

拆坝对河流生态环境影响利弊研究综述

雷 阳^{1,2},董 飞^{1,2},刘晓波^{1,2},彭文启^{1,2},陈渠昌^{1,2}

(1. 中国水利水电科学研究院流域循环模拟与调控国家重点实验室,北京 100038;
2. 中国水利水电科学研究院水生态环境研究所,北京 100038)

摘要:为研究拆坝对生态环境影响的利弊,介绍了拆坝对水文情势、泥沙输运、河道地貌、河道水质、栖息地质量及生物多样性等生态的影响,综述了拆坝后河道物理化学及重要生态特性之间响应关系的研究进展。拆坝对生态环境的影响具有时空复杂性,且各生态因子相互影响;水文情势的变化是所有生态响应的触发条件,泥沙输运是生态响应的关键性因子。为了河道长期连续性的开发与利用,研究泥沙输运及泥沙污染物的释放规律,预测拆坝后河道水质时空变化过程,分析流域尺度上生态系统之间的响应关系等对拆坝的评估决策十分重要。

关键词:拆坝;生态影响;泥沙输运;河道地貌;河流水质;生物多样性

中图分类号:TV64;X522 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2022)04-0094-09

Review on influence of dam removal on advantages and disadvantages of river ecological environment//LEI Yang^{1,2}, DONG Fei^{1,2}, LIU Xiaobo^{1,2}, PENG Wenqi^{1,2}, CHEN Quchang^{1,2} (1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. Institute of Water Ecology and Environment, China Institute Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: To study the influence of dam removal on river ecological environment, the impacts of dam removal on hydrological regime, sediment transport, fluvial geomorphology, river water quality, habitat quality and biodiversity were introduced. Progress on the response relationship among river physical chemical characteristics and important ecological characteristics was summarized. The impact of dam removal on ecological environment has spatiotemporal complexity and each ecological factor influences each other. Hydrological regime change is the trigger of all ecological responses and sediment transport is found to be the key factor affecting the ecological environment. Considering the long-term continuous development and utilization of rivers, the study of sediment transport and release of sediment pollutants, the prediction of the spatiotemporal variation of river water quality after dam removal, and the analysis of the response relationship between ecosystems at the watershed scale are important in the evaluation and decision-making of dam removal.

Key words: dam removal; ecological impact; sediment transport; fluvial geomorphology; river water quality; biodiversity

水电能源作为世界上主要的可再生能源,占全球可再生能源供应的近3/4,发电总量的近1/5^[1]。根据国际大坝委员会(ICOLD)的统计,2020年坝高15 m以上的大坝共计58 713座,中国、美国、印度、日本稳居前四,中国占据40%以上^[2]。在世界范围内超过1 000 km的河流中,只有37%的河流整体都保持自由流动,23%的河流不间断地流入海洋^[3]。世界上超过50%的大河已经失去了它们的水文形态和生态连续性,考虑到未来的建设计划,这一数字将大幅

增加到93%^[4]。

大坝建设会改变河道原水流节律,降低河流连通性,割裂河流廊道,孤立种群和生境,为河流生物的迁移和运动形成了物理和温度障碍,从而影响生物地化循环及生物群落结构^[5],导致部分生态系统功能丧失^[6-7]。随着坝体老化,功能丧失、效益减退、安全隐患及生态影响等问题日渐突出^[8-11],拆坝逐渐成为当下关注的热点问题,大量工程通过移除坝体和堰体促进河流向原始生态系统恢复^[4,12]。1950—

基金项目:国家重点研发计划(2018YFC0407702);国家自然科学基金(51809288);中国水利水电科学研究院基本科研项目(WEO145B592017)

作者简介:雷阳(1991—),女,博士研究生,主要从事水环境数值模拟研究。E-mail:leiyanghehai@163.com

通信作者:刘晓波(1978—),男,正高级工程师,博士,主要从事水环境数值模拟和水利工程环境影响研究。E-mail:xbliu@iwhr.com

2016年,世界范围内有记录的水坝拆除3 869座,其中美国拆坝数量最多,占比36%^[13]。进入21世纪以来,美国拆坝数量急剧增长,至2018年已退役1 590座,71.3%为高度低于5 m的水坝^[14]。根据欧洲民间组织的大坝拆除报告,自20世纪90年代中期至2017年,欧洲至少有3 450座拦河坝被拆除^[15]。虽然不同组织统计结果差距较大,但不难发现,北美洲、欧洲的拆坝运动早已展开,目前北美和西欧正在拆除的大坝比正在修建的大坝多^[4]。截至2017年底,中国实施降等与报废水库6 539座,99%为小型水库^[16];截至2020年底,长江经济带小水电退出3 528座^[17],其中因难以改造或老旧失修而需要拆除的占14%^[18]。由于环境和社会问题,日本、非洲、韩国、泰国等国家和地区也已转变了对水电大坝简单的支持态度^[19-20]。拆坝已成为世界范围内纠正水电开发中突出生态环境问题,保护和修复河流生态系统的主要趋势^[21-24],且主要集中于小型水电站。

水库大坝退役,对河流水文、泥沙、地貌、水质、湿地、水生生物、植被、水生生物(鱼类、底栖)等均会产生影响,最终影响社会及经济效益^[23]。而河道生态系统的各种生态响应,是由生态系统物理和生物组成部分之间的多个因果路径和反馈机制控制^[25]。目前国内外已开展了很多相关研究,如Duda等^[26-28]研究了拆坝对库区泥沙运输的影响;Doyle等^[29-30]研究了拆坝后上下游河道演变过程;Stanley等^[31-33]对拆坝后河道营养盐及水质变化进行了研究;Magilligan等^[34-35]对拆坝后栖息地质量变化进行了研究;Birmie-Gauvin等^[36-37]对拆坝后鱼类、底栖的物种多样性进行了研究。部分学者如Bellmore等^[25,38-39]综述了拆坝对水文、泥沙、地形地貌、水质、鱼类、水生植物等各项生态因子的主要影响。但从生态系统整体出发,分析拆坝后各生态因子之间响应关系的研究相对较少。本文通过综述国内外拆坝对河道水文物理、环境化学及生态因素的影响,分析各生态因子之间的响应关系,总结主要研究方法,提出今后的重点研究方向,为我国拆坝及后期恢复管理工作提供参考。

