

筑坝对河流生态系统影响研究进展

毛战坡, 王雨春, 彭文启, 周怀东

(中国水利水电科学研究院水环境研究所, 北京 100038)

摘要: 河流是陆地生态系统和水生态系统间物质循环的通道, 筑坝人为改变河流物理、化学、生物地球化学循环模式, 影响河流生态系统的结构、功能。分析了筑坝对河流水文水力特性、生源要素(氮、磷、硅等)、水生态系统结构和功能的影响以及河流生态系统恢复等研究的进展。随着水库成为陆地水分循环的一个主要组成部分, 对流域生态系统健康的影响日益显著, 进而对大坝的生态效应、河流生态恢复等需要进行深入的研究, 减轻大坝的负面效应。

关键词: 大坝; 河流; 生态系统; 生态恢复

中图分类号: TV853 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-6791(2005)01-0134-07

全球水分循环是地球气候和生物、地球化学系统中一个基本组成部分, 河流是陆地生态系统和水生态系统间物质循环的主要通道^[1]。流域河流系统是由一系列不同级别的河流形成的完整系统, 河流物理参数的连续变化梯度形成系统的连贯结构和相应的功能; 河道物理结构、水文循环和能量输入, 在河流生物系统中产生一系列响应——连续的生物学调整, 以及沿河有机质、养分、悬浮物等的运动、运输、利用和储蓄, 即河流连续体概念(River Continuum Concept, RCC)^[2], 包括河流地理空间、空间的连续性, 注重河流生态系统中生物因素及其物理环境的连续性和系统景观的空间异质性^[3]。Junk 提出洪水脉动概念(Flood Pulse Concept, EPC)^[4, 5], 明确河流生态系统具有三维结构的特征(纵、横、垂直3个方向), 强调河流生态系统在流域景观中的生态功能, 以及流域生态系统与河流生态系统的相互作用过程。Ward^[6]进一步认为河流生态系统应具有四维结构: 纵向、横向、垂向和时间尺度, 并强调河流生态系统的连续性和完整性, 更加注重流域与河流生态系统的相互关系。

随着社会发展, 在河流上大规模筑坝拦截河水量(发电、灌溉、控制洪水等), 是河流生态环境受人为影响最显著、最广泛、最严重的事件之一^[7]。根据世界大坝学会的统计, 目前全世界有36000座大中型水坝在运行, 控制着全球20%左右的径流量^[8]。在中国, 长江、黄河等主要河流的梯级水库以惊人速度进行, 部分河流缺乏有效管理引起河流断流、水污染严重等后果, 严重影响河流生态系统的结构和功能^[9, 10]。大坝建设人为改变了河流原有的物质场、能量场、化学场和生物场, 直接影响生源要素在河流中的生物地球化学行为(生源要素输送通量、赋存形态、组成比例等), 进而改变河流生态系统的物种构成、栖息地分布以及相应的生态功能^[11]。鉴于筑坝造成河流生源要素、河流和区域生态环境的改变, 国内外科学家对河流生态系统的响应过程广泛重视, 成为目前河流生态研究的重要领域之一。

1 筑坝对河流的影响

河流的物理、化学、生态特征是流域许多因素综合作用的结果, 在河流筑坝蓄水后, 河流将产生一系列复杂的连锁反应改变河流的物理、生物、化学因素。根据筑坝对河流下游生态系统的影响程度, 可以划分为三个层次(图1): 第一层次是筑坝对河流下游能量、物质(悬浮物、生源要素等)输送通量的影响; 第二层次是河道结

收稿日期: 2003-11-03; 修订日期: 2004-02-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40103008); 国家重点基础研究发展计划资助项目(2002CB412300)

作者简介: 毛战坡(1974-), 男, 河南洛阳人, 工程师, 博士, 主要从事水生态、湖泊富营养化控制等研究。

E-mail: maozb@iwhr.com

构(河道形态、泥沙淤积、冲刷等)和河流生态系统结构和功能(种群数量、物种数量、栖息地等)的变化,主要是河流能量和物质输送在筑坝后的调整结果;第三层次综合反映所有一、二层次影响引起的变化^[7]。

