄游路线的破坏,同时各国需依据《欧盟洪水指令》(EU Floods Directive,EFD)将洪泛区恢复纳入流域管理计

中国知网　https://www.cnki.net

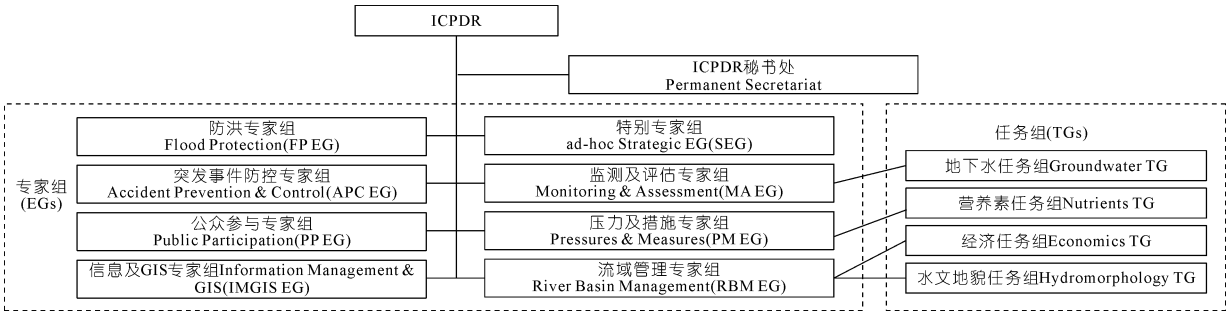

图 5 多瑙河保护国际委员会(ICPDR)组织结构

Fig. 5 Organizational structure of the ICPDR

划,以重建横向栖息地连通性。

(3) 系统的科技支撑体系。多瑙河流域通过水文与地形数据、鱼类行为数据、全球鱼道案例库分析等技术手段,为鱼道参数设计和选址提供了大量的实证依据。“鲟鱼 2020 规划”建立了覆盖全流域的监测体系,用于追踪鱼类洄游行为与种群动态,以指导水系连通性恢复措施。ICPDR 利用先进技术手段建立多瑙河鲟鱼迁徙网络,运用声学遥测和 eDNA 等技术绘制关键栖息地分布图,通过 DRBMP 的生态模型,评估不同河段连通性修复方案对鲟鱼种群恢复的长期效应。

(4) 健全的公众参与机制。提升公众认知是长期保护的基础,多瑙河流域通过 ICPDR 的公众参与专家组建立了多层次、多渠道的公众参与机制,使政策得到了更广泛的支持[39]。“We Pass”项目通过品牌标识、科普动画、社交媒体等方式提升公众对恢复河流连通性的认知。“鲟鱼 2020 规划”将公众教育项目列为关键措施,通过生态教育项目提升公众对鱼类洄游通道生态价值的认知,同时推动利益相关者支持栖息地恢复。公众参与机制不仅提高了多瑙河流域全社会对鲟鱼等鱼类物种的关注,还促进跨国利益相关方支持鱼道建设,为长期生态治理奠定了社会基础。

3 多瑙河流域水系连通性修复效果评估

多瑙河流域通过实施生态流量调控、鱼道建设及河流形态修复工程等综合措施,于 2009 ~ 2021 年间建成 127 处鱼类洄游通道设施、58 项河道修复工程,并恢复 6.17 万 hm^2 洪泛区,显著改善了栖息地水文连通性,增强了流域生态韧性。在此基础上,ICPDR 还规划了至 2027 年新增 424 项连通性修复工程和 2.3 万 hm^2 湿地恢复项目,进一步强化生态廊道完整性(图 6)。多瑙河通过采取以恢复河流水系连通性为生态修复核心的举措,以全流域综合治理体系为支撑,有效缓解了历史水利工程导致的河流水系连通性破坏和生物廊道碎片化问题,推动流域生态环境逐步改善。

在关键河段上,多瑙河畔诺伊堡和因戈尔施塔特之间的多瑙河生态修复工程包括重建次级河道、重新连通牛轭湖和临时性洪泛池塘,提升了河流连通性和栖息地异质性,实现了从单一化人工河道向多功能洪泛区生态系统的转变。自 2010 年实施连通性生态修复后,该河段物种数量和个体数量呈现不断增长的趋势,鱼类多样性不断提高,至 2022 年分别增加 1.3 倍和 10 倍(图 7),Shannon 指数从 2.26增长到 2.54[40]。水文地貌过程持续驱动栖息地优化,河段高流速(0.3 m/s)与底质粗化吸引喜流性物种,牛轭湖底质从细颗粒为主转为砾石主导。斯洛伐克和匈牙利边境的洪泛区通过 LIFE Danube Floodplains 项目恢复了超过 75 hm^2 的湿地,改善了纵向连通性和鱼类洄游通道。

