

密西西比河干流大坝建设对鱼类的影响及保护措施

常涛 刘焕章

(中国科学院水生生物研究所水生生物多样性与保护重点实验室, 武汉 430072)

摘要: 如何减轻大坝阻隔对鱼类等水生生物的影响以及制定有效的恢复措施一直是河流生态保护的主要内容。文章通过文献调研、资料收集等方式对美国密西西比河干流大坝建设状况及其对鱼类的影响进行梳理,总结了当前美国所采取的相关保护措施和效果。统计结果显示,密西西比河干流共建有梯级闸坝41座,均分布在干流的上游,多数大坝坝高不超过15 m,库容小于 0.3 km^3 。这些弱调蓄能力的低水头坝阻隔了密西西比河鱼类洄游,但目前仍未修建过鱼设施。相关研究证实,密西西比河洄游性鱼类可以利用泄水闸门完成上行和下行,但过鱼效率随着大坝梯级的递增逐级下降,尤其是鲟类,仍难以抑制其种群的衰退。受长期蓄水影响,密西西比河上游鱼类群落产生了空间分化,但仍保持着较高的物种多样性。1986和2000年,美国分别实施了上密西西比河生态系统环境管理计划(UMRS-EMP)和上密西西比河生态恢复和维持策略(UMRS-RMS),采用渔业资源长期监测计划(LTRMP)及9项栖息地修复措施,从生态系统层面保障了密西西比河鱼类资源的持续稳定。这种系统性修复方式可为我国筑坝河流鱼类资源保护与河流生态修复提供参考和示范。

关键词: 密西西比河; 大坝; 鱼类保护; 生态修复

中图分类号: S937 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3207(2020)06-1330-12

鱼类资源的保护极大地依赖于河流生态系统在时间和空间上的连续性^[1,2]。随着工业化,城市化的快速发展,大量水利设施的建设使得世界多数河流受到了人为的改变。水利水电工程建设和运行一方面满足了人们对防洪、发电、航运以及娱乐等方面的需求,在促进社会经济可持续发展、保障国家能源安全方面发挥了巨大作用;另一方面则改变了坝上、坝下河流的天然水文情势,阻断了洄游和半洄游性鱼类的觅食、繁殖或越冬通道,这些鱼类在生活史的某些阶段需要依赖于河流连续体的纵向活动^[3]。因此,在大坝对社会经济发展与鱼类等水生生物保护的博弈中,我们必须考虑鱼类栖息地和产卵场的建立与维护,鱼类资源的保护与补充,以及在大坝建设中各种鱼类保护措施的必要性和合理性。

美国是世界水资源较为丰富的国家,据2003年

联合国粮农组织颁布的《各国水资源评论》,美国本土的年均水资源量为20000亿 m^3 ,人均水资源量接近7407 m^3 ,水资源总量位居世界第七^[4-6]。根据美国国家大坝数据库(NID, National Inventory of Dams)统计数据,美国水能理论蕴藏量为5285亿 $\text{kw} \cdot \text{h/a}$,2009年美国共有大坝83987座,其中坝高在51—100英尺(约15.5—30.5 m)的大坝4596座,坝高大于100英尺的大坝1575座(图1)。至2019年,美国大坝已增至91468座,总集水面积128万 km^2 ,水能资源的经济开发度高达82%^[7]。

美国水资源开发和利用过程中一直伴随着诸多争议,尤其是大坝结构对河流水环境的改变以及对鱼类洄游的阻隔^[8,9]。为了减轻水电开发产生的负面影响,美国从19世纪开始,开展了一系列筑坝河流鱼类恢复措施^[10]。因此,美国在筑坝河流鱼类资源保护方面积累了丰富的经验,而学习其成功经

收稿日期: 2019-12-19; 修订日期: 2020-05-17

基金项目: 三峡工程后续工作资助(2136902); 中国生物多样性监测与研究网络-内陆水体鱼类多样性监测专项网; 长江上游及重要支流小水电生态影响评估及退出机制研究(125E0202)资助 [Supported by the Follow-up Work of the Three Gorges Project (2136902); Sino BON-Inland Water Fish Diversity Observation Network; Ecological Impact Assessment and Exit Mechanism of Small Hydropower in the Upper Reaches of the Yangtze River and Important Tributaries (125E0202)]

作者简介: 常涛(1989—), 男, 助理研究员; 主要研究方向为鱼类生态学。E-mail: changtao@ihb.ac.cn

通信作者: 刘焕章, E-mail: hzliu@ihb.ac.cn

验无疑对我国河流生态修复有很好的借鉴意义。本文以美国最大的河流-密西西比河为例,通过文献调研、资料收集等方式梳理了密西西比河干流大坝建设状况及其对鱼类的影响,总结了当前美国所采取的相关鱼类保护措施及其效果,以期为我国河流鱼类资源保护与管理提供参考。

1 密西西比河大坝建设

1.1 密西西比流域建坝发展

密西西比河是世界第四长河,也是美国最重要的商业水道之一,源于明尼苏达州北部的伊塔斯卡湖,向南注入墨西哥湾,干流全长约3856 km。根据密西西比河的水系结构特征,通常以俄亥俄河河口为界,将密西西比河划分为上密西西比河(UMR, the Upper Mississippi River)和下密西西比河(LMR, the Lower Mississippi River)^[11-13]。

由于密西西比河洪水频繁^[14],自然条件较差,美国政府一直比较重视密西西比河的治理和开发工作。从20世纪20年代开始,美国陆军工程兵团(USACE, U.S. Army Corps of Engineers)对密西西比河制定统一规划,改善河道通航条件^[15]。工程措施主要包括在上密西西比河修建梯级闸坝以提高航深;在下密西西比河修建防洪堤和丁坝以稳定河岸河床;在各支流修建综合利用水库^[16]。1933年5月,美国国会通过了田纳西河谷开发法案(TVA, the Tennessee Valley Authority Act),进一步推动了密西西比河全流域的水资源规划和开发利用。该法案的成功实施使美国进入“大坝时代”(图1),同时也为全世界范围内的流域水资源综合开发管理提供了示范^[17,18]。至20世纪90年代,美国已逐步完成了密西西比河干支流河道的渠化工程,

形成江、河、湖、海贯通的内河航运网络。现如今,密西西比河建有上千座单功能或多功能的堤堰、大坝和水库,用以航运、防洪、发电、供水、灌溉以及娱乐。其中干流建有梯级闸坝41座(数据来源于NID,附表1),全部分布在上游伊利诺斯河河口以上江段,而密西西比河干流下游至今尚未修建拦河大坝(图2)。

1.2 密西西比河干流大坝特征

按运行时间统计(图3),上密西西比河最早投入运行的大坝是1878年建在伊利诺斯州岩岛的Arsenal Power Dam。最晚的是1990年建在伊利诺斯州东奥尔顿的Melvin Price Locks & Dam。20世纪30年代为建坝高峰期,之前加速增长,之后陡然下降。多数大坝的服役年限已达到60 a(36座,占88%),而美国大坝许可证的有效期限一般为30—50 a,因此密西西比河干流大坝或水电站目前正进入“老化”期。

按建坝坝高统计(图3),最高的是1963年建在明尼苏达州明尼阿波利斯的Upper Saint Anthony Falls Lock and Dam(坝高28.3 m),是上密西西比河的第一级坝。最低的是建在明尼苏达州彭宁顿的Knutson Dam(坝高2.7 m)。主流大坝坝高为10—15 m(24座,占59%)。

按建坝总库容统计(图3),最大的是建于明尼苏达州古德休县的Lock & Dam 3(坝高13.4 m,库容1.369 km³)。最小的是建于伊利诺斯州格拉尼特城的Lock & Dam 27(坝高7.6 m,库容0),是上密西西比河的最后一级坝。多数大坝库容小于0.3 km³(33座,占80%)。