1 拆坝对河流生态环境的影响

1.1 对河道水文情势的影响

拆坝可以最大程度地恢复河流的水文情势,对水文的影响与水库原调蓄能力有关,具体包括特征库容、坝址处年平均径流量、泄流能力、调度规程等。水库调蓄能力越大,对水文情势的影响越大。水库退役后,库区水位大幅降低,坝址上游回水范围缩

小,水力坡降和流速显著增加^[40];下游河道的水文过程恢复为无调节的自然状态^[41]。拆坝后地下水的水位和补给条件也发生相应变化,主要与库区水位降落幅度、水力坡度、水流流速的增加幅度及库区水文地质条件有关^[39]。库区的水温分层现象也因水流混掺作用增强而消失。拆坝后,水库对下游河道洪水调蓄能力丧失,上游泄流能力增大,洪水位降低,洪水风险减小;库区淹没范围大幅度缩小,洪水位降低,洪水风险减小;下游河道洪水调控能力消失,汛期流量变大,平、枯水期流量相应减小,洪水位变化幅度增大,洪水风险增加,河漫滩重新经历天然洪水过程^[41]。

1.2 对河道泥沙运输的影响

水库运行期间,降水及河流的自然侵蚀会输送泥沙等物质至库区,如美国Elwha坝和Glines Canyon坝2座混凝土坝拆除时,水库淤沙量达到1 900万 m^3 ^[26]。拆坝行为结束后,会有更大且持续的泥沙运输影响^[42],短期内的泥沙负荷增加^[43],河道泥沙粒度发生变化,总体特征为上游粗化、下游细化^[40]。拆坝后的泥沙运动分为两类,一类是水土流失,河流消亡;一类是先水土流失,后形成沟壑,最终形成新河道,河流仍活跃^[23]。对于仍然活跃的河流,上游流速增加,挟沙能力增加,冲刷河床和堤岸;当河床冲刷下切超过岸滩的临界崩塌高度时,岸滩崩塌,粗细颗粒泥沙同时被输送到下游^[44],造成水土流失;库区淤积的泥沙及污染物重新运动,向下游河道扩散;下游泥沙含量增加,短期内产生淤积,甚至下游较远距离河道会受到影响,河道地貌产生变化^[27]。如Homestead大坝一次性拆除后,原坝前约6万 m^3 的沉积物,在拆坝后2~12个月内91%发生了侵蚀,其中80%被携带至大坝下游8 km以外^[28]。而Stronach大坝分期拆除后,上游发生了3.89 km的溯源侵蚀,在大坝拆除后10 a内,12%的泥沙共92 000 m^3 被侵蚀,其中仅约14%沉积在大坝下游1 km处,其余部分被输送至下游或沉积在河漫滩上^[44]。但当流域内为多坝系统时,拆坝产生的大量泥沙的影响是有限的^[45],洪水事件会加剧上游侵蚀和下游淤积现象。

1.3 对河道地貌的影响

拆坝造成的水文条件改变及泥沙运输,直接改变河道地貌,但对上下游地形地貌的影响不同^[27]。拆坝后上游河道发生溯源侵蚀,导致上游河道变窄、变深,坡度增加^[44],河床降低^[30]。拆坝对下游地形地貌的影响主要与泥沙输运行为相关。岸滩崩塌引起河道加宽,泥沙在库区下游沉积,侧向和垂向河道调整,河道变浅变宽,局部能坡减小,河岸侵蚀减小,

上下游河段将形成新的相对稳定的比降,河道重新建立动态平衡^[29]。但下游的水流速度整体随着坡度的增加而增加,河流地貌在拆坝后几年内的持续变化仍很明显^[44]。库区淤沙重新运动过程类似于沙波,而沙波的运动方式决定着下游河道地形的变化^[46-47]。沉积物的中位粒径、黏聚力水平、沉积物空间变异性和迁移时间是决定沉积物侵蚀速率和体积的最重要因素,在河貌变化中具有关键作用^[29,48]。水流的波动可能导致整个地区更严重的侵蚀,高流量会导致更明显的河道演变和深泓线迁移^[49]。拆坝后河道新平衡状态与坝体拆除方式也有关。研究表明与一次性拆坝相比,分期拆坝形成的正向与负向波都较小,流速相对较低,侵蚀程度相对较弱,溯源侵蚀距离较短;但长期来看,泥沙冲淤分布和一次性拆除类似^[50]。

1.4 对河流水质的影响

拆坝后,库区水动力条件改善,水体中污染物不再累积,库区水质可能因此有所改善;但库区被污染的沉积物再悬浮也会带来水质污染的风险^[43]。下游河道的水质与库区淤积泥沙性质有关。若泥沙中污染物释放,水质将有恶化的趋势;若泥沙中无污染物,水质无显著变化;但如果拆坝前下泄水体水质较差,且拆坝后泥沙中不含污染物,下游河道水质甚至可能有所改善^[41]。为研究拆坝对河道中氮、磷释放的影响,Stanley等^[31]从地貌影响的角度进行分析,认为溯源侵蚀和向下游大量的泥沙输运会导致研究库区水体磷含量的降低,且随着时间推移,磷损失会持续存在或加剧,直至河道进入沉积阶段;库区水体氮含量在水位降低阶段呈上升趋势,但在河床下切阶段,氮向下游输移,库区浓度下降。但实际过程中,拆坝后的水质趋势很难概括,与沉积物性质、水文变化和系统中的生物地球化学过程速率有关,不同条件下拆坝带来的环境影响并不相同^[51]。例如,宾夕法尼亚的马纳塔尼溪大坝拆除后,由于大坝水文影响小,停留时间短(不到2h),碳、可溶性氮、可溶性磷和颗粒物以及碱度、电导率和溶解氧等均没有显著变化^[32]。而威斯康星州的Rockdale大坝拆除后,细颗粒沉积物的磷释放会导致富营养化风险^[52]。Zhang等^[53]研究表明,美国Lower Olentangy河上2m高的低坝拆除后,合流制溢流污水对水体溶解氧含量的影响依然显著,无显著改善;但凯霍加河拆除大坝后,溶解氧浓度提高了22%,但同时也导致了沉积物污染物的释放。王艳等^[33]研究发现,平山水库退役后,水位降低使裸露的河滩部分变成农田,氮肥随地表径流直接进入河流,使水体呈重污染状态。Bohrerova等^[54]研究表明,在城市化河流