在关键节点上,基于 2019 ~ 2021 年对 6 个物种共 185 条鱼类的声学追踪数据,“We Pass”项目团队发现铁门Ⅱ坝上游水库鱼类活动广泛[35]。通过历史迁移路径进一步分析发现,鱼类在铁门Ⅱ坝下游存在固定聚集区,结合流体动力学建模验证,团队建议将鱼道入口设在该下游聚集区,以顺应洄游行为并提升过坝效率。同时,2021 ~ 2022 年多个声学接收器追踪了铁门Ⅱ坝下游的鱼类活动,以确定潜在的鱼类通道入口位置。鱼道设计采用多方案比选模式:针对铁门Ⅰ坝和铁门Ⅱ坝的高水头落差,优先推荐鱼闸系统等非自主式鱼道,通过集鱼、抬升和释放 3 阶段机制实现过坝;在铁门Ⅱ坝提出技术 - 自然混合型鱼道,入口段采用垂直槽式结构,后续段模拟自然河道水文特征以提升生态兼容性。设计参数满足鲟鱼的体型需求,结合水力模型确定鱼道流速阈值为 0.8 ~ 1.4 m/s。此外,作为过渡措施,集鱼船系统通过捕获下游鱼类并船运至上游释放,通过监测鱼类迁移行为验证永久鱼道的选址合理性。

中国知网 https://www.cnki.net

图 6　多瑙河流域鱼类洄游中断的河段其连通性恢复时间示意

Fig. 6　Schematic diagram of the restoration time of Danube River continuity due to fish migration interruption

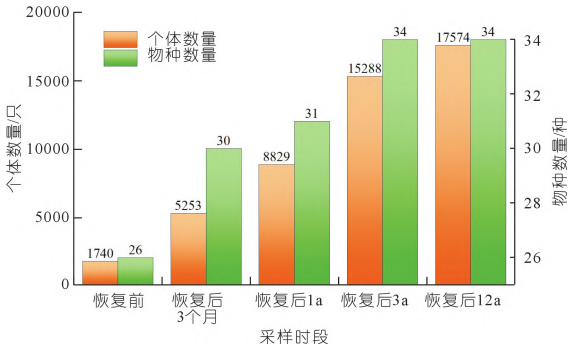

图 7　多瑙河诺伊堡和因戈尔施塔特之间每个采样年的个体数量、物种数量[40]

Fig. 7　Numbers of individuals and species in each sampling year of the Danube River between Neuburg and Ingolstadt

4　对中国河流生态修复的启示

4.1　强化流域尺度河流连通性建设、加强区域生态水网建设

多瑙河流域的实践表明,全流域尺度的水系连通性建设是生态修复成功的关键。针对中国长江、黄河流域存在的闸坝阻隔与栖息地破碎化问题,建议以《长江保护法》和《黄河保护法》为指导,在长江、黄河流域推行河流廊道生态修复工作,将鱼类洄游通道修复纳入流域管理规划体系,分区域分步骤改善流域水系连通性,构建流域生态水网体系[41]。在长江流域,需重点缓解葛洲坝和三峡大坝对四大家鱼自然繁殖所需水文情势的干扰,通过生态调度模拟天然洪峰以促进其产卵[42-44];同时,构建“干流 - 通江湖泊 - 支流”水系连通网络,恢复江豚等物种的迁移通道及栖息地连续性,解决栖息地破碎化问题。此外,需建立跨省域的生态流量协同调度机制,加强联合调度和统一规划,如长江流域可借鉴多瑙河 TNMN 监测网络,在关键节点布设生态水文联合监测站点,实现跨行政区水量 - 水质 - 水生态数据共享,提升技术方案的时效性。

4.2　确定流域生态修复工程优先级和实施顺序

多瑙河的鱼类洄游通道规划与实施项目多准则优先排序为流域生态修复工程提供了一种指导意见,其治理实践表明,优先选择重点河段和重点工程解决洄游通道阻断问题是十分必要的[18]。参考多瑙河“多权重分级计分法”,建议在长江流域建立包含濒危物种保护、干流关键障碍物、河口连通性、栖息地恢复长度、自然保护地优先、历史栖息地恢复比例、社会经济协调、水质与污染控制 8 项准则的修复优先级评估体系,对全流域鱼类洄游障碍物进行恢复连通性排序。同时,结合长江十年禁渔政策,建议优先修复已禁渔河段的连通性,确保政策协同增效。实施路径上,建议采用干流先行、支流跟进的时序策略,提高干流关键障碍物权重,率先在长江干流开展关键节点的闸坝生态化改造,协同推进汉江、湘江等支流的鱼类洄游通道修复,逐步系统化解决鱼类洄游通道破碎化问题,推动流域