按大坝开发目标统计(图3),密西西比河干流大坝开发目标可分为五类,分别是防洪(1座)、发电

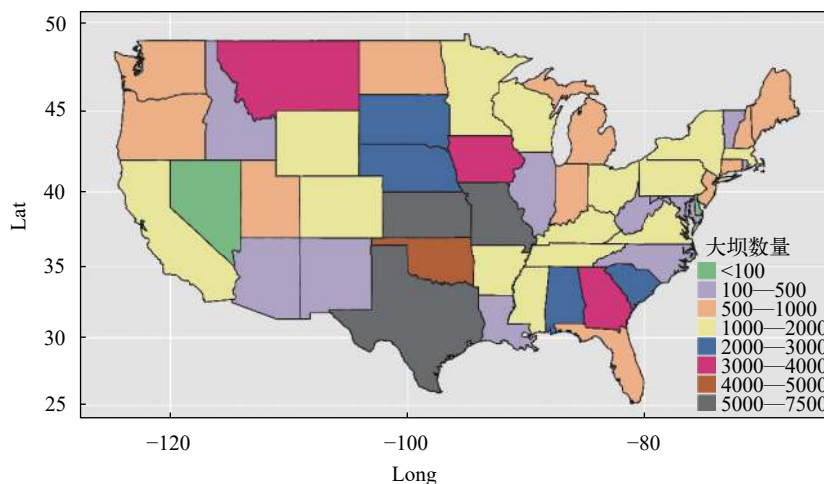


图1 美国各州大坝分布(数据引自NID)

Fig. 1 Distribution of dams in various states of American (data from NID)



图2 上密西西比河主要大坝分布(数据引自NID)

Fig. 2 Dams in the main stream of upper Mississippi River (data from NID)

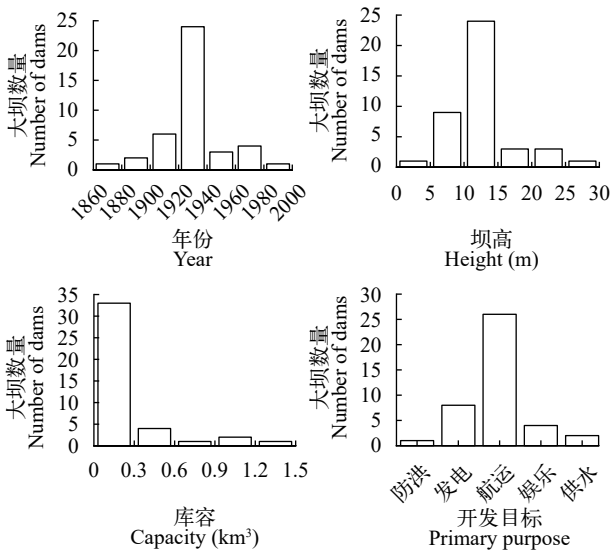


图3 上密西西比河41座大坝建设特征(数据引自NID)

Fig. 3 The characters of 41 dams in the main stream of upper Mississippi River (data from NID)

(8座)、航运(26座)、娱乐(4座)和供水(2座),其中航运是主要开发目标。

2 闸坝对密西西比河鱼类的影响

作为北美洲最大的河流,密西西比河是多种鱼类起源和进化的中心,也是冰川时期北方鱼类的重要避难所,保留了许多古老的、濒危的鱼类,如匙吻鲟(*Polyodon spathula*)、雀鳝(*Atractosteus spatula*)、弓鳍鱼(*Amia calva*)等。因此,密西西比河被称作是“北美动物区系的发源地”,也是“温带淡水鱼类多样性的摇篮”^[19]。据不完全统计^①,整个密西西比河流域共有淡水鱼类31科375种^[20],约占北美鱼类物种数的1/4。若仅考虑密西西比河干流,则上游约140种^[21, 22],下游约150种,河口约206种^[23]。但由于梯级闸坝的建设,导致密西西比河水文、水动力、水化学和物理环境等均发生较大改变。因此,与世界其他筑坝河流一样,密西西比河鱼类同样遭受着水电开发带来的不利影响。

2.1 对鱼类洄游的影响

筑坝对鱼类的影响之一是溯河产卵鱼类种类和资源量的下降。大坝阻断了洄游鱼类在繁殖地与肥育地之间的洄游,导致繁殖群体和补充群体数量下降,严重威胁其种群生存^[24, 25]。在上密西西比河的140多种鱼类中,至少有34种是洄游性鱼类^[26]。为保证通航,上密西西比河的梯级大坝将干流分割成28个导航渠(Navigation Pools),但都没有配套辅助过鱼设施。

上密西西比河大坝多数为弱调蓄能力的低水头坝,并在大坝底部设有泄水闸门。在高流量时期,闸门全开,大部分都高出水面,允许河流自由流通。而在低流量条件下,闸门仅部分开启,保证通航水位(控制通航水深9英尺,约2.74 m)。这种设计特点和运行方式允许鱼类通过大坝的闸门上行和下行^[27, 28]。但除闸门之外,大坝系统中没有设置其他的鱼类过坝设施,因此干流鱼类通过大坝的机会会受到物种迁移时间、游泳能力以及大坝水头、闸门结构、水力变化等因素所限制^[29]。Zigler等^[30]采用无线电标记评估了匙吻鲟在上游大坝间的通过效率,发现夏秋季低水位时的通过率(29%)远低于春季高水位闸门开启时的通过率(71%),而大坝水头每增加1 m,会使匙吻鲟上溯通过效率降低7倍。此外,对于梯级开发的河流而言,大坝的逐级阻隔也会降低鱼类的通过效率。Tripp等^[31]证实70%的鱼类上行和下行事件发生在闸门全开的时候,并且

① 注: 密西西比河鱼类物种丰富,具体物种数尚不明确,如: FISHBASE记载总物种数为236种;美国国家公园管理局(U.S. National Park Service)记录总物种数为260种;中上游若包括俄亥俄、密苏里、伊利诺斯河等大型支流,则约有鱼类260种^[22]; Baker等^[13]记载下游土著鱼类约91种^[23];若考虑河口墨西哥湾等海洋性鱼类,则河口区域增加鱼类50—60种

多数鱼类上行能力要显著低于下行能力; 随着大坝梯级增加, 过鱼效率逐级降低, 三级以上大坝过鱼事件发生率不足20%, 到lock and dam 19时已无过鱼事件发生(图 4)。

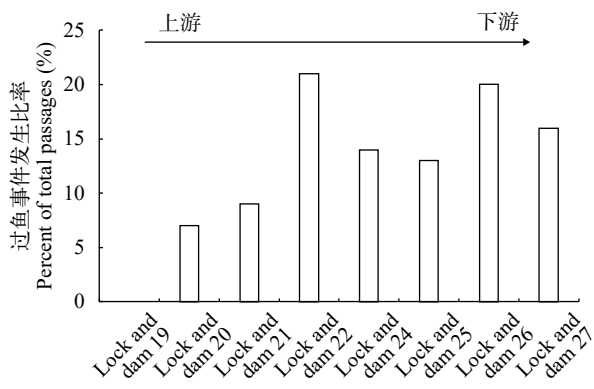


图 4 不同大坝的过坝效率(数据引自Tripp等^[31])
Fig. 4 The percent of total passages between different dams (data from Tripp, et al.^[31])

上密西西比河的梯级闸坝建设已经造成了某些洄游性物种种群的灭绝。如lock and dam 19的阻隔导致坝上金绿西鲱(*Alosa chrysochloris*)种群的消失, 随之而来的是坝上黑檀贝(*Fusconaia ebena*)种群数量的大幅减少。因为金绿西鲱是黑檀贝幼体迁移的唯一寄主^[32]。而对于现存鱼类物种, 尤其是鲟类, 即便保留了一定的迁移通道, 也仍然无法抑制其种群的衰退。现如今, 在密西西比河5种鲟中, 湖鲟(*Acipenser fluvescens*)处于低危, 匙吻鲟和密西西比铲(*Scaphirhynchus platyrhynchus*)鲟处于易危, 密苏里铲鲟(*Scaphirhynchus albus*)处于濒危, 阿拉巴马铲鲟(*Scaphirhynchus suttkusi*)处于极危(表 1)。