1.1 筑坝对河流水文、水力学特性的影响

流速、流量以及水库的泄流方式、频率等对河流物理、化学和生物特征的影响具有重要作用,其中水力特性对河流生态系统具有决定作用。大坝蓄水对河流流量的调节,使下游河道流量的模式发生变化;大、中、小型水库的运行方式将产生不同的泄流方式(浅层泄流、深层泄流、溢流等),影响河流原有物质、能量、生态系统结构和功能,其影响程度取决于水库的调度方案、泄流位置、溢流堰特性、蓄水库容、泥沙沉积以及流域地貌等(图 2)。动水生态系统的生态平衡依赖于河道平均水流、大小流量的频率等;河流季节的流量变化,便于鱼类产卵、迁徙,为河边生物栖息地和洪泛平原的沼泽地、地下水补给水源、营养物质。筑坝引起河流水力条件的改变,导致河流、河岸、洪泛平原等各类生态环境产生相应的变化,进而对河道地貌形态和河床地质的稳定性产生间接影响^[7,11]。

筑坝蓄水形成水库将引起河流水动力条件的改变(主要是流速减慢),导致颗粒物迁移、水团混合性质等显著变化^[12],强水动力条件下的河流搬运作用,将逐渐演变成为弱水动力条件下的“湖泊”沉积作用^[13]。水库的运行方式(发电、灌溉、控制洪水等)影响泄流模式,进而影响下游河道的水力、水文因素。研究发现,Grany 大坝水力发电产生的脉动泄流引起科罗拉多河流量明显波动,流量从自然状态下的 $0.57 \text{ m}^3/\text{s}$ 急剧上升到 $5 \sim 9 \text{ m}^3/\text{s}$,泄流冲刷下游河道中淤积的泥沙和藻类;泄流对河流水位和水质的影响(主要是温度和浊度),远高于流量对河流生态系统的影响^[7]。

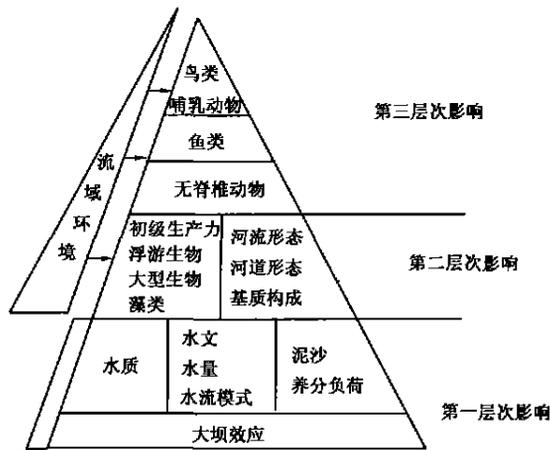


图 1 大坝对河流生态系统影响

Fig. 1 Effects of dams on river ecosystems

1.2 筑坝对河流物理/化学特性的影响

筑坝蓄水导致河流水体的物理、化学和生物因素发生变化,主要影响因素有水库水位、分层、滞留时间、异重流、水库运用方式、出流部位、出流结构类型等^[7]。多数河流输送的生源要素(氮、磷、硅等)中相当部分以颗粒态迁移,河流输送的溶解态有机质(DOC)与颗粒态有机质(POC)通量比值为 $1 \sim 20$,总氮通量(TN)中颗粒态氮素(PN)占半数以上,而颗粒态磷(PP)约占总磷(TP)通量的 80% ^[14]。同时,水库的沉积作用(泥沙沉积)显著减少生源要素输送通量,相当数量的颗粒态物质将“滞留”在库底沉积物中^[15]。

水库水环境水团性质的改变(水体滞留时间增加、流速减缓等),制约生源要素的地球化学行为(沉淀与溶解/絮凝、吸附与解吸等),使营养物质在水库中迁移、转换的生物地球化学行为明显不同于河流^[8]。水体滞留时间和水环境的物理化学条件也可能影响固-液相反应的动态平衡,生源要素在固-液相之间的分配关系受吸附/解吸-沉淀-水溶液-絮凝体系的控制,如:水体泥沙浓度抑制生物学过程,使营养元素从颗粒物表面的释放