中国知网　https://www.cnki.net

系统化修复,兼顾生态保护与可持续发展需求。

4.3 通过生态化改造恢复水系连通性

多瑙河生态修复实践为中国长江流域生态化改造提供了 3 个方面启示。在纵向连通性维度,可借鉴多瑙河“垂直狭槽鱼道 + 仿自然旁路河道”复合通道技术,结合中华鲟、达氏鲟等长江鱼类行为学数据,调整设计参数,优化既有水电设施过鱼系统。在横向连通性层面,可结合多瑙河治理经验,针对长江流域泥沙含量高的特点,建议实施湿地重建工程,构建“硬质堤防 + 生态缓冲带”复合结构,通过恢复湿地植被、构建生态缓冲带等手段修复长江中下游江湖连通复合体系统,为四大家鱼等物种提供产卵场与育幼庇护所。在垂向连通方面,需注重河床基质改良与地下水交换功能恢复,参照多瑙河砾石产卵场修复经验,建议系统性实施底栖生境重建工程,同时加强流域尺度空间异质性规划,构建包含主河道、故道、通江湖泊的多维水文网络。这些系统性措施需融入《长江保护法》实施框架,明确政府、企业等利益相关方责任,通过跨行政区协同治理与生态红线制度保障,实现流域水电开发、防洪安全与生物多样性保护的多目标平衡。

5 结 论

(1) 多瑙河流域治理经历了工程主导、系统协作到生态修复的转型。18 世纪以来的工程化改造虽提升了多瑙河航运和防洪能力,但引发纵向洄游阻隔与横向洪泛区割裂的生态危机。20 世纪末流域各国开启国际协作与系统治理,通过法律框架与国际公约进行联合治理,推动了全流域综合可持续发展。进入 21 世纪,治理目标向水生态系统修复方向演进,通过“鲟鱼 2020 规划”等系统性工程实现了栖息地连通性重建,有力推动了多瑙河生态修复与水系连通性恢复。

(2) 水系连通性修复是多瑙河流域生态修复的核心手段。多瑙河在流域尺度开展鱼类洄游通道规划与实施项目多准则优先排序,精准识别关键修复节点,为大型河流连通性修复提供了方法论支撑。通过大坝生态化改造、硬质堤岸生态化改造与水生生物栖息地修复等措施,恢复了流域水系连通性。多瑙河流域构建了涵盖法律框架、组织架构与技术创新的多尺度综合治理体系,以保障水系连通性修复工程的成效。

(3) 多瑙河治理与生态修复经验可为中国流域系统治理和典型区域小水电清理整改等事项提供有益启示。需以流域整体性思维推进水系连通性建设,构建生态水网,通过闸坝生态化改造突破四大家鱼、江豚等物种洄游阻隔,依托跨省域生态流量协同调度提升治理效能。建立多准则优先级评估体系,结合长江十年禁渔政策,将纵向鱼类洄游通道修复、横向湿地重建工程与垂向底栖生境修复相结合,并融入《长江保护法》等法规框架强化空间异质性规划与多方责任机制。同时,需注重公众参与机制建设,推动形成“社会共治 - 生态共赢”的可持续治理格局。

参考文献:

[1] MOILANEN A, NIEMINEN M. Simple connectivity measures in spatial ecology[J]. Ecology, 2002, 83(4): 1131 - 1145.

[2] 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.

[3] XIA J, GAO Y, ZUO Q T, et al. Characteristics of interconnected rivers system and its ecological effects on water environment[J]. Progress in Geography, 2012(1): 26 - 31.

[4] GRILL G, LEHNER B, THIEME M, et al. Mapping the world's free - flowing rivers[J]. Nature, 2019, 569(7755): 215 - 221.

[5] SHAO X, FANG Y, JAWITZ J W, et al. River network connectivity and fish diversity[J]. Science of the Total Environment, 2019, 689: 21 - 30.

[6] PRUNIER J G, LOOT G, VEYSSIERE C, et al. Novel operational index reveals rapid recovery of genetic connectivity in freshwater fish species after riverine restoration[J]. Conservation Letters, 2023, 16(2): e12939.