2.2 对鱼类群落空间分布的影响

密西西比河梯级闸坝的功能在于通过调蓄上游来水对下泄流量的大小、洪水出现时间和持续时间等进行管理, 从而维持其通航条件。这种人为控制会阻断自然河流生态系统的连续性, 改变大坝

上下游河流的物理化学环境, 形成交替出现的激流-静水区。物理阻隔和生境改变也导致了鱼类群落的空间异质性^[33]。

1913年建造的Lock and Dam 19是密西西比河第一座具有蓄水功能的闸坝, 创造了上密西西比河最长的导航渠(坝上Pool 19, 74 km; 坝下Pool 20, 35.2 km)。较高的水头(11.64 m)使得下游鱼类无法通过大坝闸门进一步上溯迁移。Chick等^[34]对比了上密西西比河14个航道渠的鱼类群落, 发现pool 19和20与上游各航道渠具有相似的物种丰富度特征, 与下游各航道渠具有相似的物种多度特征。在此基础上, Haun^[35]分析了14年的长期监测数据, 发现pool 19和20的鱼类组成分别与上下游其他航道渠形成不同的聚类, 其中上游群落以吸口鱼属(*Moxostoma*)和棘臀鱼科(*Centrarchidae*)鱼类为主, 下游则以斑点叉尾鲟(*Ictalurus punctatus*)、淡水石首鱼(*Aplodinotus grunniens*)、大口胭脂鱼(*Ictiobus cyprinellus*)和金眼石鲈(*Morone chrysops*)等为优势种。Haun^[35]的研究结果证实Lock and Dam 19对上密西西比河鱼类群落产生的纵向空间隔离, 并认为pool 19和20是上密西西比河鱼类群落的过渡区。值得注意的是, Chick等^[34]在其研究中指出, 对于上密西西比河的多数低水头闸坝, 其上下游航道渠之间的鱼类群落并没有显著差异。这说明鱼类通过闸门进行迁移和扩散能够减轻低水头大坝带来的阻隔效应; 但对于高水头蓄水坝, 这种辅助迁移方式并不能有效弥补阻隔和生境改变对鱼类群落的影响^[36]。换言之, 大坝蓄水引起的生境改变对鱼类群落的影响可能远大于阻隔引起的扩散障碍。

频繁的航运同样会干扰鱼类群落的横向空间分布。Weigel等^[37]研究发现, 密西西比河干流主航道的鱼类多样性要显著低于河道侧槽区域, 主航道鱼类生物完整性指数(*IBI*, Index of Biotic Integrity)评级为“极好”, 侧槽则为“一般”。但这种差异在威斯康辛河等未受航运影响的支流并不存在。此外, 航运过程中的河床水位变化也会进一步压缩干流

表 1 密西西比河5种鲟分布及濒危状况
Tab. 1 Distribution and endangered status of five sturgeon species in the Mississippi River Basin

物种 Species	分布 Distributions	受胁因素 Threats	濒危状况 Endangered status
湖鲟 <i>Acipenser fluvescens</i>	密西西比河上游及其支流	捕捞、阻隔、栖息地丧失	低危(LC)
匙吻鲟 <i>Polyodon spathula</i>	密苏里河和密西西比河	捕捞、阻隔、栖息地丧失	易危(VU)
密苏里铲鲟 <i>Scaphirhynchus albus</i>	密苏里河和密西西比河	捕捞、阻隔、栖息地丧失、河道渠化、污染、种间杂交	濒危(EN)
密西西比铲鲟 <i>Scaphirhynchus platyrhynchus</i>	密苏里河和密西西比河	捕捞、阻隔、栖息地丧失、污染、种间杂交	易危(VU)
阿拉巴马铲鲟 <i>Scaphirhynchus suttkusi</i>	主要分布在Mobile盆地, 密西西比河少量分布	捕捞、河道改造、污染	极危(CR)

鱼类可利用栖息地,影响鱼类的游泳能力^[38],甚至导致搁浅^[39]。

2.3 对鱼类多样性稳定性的影响

上密西西比河的梯级闸坝多建于1950年以前(占比83%,附表1),长期的阻隔已在坝上坝下形成了较稳定的鱼类群落。1993年起美国地质勘探局(USGS, United States Geological Survey)对上密西西比河部分航道渠开展了标准化的鱼类资源常规监测(具体见章节3.1),尽管建坝前后鱼类多样性变动已很难评估,但仍能从其长期监测数据中看出大坝运行对鱼类多样性稳定性的影响。到2017年,USGS平均每年在上密西西比河监测到鱼类124种,最少106种(2006年),最多136种(1997年)。物种丰富度的年间变化较小,说明梯级闸坝运行后,上密西西比河仍具有较丰富的鱼类多样性。单位时间(天)捕捞数量的年间变幅较大,最少822 ind./d (2003年),最多4689 ind./d (2002年),年均2595 ind./d (图5)。但没有文献表明这种变化与上密西西比河梯级闸坝运行有关。优势种方面,翡翠闪光鱼(*Notropis atherinoides*)、美洲真鲮(*Dorosoma cepedianum*)和

蓝鳃太阳鱼(*Lepomis macrochirus*)在绝大多数年份为优势种,年均数量占比为53.5%,最高69.2% (1999年),最低27.1% (1994年),优势种的年间更替不明显。综合来看,建坝后的上密西西比河鱼类多样性维持在较稳定状态(图6)。

上密西西比河的闸坝建设对下密西西比河鱼类影响较小。下密西西比河受洪水侵蚀严重,美国在下游修建了约3000 km的防洪堤以稳固河岸河床,保障通航^[12]。大量的人工护岸弱化了下密西西比河生物地球化学循环^[40],但由于没有修建拦河大坝,以及丰富的支流水系和多样化的生境类型(26条支流和242个8万m²以上湖泊^[12]),使得下密西西比河仍具有较完整的鱼类多样性。目前,下密西西比河鱼类中仅密苏里铲鲟被美国鱼类和野生动物管理局(USFWS, U.S. Fish and Wildlife Service)列为濒危物种^[41],而下游St. Louis以下江段的河道渠化工程也被认为是导致密苏里铲鲟濒危的首要因素^[42]。

3 密西西比河生态及鱼类保护措施

上密西西比河大部分属于草原,加上密集的水电开发和严重的河流污染,生态系统较脆弱。美国联邦政府将上密西西比河定义为“国家级生态系统和国家级商用航运系统(A nationally significant ecosystem and a nationally significant commercial navigation system)”^[43],同时也针对其生态环境及鱼类资源开展了系统化的管理和保护。

3.1 上密西西比河生态系统环境管理计划

1986年,美国国会通过了水资源开发法案(WRDA, Water Resources Development Act),并批准了上密西西比河生态系统环境管理计划(UMRS-EMP, Upper Mississippi River System-Environmental Management Program)的实施。其目标是为了恢复、保

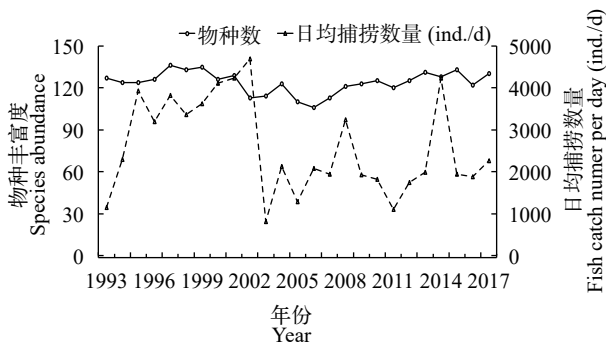


图5 上密西西比河鱼类丰富度和日均捕捞数量变化(数据来源LTRMP)