中,原本沉积物中累积大肠杆菌在水坝拆除后释放。但也有学者认为,拆坝造成的干扰(即浓度和负荷)应与同一系统内洪水产生的干扰进行比较,不应与基流条件进行比较^[55]。

2 拆坝对河流生态多样性的影响

2.1 对栖息地的影响

拆坝后,河道水文情势、泥沙、地貌等条件均发生变化,库区上游的滨河湿地消失或迁移,原库区及下游湿地的形态和分布范围可能变化^[41]。栖息地的面积、分布和类型均因此发生变化。同时由于河道连通性恢复,栖息地连通性及整体性增强,创造了更好的栖息地条件^[56]。拆坝连接了优质栖息地,如以前缺乏泥沙的河段,泥沙的补充会对河岸和河流栖息地的整体多样性产生影响,泥沙可以用来形成沙洲、侧水道和其他重要的栖息地特征^[34]。Magilligan等^[34]研究发现,Amethyst Brook坝拆除后上游河道内出现了4种新的鱼类,下游在原坝下位置出现了新的鱼类产卵场所。Johnston等^[57]研究拆坝后河道内适宜产卵栖息地的分布情况,结果表明随着水坝拆除,可用淡水栖息地和产卵栖息地的增加,短吻鲟产卵的可能性增大。Hill等^[35]研究表明,Willsboro坝拆除后,上游出现更合适的产卵地,下游栖息地也得到改善,栖息地质量可以迅速发生积极变化。

2.2 对鱼类、底栖及岸边植物的影响

拆坝对河道生态多样性的影响分为长期和短期^[43,58]。研究表明,拆坝后的初期,由于河道流速增大,水位下降,挟沙能力增强,大量水生植物遭到破坏,浮游动物窒息死亡;同时鱼类也由于水体过饱和、浑浊导致伤亡^[5],但这些负面影响往往是短期的^[59]。如Carlson等^[37]研究发现,水坝拆除后,河道上下游的大型无脊椎动物、蜉蝣目、胸翅目和毛翅目总密度均下降,但大约15~20个月后即恢复到拆除前的值。长期来看,由于河道连通性提高,河流恢复自然流动状态,上游河段洄游物种在水陆联系中的作用增强,生存环境得到改善,鱼类的迁移和繁殖能力提高。鱼类物种的丰富是拆坝最为显著的生态效应之一^[60]。Birmie-Gauvin等^[36]通过对一座小型水电站拆除后30a的监测数据进行分析,发现在原库区的上游及下游区域,鳟鱼密度均大大增加,进一步验证了拆坝对恢复河流连通性和重建高质量栖息地的重要性。Donnelly等^[61]对加拿大芬利森坝(坝高5m)的整个拆除过程进行研究,结果表明当泥沙输运保持在容许限度内,该区域变为有益于鱼类的冷水环境,溪红点鲑重新出现,小口狼鲈重新洄游。

但拆坝造成的栖息地条件改变对不同的鱼类利弊有所不同,对于喜欢稳定水流和低水流变化频率的底栖鱼类和半水生鲤科动物,连通性的改善带来的好处可能被水流状况的改变带来的不利影响所抵消^[62]。而拆坝后,岸边植物在自然洪水状态下发生群落演替,植物群落的分布、范围和种类将发生变化,有利于恢复生物多样性^[51];而植物适应变化能力导致植物种类的变化,利弊难以一概而论^[41]。

3 拆坝后河流生态响应过程

研究表明,拆坝对河道生态系统的影响主要包括流量及流量过程的变化、输送泥沙质和量的变化、地形地貌变化、水质的变化、生物栖息地的变化、生物多样性的变化等,由非生态变量(水文、水质、泥沙等流域特征)逐步提高到生态变量(指浮游植物、浮游动物、鱼类等食物链中的生产者和消费者)^[63],各变量之间相互作用,互相影响。大坝拆除后,河道水文情势发生改变,导致河道深度、宽度、岸边地形、

沉积物颗粒组成等均发生变化,河道上游变深变窄,下游变宽变浅,如图1所示。拆坝后河道障碍物消失,河道连通性的增强消除了河道环流及间歇性流动,改善了水流状态,增强了河道的自净效率;但原库区泥沙中累积的污染物在输运过程中的释放对河流的透明度、溶解氧、总氮、总磷、大肠杆菌、重金属^[64]含量等均会造成不确定性影响,如图1所示。河道水文情势、地貌共同决定生态栖息地面积、分布及类型,但库区水流下泄、泥沙输运等活动对河流水质造成的影响会改变生境质量,甚至掩埋底栖生物,伤害敏感的生物群,直接影响生物的生存^[51],如图1所示。河流水文情势、地形地貌的变化改变了地下水补给条件,岸边带植被群落演替,滨河湿地退化或消失。而植被定植对泥沙输运等具有重要影响,从而影响河道地貌的演变及泥沙污染物的释放,改变河流自净效率,从而对河道水质造成影响。