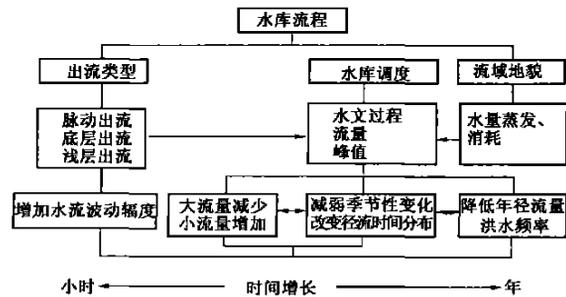


图 2 大坝对河流水文水力过程的影响

Fig. 2 Effects of dams on hydrological and hydraulic characteristics of rivers

成为主要机制；而在高生产力的水体中，生源要素则倾向于向固相颗粒态(有机质)迁移^[16]。

河流筑坝形成水库后，破坏了河流原有的“连续性”，水环境的物理、化学特性随之发生变化^[17]。水库水体出现“分层”现象，使水库体系内生源要素的生物地球化学行为与河流显著不同^[18]。对多数水库而言，水库具有比自然湖泊更强的河流水量补给和换水频度，而太阳辐射和热量传输不平衡将导致季节性水体分层^[19]。水体温度变化有利于冷水物种繁殖和生长，而导致温水植物的多度降低以至物种灭绝^[19]。水温热力分层改变和干扰生物生存环境，影响程度依赖于下游支流的入流流量^[20]。

水库水体的季节性分层，直接导致水体垂直剖面上不同水团的物理、化学特性的差异，上层水体混合强烈及水生植物的光合作用使得水体中溶解氧含量较高；在下层水体中，缺乏复氧机制补偿溶解氧，导致水体溶解氧呈典型的 Clinograde 分布。水库水体分层和水团滞留时间的增加，使其内的生物地球化学过程呈现出更多的“湖沼学反应”特征^[19]。气候条件控制温度分层特征，而风和水库形态是温度分层能否形成的关键因素^[7]。

水库温度分层直接影响生源要素在水库中的迁移、循环和更新速率。水体溶解氧分布控制水体中氧化/还原界面的垂直迁移，进而影响生源要素循环迁移过程，包括 CO_2 与溶解无机碳(DIC)的化学平衡、有机碳(DOC和POC)的矿化降解和埋藏保存、有机氮矿化降解的氨化作用、硝化作用、反硝化作用、固态颗粒物对氨态氮的吸附、沉积物颗粒对磷酸盐(PO_4^{3-})的吸附/解吸、磷酸盐矿物的沉淀溶解等^[21]。浮游植物释放氧气增加湖面温水层的溶解氧含量，在斜温层中生物化学过程和死亡浮游植物的分解所消耗的溶解氧得不到有效补充，使得有机质分解成为厌氧分解，释放 H_2S 、 CO_2 、 N_2O 等气体，水体 pH 降低，而导电性、亚磷酸盐含量增加。

水库流动环境物理因素的改变，大量营养物质在库区内滞留和积累。美国密苏里河的 Callaham 水库，出流水体磷酸盐含量比入流降低 50%，悬移质中总磷含量降低 4 倍^[7]。水库富营养化使得深水层全年发生脱氮作用，但水库相对较大的出流流量和较短的滞留时间能够显著减轻水体富营养化，使下泄水体营养物含量较低，同时出流水体的营养物浓度与泄流建筑物高程、结构等有关。研究发现，水库不同深度水体的营养物浓度具有明显季节性，在水库水体发生翻转和掺混时，氧化反应处于优势地位，而在水库分层期间，深水层主要发生还原反应^[7]。水库水质特性取决于浮游植物同亚硝态氮、深水层中细菌对氮等元素的生化反应，分层期间氮含量降低而铁离子含量增加，Wahby 等认为主要因深水层中 CO_2 浓度较高，在较低的 pH 和有机质作用下，非溶解态的 Fe^{3+} 向溶解态 Fe^{2+} 转变^[21,22]，使得水-气界面、沉积物-水界面等生物地球化学作用变得重要^[23]。

