

拆坝对河流生态系统的影响及评估方法综述

林育青¹, 马君秀², 陈求稳¹

(1. 南京水利科学研究院生态环境研究中心, 江苏 南京 210029; 2. 重庆交通大学河海学院, 重庆 400074)

摘要:为研究拆坝对河流生态系统造成的影响,从短期和长期两个时间尺度综合分析了河流水文情势、地形地貌、岸边带植物、鱼类和底栖动物等关键生态因子对拆坝的响应,并总结了目前拆坝对生态系统影响的两种主要评估方法。认为根据实际拆坝情况进行评估和基于数值模型进行预测两种评估方法中,实地观测是最直接、最有说服力的研究方法,但受成本和一些不可控因素限制;数值模拟具有速度快、费用低、无比尺影响等优点,可对拆坝影响进行预测,为管理者提供参考,但精度和准确性有待提高。指出后续研究中应综合考虑拆坝过程中各生态因子间的耦合效应,需对不同拆坝时机和分阶段拆坝方式对河流生态系统的影响进行深入研究。

关键词:拆坝;河貌演变;岸边带植物;鱼类栖息地;底栖动物;评估方法

中图分类号:TV64;X820.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2017)05-0009-07

Research on effects of dam removal on river ecosystem and review of its assessment methods//LIN Yuqing¹, MA Junxiu², CHEN Qiwen¹ (1. Center for Eco-Environment Research, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. School of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: To study the impacts of dam removal on river ecosystems, the response of key ecological components, such as river hydrological conditions, topography, riparian plants, fish, and zoobenthos, to dam removal are analyzed from both the short-term and long-term perspectives. Two currently used major assessment methods are summarized, including assessment of actual removal conditions and numerical modeling forecasting. Field surveying is considered the most direct and convincing research tool, but it is limited by cost and other uncontrollable factors. Numerical simulation has remarkable advantages, such as high speed, low cost, and freedom from scale effects, and can forecast the influence of dam removal and provide decision references for managers. However, the precision and accuracy of simulation need to be improved. It is pointed out that further studies should comprehensively consider the coupling effects among various ecological factors in the process of dam demolition, and the impacts of different demolition times and dam removal phases on river ecosystems require deeper examination in the future.

Key words: dam demolition; river evolution; riparian vegetation; fish habitat; benthic animal; assessment method

我国已建大坝约 9.8 万座,但均以小型水坝为主^[1],这些水坝大多数是特殊年代、特殊条件下的产物,普遍存在设计标准偏低、施工质量差、后期工程管理与运行维护经验不足等问题,随设计年限临近,安全隐患日益突出^[2]。据不完全统计,截至 2013 年底,我国存在病险水库大坝总数达 4 万余座,目前虽然部分大坝已采取除险加固措施,但仍有相当数量的小型病险水库大坝,这些小型病险水库不仅不能正常发挥效益,而且面临较高的安全风险,逢汛期水库出险、溃坝事故频繁发生。从经济性方面考虑,很多大坝工程老化失修严重,除险加固压力不断增大^[3],其加固和维修费用远超大坝产生的经

济效益,据湖北省水利厅堤防处统计,每座小型病险水库除险加固费用约需 200 万元;而大坝拆除费用一般少于除险加固费用,据统计,拆除费用是安全修复费用的 1/5 ~ 1/2^[4-5]。此外,许多大坝下游风险区人口、经济都比建库时大幅增长,一旦溃坝造成的社会经济损失不可估量。从环境方面考虑,筑坝蓄水导致河流水动力条件发生变化,流速减慢使大量泥沙、营养物质在库区滞留,阻碍营养物质向下游输送,改变了下游河流生态系统的物种构成^[6];而小型水库一般未建设鱼道、升鱼船、集鱼机等装置,大部分洄游鱼类无法越过水坝到上游产卵场产卵,对鱼类的生长繁殖造成极大危害^[7]。

因此,从可持续发展的观点出发,针对某些安全问题突出、经济效益差、生态环境影响恶劣的小型水坝,实施报废拆除是消除其安全隐患、发挥相应效益的一种必要管理措施。目前美国针对拆坝开展了很多相关研究,如 Doyle 等^[8]研究了拆坝后上下游河道演变;Shafroth 等^[9-10]研究了拆坝对岸边带植物的影响;Stanley 等^[11]对拆坝后底栖动物群落变化进行了研究。我国在这方面研究较少,只有少数学者如王若男等^[4,12]对美国拆坝现象做过统计分析,向衍等^[13-14]定性描述了某些生态变量的变化,缺乏系统的拆坝研究。为制定有效的大坝拆除方案,保证拆坝的实施效果,恢复河流生态健康,亟需研究拆坝对河流生态系统产生的影响,并对其进行评估预测。本文综合分析了拆坝对河流水文情势、地形地貌、岸边带植物、鱼类和底栖动物等关键生态因子的影响,总结了几种主流评估方法及其适用情况,为我国拆坝研究及工程应用提供理论参考。