拆坝后河道生态响应关系如图2所示,水文情势的改变为拆坝的一级响应,是所有生态因子响应

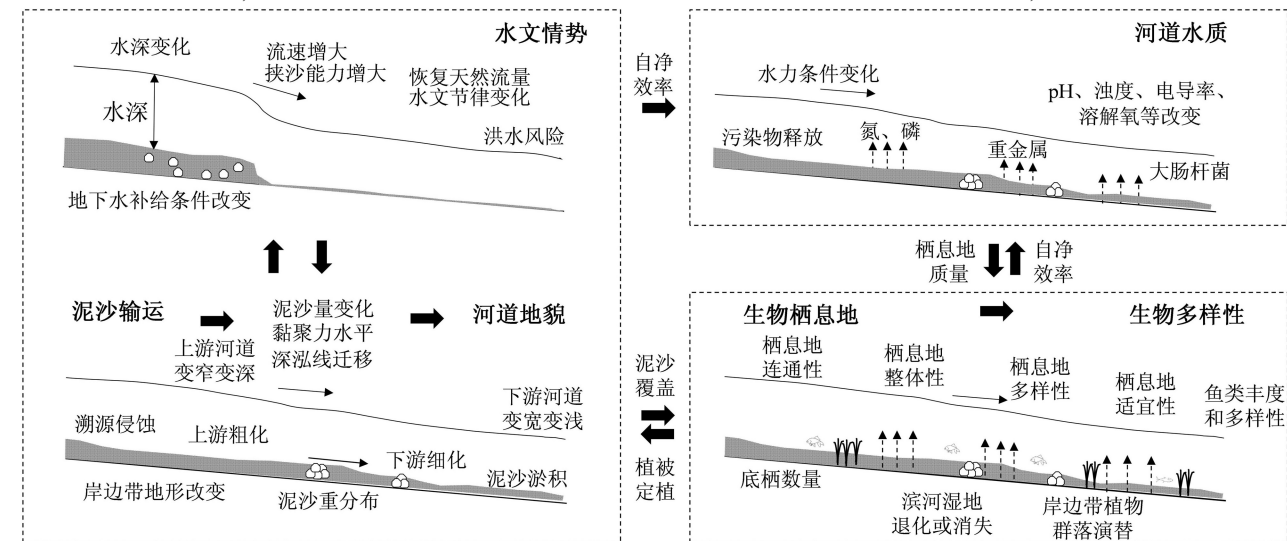


图1 拆坝后河道生态响应示意图

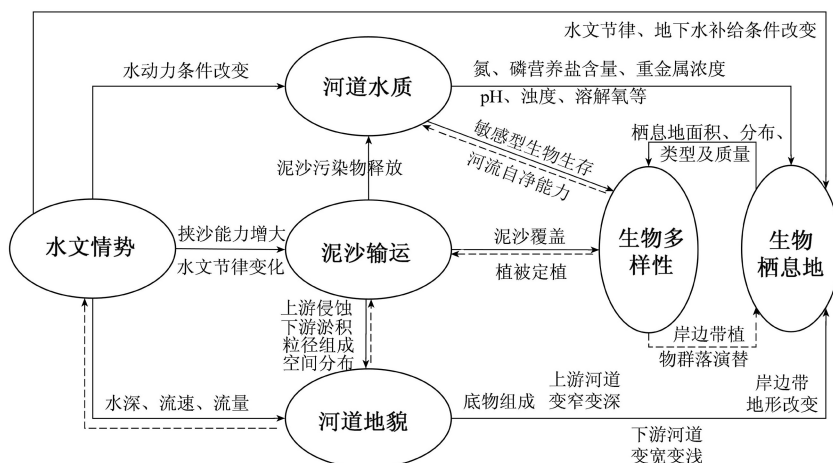


图2 拆坝生态响应关系

的触发条件;泥沙输运是拆坝的二级响应,也是生态响应关系中的关键影响因子;河道水质、河道地貌为三级生态响应,主要受水文情势、泥沙输运等影响,库区沉积的泥沙性质是新河道地貌形成以及污染物迁移转化特征的重要影响因素;栖息地质量以及生物多样性为四级生态响应,受前列所有生态因素的综合影响。同时,植被定植对河道地貌以及生物多样性对河道水质均具有反馈作用。不难看出,水文情势及泥沙输运是拆坝过程中最为重要的影响因子。由于沉积物特性对其他生态因子的重要影响,泥沙输运更是成为拆坝后河流生态响应的关键过程,故库区泥沙处置应是拆坝过程的重中之重^[65]。

4 拆坝对生态影响的主要研究方法

目前,拆坝对生态影响的研究方法主要分为现

场观测法、数值模拟法或综合分析法^[39,66-68]。本文整理了部分研究方法,见表1。关于拆坝对河道生态环境影响的研究早期主要采用现场观测法,对鱼类、水质等进行现场采样及监测,其对数据时间要求长,监测频率和监测密度要求高,受环境、成本、时间等各项因素限制。但现场观测也是最直接、最有效、最有说服力的研究方法。随着数值模拟技术的发展,现场观测和数值模拟相结合的方法在泥沙输运、地貌预测等研究领域逐步广泛应用,其速度快、费用低、有预测性。

但在复杂的河道水体中,拆坝的生态响应不可能被十分精确地预测。拆坝对河道水文条件及地貌的影响,很大程度取决于当地的地形地貌以及气候条件。再加上相邻陆域及水生态系统的相互影响、生物链系统的相互作用,拆坝对生态系统的影响更