1.3 筑坝对河流生态系统结构和功能的影响

河流蓄水形成水库后，生物群落随生境变化经过自然选择、演替，形成一种新平衡。水库形成后，水动力减弱、透明度增加等因素，使水生生态体系由以底栖附着生物为主的“河流型”异养体系向以浮游生物为主的“湖沼型”自养体系演化^[23]。大坝蓄水主要改变或者影响浮游生物的生长环境条件，动水生境迅速转变为静水生境，导致微生物群落种群数量急剧增加，同时淹没的有机质分解释放营养物，进一步增加浮游植物数量；改变上游补给的外来浮游生物数量，富营养化水库不断改变浮游植物种群构成，使静水浮游植物生长不断延续。浮游动物和浮游植物的生长均要求一个允许繁殖的最小滞留时间，而水流滞留时间将决定有机、无机悬浮物在水库内的沉积程度，使其成为控制水库、下游河道中浮游生物类型的主要影响因素^[7,19]。水库不同的泄流方式，向下游输送不同数量的浮游生物量：表层泄流一般向下游输送大量浮游生物，而底部泄流却相反^[7]。

河流生态系统的存在和发展依赖碳、氮、磷等生源要素的生物可获得性，而生物作用过程又是控制或影响河流/水库体系内生源物质循环更新的重要环节。水库生态体系内存在两类基本食物链：植食性食物链和碎屑食物链(含腐食食物链)。两类食物链相互交错，水生生物群落按营养层次构成复杂、动态变化的食物网，物质和能量经过食物链(网)的各个环节进行转换与流动，形成了水库生态体系中生源要素循环和流动的基本框架。水库体系中微生物活动、浮游植物生长过程对生源要素的同化吸收和分解过程的离子释放，对水体中生源要素的化学形态和输送通量造成很大影响。水库生态食物网结构演化过程伴随生源物质的吸收消耗、多级利用以及再生循环，显著改变相关元素在河流水环境中的迁移命运^[24,25]。植食性食物链在逐级产生和传递有机质的同时，食物链上各生物群落(浮游植物、浮游动物和鱼类)经分泌、排泄和分解向水体提供大量的溶解有机质和无机营

养盐,成为内循环中重要的营养盐来源。但是,碎屑食物链和异营养微生物的作用并不亚于植食性食物链,在湖泊(水库)下层的细菌呼吸作用要超过藻类净生产量。水库生态系统中生物作用对生源要素的“改造”,涉及到整个食物链(网)上不同营养层次生物生产力的形成和转化,包括生源要素同化固定和生源物质活化更新^[26]。

1.4 筑坝的区域生态效应

大坝通过改变下游水流、泥沙和生源要素等的流动、运移模式,影响生物地球循环以及河流缓冲区域生态系统的结构和动态平衡;改变水流温度模式,影响河流生态系统中的生物能量和关键速率;对河流上下游的生物体和养分的运移产生障碍,阻止物质交换,上述生态效应具有明显的区域性(时间、空间尺度)^[27]。研究表明,大坝蓄水引起下游河流水文、泥沙运移模式变化,河流生态系统随之调整;大坝降低径流峰值,分割下游河流主河道与冲积平原的物质联系,导致冲积平原生态系统中部分物种退化、消失^[28]。水库长期蓄水和非季节性的泄流,严重影响下游河流生态系统的食物链^[29]。Collier等发现筑坝导致河流日流量急剧变化,降低下游栖息地和水生态系统的生产力和河道冲刷^[30]。大量颗粒泥沙在河道中大量沉降,改变下游河床基质,降低下游附卵栖息地的生态环境质量,从而影响鱼类、底栖生物等的生存^[31]。