1 拆坝对生态系统的影响

大坝建设改变了河流原有的生态环境,大坝拆除将打破新建立的生态平衡,改变上下游河流生态系统环境,主要体现在河流非生态变量及生态变量变化两个方面(非生态变量指流域水文、水量、水情、泥沙、水质、地貌、河道形态、下层地层构造、区域气候等流域特征,生态变量指食物链中的生产者及消费者)。河流非生态变量与生态变量的变化相互联系、相互作用,这种变化依据影响深度可分为3个等级,拆坝对河流生态系统的作用首先从对非生态变量的影响开始,即第1级影响,第1级影响所产生的变化又与第2级影响(即对流域地形地貌和初级生产者的影响)有关,进而产生第3级影响(对食物链中消费者的影响)。这种相互作用过程的复杂性从第1级到第3级逐步提高。

拆坝后短期内河流生态系统受到强烈扰动,拆坝将对生态系统产生一些不利影响,但长期看拆坝将使河流重回天然状态,对河流生态系统变化是有利的,主要表现在河道基本的水文情势和水力条件变化、库区泥沙下泄造成的上下游河道变化、水流与洪泛区的再次连接引起的岸边植物群落多样性变化、床质改变引起的生物栖息地变化和河流连通性恢复造成的鱼类种群变化等方面。

1.1 对水文情势和水力条件的影响

水流是河流基本特性的控制因子,筑坝改变了河流基本水文情势,包括河道径流、水位、水温以及地下水变化。筑坝首先改变河道径流的年内分配和年际分配,其对径流调节的总体特征表现为汛期洪

峰削减,枯、中水期流量增大,平水期延长,流量过程的起伏变小,一些小的洪水过程甚至消失。建坝后,水库下游河段由于库区的调洪作用自然水位变化趋于稳定,不再随流域降水量而变化^[15]。同时筑坝蓄水减弱了水体紊动掺混作用,库区水温分层现象发生,夏季库区水深越深,温度越低,库区表层的水温则由于太阳辐射相对较高,下游河道因下泄水体位于水库底部,温度相对较低。河流水文条件的改变也会影响到地下水的水位、水质等,建坝后上游水库蓄水使其周围地下水水位抬高,同时,筑坝也减少了坝下游地区地下水的补给来源,致使下游地下水水位下降。

水库大坝拆除后,短期内水库回水效应和顶托作用消失,上游河道的水力坡度增大,泄流能力增加,流速加快,水位降低,同时下游流量增大,水位升高。水流趋于稳定后,因障碍物的去除,河道径流恢复到天然状态,汛期流量增大,平、枯水期流量相应减小,下游洪水调控能力消失,水位变化幅度增大,河漫滩重新经历天然洪水过程。水温分层现象因水流混掺作用增强而消失,河道水温趋于一致。而地表水文过程的变化也会对地下水产生一定的影响,上游库区地下水水位降低,而下游地下水水位显著升高^[16]。

1.2 对河床地貌的影响

泥沙输运直接影响河床地貌,筑坝阻隔了泥沙输运,导致大量泥沙在库区淤积,下游河段输沙量显著减少。拆坝后,库底泥沙运动的障碍去除,库区静水条件向动水条件的转化为库底泥沙冲刷提供了动力,水流挟沙能力增强,泥沙释放引起上下游河道迅速调整,短期内,上游河道调整遵循 Doyle 提出的概念性渠道演变模型(CEM)(图1)^[8]。CEM 将拆坝过程中上游河道演变定性描述为6个阶段:①坝未拆除时,大量泥沙储存在水库中不受扰动(图1(a));②坝刚拆除时,水面迅速下降但水库沉积物仍未受干扰,此阶段河道宽且浅,流速较小(图1(b));③第3阶段(图(c))河床冲刷剥蚀占主导地位,渠道河床下切侵蚀,水流集中,河道变窄加深,流速较大,上游发生溯源侵蚀,大量表层细粒泥沙从水库中释放,河床降低;④当河床冲刷下切到一定深度,超过临界岸滩崩塌高度时,岸滩崩塌引起河道加宽,标志第4阶段开始(图1(d)),粗细颗粒泥沙同时被输送到下游;⑤第5阶段(图1(e))由于侧向和垂向河道调整,局部比降减小,上游河道侵蚀的泥沙在下游沉积,河床抬高,岸滩高度减小,库区潜水位降低,河岸侵蚀减小;⑥第6阶段(图1(f))河道达到准平衡状态^[8]。下游河道由于输沙量增加,河床高程抬高,细颗粒泥沙沉积在下游较远处,形成极易

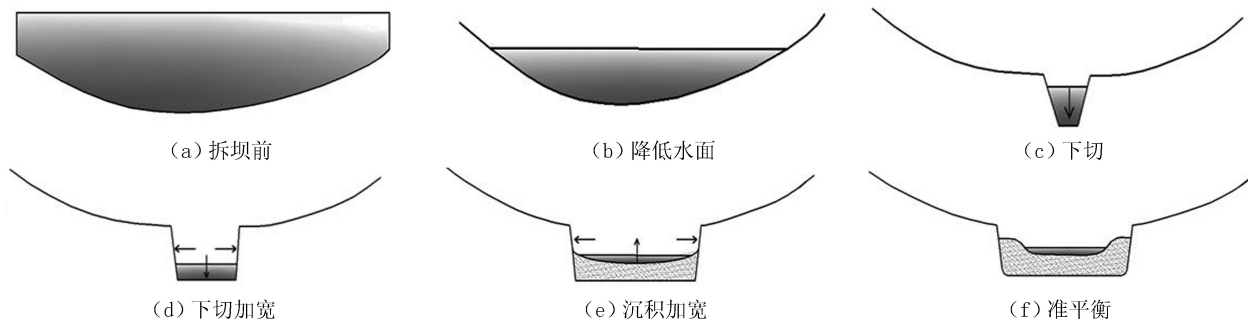


图1 概念性渠道演变模型^[8]