Fig. 5 Trend of fish species abundance and catch number per day in the upper Mississippi River (data from LTRMP)

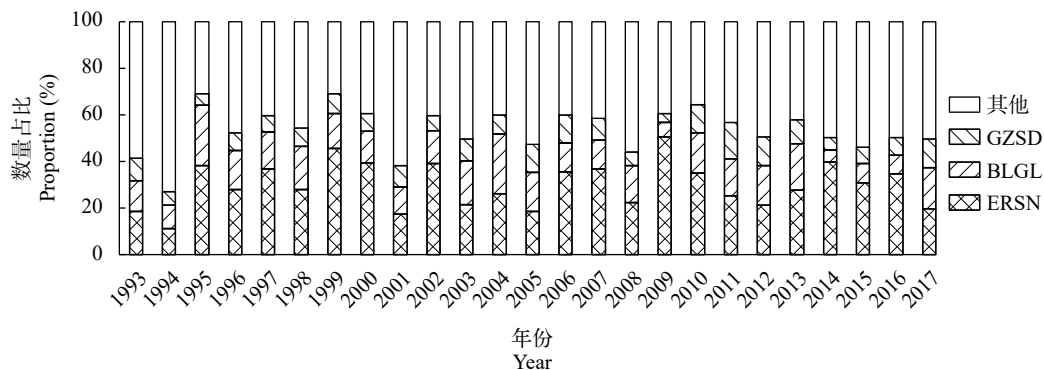


图6 上密西西比河鱼类优势种变化(ERSN. 翡翠闪光鱼; GZSD. 美洲真鲮; BLGL. 蓝鳃太阳鱼; 数据来源LTRMP)

Fig. 6 Change of dominant fish species in the upper Mississippi River (ERSN. *Notropis atherinoides*; GZSD. *Dorosoma cepedianum*; BLGL. *Lepomis macrochirus*; data from LTRMP)

护和强化UMRS中的重要水生动物、湿地和泛滥平原;通过系统的资源监测、数据分析和应用研究,提高对UMRS的认识;促进和扩大UMRS管理机构、利益集团和公众之间的交流和合作关系;最终形成示范并应用到其他河流生态系统修复和管理中^[44]。UMRS-EMP核心内容之一即鱼类资源长期资源监测计划(LTRMP, Long Term Resource Monitoring Program), 监测范围覆盖上密西西比河6大区域: Pool 4、Pool 8、Pool 13、La Grange Pool、Pool 26 和Open River Reach, 并制定了一系列标准化采样规范^[45]。自LTRMP监测实施以来, 已记录数据超过4.4万个, 收集鱼类570万尾。

LTRMP的监测价值主要体现在三个方面: 一是保护渔业资源。UMSR是美国最具生物生产力和经济价值的泛滥平原生态系统, 而鱼类则是其中最重要的商品(每年约带来12亿美元的收入), 但大量的捕捞和休闲垂钓也会对区域生态产生不利影响^[46]。LTRMP可以及时反映特定物种的资源动态, 并在出现任何不利趋势时采取补救行动。二是保存物种。UMRS拥有众多古老、珍稀以及濒危鱼类, 但也是入侵物种在美国大部分地区扩散的关键水域, 大量外来种会对UMRS土著鱼类带来了威胁^[47]。如, 根据LTRPM 20年的监测数据发现, 亚洲白鲢(Silver carp)形成入侵前后, 密西西比河土著鱼类的生物量明显下降(图 7)。因此, 通过LTRMP可以及时掌握入侵物种的扩散动态、对本地物种的影响以及制定相关的保护策略。三是生态完整性评估。鱼类是反应河流物理和生物环境状况的重要

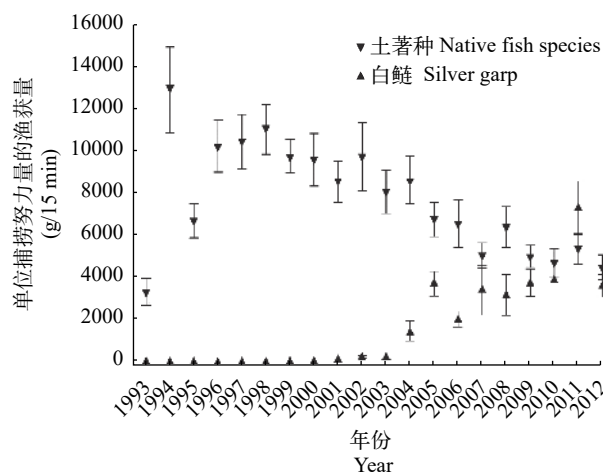


图 7 上密西西比河土著鱼类和白鲢单位捕捞量的渔获量(CPUE)变化趋势(U.S. Army Corps of Engineers, 2016)

Fig. 7 Trend of catch per unit effort (CPUE) of native fish species and silver carp in the upper Mississippi River (U.S. Army Corps of Engineers, 2016)

指示物种^[48]。鱼类多样性变化及其对环境变化的多尺度响应通常被作为UMRS生态系统完整性的指标^[48], 并借此提高公众对UMRS鱼类和河流生态环境保护的认识。从目前的监测结果可以看出, 不仅在区域尺度上, 上密西西比河保持了较丰富和稳定的鱼类多样性(图 5和图 6); 在局域尺度上, 6大监测区域的鱼类物种丰度同样具有上升趋势(图 8)。

3.2 上密西西比河生态恢复和维持策略

2000年, 上密西西比河保护协会(UMRCC, The Upper Mississippi River Conservation Committee)在UMRS-EMP的基础上, 提出了上密西西比河生态恢复和维持策略(UMRS-RMS, Restoration and Maintenance Strategies), 即通过对生态系统层面(Ecosystem, 指非生物环境, 如栖息地物理环境、水文节律和水土条件等)的综合性修复来保障自然资源系统(Natural resource system, 指流域内的鱼类和鸟类等野生动植物)的稳定^[22]。其内容主要涉及以下9项修复措施: (1)减少营养素、杀虫剂和除草剂的使用, 控制污染源的输入, 改善栖息地水质状况; (2)控制高地和河岸的水土流失, 重建支流河曲, 提高河流生境异质性; (3)恢复天然洪泛区, 拆除不合格及低效益的防洪堤; (4)降低蓄水位, 提供季节性洪水脉冲和周期性低流量, 提供鱼类繁殖需求的水文节律; (5)通过水位调控等方式提高河网连通性, 降低生境破碎化; (6)创造岛屿、浅滩和沙洲等栖息地, 使生境更加多样化; (7)航道疏浚、清淤、人工护岸等维护措施要满足河流生态修复目标; (8)切断外来物种的扩散路径; (9)改善大坝闸门的运行方式, 提高鱼类过坝机率。

为保障RMS的成功实施, UMRCC进一步提出了6项支撑性计划^[22], 包括(1)优先支持水质和沉积物改善的项目; (2)优先支持泛滥河流水文过程恢复的项目, 保障其生态功能的可持续运转; (3)建议开展小尺度或特定区域内的生态修复工程; (4)在亟需改革和试点的已有项目、组织和机构中推广UMRS-EMP; (5)促进管理者、学者和公众之间的交流, 分享有关适应性管理和河流恢复的信息; (6)公开修复措施和建议, 以便获得公众的支持, 并通过相关组织和机构促进领导者的决策和执行。由此可见, 美国除了注重流域生态的系统性治理外, 更加善于利用社会力量, 并形成公众-学者-管理者相互协作的良性管理体制。截止到2016年, UMRCC共有87项栖息地修复及强化工程已完成或正在实施^[50]。未来, UMRCC还将以LTRMP数据为基础, 不断评估和改进生态修复措施, 以保障上密西西比河生态系统和自然资源系统的稳定。