梯级水库进一步促进河流生态系统的破碎化,影响鱼类等迁移,阻止陆地物种扩散和连续性,导致河流缓冲区域内物种多样性降低^[32]。同时,大坝蓄水和泥沙沉积在区域、全球尺度上改变地球物质流动梯变过程、改变海洋水位、产生温室气体(N₂O)、干扰海洋水文循环^[33]。梯级水库对河岸带生态系统结构、功能具有显著影响,导致河岸带生态功能退化。研究表明河岸带具有滞留、过滤污染物,保护侵蚀河岸,改进邻近区域气候,促进地表水、地下水的循环,产生、保持水陆交错带植被群落,维持无脊椎动物丰富性和多样性,从而维持河流内部生境结构及其食物链等功能^[34]。洪泛平原生态系统适应洪水的季节性变化,而洪水脉动是维持洪泛平原生态系统平衡的关键因素,筑坝人为调节洪水脉动幅度和频率,从而降低洪泛平原生态系统生产力,导致洪泛平原生态系统结构、功能失稳,进而影响河流和流域的生态系统^[34]。

2 河流生态系统恢复

筑坝人为调节河流生态系统的水文特性、水环境和生物过程,改变河流生源要素的迁移、转换和循环更新,直接或间接影响河流生态系统结构和功能^[35],导致85%左右的河流恢复目标是生态系统保护和重建,也使得河流生态系统研究日益重视河流生态系统健康评价、流域生态系统与河流生态系统的相互作用、河流生物群落的生态功能以及河流生态系统的管理等^[36,37]。

河流生态恢复的基本目标是促进生态系统自我维持和陆地、缓冲区域和水生生态系统间相互联系的出现,同时在流域尺度上对缓冲区域和水生生态系统的评价,详细描述实施生态恢复的河流断面和河道性^[38,39]。河流恢复的重要目标是保护河流的生物完整性及其生态健康,蔡庆华等认为河流生态系统的恢复程度可利用生物完整性指数(Index of Biotic Integrity, IBI)进行评价,据此进一步采取必要的措施^[5]。

虽然湿地、湖泊、河流面积较小,但是其生态系统价值和服务功能巨大^[40],主要体现在水资源、水质、生态功能、对洪水的调节功能以及文化美学功能等方面。因此,Moos^[41]建议河流生态系统的恢复是系统结构、功能的全面恢复,而不是局限于生态系统的种群保护。同时,河流生态系统的恢复应从流域生态学角度出发,综合考虑流域土地利用方式、砍伐森林、农田耕种、河流缓冲区域、管理措施、堤坝、防浪墙等的影响,而不能局限于河道范围内。目前的河流生态系统恢复主要侧重于某一个断面,过分强求生态系统的迅速恢复,这主要是出于政治、经济、社会等需求目的,而忽略河流生态系统是自然长期演替、进化的结果。

生态恢复与建筑美学、生态系统的机械管理具有根本性差异,后者是根据人类的某种需求对河流生态系统的某种结构、功能进行重建,实现的是个别物种恢复或者河流自然形态的重建,这种功能的人工化并不是真正意义上的生态恢复^[42]。例如,在河道中布置人工措施(溢流水坝等)并不能取代自然河流中木屑等自然累积形成的“水坝”的多重生态功能,更不能保证或者促进木屑等物质在生态系统中的累积;同时工程措施往往忽略洪

水的生态功能^[43,44],即洪水对底泥运移、河道冲刷和填淤、横向河道运动等的重要影响。恢复河流生态系统需要了解系统内生物、物理因素间的相互作用,同时需要选择原始系统作为“参考断面”评价恢复效果,从而实现恢复计划的连续实施。

在实施生态系统恢复过程中,需要了解河流生态系统对人为干扰的抵抗力以及生态系统在干扰停止/消失后的恢复能力(恢复力/弹性力)^[45]。河流缓冲带位于经常发生冲刷、淤积的区域,其生态系统显现出与众不同的弹性力特性,区域内植物(乔木、灌木、挺水植物等)的生存依赖于外界干扰(洪水等),生态恢复速率在很大程度上依赖于干扰的模式,这就是河流系统在经常的自然干扰下也能维持平衡的原因之一^[46]。许多河流生态系统恢复工程没有正确认识生态系统的需求,以及河岸植被和干扰模式(洪水)对河道和栖息地特性形成的影响,主要是由于社会压力、组织局限性、追求见效快的管理心理等,同时假设工程方法与生态系统自然过程、结构的等同性、生态系统能够减轻大坝对缓冲区域的影响等因素^[47]。