被侵蚀的洪泛区,沙坝规模和数量增加^[17]。总的来说,拆坝后上游河道下降,河床粗化,下游河道抬高,河床细化^[18]。长期而言,拆坝再次恢复河流泥沙输运功能,将促进河道形态的多样性。

拆坝后很多河道调整需要1~5a达到新的平衡状态,同时大坝上游河道演变受库区泥沙特性(比如粒径尺寸、黏结性、固结水平、垂直分层等因素)和拆坝方式的影响,上游侵蚀过程的变化强烈控制下游河道调整的速率和量级^[19]。拆坝后砂卵石沉积层侵蚀量大于细粒泥沙沉积层侵蚀量,黏性沙比无黏性沙侵蚀速度更慢,泥沙垂直分层对溯源侵蚀过程有重要影响,分层或黏性沙侵蚀过程中形成阶梯状裂点,分阶段拆坝会减少库区泥沙侵蚀量,减小沉积物输出速率,降低上游溯源侵蚀程度^[20]。同时拆坝后一些极端洪水事件也会推进河道演变过程,重新调整泥沙和地貌状态,促进泥沙输运到下游^[21]。

1.3 对岸边带植物的影响

岸边带植被的主要功能包括维护河岸稳定性,促进营养元素循环,净化水质,减弱洪水,调节流量,调节水温、气温、土壤温度,为动植物提供避难所等。筑坝后水位变化导致河岸生物量和植物多样性发生显著变化,水坝上游形成浅水库湾,河岸带出现较多的湿生物种,而下游因大坝阻碍了繁殖体的有效扩散、沉淀、定植与生长,仅有少部分繁殖体通过水流传播到下游,导致下游植物主要来源于本地种子库而不是区域种子库;同时大坝对沉积物的阻隔和沉淀作用使得下游河道变窄,最终引起沿河分布的植物生物量增加,群落结构发生变化,物种多样性减少^[22]。

拆坝对植物的影响分不同时间尺度考虑,短期内,拆坝后上游因库区水位下降,大量水生植物如睡莲、茭苳、水葫芦等向河段下游漂流,上游河道浮游性植物大大减少;同时,泥沙冲刷对大型植物根茎产生破坏,一些小型植物可能被淤沙覆盖而死亡。长期来看,大坝拆除后河流恢复自然流动状态,下游河流岸栖和水生栖息地重新连接,对洪泛区依赖周期

性洪水生长和繁殖的植物群落产生有利影响,湿生植物逐渐取代水生植物种群,同时泥沙输运到下游为植物生长提供充足的养分,给生物群落提供良好的生存环境,增加河流沿岸的植被多样性^[23]。上游排干库区底部因具有裸露、潮湿、营养丰富、种子库贫乏等特性,杂草类植物快速集群,同时这些杂草类植物因繁殖能力强、种子产量高、传播效率高而会对植物群落结构产生长期重要影响^[9]。

拆坝时间对植物生长繁殖也具有一定的影响,拆坝初期(泥沙大量下泄时期)发芽生长的生物体会受到严重破坏,而泥沙初步稳定阶段生长繁殖的生物体存活率最大,后期建群的生物体可能会受到种间竞争作用的影响存活率降低。因此植物集群的顺序、连续性以及最终群落结构受到拆坝时间的明显影响^[10]。

1.4 对鱼类和底栖动物的影响

鱼类是筑坝和拆坝河流生态系统响应的标志,筑坝破坏了河流连通性,阻止洄游性鱼类迁移;同时鱼类栖息地的特性由地形地貌特征、水文水质特征和气象条件共同决定,筑坝对这三者造成的影响和相互作用将导致栖息地发生变化,最终影响鱼类分布^[24]。拆坝在短期内对鱼类产生不利影响,水流浊度增加可能导致鱼类伤亡,同时拆坝时水位迅速下降将会导致下游水体中溶解气体浓度超饱和,增加鱼类得气泡病的可能。长远来看,拆坝恢复了河流连通性,洄游性鱼类可从下游迁移到上游的栖息地,在原来的蓄水区定居,促进洄游性鱼类的繁殖^[25]。美国肯纳贝克河上的爱德华兹大坝的拆除重新连接了河流和海洋,一些被大坝阻隔的滨海鱼类进入到先前不能到达的水库蓄水区,促进了许多区域种如斑纹鲈鱼、大西洋短鼻鲷鱼、胡瓜鱼、美洲西鲱鱼和黑尾青鱼的生长繁殖,物种数量显著增加^[26]。对于缺少鱼道设施的大坝,拆坝可减少过鱼过程中涡轮卷吸作用造成的伤亡^[27]。同时,拆坝后水库湖泊型生态环境转变为河流生态环境,浅滩、弯道、急滩河段增多,造成鱼类栖息环境发生变化,湖泊静水型的鱼类逐渐被河流流动型的鱼类所取代,如美国一些