3.3 密西西比河大坝拆除

美国最早于1912年拆除了第一座位于密执根州的马克特坝(Marquette Dam)。迄今为止,全美已拆除近1700座老、弃、废坝和“无名坝”,主要分布于美国东西部河流的小支流或溪沟上,多数拆坝的坝高小于8 m。据不完全统计,密西西比河流域已拆除大坝50座以上,但全部位于支流水系,而干流为了保证通航以及防洪需求没有计划对已建大坝进行拆除。美国拆坝的重要里程碑是2001年拆除了位于密西西比河二级支流巴拉博河的最后四座大坝,拆坝后恢复了该河流185 km长的自然流通状态。在此之前,巴拉博河被阻隔长达150年之久。Catalano等^[51]分析了巴拉博河拆坝后的鱼类群落变化,发现坝址区域的鱼类生物完整性和物种丰度会在拆坝后2年内迅速下降并随后上升至稳定,有10个新物种在原坝上游定殖并大量繁殖,这种群落变动随着离拆坝位置越远而逐渐减弱。

大坝拆除对鱼类的影响是双向的,一方面可恢复河流的自然流态及其连通性,有利于洄游性鱼类的生长与繁殖;另一方面,对于阻隔较久的河流,其生态系统已经达到稳定和平衡,拆坝后库区底泥

的释放会影响下游水质,改变下游河床基质和河道形态,鱼类群落产生新的演替。此外,拆坝后也可能带来新的物种入侵。目前,在美国仅有9%的拆坝经过科学评估,并且多数评估仅针对建坝后1—4年内,缺乏长期评估以及拆坝前的对比评估。而现有评估也多关注于拆坝后水文、沉积物等短期形成的物理效应,极少数关注生物、水质等长期生态效应,以及物理和生态效应之间的内在联系^[52]。因此,尽管美国较早的采取拆坝措施来恢复河流生态,但其恢复效果仍需大量长期数据来验证。

4 对我国水电开发下鱼类保护的启示

密西西比河与我国大型河流有诸多相似之处。以长江为例:从空间权属看,密西西比河仅流经美国和加拿大两个国家,长江为境内河流,权属关系同其他国际河流相对简单;从城市规划看,密西西比河和长江流经地区多为社会经济发达、城市化较集中的中部区域,人类活动频繁;从建坝目标看,都以航运、防洪、发电、供水等为主。尽管密西西比河在气候、水文、长度、流域面积等方面和长江存在差异,但其丰富的治理经验仍可为我

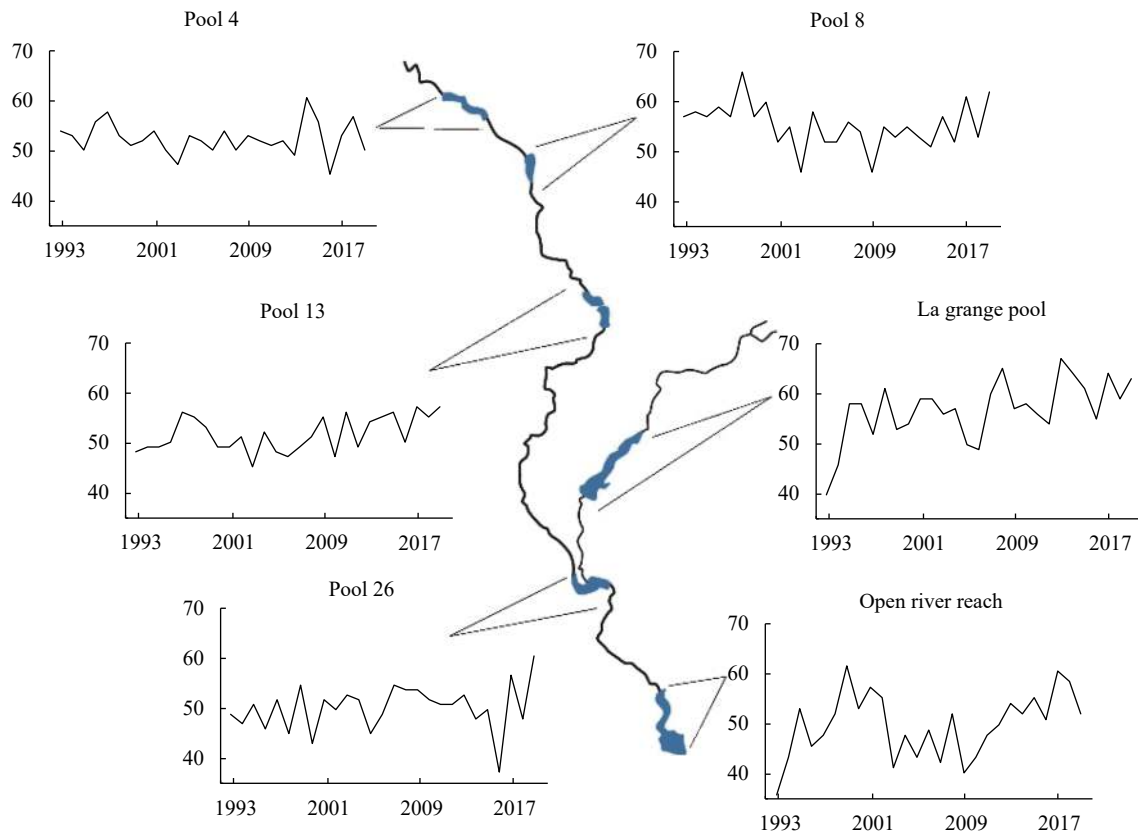


图8 上密西西比河不同监测区域的鱼类物种丰富度变化(数据来源LTRMP; x轴. 年份; y轴. 物种丰度)

Fig. 8 Variation of species richness of different monitoring areas in the upper Mississippi River (data from LTRMP; x-axis. years; y-axis. species abundance)

国筑坝河流鱼类资源保护及其生态修复提供参考和示范。

4.1 建立长期系统的河流监测体系

系统的自然资源调查与监测是成功治理的根本。实时监测有利于掌握河流生态系统健康状况,并为河流生态修复提供信息和决策支撑,但需要长期的、标准化的监测数据作为基础。在密西西比河UMRS-EMP计划中,除了鱼类资源监测外,还包含水生植物、大型无脊椎动物、水质、土地覆盖、测深和遥感等监测要素。借鉴密西西比河的成功经验,美国环境保护研究与发展办公室(EPA-ORD, U.S. Environmental Protection Agency Office of Research and Development)于2004年也开始在其他河流实施了“大型河流环境监测与评估计划(EMAP-GRE, Environmental Monitoring and Assessment Program-Great Rivers Ecosystems)”^[53]。

4.2 注重栖息地修复

目前而言,以物种为导向的河流生态修复措施,如人工产卵场、建造繁育基地、增殖放流以及引种等,仍难以保证鱼类自然种群的恢复^[54],甚至会对原本的自然种群产生潜在威胁^[55]。美国UMRS-RMS和拆坝都是以栖息地修复为导向,从河流生态系统运转机制、维持过程、核心要素以及健康标准4个角度进行综合规划,其目标更具有长期性和系统性,弥补了单一物种补偿措施的不足,而河流监测体系的建立也可为栖息地修复效果评估提供资料。

4.3 建坝与拆坝之争

拆坝的焦点在于对鱼类洄游通道的恢复,但往往会带来环境和经济的不利影响,这也促进了鱼道的发展。然而,鱼梯、升鱼机等过鱼设施难以满足不同物种的洄游需求,有进一步增加外来种入侵的风险,如密西西比河的亚洲鲤^[47]、七鳃鳗等^[56],同时也会引发生态陷阱(Ecological traps)^[57]。因此,过鱼设施在美国被认为是一种半成熟的技术^[25, 58]。不同河流由于人口、区域、气候、水文、生物多样性的差异,水利开发通常产生不同的经济效益、社会效益以及生态效益,因此,无论建坝、拆坝或是辅助过鱼都需综合考虑三者之间的平衡以及实施后的长短期变化,并通过大量的本底数据开展预测研究。尤其是对已经形成稳定生态系统的大坝,其拆除和修建过坝措施更应谨慎考虑。