表1 拆坝对河流生态影响研究方法及其相关案例

类型	文献	发表年份	研究方法
现场观测	Doyle 等 ^[29]	2003	在原坝址上下游共4~5 km的研究范围内设定测量断面,测量流量、SS,采集沉积物样本,提出河道演变的概念模型
	Rumschlag 等 ^[40]	2007	对大坝上游5 km、下游3 km进行现场监测,测量河道横断面、流量和流速,并于拆坝前后对沉积物表层进行采样分析
	Riggsbee 等 ^[55]	2007	在拆坝的所有阶段(放水、爆破和移除)于水库上游、库区和下游采样,监测总悬浮固体、溶解有机碳和总溶解氮负荷
	Burroughs 等 ^[44]	2009	在10 km的研究区域内布设31个监测断面,对拆坝中及拆坝后10 a的断面监测数据进行分析
	Sawaske 等 ^[48]	2012	对12座拆坝工程的泥沙、流量、沉积物、迁移年表、河道和流域数据进行统计分析,开发水库沉积物侵蚀的概念化模型
	Young 等 ^[67]	2014	对河口沉积物粒径、主要成分、重金属元素及SS浓度、水质物理参数等进行测量,并与拆坝前数据进行对比分析
	Magilligan 等 ^[34]	2015	测量原坝址上游300 m至下游750 m河道大断面、河床纵剖面、河床粒度组成等相关数据,对河道中鱼类的数量和种类进行调查
	Bohrerova 等 ^[54]	2017	水坝拆除前后在4个采样点采集水面下0~30 cm处水样进行水质检查,并培养微生物采用源追踪法追踪污染物来源
	Birmie-Gauvin 等 ^[36]	2017	对拆坝后30 a的监测数据进行统计分析
	Rothenberger 等 ^[64]	2017	对拆坝前5 a的监测数据进行分析,测定沉积物重金属联合毒性,并对大坝附近与大坝上游溶解氧、大型无脊椎动物多样性和敏感类群进行对照分析研究拆坝潜在的风险
数值模拟	Hill 等 ^[35]	2019	2014年、2016年、2017年在坝址上下游进行产卵生境指标调查,如水深、流域、基质粒径等
	王艳等 ^[33]	2019	于原库区河段进行采样,分析浮游藻类的种类、数量,并通过生物多样性指数评价水环境质量
	Poepl 等 ^[45]	2019	采用二维水流输沙数值模型(CAESAR-Lisflood)模拟多座大坝及其拆除对河道演变和输沙的影响
	Conlon 等 ^[27]	2013	通过现场调研和模型计算,评估形态动力泥沙输运模型(Dam Removal Express Assessment Model-1)的适用性
	Zhang 等 ^[53]	2014	通过STELLA设计日模型和周模型,分别对拆坝前后120 h内的水质,以及拆坝后2 a内长期的DO变化进行预测
	Gartner 等 ^[28]	2015	在大坝上游12 km、下游10 km的研究区域设置30个测量断面,并在拆坝前后进行断面测量,并通过HCE-RAS模型(1-D)进行模拟
	Hsiao-Wen 等 ^[68]	2016	于拆坝前后在原坝址上游4.8 km至下游5.2 km进行现场监测,断面设置间隔约200 m,并通过一维、二维水动力模型及沉积物模型(NETSTARS)对河道的沉积物输移、活性层厚度及流管数量进行计算
	马君秀 ^[30]	2017	通过实测地形数据和泥沙基本资料,推算西河无资料流域降雨径流过程和含沙量,并利用Delft3D建立二维水沙模型
	Johnston 等 ^[57]	2019	通过River2D进行拆坝后库区上游5 km的河段二维水动力模拟,利用短鼻鲟产卵生境的生境适宜性指数曲线估计栖息地适宜性
	Ishiyama 等 ^[62]	2018	拆坝后进行鱼类采样,并利用水文模型进行生境适宜性建模,与网络分析相结合得到流域尺度生境可用性
Wang 等 ^[49]	2020	采用基于马尔科夫方法的短间隔合成流模型生成多个随机等价的逐时合成流系列,作为模型边界条件,采用二维有限体积分SRH-2D模型模拟大坝拆除后的地貌响应	

加复杂^[43]。有学者对常用的 HEC-RAS、SERATRA、EFDC 一维、二维及三维泥沙模型进行了整理,分析了各个模型的适用条件、优势及使用案例^[69]。目前为止,数值和物理模型可以指导移除和监测策略,预测大尺度趋势,但还不能预测驱动许多生态过程的精细尺度变化,物种和生态系统对大坝拆除反应的定量模型甚至更落后^[70]。因此为提高模拟准确性及研究效率,后续应对如何提高模型精度、敏感度进行深入研究,并提出更准确耦合各非生物变量及生物变量之间相互关系的方法,可以更加有效地定量化预测拆坝带来的生态影响。

5 研究展望

随着部分大坝经济效益、社会效益、环境效益的大幅下降,拆坝成为众多国家面临的问题。但河道生态环境对拆坝的时空响应复杂多变,拆坝打破了原有生态系统的稳定,导致水文情势发生变化,河道产生溯源侵蚀及岸边侵蚀,库区河道地貌发生演变。侵蚀产生的泥沙与原库区淤积的沉积物一同向下游河道发生输移,从而改变下游河道地貌及生态环境。短期内,由于河道流速过大及所挟带的大量泥沙,河道的生态多样性受损。长期来看,河道地貌达到稳定,岸边带植被群落发生演替,生境条件的改变使鱼类生物多样性增加,河道重新恢复生态平衡。此过程中,河道水质的变化情况与拆坝前库区沉积物性质、拆坝方式等均有关,原库区泥沙富集的污染物在泥沙输运过程中的释放会引起水质问题。水文情势的改变是所有生态响应的触发条件,泥沙输运是拆坝对生态环境影响的关键因子。目前全球范围内关于拆坝生态影响的研究主要关注点为水文情势、泥沙输运、生物多样性(鱼类)、生态栖息地等^[13],大部分采用现场观测和数值模拟或两者相结合的方式,且已取得了一定的研究成果。但研究物理和生态特性之间关系的相对较少,数值模拟也难以预测驱动生态过程的精细变化,物种和生态系统联合反应的定量模型也更为落后。而拆坝后,作为拆坝社会效益及经济效益最为直接的反馈,河流水质持续扰动时间、扰动程度等方面的相关研究更加匮乏。

为预测拆坝的生态影响,应将水动力、水文、泥沙、水质及生物多样性等各项生态因子进行综合模拟及预测,进行长期、多学科的研究^[71],深入分析拆坝后泥沙输运及污染物的释放规律,河道水质时空变化过程,并关注更长期和更大空间尺度的生态系统结构和功能的反应^[38],为大坝退役决策提供可靠的评估依据,缩短拆坝带来的环境影响周期,规避潜在的污染风险。

参考文献:

- [1] COUTO T B A, OLDEN J D. Global proliferation of small hydropower plants-science and policy [J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2018, 16(2): 91-100.
- [2] International Commission on Large Dams. General Synthesis Number of Dams by Country Members [EB/OL]. [2021-04-25]. https://www.icold-cigb.org/article/GB/world_register/general_synthesis/number-of-dams-by-country-members.
- [3] GRILL G, LEHNER B, THIEME M, et al. Mapping the world's free-flowing rivers [J]. *Nature*, 2019, 569(7755): 215-221.
- [4] HABEL M, MECHKIN K, PODGORSKA K, et al. Dam and reservoir removal projects: a mix of social-ecological trends and cost-cutting attitudes [J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 19210.
- [5] 俞云利, 史占红. 拆坝措施在河流修复中的运用[J]. *人民长江*, 2005, 36(8): 17-19. (YU Yunli, SHI Zhanhong. Application of dam removal in river restoration [J]. *Yangtze River*, 2005, 36(8): 17-19. (in Chinese))
- [6] 包广静. 大坝建设生态环境影响国外研究回顾[J]. *生态经济*, 2008(3): 145-148. (BAO Guangjing. Review of the ecological impacts of the dam's construction in foreign countries [J]. *Ecological Economy*, 2008(3): 145-148. (in Chinese))
- [7] 贾建辉, 陈建耀, 龙晓君. 水电开发对河流生态环境影响及对策的研究进展[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2019, 40(2): 62-69. (JIA Jianhui, CHEN Jianyao, LONG Xiaojun. Research progress of impact and countermeasures of hydropower development on river ecological environment [J]. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power(Natural Science Edition)*, 2019, 40(2): 62-69. (in Chinese))
- [8] 熊永兰, 张志强, 唐霞. 美国大坝拆除对我国大坝建设与管理的启示[J]. *生态经济*, 2016, 32(3): 20-24. (XIONG Yonglan, ZHANG Zhiqiang, TANG Xia. Dam removal in the United States and its enlightenments on the construction and management of dams in China [J]. *Ecological Economy*, 2016, 32(3): 20-24. (in Chinese))
- [9] 王若男, 吴文强, 彭文启, 等. 美国百年拆坝历史回顾[J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2015, 13(3): 222-226. (WANG Ruonan, WU Wenqiang, PENG Wenqi, et al. Review of the dam removal in the last one hundred years in the United States [J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2015, 13(3): 222-226. (in Chinese))
- [10] 陆波, 顾洪宾, 姜昊. 浅谈小水电工程退出拆坝的环境评估[J]. *水力发电*, 2019, 45(12): 12-16. (LU Bo, GU Hongbin, JIANG Hao. Brief analysis on environmental assessment for dam removal of small hydropower project [J]. *Water Power*, 2019, 45(12): 12-16. (in Chinese))

- [11] 胡苏萍,徐灿灿,李弘. 美国退役坝拆除背景与原因剖析[J]. 水利水电科技进展, 2017, 37(1): 43-49. (HU Suping, XU Cancan, LI Hong. Anatomy of dam removal in the United States of America[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37(1): 43-49. (in Chinese))
- [12] LOVETT R A. Rivers on the run [J]. Nature, 2014, 511: 521-523.
- [13] DING L, CHEN L, DING C, et al. Global trends in dam removal and related research: a systematic review based on associated datasets and bibliometric analysis [J]. Chinese Geographical Science, 2018, 29(1): 1-12.
- [14] Rivers, American (2019): American Rivers Dam Removal Database. figshare. Dataset. [DB/OL]. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.5234068>.
- [15] SNEDDON C S, BARRAUD R, GERMAINE M A, et al. Dam removals and river restoration in international perspective[J]. Water Alternatives, 2017, 10(3): 648-654.
- [16] 荆茂涛,杨正华,蒋金平. 全国水库降等与报废情况调查分析[J]. 中国水利, 2018(20): 12-14. (JING Maotao, YANG Zhenghua, JIANG Jinping. Studies on reservoir demotion and retirement in China [J]. China Water Resources, 2018(20): 12-14. (in Chinese))
- [17] 中华人民共和国审计署办公厅. 长江经济带生态环境保护审计结果 2018 年第 3 号[R/OL]. (2018-06-19) [2021-03-16]. <http://www.audit.gov.cn/n5/n25/c123511/content.html>.
- [18] 王亦楠. 小水电整治不能“一刀切拆除”[J]. 中国经济周刊, 2021(14): 100-103. (WANG Yinan. Small hydro-power plants should not be demolished in “one-size-fits-all” fashion [J]. China Economic Weekly, 2021(14): 100-103. (in Chinese))
- [19] 彭辉,刘德富,田斌. 国际大坝拆除现状分析[J]. 中国农村水利水电, 2009(5): 130-135. (PENG Hui, LIU Defu, TIAN Bin. The status quo analysis of dam removal in the world [J]. China Rural Water and Hydropower, 2009(5): 130-135. (in Chinese))
- [20] NODA K, HAMADA J, KIMURA M, et al. Debates over dam removal in Japan [J]. Water and Environment Journal, 2018, 32(3): 446-452.
- [21] 王正旭. 美国水电站退役与大坝拆除[J]. 水利水电科技进展, 2002, 22(6): 61-63. (WANG Zhengxu. Retirement of hydropower stations and dam demolition in the United States [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2002, 22(6): 61-63. (in Chinese))
- [22] 刘咏梅. 浅谈我国退役水库拆除对生态环境影响研究[J]. 中国水运(下半月刊), 2011, 11(1): 152-153. (LIU Yongmei. Elementary introduction to effects on ecological environment due to decommissioned dam removal in China [J]. China Water Transport, 2011, 11(1): 152-153. (in Chinese))
- [23] 向衍,盛金保,袁辉,等. 中国水库大坝降等报废现状与退役评估研究[J]. 中国科学:技术科学, 2015, 45(12): 1304-1310. (XIANG Yan, SHENG Jinbao, YUAN Hui, et al. Research on degrading and decommissioning assessment of reservoir in China [J]. Scientia Sinica (Technologica), 2015, 45(12): 1304-1310. (in Chinese))
- [24] SCHIERMEIER Q. Europe is demolishing its dams to restore ecosystems [J]. Nature, 2018, 557(7705): 290-291.
- [25] BELLMORE J R, PESS G R, DUDA J J, et al. Conceptualizing ecological responses to dam removal: if you remove it, what's to come? [J]. Bioscience, 69(1): 26-39.
- [26] DUDA J J, WARRICK J A, MAGILL C S, et al. Coastal habitats of the Elwha River, Washington—Biological and physical patterns and processes prior to dam removal[R/OL]. U. S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2011-5120, 2011.
- [27] CONLON M. A hindcast comparing the response of the Souhegan river to dam removal with the simulations of the dam removal express assessment model-1 [D]. Boston: Boston College, 2013.
- [28] GARTNER J D, MAGILLIGAN F J, RENSHAW C E. Predicting the type, location and magnitude of geomorphic responses to dam removal: role of hydrologic and geomorphic constraints [J]. Geomorphology, 2015, 251: 20-30.
- [29] DOYLE M W, STANLEY E H, HARBOR J M. Channel adjustments following two dam removals in Wisconsin [J]. Water Resources Research, 2003, 39(1): 1011.
- [30] 马君秀. 小型水坝拆除后沉积物侵蚀沉积规律及局部河貌变化 [D]. 重庆:重庆交通大学, 2017.
- [31] STANLEY E H, DOYLE M W. A geomorphic perspective on nutrient retention following dam removal [J]. BioScience, 2002, 52(8): 693-701.
- [32] VELINSKY D J, BUSHAW-NEWTON K L, KREEGER D A, et al. Effects of small dam removal on stream chemistry in southeastern Pennsylvania [J]. Journal of the North American Benthological Society, 2006, 25(3): 569-582.
- [33] 王艳,董锡瑞,刘欣,等. 辽宁抚顺平山水库退役后河流浮游藻类季节动态及水质评价 [J]. 安徽农业科学, 2019, 47(13): 58-60. (WANG Yan, DONG Xirui, LIU Xin, et al. Seasonal dynamics of phytoplankton and water quality evaluation of the river after pingshan reservoir decommissioning in Fushun, Liaoning Province [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2019, 47(13): 58-60. (in Chinese))
- [34] MAGILLIGAN F J, NISLOW K H, KYNARD B E, et al. Immediate changes in stream channel geomorphology,