地区,大麻哈鱼、鲑鱼和鲟鱼等流动型鱼类因大坝拆除数量大幅增加^[26]。

此外,拆坝后鱼类种群恢复时间与其生物限制类型相关联。仅受迁移限制的鱼类,拆坝后1 a内种群基本恢复,但受栖息地限制的鱼类,种群恢复需要3 a乃至更长时间,因为这些物种恢复需要河流地貌变化提供适宜的栖息地环境,如美国Milwaukee河中口黑鲈(受栖息地限制的鱼类)与鲤鱼(仅受迁移限制的鱼类)相比,其种群恢复时间要多出3 a^[28]。

底栖动物是河流生态系统的重要组成部分,其群落结构特点与河流环境因子密切相关,其中河床底质是最重要的影响因素之一,是底栖动物生长、繁殖等一切生命活动的必备条件。底质粒径的大小、表面结构、稳定性等对底栖动物群落结构组成的影响显著^[29]。拆坝后库区沉积物的释放将改变河流形态及河床底质,进而改变底栖动物的群落,上游河道侵蚀下切,河床粒径粗化,可能增加底栖动物密度,而下游河道淤积抬升,同时河床细化则会减小底栖动物密度及多样性^[30]。

拆坝对河流生态系统各个生态因子的影响既存在差异又相互联系,拆坝后动植物种群恢复最终取决于栖息地物理环境的恢复,而栖息地环境恢复受地貌调整速率的影响。因此,动植物群落恢复时间比地貌恢复时间长,拆坝1 a内大幅度的地貌演变基本完成,以后可能发生微小调整;其次恢复的是底栖动物和鱼类,栖息地一旦恢复,底栖动物因其生命体周期短将迅速繁殖,与底栖动物相比,鱼类恢复较慢;恢复时间最长的一般是植物,岸边带草类集群演变到乔木类集群需要至少5 a时间。

2 拆坝对生态系统影响的评估方法

在定性理解拆坝生态影响的基础上,定量评估拆坝对生态系统造成的影响更加重要,比如评估预测拆坝后淤沙无控释放造成的河道演变、流态变化对动植物栖息地影响等。目前评估拆坝生态影响有3种方法:根据实际拆坝情况进行评估;根据现存大坝情况进行评估;根据理论模型进行预测。

2.1 对河流地貌影响的评估方法

河流地貌过程决定河流形态,进而决定河流生物的生态环境结构。河流地貌多样性是生物栖息地多样性及河流健康的重要指标之一,河道形态是河流栖息地结构的主要控制因素,地貌过程如河岸侵蚀、泥沙沉积对动植物栖息地有重要的生态学意义。

评估拆坝对地貌的影响主要应用实地监测、物理实验及数值模拟3种方法。实地监测方法通过选取大坝上下游典型研究断面,同时在上游未受干扰

段选取参考断面,在拆坝前后按时间顺序测量地形,将前后地形数据进行对比,用断面法定量估算泥沙侵蚀沉积体积,以纵断面深泓线变化表示河道侵蚀沉积具体位置。同时采集河道床沙、悬沙进行泥沙颗粒级配指标分析,研究河道典型横断面的泥沙粒径变化。如Magilligan等^[31-33]对一些拆坝案例进行拆后实地监测,所得结论验证了Doyle概念性河道演变模型的全部过程。

实地监测需要拆坝前后长序列数据,受很多因素限制,须结合其他辅助方法如模型预测、物理实验进行分析,如Doyle等^[34-35]用岸坡稳定性分析预测拆坝后水库侵蚀的最大深度;Cantelli等^[36-37]用物理实验分析河道下切侵蚀到沉积层的宽度;Rumschlag等^[18,38-40]用HEC-RAS模型模拟泥沙输运动态及侵蚀沉积位置,预测河道未来形态、宽度、深度和坡降等。

实地监测地形和泥沙的变化受当地条件影响,包含很多不可控因素,缺乏普适性,但能直观反映拆坝后河槽演变形态,同时为模型预测提供可靠的验证数据。物理实验一般用来探究局部变量的影响,如坝体本身属性(类型、尺寸、材料等)、沉积物属性(尺寸、形状、密度、黏聚力等)和拆坝方式对库区沉积物释放机制和速率以及拆坝河道演变的影响,为具有共性的一些坝体拆除提供参考。数值模型则主要服务于决策者,以便提出更好的泥沙处置策略和拆后修复措施,目前拆坝泥沙输运模型大多是一维的,仅考虑了纵向河床高程变化,而河道横向拓宽也是重要的演变模式,因此二维模型和三维模型可能更适用于分析拆坝后河流地貌演变。