4.4 因地制宜

成功的治理经验要结合河流自身的实际情况才能加以借鉴运用,并研究制定针对性的修复措施。如前文提到的《田纳西河谷开发法案》正是

以田纳西河水电规划为蓝本对密西西比河进行的全流域开发。美国基西米河生态修复也采取了和密西西比河类似的工程措施,但其侧重目标在于通过恢复河道的自然水文水力条件进而重建其生态环境^[59]。此外,上密西西比河EMP和RMS计划都只对干流进行了修复试点和规划,而没有涉及其他支流或湖泊。这也是考虑到不同河流各自的生物、环境状况以及经济、社会影响的唯一性。

4.5 完善法律法规

健全的法律体系能够保障河流治理做到依法治水、依法开发,并监督敦促各项修复措施有效落实。美国1936年的《防洪法》、1965年的《水资源规划法》、1972年的《清洁水法》、1986年的《水资源发展法案》、1998年的《面向21世纪的交通运输平衡法案》以及1933—1977年的多部防洪保险法规,使得密西西比河的水资源、水利、水电、航运均有法可依,保障了内河开发有序进行。

5 总结与展望

美国对密西西比河生态系统的研究相对较早,河流修复理论、技术和方法较为成熟,经验积累丰富。鉴于河流生态系统的复杂性,其恢复过程是长期而持续的,这也给我国相关研究和管理带来了挑战。目前我国水电开发下鱼类保护存在的问题主要包括以下几个方面:(1)对我国河流生态系统缺乏足够的认识,无法对症下药;(2)恢复措施多为国内外已有成功案例的效仿,没有实施本地化;(3)河流的历史生态数据极度缺乏,难以开展系统的研究和评估;(4)多数修复研究仅考虑了鱼类、流量、水质等单一生态指标,缺乏对生态系统的整体性考虑;(5)对影响河流物理、化学和生物过程的关键因子尚不明晰;(6)鱼类物种保护方式仍以人工繁殖和增殖放流为主,对栖息地的研究和保护力度较弱;(7)标准化的生态监测体系尚未建立完全。

随着习近平总书记提出的“生态文明建设”、“绿水青山就是金山银山”以及“共抓大保护,不搞大开发”等理念的贯彻落实,我国也逐渐意识到河流生态和鱼类保护的重要性,在诸多流域开展了试点修复工作。早在2012年,美国大自然保护协会(TNC, The Nature Conservancy)与长江流域渔业资源管理委员会(YFC, Yangtze River Basin Fisheries Resources Management Commission)建立了“长江-密西西比河”绿色伙伴合作关系(Yangtze-Mississippi River EcoPartnership),其目的是为了解决亚洲鲤在密西西比河干支流中的进一步扩散,而通过学习密西西比河多年的流域治理模式和经验也可为

长江流域生态修复和鱼类资源保护提供借鉴。2018年,国务院审定印发了《国务院办公厅关于加强长江水生生物保护工作的意见》,在生态修复、拯救濒危物种、加强生境保护、完善生态补偿、加强执法监管、强化支撑保障、加强组织领导等7个方面提出了19项政策措施。2019年,在中国科学院水生生物研究所曹文宣院士的多年呼吁下,三部委联合发布了《长江流域重点水域禁捕和建立补偿实施方案》,要求在长江干流和重要支流等重点水域逐步实行合理期限内禁捕的禁渔期制度,2020年底以前实现长江流域重点水域常年禁捕(暂定实行10年禁捕)。此外,《中华人民共和国长江法》的基本框架和原则也已确定,尚待落实。一系列的政策和法规为进一步推动“长江大保护”奠定了基石。

未来,我国河流生态保护和评估工作仍需依赖于多学科的基础研究,在充分吸收密西西比河等国外成功河流生态修复经验的同时,以大量既有资料为根本,以长期监测数据为基础,通过掌握河流生态过程及其生物、环境的演变规律,不断发展适合我国河流特点的生态修复理论、技术和方法。同时在管理层面,实施跨部门合作;加强水域生态环境健康监测,建立覆盖全流域和所有环境要素的监测网络体系;对于已建高坝大库的河流,积极开展鱼类栖息地修复和生态补偿机制;从连通支流入手,评估替代生境的可行性,科学拆除小水电,恢复支流原来的自然流态;在鱼类关键栖息地设置自然保护区,划定水域生态红线,开展保护区效果评估,优化空间布局;针对濒危特有鱼类,制定相关拯救行动计划;最后,应以《长江法》为范式,尽快推进其他河流生态保护相关法律法规的确立和落实,使我国河流生态保护有法可依,并最终指导相关河流的生态修复和鱼类保护工作。

参考文献:

- [1] Lynch H J, Campbell Grant E H, Muneeppeerakul R, *et al.* How restructuring river connectivity changes freshwater fish biodiversity and biogeography [J]. *Water Resources Research*, 2011, **47**(5): 1-10.
- [2] Vannote R L, Minshall G W, Cummins K W, *et al.* The river continuum concept [J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1980, **37**(1): 130-137.
- [3] Nunn A D, Cowx I G. Restoring river connectivity: prioritizing passage improvements for diadromous fishes and lampreys [J]. *Ambio*, 2012, **41**(4): 402-409.
- [4] FAO. Review Of World Water Resources By Country [M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2003: 1-126.
- [5] World Energy Council. Survey of energy resources 2010 [M]. New York: Elsevier, 2011: 1-608.
- [6] Ho M, Lall U, Allaire M, *et al.* The future role of dams in the United States of America [J]. *Water Resources Research*, 2017, **53**(2): 982-998.
- [7] National Inventory of Dams. Federal Emergency Management Agency. US Army Corps of Engineers: Washington, DC, 2019. <http://nid.usace.army.mil>.
- [8] Poff N L R, Schmidt J C. How dams can go with the flow [J]. *Science*, 2016, **353**(6304): 1099-1100.
- [9] Graf W L. Downstream hydrologic and geomorphic effects of large dams on American rivers [J]. *Geomorphology*, 2006, **79**(3-4): 336-360.
- [10] Mcmenemy J. An overview of the program to restore Atlantic salmon and other diadromous fishes to the Connecticut River with notes on the current status of these species in the river [J]. *American Fisheries Society Monograph*, 2004(9): 287-317.
- [11] Delong, Michael D. Upper Mississippi River Basin [M]. New York: Elsevier, 2005: 327-373.
- [12] Brown A V, Brown K B, Jackson D C, *et al.* Lower Mississippi River and its tributaries [J]. *Rivers of North America*, 2005: 231-281.
- [13] Fremling C R, Claflin T O. Ecological history of the Upper Mississippi River [C]//Wiener J G, Anderson R V, McConville D R (Eds.), *Contaminants in the Upper Mississippi River: Proceedings of the 15th Annual Meeting of the Mississippi River Research Consortium*, Butterworth Publishers: Stoneham, MA, 1984: 5-24.
- [14] Hey D L, Philippi N S. Flood reduction through wetland restoration: the Upper Mississippi River Basin as a case history [J]. *Restoration Ecology*, 1995, **3**(1): 4-17.
- [15] Chang H. Enlightenment from the Shipping Development of the Mississippi River in the United States [J]. *Comprehensive Transportation*, 2004(7): 85-89. [常航. 美国密西西比河航运开发的启示 [J]. 综合运输, 2004(7): 85-89.]
- [16] Hou L S, Xu X G. Treatments and Inspiration of Mississippi Basin [J]. *Yellow River*, 2001, **23**(1): 39-41. [后立胜, 许学工. 密西西比河流域治理的措施及启示 [J]. 人民黄河, 2001, **23**(1): 39-41.]
- [17] Clapp G R. The TVA; an Approach to the Development of a Region [M]. Russell & Russell, 1971: 567-568.
- [18] Xie S Q. The development and management experience of the Tennessee River Basin in the United States [J]. *Asia-Pacific Economic Review*, 2013(2): 68-72. [谢世清. 美国田纳西河流域开发与管理及其经验 [J]. 亚太经济, 2013(2): 68-72.]
- [19] Wiley E O, Mayden R L. Species and speciation in phylogenetic systematics, with examples from the North American fish fauna [J]. *Annals of the Missouri botanical Garden*, 1985, **72**(4): 596-635.
- [20] Matthews W J. Patterns in Freshwater Fish Ecology [M]. Springer Science & Business Media, 2012: P236.
- [21] Littlejohn, S. Habits and Habitats of Fishes in the Upper Mississippi River [M]. Upper Mississippi River Conservation Committee, 2011: 1-24.
- [22] McGuinness D. A river that works and a working river: A strategy for the natural resources of the Upper Missis-