- aquatic habitat, and fish assemblages following dam removal in a small upland catchment [J]. *Geomorphology*, 2015, 252:158-170.
- [35] HILL N L, TRUEMAN J R, PRÉVOST A D, et al. Effect of dam removal on habitat use by spawning Atlantic salmon [J]. *Journal of Great Lakes Research*, 2019, 45 (2): 394-399.
- [36] BIRNIE-GAUVIN K, LARSEN M H, NIELSEN J, et al. 30 years of data reveal dramatic increase in abundance of brown trout following the removal of a small hydrodam [J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, 204: 467-471.
- [37] CARLSON P E, DONADI S, SANDIN L, et al. Responses of macroinvertebrate communities to small dam removals; implications for bioassessment and restoration [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2018, 55(4): 1896-1907.
- [38] 向衍, 盛金保, 杨孟, 等. 水库大坝退役拆除及对生态环境影响研究[J]. *岩土工程学报*, 2008, 30(11): 1758-1764. (XIANG Yan, SHENG Jinbao, YANG Meng, et al. Impacts on ecological environment due to dam removal or decommissioning[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, 30(11): 1758-1764. (in Chinese))
- [39] 林育青, 马君秀, 陈求稳. 拆坝对河流生态系统的影响及评估方法综述[J]. *水利水电科技进展*, 2017, 37(5):9-15. (LIN Yuqing, MA Junxiu, CHEN Qiwen. Research on effects of dam removal on river ecosystem and review of its assessment methods [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2017, 37(5):9-15. (in Chinese))
- [40] RUMSCHLAG J H, PECK J A. Short-term sediment and morphologic response of the middle cuyahoga river to the removal of the Munroe Falls Dam, Summit County, Ohio [J]. *Journal of Great Lakes Research*, 2007, 33 (Sup2):142-153.
- [41] 程卫帅, 刘丹. 水库报废的影响分析:宏观过程与效应 [J]. *岩土工程学报*, 2008, 30(11): 1765-1770. (CHENG Weishuai, LIU Dan. Impact analysis of reservoir retirement; macro-processes and final effects [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, 30(11):1765-1770. (in Chinese))
- [42] WARRICK J A, DUDA J J, MAGIRL C S, et al. River turbidity and sediment loads during dam removal [J]. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 2012, 93(43):425-426.
- [43] BEDNAREK A T. Undamming Rivers; a review of the ecological impacts of dam removal [J]. *Environmental Management*, 2001, 27(6):803-814.
- [44] BURROUGHS B A, HAYES D B, KLOMP K D, et al. Effects of Stronach Dam removal on fluvial geomorphology in the Pine River, Michigan, United States [J]. *Geomorphology*, 2009, 110(3/4): 96-107.
- [45] POEPL R E, COULTHARD T, KEESSTRA S D, et al. Modeling the impact of dam removal on channel evolution and sediment delivery in a multiple dam setting [J]. *International Journal of Sediment Research*, 2019, 34 (6): 537-549.
- [46] CUI Y, PARKER G, LISLE T E, et al. Sediment pulses in mountain rivers: 1. experiments[J]. *Water Resources Research*, 2003, 39(9):1239.
- [47] CUI Y, PARKER G, LISLE T E, et al. Sediment pulses in mountain rivers: 2. comparison between experiments and numerical predictions [J]. *Water Resources Research*, 2003, 39(9):1240.
- [48] SAWASKE S R, FREYBERG D L. A comparison of past small dam removals in highly sediment-impacted systems in the U. S. [J]. *Geomorphology*, 2012,151:50-58.
- [49] WANG Y H, CHU C C, YOU G J Y, et al. Evaluating uncertainty in fluvial geomorphic response to dam removal [J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2020, 25(6): 04020022.
- [50] 唐磊, 何术锋, 莫康乐, 等. 小型水坝拆除后河貌演变模拟分析:以西河水坝为例 [J]. *水科学进展*, 2019, 30(5):699-708. (TANG Lei, HE Shufeng, MO Kangle, et al. Simulation analysis of river channel evolution after small dam removal: a case study of Xihe Dam [J]. *Advances in Water Science*, 2019, 30(5):699-708. (in Chinese))
- [51] TONITTO C, RIHA S J. Planning and implementing small dam removals; lessons learned from dam removals across the eastern United States [J]. *Sustainable Water Resources Management*, 2016, 2(4): 489-507.
- [52] DOYLE M W, STANLEY E H, HARBOR J M. Geomorphic analogies for assessing probable channel response to dam removal [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2002, 38(6): 1567-1579.
- [53] ZHANG Y, ZHANG L, MITSCH W J, et al. Predicting river aquatic productivity and dissolved oxygen before and after dam removal [J]. *Ecological Engineering*, 2014, 72:125-137.
- [54] BOHREROVA Z, PARK E, HALLORAN K, et al. Water quality changes shortly after low-head dam removal examined with cultural and microbial source tracking methods [J]. *River Research and Applications*, 2017, 33(1): 113-122.
- [55] RIGGSBEE J A, JULIAN J P, DOYLE M W, et al. Suspended sediment, dissolved organic carbon, and dissolved nitrogen export during the dam removal process [J]. *Water Resources Research*, 2007, 43:W09414.
- [56] HOENKE K M, KUMAR M, BATT L, et al. A GIS based approach for prioritizing dams for potential removal [J]. *Ecological Engineering*, 2014, 64:27-36.
- [57] JOHNSTON C, ZYDLEWSKI G B, SMITH S, et al.