2.2 对岸边带植物影响的评估方法

定量评估拆坝对岸边带植物影响的传统实地监测方法主要涉及植被盖度、植被丰富度、群落多样性、生物量以及本土植被覆盖率等指标。通常选取样带断面进行植被调查采样,计算植被盖度、植被多样性指数、本土植被覆盖率等,结合统计分析方法得出拆坝前后植被差异程度及其主要影响因素。如Orr等^[41]利用统计方法调查了美国威斯康星州30个拆坝地点植被监测情况,研究表明所有地点植被广泛覆盖而几乎无裸露空地,最初植被恢复需要1个月并保持高覆盖率,新拆坝地点禾草和杂草类占主导地位,乔木类在老拆坝地点大量集群,说明乔木群落的生长与拆坝年限显著相关,同时物种多样性和拆坝年限正相关。数值模型预测方法将水动力模型和植物模型进行耦合,利用水动力模型模拟拆坝水流场,同时结合植物内在生长机理,预测拆坝后岸边带植物生长分布情况。例如Kim等^[17]采用

数值模拟方法,用洪水水位对应岸边带植物死亡,用常水位对应岸边带植物入侵、生长和繁殖情况,得出拆坝后 1 a 内草类植物集群,10 a 后乔木类数量增长,并用韩国 Gongreung 河拆坝案例进行了验证。

传统方法能够获得比较准确的植物物种样点数据,是研究植被分布的基础,但是耗时、耗力,且由于区域内地形地貌的限制,某些地方无法到达,所以仅适用于有限的小空间尺度研究区域。随着遥感技术的不断发展,使得高效获取大范围长序列植被数据成为可能,地理信息系统具备超强的空间数据分析能力,能够作为拆坝前后植被动态变化监测分析的有力工具,通过提取不同年份的遥感影像,能直观、快速地反映植被的时空变化规律。此外,数值模型预测方法方面除了耦合水动力模型和植物模型外,未来研究还可以考虑构建拆坝的 CA-Markov(元胞自动机-马尔可夫)模型,预测研究区域岸边带植被未来的动态变化趋势,因 CA 模型主要关注元胞局部的相互作用,因此可以利用拆坝后植物生长的先后顺序和种间作用机制制定相应的元胞相互作用规则,结合 Markov 模型在预测状态变化方面的优势,模拟拆坝后岸边带植物分布的时空变化^[42]。

2.3 对鱼类和底栖动物影响的评估方法

定量评估拆坝对鱼类的影响可从种群结构和栖息地两方面进行。通过断面电击取样,记录鱼类数量、质量、种类、尺寸等,计算鱼类密度、生物量、物种数、丰度、重要鱼类比例、Simpson 指数、Shannon-Weaner 指数,比较拆坝前后群落结构差异,确定其变化程度,预测变化趋势。记录浅滩数量、基质类型等,通过栖息地评估方法(包括水文水力学方法、河流地貌法、栖息地模拟法、综合评估法等)对拆坝后的栖息地质量进行评估^[43]。美国威斯康星州 Milwaukee 河的 Woolen Mills 大坝拆除后,Canehl 等^[28]用 IBI 指数评价河流的生物完整性,结果表明以前库区段栖息地评分增加,高密度的非本地种鲤鱼的数量大幅减少,而一些本地种如小口黑鲈鱼显著增加。Burroughs 等^[44]监测了美国 Pine 河鱼类群落对 Stronach 大坝逐渐拆除的生物响应,对比了拆坝前后物种组成,结果表明一些以前仅在下游河段集群的物种在上游集群,有效栖息地面积增加,物种丰度增加 2 倍。目前,预测拆坝水动力条件的改变对鱼类栖息地影响的常用模型是耦合水动力模型和 HSI(栖息地适宜性指数)模型,以河流基质分布、水动力模型输出的水位和流速作为 HSI 模型输入,基于 ArcGIS 在所选河段评估栖息地适宜性指数,如 HARO 等^[45-46]利用这种模型研究了美国 Sandusky 河 St. John 大坝拆除后目标鱼类的恢复情况,模型

结果表明拆坝后栖息地适宜性指数明显增加。

评估拆坝造成的底栖动物变化和评价鱼类类似,但底栖动物因其采样成本低、活动场所较固定、迁徙能力差等特点,更能有效反应拆坝对河流生态的影响。Stanley 等^[11]监测了美国 Baraboo 河拆坝后底栖动物群落的变化,发现 1 a 后库区底栖动物群落组成与非库区河段类似,表明非库区河段底栖动物群落迁移到库区河段;Casper^[47]研究表明大坝拆除后底栖物种丰度增加。

总体而言,评估鱼类和底栖动物对拆坝的响应在方法上有所相似,但 Marzin 等^[48]研究发现,鱼类对水文情势改变响应更敏感,而大型底栖动物对地形地貌改变响应更敏感。

评估拆坝的影响目前主要有两类方法:根据实际拆坝情况进行评估和根据理论模型进行预测。国外已有了很多小型水坝拆除案例,由于以前缺乏拆坝方面的研究,因此对一些拆坝案例进行拆后实地观测成为最直接、最有说服力的研究手段,应用最广。但由于成本和一些不可控因素,加上数值模拟具有速度快、费用低、无比尺影响、模拟能力强等优点,可以快速为管理者提供更好的泥沙处置策略和拆除方式参考,因此数值模拟方法也被应用到拆坝影响评估中。这两种方法各有利弊,应综合使用,利用数值模拟方法给管理者快速提供拆除策略,同时采用实地监测资料进行验证研究以改善模型精度应是最好的选择。