- issippi River System [J]. *Report of the Upper Mississippi River Conservation Committee. Rock Island, IL*, 2000: 1-35.
- [23] Baker J A, Killgore K J, Kasul R L. Aquatic habitats and fish communities in the lower Mississippi River [J]. *Reviews in Aquatic Sciences*, 1991, **3**(4): 313-356.
- [24] Ferguson J W, Healey M, Dugan P, *et al.* Potential effects of dams on migratory fish in the Mekong River: lessons from salmon in the Fraser and Columbia Rivers [J]. *Environmental Management*, 2011, **47**(1): 141-159.
- [25] Brown J J, Limburg K E, Waldman J R, *et al.* Fish and hydropower on the US Atlantic coast: failed fisheries policies from half-way technologies [J]. *Conservation Letters*, 2013, **6**(4): 280-286.
- [26] Nielsen L A, Sheehan R J, Orth D J. Impacts of navigation on riverine fish production in the United States [J]. *Polskie Archiwum Hydrobiologii/Polish Archives of Hydrobiology*, 1986, **33**(3): 277-294.
- [27] Holland L, Huff D, Littlejohn S, *et al.* Analysis of existing information on adult fish movements through dams on the upper Mississippi River [R]. *National Fishery Research Lab La Crosse Wi*, 1984: 1-213.
- [28] Wlosinski J H, Hill L. Analysis of water level management on the Upper Mississippi River (1980-1990) [J]. *Regulated Rivers: Research & Management*, 1995, **11**(2): 239-248.
- [29] Winter H V, Van Densen W L T. Assessing the opportunities for upstream migration of non-salmonid fishes in the weir-regulated River Vecht [J]. *Fisheries Management and Ecology*, 2001, **8**(6): 513-532.
- [30] Zigler S J, Dewey M R, Knights B C, *et al.* Hydrologic and hydraulic factors affecting passage of paddlefish through dams in the upper Mississippi River [J]. *Transactions of the American Fisheries Society*, 2004, **133**(1): 160-172.
- [31] Tripp S, Brooks R, Herzog D, *et al.* Patterns of fish passage in the upper Mississippi River [J]. *River Research and Applications*, 2014, **30**(8): 1056-1064.
- [32] Kelner D E, Sietman B E. Relic populations of the ebony shell, *Fusconaia ebena* (Bivalvia: Unionidae), in the upper Mississippi River drainage [J]. *Journal of Freshwater Ecology*, 2000, **15**(3): 371-377.
- [33] Koel, Todd M. Spatial variation in fish species richness of the upper Mississippi River system [J]. *Transactions of the American Fisheries Society*, 2004, **133**(4): 984-1003.
- [34] Chick J H, Pegg M A, Koel T M. Spatial patterns of fish communities in the Upper Mississippi River System: assessing fragmentation by low-head dams [J]. *River Research and Applications*, 2006, **22**(4): 413-427.
- [35] Haun R L. Comparison of Fish Community Composition and Structure Among River Reaches of the Upper Mississippi River: Determining the Effects of Lock and Dam 19 in Structuring Fish Communities [M]. Western Illinois University, 2016: 1-42.
- [36] Anderson R L, Anderson C A, Larson J H, *et al.* Influence of a high-head dam as a dispersal barrier to fish community structure of the Upper Mississippi River [J]. *River Research and Applications*, 2020, **36**(1): 47-56.
- [37] Weigel B M, Lyons J, Rasmussen P W. Fish assemblages and biotic integrity of a highly modified floodplain river, the upper Mississippi, and a large, relatively unimpacted tributary, the lower Wisconsin [J]. *River Research and Applications*, 2006, **22**(8): 923-936.
- [38] Wolter C, Arlinghaus R. Navigation impacts on freshwater fish assemblages: the ecological relevance of swimming performance [J]. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 2003, **13**(1): 63-89.
- [39] Adams S R, Keevin T M, Killgore K J, *et al.* Stranding potential of young fishes subjected to simulated vessel-induced drawdown [J]. *Transactions of the American Fisheries Society*, 1999, **128**(6): 1230-1234.
- [40] Theriot J M, Conkle J L, Pezeshki S R, *et al.* Will hydrologic restoration of Mississippi River riparian wetlands improve their critical biogeochemical functions [J]? *Ecological Engineering*, 2013(60): 192-198.
- [41] Hurley K L, Sheehan R J, Heidinger R C, *et al.* Habitats by middle Mississippi River pallid sturgeon [J]. *Transactions of the American Fisheries Society*, 2004, **133**(4): 1033-1041.
- [42] Alexander J S, Wilson R C, Green W R. A brief history and summary of the effects of river engineering and dams on the Mississippi River system and delta [J]. *US Department of the Interior, US Geological Survey*, 2012: 1-43.
- [43] Dubowy P J. Navigation, Flood Risk Management, and Mississippi River Ecosystem Rehabilitation [M]. Watershed Management 2010: Innovations in Watershed Management under Land Use and Climate Change, 2010: 431-442.
- [44] Carlson B. Upper Mississippi River system: environmental management program [J]. *Restoration and Reclamation Review*, 1998: 1-10.
- [45] Ratcliff E N, Gittinger E J, O'Hara T M, *et al.* Long Term Resource Monitoring Program Procedures: Fish Monitoring [M]. Washington, DC: US Army Corps of Engineers, 2014: 1-88.
- [46] Carlson B D, Propst D B, Stynes D J, *et al.* Economic Impact of Recreation on the Upper Mississippi River System [R]. Army Engineer Waterways Experiment Station Vicksburg Ms Environmental Lab, 1995: 1-45.
- [47] Chick J H, Pegg M A. Invasive carp in the Mississippi River basin [J]. *Science*, 2001, **292**(5525): 2250-2251.
- [48] Karr J R. Assessment of biotic integrity using fish communities [J]. *Fisheries*, 1981, **6**(6): 21-27.
- [49] Theiling C H. Habitat rehabilitation on the upper Mississippi River [J]. *Regulated Rivers: Research & Management*, 1995, **11**(2): 227-238.
- [50] U.S. Army Corps of Engineers. Report to congress upper mississippi river restoration program [R]. Upper Mississippi River Restoration Program, 2016: 1-98.
- [51] Catalano M J, Bozek M A, Pellett T D. Effects of dam removal on fish assemblage structure and spatial distributions in the Baraboo River, Wisconsin [J]. *North American Journal of Fisheries Management*, 2007, **27**(2): 519-