[7] FUNK A, BALDAN D, BONDAR K E, et al. Connectivity as a driver of river - floodplain functioning: a dynamic, graph theoretic approach[J]. Ecological Indicators, 2023, 154: 110877.

[8] AKASAKA M, TAKAMURA N. Hydrologic connection between ponds positively affects macrophyte α and γ diversity but negatively affects β diversity[J]. Ecology, 2012, 93(5): 967 - 973.

[9] 赵进勇, 张晶, 董延军, 等. 河湖水系连通生态模型、规划方法和工程实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2021.

[10] 赵进勇, 丁洋, 张晶, 等. 区域河湖水系连通工程的生态学意义[J]. 中国水利, 2022(12): 14 - 17.

[11] 左其亭, 崔国韬. 人类活动对河湖水系连通的影响评估[J]. 地理学报, 2020, 75(7): 1483 - 1493.

[12] 李宗礼, 陈伟, 刘昌明, 等. 基于“双治”理念的中国现代治水战略思考[J]. 中国水利, 2021(9): 10 - 12.

[13] YI Y J, GAO Y N, ZHANG S H. The impact of dams on the river connectivity of the two largest river basins in China[J]. River Research and Applications, 2022, 38(2): 185 - 193.

[14] 王振忠, 鲁森, 卢兵友, 等. 加强长江水生生物多样性保护的若干思考[J]. 淡水渔业, 2023, 53(1): 20 - 26.

[15] 邢子强, 李宗礼, 李天宏, 等. 面向美丽中国建设目标的河湖生态安全保障对策探讨[J]. 中国水利, 2023(7): 41 - 44.

[16] 刘晟廷, 曹宸, 景峰, 等. 北京市房山区河流水质与营养状态对连通性和再生水补给的响应[J]. 环境科学学报, 2025, 45(2): 166 - 176.

[17] 夏文文, 王晨波, 邓宇, 等. 基于河网水动力模型的水系连通性对水环境质量的影响分析研究[J]. 中国农村水利水电, 2024(3): 96 - 104.

[18] 董哲仁, 张晶, 赵进勇. 论恢复鱼类洄游通道规划方法[J]. 水生态学杂志, 2020, 41(6): 1 - 8.

[19] 徐宗学, 庞博, 冷罗生. 河湖水系连通工程与国家水网建设研究[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2022, 20(4): 757 - 764.

[20] NEGM A, ZAHARIA L, IOANA T G. The lower danube river: hydro - environmental issues and sustainability[M]. Cham: Springer Interna-