3 结 语

拆坝作为一种河流修复手段受到广泛关注,但是面临更多的大坝拆除需求,拆坝科学理论基础十分缺乏,这对制定大坝拆除行动方案造成困难。本文在分析国内外学者研究成果的基础上,综合概括了拆坝对水文情势、河流地貌、岸边带植物、鱼类和底栖动物短期和长期的影响,短期来看拆坝是有害的,但长期而言,拆坝一定程度恢复了河流生态系统;在分析拆坝对河流生态系统影响的基础上,对评估拆坝生态影响的几种主流方法进行了综述,指出了各评估方法的优缺点和适用情况,可为后续评估拆坝影响提供参考。

拆坝研究是一个涉及地貌学、生态学、水文学等多学科的新研究领域,拆坝引起河流水动力变化,库区淤沙下泄引起地貌变化,从而对生物栖息地环境产生影响;反之,对河床地貌而言,生物繁衍也会对其产生影响,比如岸边带植物生长稳固河床可以改变水流并缩短河流地貌调整时间。水文、地貌和生物要素息息相关,彼此相互制约,目前很多研究仅侧

重于一个方面,单一地分析拆坝后泥沙运输引起的河貌演变或拆坝对某种生物的影响,缺乏结合多个因子之间的相互作用评估拆坝影响的研究,因此可以考虑在数值模型中耦合水动力、泥沙、生态三方面的参数,综合考虑关键生态要素之间的联系,研究河流生态系统对拆坝过程的响应。

此外,选择良好的拆坝时机和正确的拆坝方式也是拆坝工程实施的关键,因此还需对拆坝时机(丰水期、平水期、枯水期)、一次性拆坝和分阶段拆坝等各种工况下的长短期生态影响进行深入研究,以提供最优拆坝实施方案,最大程度恢复河流生态系统。

参考文献:

- [1] 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))
- [2] 盛金保. 小型水库大坝安全与管理问题及对策专题报告[R]. 南京:南京水利科学研究院,2008.
- [3] 姜树海,吴时强,范子武. 试论小型水库的负面效应及其对策措施[J]. 水利发展研究,2004(9):33-36. (JIANG Shuhai, WU Shiqiang, FAN Ziwu. Discussion on the negative effects and countermeasures of small reservoirs[J]. Water Resources Development Research, 2004(9):33-36. (in Chinese))
- [4] 王若男,吴文强,彭文启,等. 美国拆坝原因分析[J]. 中国农村水利水电,2015(9):135-138. (WANG Ruonan, WU Wenqiang, PENG Wenqi, et al. An analysis of the reasons of dam removal in the United States [J]. China Rural Water and Hydropower, 2015(9):135-138. (in Chinese))
- [5] 林启才. 美国拆坝现象的原因分析及其哲学思考[J]. 黑龙江水专学报,2007,34(1):5-7. (LIN Qicai. Dam removal and the reflect on philosophical view [J]. Journal of Heilongjiang Hydraulic Engineering College, 2007, 34(1):5-7. (in Chinese))
- [6] 祁继英,阮晓红. 大坝对河流生态系统的环境影响分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2005,33(1):37-40. (QI Jiying, RUAN Xiaohong. Dam construction-induced environmental impact on riverine ecosystem [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2005, 33(1):37-40. (in Chinese))
- [7] 姚维科,崔保山,刘杰,等. 大坝的生态效应:概念、研究热点及展望[J]. 生态学杂志,2006,25(4):428-434. (YAO Weike, CUI Baoshan, LIU Jie, et al. Ecological effects of dam: concepts, research hotspots and prospects [J]. Chinese Journal of Ecology, 2006, 25(4):428-434. (in Chinese))
- [8] DOYLE M W, STANLEY E H, HARBOR J M. Channel adjustments following two dam removals in Wisconsin [J]. Water Resources Research, 2003, 39(1): ESG2. 1-2. 15, DOI:10.1029/2002WR001714.
- [9] SHAFROTH P B, FRIEDMAN J M, AUBLE G T, et al. Potential responses of riparian vegetation to dam removal [J]. BioScience, 2002, 52(8):703-712.
- [10] KIM S, TODA Y, TSUJIMOTO T. Geomorphological and riparian vegetation responses following a low-head dam removal: a study based on literature review [J]. International Journal of River Basin Management, 2015, 13(3):1-10.
- [11] STANLEY E H, LUEBKE M A, DOYLE M W, et al. Short-term changes in channel form and macroinvertebrate communities following low-head dam removal [J]. Journal of the North American Benthological Society, 2002, 21(1):172-187.
- [12] 李翠,王晓玥. 美国拆坝统计分析[J]. 大坝与安全, 2015(4):74-78. (LI Cui, WANG Xiaoyue. A statistical analysis of dam removals in the United States of America [J]. Dam and Safety, 2015(4):74-78. (in Chinese))
- [13] 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))
- [14] 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,2011,11(1):146-147. (LIU Yongmei. Elementary introduction to effects on ecological environment due to decommissioned dam removal in China [J]. China Water Transport, 2011, 11(1):146-147. (in Chinese))
- [15] LAWRENCE R E. The impacts of hydro-electric construction works on the hydrology of a subalpine area in Australia [J]. Environmental Geology, 2001, 40(4):612-621.
- [16] 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))
- [17] KIM S, TODA Y, TSUJIMOTO T. Effects of a low-head dam removal on river morphology and riparian vegetation: a case study of Gongreung River [J]. Journal of Water Resource and Protection, 2014, 6(18):1682-1690.
- [18] 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(2): 142-153.
- [19] DOYLE M W, STANLEY E H, ORR C H, et al. Stream ecosystem response to small dam removal: lessons from the heartland[J]. *Geomorphology*, 2005, 71(1/2): 227-244.
- [20] 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, 151/152: 50-58.
- [21] CANNATELLI K M, CURRAN J C. Importance of hydrology on channel evolution following dam removal: case study and conceptual model[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2012, 138(5): 377-390.
- [22] 邓伟琼, 孙荣, 李修明, 等. 水电开发对河岸植被影响研究进展[J]. *生态科学*, 2015, 34(6): 201-208. (DENG Weiqiong, SUN Rong, LI Xiuming, et al. Review on impacts of cascade hydropower exploitation on the riparian vegetation[J]. *Ecological Science*, 2015, 34(6): 201-208. (in Chinese))
- [23] BEDNAREK A T. Undamming rivers: a review of the ecological impacts of dam removal [J]. *Environmental management*, 27(2001): 803-814.
- [24] 朱瑶. 大坝对鱼类栖息地的影响及评价方法述评[J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2005, 3(2): 100-103. (ZHU Yao. Commentary on dam influence on fish habitat and evaluation on assessment method[J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2005, 3(2): 100-103. (in Chinese))
- [25] 方崇, 苏超, 陆克芬, 等. 退役大坝拆除后对河流鱼类生长环境的影响[J]. *安徽农业科学*, 2008, 36(19): 8120-8122. (FANG Chong, SU Chao, LU Kefen, et al. The influence of decommissioning dam demolition on river environment for fish growth [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2008, 36(19): 8120-8122. (in Chinese))
- [26] 王睿. 水坝对生物地球化学循环的阻隔及拆坝后的环境影响[J]. *城乡建设*, 2007(2): 67-69. (WANG Rui. Barrier of biogeochemical cycle of dam and environmental impact after dam removal [J]. *Urban and Rural Development*, 2007(2): 67-69. (in Chinese))
- [27] 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): 15-17. (YU Yunli, SHI Zanhong. Application of dam removal measures in river restoration [J]. *Yangtze River*, 2005, 36(8): 15-17. (in Chinese))
- [28] KANEHL P D, LYONS J, NELSON J E. Change in the habitat and fish community of the Milwaukee River, Wisconsin, following removal of the Woolen Mills Dam[J]. *North American Journal of Fisheries Management*, 1997, 17(2): 387-400.
- [29] 任海庆, 袁兴中, 刘红, 等. 环境因子对河流底栖无脊椎动物群落结构的影响[J]. *生态学报*, 2015, 35(10): 3148-3156. (REN Haiqing, YUAN Xingzhong, LIU Hong, et al. The effects of environment factors on community structure of benthic invertebrate in rivers [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(10): 3148-3156. (in Chinese))
- [30] 段学花, 王兆印, 程东升. 典型河床底质组成中底栖动物群落及多样性[J]. *生态学报*, 2007, 27(4): 1664-1672. (DUAN Xuehua, WANG Zhaoyin, CHENG Dongsheng. Benthic macroinvertebrates communities and biodiversity in various stream substrata[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(4): 1664-1672. (in Chinese))
- [31] 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*, 2016, 252: 158-170.
- [32] 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): 96-107.
- [33] CHENG F, GRANATA T. Sediment transport and channel adjustments associated with dam removal: field observations [J]. *Water Resources Research*, 2007, 43(3): 1832-1840.
- [34] DOYLE M W, STANLEY E H, SELLE R, et al. Predicting the depth of erosion in reservoirs following dam removal using bank stability analysis[J]. *International Journal of Sediment Research*, 2003, 18(2): 115-121.
- [35] 王廷贵, 匡尚富. 河岸临界崩塌高度的研究[J]. *水利学报*, 2007, 38(10): 1158-1165. (WANG Yangui, KUANG Shangfu. Critical height of bank collapse [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, 38(10): 1158-1165. (in Chinese))
- [36] CANTELLI A, PAOLA C, PARKER G. Experiments on upstream-migrating erosional narrowing and widening of an incisional channel caused by dam removal [J]. *Water Resources Research*, 2004, 40(3): 114-125.
- [37] FERRER-BOIX C, MARTÍN-VIDE J P, PARKER G. Channel evolution after dam removal in a poorly sorted sediment mixture: experiments and numerical model[J]. *Water Resources Research*, 2014, 50(11): 8997-9019.
- [38] WILDMAN L A S, MACBROOM J G. The evolution of gravel bed channels after dam removal: case study of the Anaconda and Union City Dam removals [J]. *Geomorphology*, 2005, 71(1/2): 245-262.
- [39] GREENE S L, KRAUSE A J, KNOX J C. A Decade of geomorphic and hydraulic response to the La Valle Dam project, Baraboo River, Wisconsin [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2013, 49(6): 1473-1484. (下转第 21 页)