- 530.
- [52] Ryan Bellmore J, Duda J J, Craig L S, *et al.* Status and trends of dam removal research in the United States [J]. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 2017, **4**(2): 1164.
- [53] McDonald M, Blair M, Bolgrien D, *et al.* The U. S. Environmental Protection Agency's Environmental Monitoring and Assessment Program [M]//Weirsma G B (Eds.), *Environmental Monitoring*. New York: CRC, 2004: 649–668.
- [54] Gustafson R G, Waples R S, Myers J M, *et al.* Pacific salmon extinctions: quantifying lost and remaining diversity [J]. *Conservation Biology*, 2007, **21**(4): 1009–1020.
- [55] Piller K R, Wilson C C, Lee C E, *et al.* Conservation genetics of inland lake trout in the upper Mississippi River basin: stocked or native ancestry [J]? *Transactions of the American Fisheries Society*, 2005, **134**(4): 789–802.
- [56] Smith B R, Tibbles J J. Sea lamprey (*Petromyzon marinus*) in Lakes Huron, Michigan, and Superior: history of invasion and control, 1936–78 [J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1980, **37**(11): 1780–1801.
- [57] Pelicice F M, Agostinho A A. Fish-passage facilities as ecological traps in large neotropical rivers [J]. *Conservation Biology*, 2008, **22**(1): 180–188.
- [58] Pennock C A, Bender D, Hofmeier J, *et al.* Can fishways mitigate fragmentation effects on great plains fish communities [J]? *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2017, **75**(1): 121–130.
- [59] Wu B S, Chen H G, Ma J M. Review of the ecosystem restoration of Kissimmee River in USA [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2005(4): 91–95. [吴保生, 陈红刚和马吉明. 美国基西米河生态修复工程的经验 [J]. 水利学报, 2005(4): 91–95.]

IMPACTS OF CASCADE DAMS ON FISH IN THE MAINSTREAM OF MISSISSIPPI RIVER AND THE MITIGATION MEASURES

CHANG Tao and LIU Huan-Zhang

(The Key Laboratory of Aquatic Biodiversity and Conservation of Chinese Academy of Sciences, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China)

Abstract: How to mitigate the influence of dam construction on fish diversity and develop effective conservation and restoration measures are the main content of river ecological protection. This study overviewed dam constructions in the mainstream of Mississippi River and their influence on fish. Additionally, the conservation measures of fish resources and their effectiveness were analyzed and summarized. It was found that 41 lock and dams were constructed in the upper Mississippi River. The height of most dams were no more than 15 m and their capacities were less than 0.3 km³. These dams blocked the migration path of fish in the Mississippi River but no one had fish passage facilities. Many studies showed that navigation dams in the Mississippi River may function similarly to weirs, because most are low-head dams with bottom release gates that allow fish to pass under some conditions. However, increased dams decreased the passage efficiency, and they had less effect in maintaining the fish population, especially for sturgeon species. Influenced by the impoundment of dams, the spatial variation of fish composition in the upper Mississippi River suffered a community-level fragmentation. In 1984 and 2000, the Upper Mississippi River System-Environmental Management Program (UMRS-EMP) and the Restoration and Maintenance Strategies (UMRS-RMS) were implemented respectively, including the long term fish resources monitoring program (LTRMP) and 9 habitat restoration measures. Benefiting from these measures, the Mississippi river still maintains high species diversity. This can provide us with successful experience in future fish resources protection and watershed management in dammed Chinese rivers.

Key words: Mississippi River; Dams; Fish population; Restoration measure

附表 1 密西西比河干流41座大坝建设概况(数据引自NID)

Attached table 1 The characters of 41 dams in the main stream of upper Mississippi River (data from NID)

NID序号 NID Number	大坝名称 Dam Name	纬度 Longitude	经度 Latitude	建成时间 Completed year	坝高(m) NID Height	库容(km ³) NID Storage	开发目标 Primary Purpose
421	Arsenal Power Dam	-90.54	41.515	1878	8.8	0.037	Hydroelectric
1029	Winnibigoshish Dam	-94.05	47.43	1884	7.0	0.678	Water Supply
1031	Pokegama Lake Dam	-93.5866	47.2483	1884	5.2	0.148	Navigation
4485	Ottertail Power Dam	-94.7296	47.4836	1907	10.1	0.006	Hydroelectric
5738	Lock & Dam 19	-91.3747	40.395	1913	19.2	0.360	Navigation
6059	Little Falls Dam	-94.3678	45.9756	1914	9.1	0.006	Hydroelectric
6073	Coon Rapids Dam	-93.3106	45.1444	1913	10.7	0.002	Recreation
6084	Blandin Dam	-93.53	47.2317	1916	6.4	0.005	Hydroelectric
6089	Lock & Dam 1	-93.2016	44.915	1917	17.1	0.011	Hydroelectric
8066	Knutson Dam	-94.4831	47.4517	1929	2.7	0.131	Flood Control
8086	Blanchard Dam	-94.3583	45.86	1925	14.0	0.020	Hydroelectric
9810	Lock & Dam 15	-90.5637	41.5182	1934	12.5	0.037	Navigation
10000	Lock & Dam 5	-91.8116	44.1616	1935	13.1	0.131	Navigation
10856	Lock & Dam 4	-91.9233	44.325	1935	12.8	1.083	Navigation
10948	Lock & Dam 2	-92.8683	44.7599	1931	12.8	0.971	Navigation
11243	Lock & Dam 17	-91.0568	41.1917	1939	14.3	0.062	Navigation
11244	Lock & Dam 18	-91.024	40.8815	1937	12.5	0.111	Navigation
11245	Lock & Dam 11	-90.6453	42.5392	1937	13.1	0.210	Navigation
11246	Lock & Dam 13	-90.1547	41.8972	1939	13.4	0.237	Navigation
11247	Lock & Dam 12	-90.422	42.2603	1938	13.4	0.113	Navigation
11248	Lock & Dam 16	-91.0102	41.4249	1937	10.4	0.109	Navigation
11250	Lock & Dam 14	-90.4002	41.5741	1939	11.9	0.101	Navigation
11323	Lock & Dam 10	-91.095	42.785	1937	13.1	0.262	Navigation
11723	Lock & Dam 24	-90.901	39.379	1940	23.2	0.155	Navigation
11727	Lock & Dam 20	-91.5149	40.1432	1936	11.3	0.072	Navigation
11729	Lock & Dam 22	-91.2487	39.6353	1938	9.8	0.099	Navigation
11754	Lock & Dam 3	-92.61	44.61	1938	13.4	1.369	Recreation
11760	Lock & Dam 7	-91.3083	43.8666	1937	12.5	0.130	Navigation
11769	Lock & Dam 25	-90.7047	39.0229	1939	22.9	0.217	Navigation
11770	Lock & Dam 21	-91.4288	39.903	1938	14.6	0.076	Navigation
11818	Lock & Dam 5A	-91.6699	44.0883	1936	14.0	0.321	Recreation
13551	Lock & Dam 9	-91.095	43.2116	1937	14.0	0.580	Navigation
13641	Lock & Dam 6	-91.4383	44	1936	12.2	0.222	Navigation
13642	Lock & Dam 8	-91.2316	43.5766	1937	12.8	0.321	Navigation
17964	Potlatch Dam	-94.1831	46.3779	1950	6.3	0.016	Hydroelectric
27030	St Anthony Falls Lower Lock & Dam	-93.2466	44.9783	1956	17.7	0.001	Navigation
33361	Lock & Dam 27	-90.1771	38.7578	1962	7.6	0.000	Navigation
36281	St Anthony Falls Upper Lock & Dam	-93.2583	44.9816	1963	28.3	0.006	Navigation
36921	Sartell Dam	-94.2	45.6167	1964	14.0	0.019	Hydroelectric
52327	St. Cloud Dam	-94.1473	45.5476	1972	7.1	0.003	Water Supply
67087	Melvin Price Locks & Dam (Locks & Dam 26)	-90.1548	38.8669	1990	23.5	0.294	Recreation