中国知网 https://www.cnki.net

tional Publishing,2022.
[21] NACHTNEBEL H P. The danube river basin environmental programme:plans and actions for a basin wide approach[J]. Water Policy,2000,2(1):113 - 129.
[22] STAGL J C,HATTERMANN F F. Impacts of climate change on riverine ecosystems:alterations of ecologically relevant flow dynamics in the danube river and its major tributaries[J]. Water,2016,8(12):566 - 581.
[23] FELDBACHER E, PAUN M, RECKENDORFER W, et al. Twenty years of research on water management issues in the danube macro - region:past developments and future directions[J]. Science of The Total Environment,2016,572:1297 - 1306.
[24] JONES C M. CHAPTER 4 - estuarine and diadromous fish metapopulations[M]// Marine Metapopulations, Burlington: Academic Press, 2006:119 - 154.
[25] SCHMID M,HAIDVOGL G,FRIEDRICH T C,et al. The danube:On the environmental history,present,and future of a great european river [J]. River Culture,2023:10. 54677/intf8577.
[26] 刘玉成. 迷人的维也纳城市建设[J]. 城乡建设,2003(5):58 - 59.
[27] LÓCZY D. The danube:Morphology,evolution,and environmental issues[M]// Large Rivers, New York:John Wiley & Sons, Ltd,2022: 335 - 367.
[28] STANÍKOVÁ A. Training of the danube river channel[M]// Hydrological processes of the Danube River Basin:perspectives from the Danubian Countries,Dordrecht:Springer Netherlands,2010:305 - 341.
[29] MĂNOIU V M,CRĂCIUN A I. Danube river water quality trends:a qualitative review based on the open access web of science database [J]. Ecohydrology & Hydrobiology,2021,21(4):613 - 628.
[30] HILDREW A. A world of rivers:environmental change on ten of the world's great rivers by ellen wohl[J]. The Quarterly Review of Biology,2013,88:44 - 45.
[31] BALON E K,HOL ČÍK J. Gab číkovo river barrage system:the ecological disaster and economic calamity for the inland delta of the middle danube[J]. Environmental Biology of Fishes,1999,54(1):1 - 17.
[32] 光明网. 多瑙河流被污染罗马尼亚担责任[N]. 生活时报,2000 - 02 - 18(3).
[33] 梁博,吴子怡,梁菊平,等. 基于国外经验的珠江口总氮综合治理探究[J]. 环境保护,2023,51(19):21 - 23.
[34] ICPDR. Sturgeon 2020 - A program for the protection and rehabilitation of Danube sturgeons[EB/OL]. (2016 - 05 - 01)[2025 - 04 - 26]. https:// www. icpdr. org/sites/default/files/nodes/documents/sturgeon2020 - final. pdf.
[35] ICPDR. WePass:Explained - facilitating fish migration and conservation at theiron gates[EB/OL]. (2021 - 05 - 01)[2025 - 04 - 26]. https:// www. icpdr. org/sites/default/files/nodes/documents/we _ pass_ - _explained. pdf.
[36] ICPDR. WePass2 Pilot project - making the iron gate dams passable![EB/OL]. (2024 - 05 - 01)[2025 - 04 - 26]. https://www. icpdr. org/sites/default/files/2025 - 01/WEB% 20Version% 20 - % 20WePass2%20Poster_4. pdf.
[37] DANUBE4all. Restoration of the Danube River Basin for ecosystems and people from mountains to coast[EB/OL]. (2023 - 05 - 01)[2025 - 04 - 26]. https://www. danube4allproject. eu/.
[38] ICPDR. ICPDR Framework[EB/OL]. (2014 - 05 - 01)[2025 - 04 - 26]. https://www. icpdr. org/about - icpdr/framework/about - us.
[39] ICPDR. Danube River Basin Management Plan(Update 2021)[EB/OL]. (2021 - 05 - 01)[2025 - 04 - 26]. https:// www. icpdr. org/sites/default/files/nodes/documents/drbmp_2021_final_hires. pdf.
[40] PANDER J,WINTER E,GEIST J. Ecological indicators for restoration success:development of fish diversity in a large restored floodplain over twelve years[J]. Ecological Indicators,2024,169:112920.
[41] 张晶,赵进勇,王琦,等. 试论长江保护法的科学基础[J]. 中国水利,2022(9):38 - 41.
[42] 曹光荣,杨霞,范向军,等. 金沙江下游 - 三峡梯级水库生态环保工作实践[J]. 人民长江,2022,53(增 2):28 - 33.
[43] 徐薇,金瑶,陈桂亚,等. 三峡水库十年生态调度(2011 ~ 2020 年)期间下游沙市江段产漂流性卵鱼类自然繁殖变化[J]. 湖泊科学,2023,35(5):1729 - 1741.
[44] 张云昌,丁洋,赵进勇. 河流伦理建构中的八个理论和实践问题探讨[J]. 中国水利,2024(16):7 - 11.

(编辑:胡旭东)

Ecological effect of river system connectivity restoration on migratory fish protection

ZHAO Jinyong, LI Aoxiang, LI Zhipeng, DING Yang

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

Abstract: River system connectivity is a critical element for maintaining the integrity of river ecosystems and biodiversity. This study systematically analyzed the impact of river system connectivity restoration on aquatic biodiversity, using the Danube River Basin as a representative case study. The results revealed that over two centuries of navigation engineering and hydropower development, the disruption of longitudinal connectivity in the Danube River has accelerated the loss of historical sturgeon habitats, while the degradation of lateral connectivity has led to the ecological decline of floodplains. Consequently, native sturgeon species became endangered, and overall biodiversity declined. Through the implementation of systematic restoration projects, such as the 'Sturgeon 2020' program, the connectivity of the river system has been progressively restored, leading to a significant improvement in aquatic biodiversity. These experiences provide a valuable reference for the ecological restoration of large rivers in China. It is recommended that, in accordance with the Changjiang River Protection Law and the Yellow River Protection Law, ecological restoration of river corridors be carried out in the Changjiang and Yellow River basins, and that technical bottlenecks in the ecological retrofitting of dams be overcome. The restoration of fish migration channels should be incorporated into river basin management planning, and river system connectivity should be enhanced step by step across different regions.

Key words: river system connectivity; migratory fish; biodiversity; ecological restoration; Danube River; Changjiang River

中国知网 https://www.cnki.net