- empirical mode decomposition hybrid model for annual runoff forecasting [J]. Water Resources Management, 2015,29(8): 2913-2926.
- [9] WANG W, CHAU K, QIU L, et al. Improving forecasting accuracy of medium and long-term runoff using artificial neural network based on EEMD decomposition [J]. Environmental Research, 2015, 139: 46-54.
- [10] 马超, 姜璇. 基于 EEMD-ANN 的水库年径流预测[J]. 水电能源科学, 2016, 34(8): 32-35. (MA Chao, JIANG Xuan. Annual reservoir runoff forecasting using ensemble empirical mode decomposition and artificial neuron network[J]. Water Resources and Power, 2016, 34(8): 32-35. (in Chinese))
- [11] 郑晓东, 鲁帆, 严登华, 等. 基于小波分析的丹江口水库水文年度入库径流变化特征[J]. 水科学与工程技术, 2011(2): 1-3. (ZHENG Xiaodong, LU Fan, YAN Denghua, et al. Variation characteristics of the Danjiangkou Reservoir hydrological annual runoff based on the morlet wavelet [J]. Water Sciences and Engineering Technology, 2011(2): 1-3. (in Chinese))
- [12] 李响, 邹宁, 吕孙云. 丹江口水库天然入库径流演变规律研究[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(2): 206-210. (LI Xiang, ZOU Ning, LÜ Sunyun. Variation of natural inflow runoff in the Danjiangkou Reservoir [J]. South-to-North Transfers and Water Science & Technology, 2015, 13(2): 206-210. (in Chinese))
- [13] 冉笃奎, 李敏, 武晟, 等. 丹江口水库中长期径流量的多模型预报结果分析及综合研究[J]. 水利学报, 2010, 41(9): 1069-1073. (RAN Dukui, LI Min, WU sheng, et al. Research on multi-model forecasts in mid-long term runoff in Danjiangkou Reservoir [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(9): 1069-1073. (in Chinese))
- [14] 王元超. 丹江口水库中长期径流预报及水质水量联合模拟技术[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2015.
- [15] 冯小冲, 王银堂, 刘勇, 等. 基于物理统计方法的丹江口水库月入库径流预报[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2011, 39(3): 242-247. (FENG Xiaochong, WANG Yintang, LIU Yong, et al. Monthly runoff forecast for Danjiangkou Reservoir based on physical statistical methods [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2011, 39(3): 242-247. (in Chinese))
- [16] WU Z, HUANG N E. Ensemble empirical mode decomposition: a noise-assisted data analysis method[J]. Advance in Adaptive Data Analysis, 2009, 1(1): 1-41.
- [17] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis [J]. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical Physical and Engineering Sciences, 1998, 454: 903-995.
- [18] 王文圣, 丁晶, 金菊良, 等. 随机水文学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008: 41, 165-167.
(收稿日期: 2016-10-19 编辑: 骆超)
-
- (上接第 15 页)
- [40] CUI Y, WOOSTER J K, BRAUDRICK C A, et al. Lessons learned from sediment transport model predictions and long-term postremoval monitoring: Marmot Dam removal project on the Sandy River in Oregon [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 140(9): 04014044.
- [41] ORR C H, STANLEY E H. Vegetation development and restoration potential of drained reservoirs following dam removal in Wisconsin [J]. River Research and Applications, 2006, 22: 281-295.
- [42] 杨国清, 刘耀林, 吴志峰. 基于 CA-Markov 模型的土地利用格局变化研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2007, 32(5): 414-418. (YANG Guoqing, LIU Yaolin, WU Zhifeng. Analysis and dimulation of land-use temporal and spatial pattern based on CA-Markov model [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan, 2007, 32(5): 414-418. (in Chinese))
- [43] 赵进勇, 董哲仁, 孙东亚. 河流生物栖息地评估研究进展[J]. 科技导报, 2008, 26(17): 82-88. (ZHAO Jinyong, DONG Zheren, SUN Dongya. State of the art in the field of river habitat assessment [J]. Science & Technology Review, 2008, 26(17): 82-88. (in Chinese))
- [44] BURROUGHS B A, HAYES D B, KLOMP K D, et al. The effects of the Stronach Dam removal on fish in the Pine River, Manistee County, Michigan [J]. Transactions of the American Fisheries Society, 2010, 139(5): 1595-1613.
- [45] HARO A, CHELMINSKY M, DUDLEY R. Computational fluid dynamics-habitat suitability index (CFD-HSI) modeling as an exploratory tool for assessing passability of riverine migratory challenge zones for fish [J]. River Research and Applications, 2015, 31(5): 526-537.
- [46] TOMSIC C A, GRANATA T C, MURPHY R P, et al. Using a coupled eco-hydrodynamic model to predict habitat for target species following dam removal [J]. Ecological Engineering, 2007, 30(3): 215-30.
- [47] CASPER A F. Ecological responses of zoobenthos to dam removal on the Kennebec River, Maine, USA [J]. Archiv Fur Hydrobiologie, 2006, 16(4): 541-555.
- [48] MARZIN A, ARCHAIMBAULT V, BELLARD J, et al. Ecological assessment of running waters: do macrophytes, macroinvertebrates, diatoms and fish show similar responses to human pressures? [J]. Ecological Indicator, 2012, 23(4): 56-65.
(收稿日期: 2016-11-18 编辑: 熊水斌)