3 研究展望

河流筑坝不仅影响流域乃至全球水资源平衡,显著改变着河流输送的 C、N、P 等主要生源要素的生物地球化学循环和河流生态系统结构、功能,这种改变可影响到相关元素的全球循环质量平衡和海洋生态结构。

加强对水库-河流系统内重要的生物或非生物过程的研究十分必要,同时需要建立实施有效的河流生态系统健康评价指标体系,能迅速评价筑坝和恢复措施对河流生态系统的影响,这是目前河流生态系统研究的热点问题之一。通过对比研究具有不同性质生态体系(水库、河流)的生源要素的输入/输出负荷变化,得出水库内生物作用过程(包括作用方式和作用强度)影响河流生源物质输送循环的总体认识;同时了解生源物质输入负荷对河流/水库生态系统演化的影响。对河流/水库食物网上碳转化(营养动力学过程)的研究,能更深入理解水库系统内生源物质循环和更新细节,特别是关于生物作用方式、强度及其变化规律等重要问题。对营养盐污染来源的示踪,可以了解流域尺度下人为扰动(如污染物排放)对水库生态系统的影响。此外,对水库/河流系统内生物地球化学物质循环性质的研究,还对水库(河流)本身水环境未来演化中的一些重要问题具有重要意义。

筑坝对河流生态系统的影响程度与其规模、运行方式、流域地质、人口、经济等关系密切,其中大坝规模的影响尤其重要,但目前对大坝规模的描述局限于工程方面:大坝尺寸,运行模式和坝龄等。大坝规模、运行方式影响河流生态系统的类型、范围、频率和时间,而大坝的各种特性是相互联系。这也是目前河流生态系统急需的研究区域之一,ASCE(1997)建议分析和综合有关因素,应建立相应的评价指标和体系,对于评价大坝生态影响具有重要的理论和现实意义^[48]。同时,随着部分大坝的老化,需要重视大坝拆除后对河流生态系统的影响,尤其是水库大量滞留(主要通过泥沙沉积作用)的生源要素向下游的输移,以及河流水文、水力特性的恢复对河流生态系统的影响,从而采取相应的措施,减轻对河流生态系统的胁迫,促进流域的可持续发展^[48]。

在进行河流生态系统恢复时,需要考虑以下问题:恢复措施是否改变河流的水力、物理、化学特性;对河流生态系统中浮游生物的影响范围;是否有利于缓冲区域的生态恢复以及对河道形态的影响;生物地球化学循环过程对水化学的影响以及缓冲区域内的水文、生物联系过程;是否增加河道景观的多样性;区域景观结构的改变(土地利用等)对恢复措施的影响(增加/减少径流、增加/减少生源要素的输出)等;河流生态系统恢复的有效评价体系等。需要对上述问题进行综合研究,采取相应的措施减轻大坝对河流生态系统的影响,以及河流生态系统保护、恢复具有重要的理论和现实意义。

参考文献:

- [1] Karr J R, Chu E W. Sustaining living rivers[J]. *Hydrobiologia*, 2000, 422/423:1-14.
- [2] Vannote R L, Minshall G W, Cummins K W, et al. The river continuum concept[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science*, 1980, 37:130-137.