- River reach restored by dam removal offers suitable spawning habitat for Endangered Shortnose Sturgeon[J]. Transactions of the American Fisheries Society, 2019, 148(1): 163-175.
- [58] GREGORY S, LI H, LI J. The conceptual basis for ecological responses to dam removal [J]. Bioscience, 2002, 52(8):713-723.
- [59] MICHAL H, KARL M, KRESCENCJA P, et al. Dam and reservoir removal projects; a mix of social-ecological trends and cost-cutting attitudes[J]. Scientific Reports, 2020, 10:19210.
- [60] STANLEY E H, DOYLE M W. Trading off; the ecological effects of dam removal[J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2003, 1(1):15-22.
- [61] DONNELLY C R, 黎刚. 加拿大芬利森坝的拆除[J]. 水利水电快报,2006(4):12-15. (DONNELLY C R, LI Gang. Demolition of Finlison Dam in Canada [J]. Express Water Resources Hydropower Information, 2006 (4):12-15. (in Chinese))
- [62] ISHIYAMA N, RYO M, KATAOKA T, et al. Predicting the ecological impacts of large-dam removals on a river network based on habitat-network structure and flow regimes [J]. Conservation Biology, 2018, 32(6): 1403-1413.
- [63] 高玉琴, 刘云苹, 王怀志, 等. 退役坝拆除现状及其影响研究进展综述[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(6): 136-142. (GAO Yuqin, LIU Yunping, WANG Huaizhi, et al. Status of decommissioned dam removal and review of research progress on its effects[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2018, 29(6):136-142. (in Chinese))
- [64] ROTHENBERGER M B, HOYT V, GERMANOSKI D, et al. A risk assessment study of water quality, biota, and legacy sediment prior to small dam removal in a tributary to the Delaware River [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2017, 189: 344.
- [65] 吴文强,王若男,彭文启,等. 浅谈美国拆坝工程中的泥沙处置 [J]. 泥沙研究, 2016 (2): 76-80. (WU Wenqiang, WANG Ruonan, PENG Wenqi, et al. Sediment management of dams removal in the United States[J]. Journal of Sediment Research,2016(2):76-80. (in Chinese))
- [66] WINTER B D, CRAIN P. Making the case for ecosystem restoration by dam removal in the Elwha River, Washington [J]. Northwest Science, 2008, 82(Sup1): 13-28.
- [67] YOUNG S M, ISHIGA H. Environmental change of the fluvial-estuary system in relation to Arase Dam removal of the Yatsushiro tidal flat, SW Kyushu, Japan [J]. Environmental Earth Sciences, 2014, 72(7):2301-2314.
- [68] HSIAO-WEN W, DESIREE T, WEI-CHENG K. Simulating bed evolution following the Barlin Dam (Taiwan, China) failure with implications for sediment dynamics modeling of dam removal [J]. International Journal of Sediment Research, 2016,31(4): 299-310.
- [69] PAOANICOLAOU A N, ELHAKEEM M, KRALLIS G, et al. 泥沙输运模拟综述—现状及其发展趋势[J]. 力学进展,2010,40(3):323-339. (PAOANICOLAOU A N, ELHAKEEM M, KRALLIS G, et al. Sediment transport modeling review-current and future developments [J]. Advances in Mechanics, 2010,40(3):323-339. (in Chinese))
- [70] O'CONNOR J E, DUDA J J, GRANT G E, et al. 1000 dams down and counting [J]. Nature, 2015, 348(6234):496-497.
- [71] BELLMORE J R, 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:e1164.

(收稿日期:2021-05-14 编辑:刘晓艳)

(上接第 86 页)

- [14] 杨坡,袁明,王昊. 基坑开挖对既有地铁隧道变形的影响研究 [J]. 交通科学与工程, 2022, 38(1): 88-96. (YANG Po, YUAN Ming, WANG Hao. Study on effects of foundation pit excavation on the deformation of existing metro tunnel[J]. Traffic Science and Engineering, 2022, 38(1):88-96. (in Chinese))
- [15] 董必昌,张鹏飞,张明轩,等. 基于流固耦合效应的深基坑降水开挖变形规律研究[J]. 公路,2021,66(4):349-356. (DONG Bichang, ZHANG Pengfei, ZHANG Mingxuan, et al. Study on deformation of deep foundation pit dewatering excavation based on fluid-solid coupling effect [J]. Highway, 2021, 66(4): 349-356. (in Chinese))
- [16] 陈育民,徐鼎平. FLAC/FLAC3D 基础与工程实例. 第 2 版[M]. 北京:中国水利水电出版社,2013.
- [17] 龚晓南. 地基处理手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2008.
- [18] 唐明裴,王如寒,宁平华. 基于双液高压旋喷注浆处理后桩基持力层安全厚度分析[J]. 北京交通大学学报, 2020,44(1):129-134. (TANG Mingpei, WANG Ruhan, NING Pinghua. Safety thickness analysis of pile foundation bearing stratum after high-pressure jet grouting of cement-water glass [J]. Journal of Beijing Jiaotong University,2020,44(1):129-134. (in Chinese))

(收稿日期:2021-07-11 编辑:刘晓艳)