- [3] Minshall G W, Cummins K W, Peterson R C, *et al.* Development in stream ecosystem theory[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science*, 1985, 42:1045 - 1055.
- [4] Junk W J, Bayley P B, Sparks R E. The flood pulse concept in river-floodplain systems[A]. Dodge D P. *Proceedings of the International Large River Symposium*[C]. *Canadian Special Publication of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1989.
- [5] 蔡庆华, 唐涛, 刘健康. 河流生态学研究中的几个热点问题[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(9):1573 - 1577.
- [6] Ward J V. The four dimensional nature of lotic ecosystems[J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 1989, 8:2 - 8.
- [7] Petts G. *Impounded rivers: perspectives for ecological management*[M]. New York: Wiley, Chichester, 1984.
- [8] Voïšmarty C J, *et al.* The storage and aging of continental runoff in large reservoir systems of the world[J]. *Ambio*, 1997, 26:210 - 219.
- [9] 张二凤, 陈西庆. 人类活动对河流入海流量下降的影响——以长江黄河为例[J]. *华东师范大学学报*, 2002, 2:81 - 86.
- [10] 国家环境保护局自然保护司. *黄河断流与流域可持续发展*[M]. 北京:中国环境科学出版社, 1997.
- [11] Karr J R. Biological integrity: a long neglected aspect of water resource management[J]. *Ecol Appl*, 1991, 1:66 - 84.
- [12] Dynesius M, Nilsson C. Fragmentation and flow regulation of river systems in the Northern third of the world[J]. *Science*, 1994, 266:753 - 762.
- [13] Hart D D, Poff N L. A special section on dam removal and river restoration[J]. *Bioscience*, 2002, 52(8):653 - 655.
- [14] Meybeck M. Carbon, Nitrogen and Phosphorus Transport by World Rivers[J]. *Am J Sci*, 1982, 282:401 - 450.
- [15] 陈西庆, 陈吉余. 南水北调对长江口粗颗粒悬沙来量的影响[J]. *水科学进展*, 1997, 8(3):259 - 263.
- [16] Keeney D R. The nitrogen cycle in sediment-water systems[J]. *J Environ Quality*, 1973, 2:15 - 25.
- [17] Ward J V, Stanford A. The serial discontinuity concept of lotic ecosystems[A]. Fontaine T D, Bartell S W. *In Dynamics of lotic ecosystems* [C]. Michigan: Ann Arbor Science, 1983.
- [18] Naiman R J, Turner M G. A future perspective on North American 's freshwater ecosystems[J]. *Ecological Applications*, 2000, 10:958 - 970.
- [19] Ward J V, Stanford J A. *The ecology of regulated streams*[M]. New York: Plenum Press, 1979.
- [20] Muth R T, Crist L W, Lagory K E, *et al.* Flow and temperature recommendations for endangered fishes in the Green river downstream of Flaming Gorge dam. Lakewood (co): upper Colorado river Endangered fish recovery program[R]. Final report, Upper Colorado River endangered fish recovery program project FG- 53, 2000.
- [21] Wahby S D, Bishara N F. The effect of the River Nile on Mediterranean water before and after the construction of the High Dam at Aswan[A]. *In: River Inputs to Ocean Systems*, 1980.
- [22] Stumm W, Morgan J J. *Aquatic Chemistry*[M]. New York: Wiley, 1970.
- [23] Saito L, Johnson B M, Bartholow J, *et al.* Assessing ecosystem effects of reservoir operations using food web energy transfer and water quality models[J]. *Ecosystems*, 2001, 4:105 - 125.
- [24] Ligon F E, Dietrich W E, Trush W J. Downstream ecological effects of dams[J]. *Bioscience*, 1995, 45:183 - 192.
- [25] Kimmel B, Lind O, Paulson L. Reservoir primary production[A]. Thomson K, Kimmel B, Payne B. *Reservoir limnology, ecological perspectives*[C]. New York: Wiley, 1990.
- [26] Balba A M. Evaluation of changes in the Nile water composition resulting from the Aswan High dam[J]. *J Environ Qual*, 1979, 8:153 - 156.
- [27] Poff N L, Hart D D. How dams vary and why it matters for the emerging science of dam removal[J]. *Bioscience*, 2002, 52(8):659 - 668.
- [28] Scott M L, Friedman J M, Auble G T. Fluvial process and the establishment of bottomland trees[J]. *Geomorphology*, 1996, 14:327 - 339.
- [29] Wootton J T, Parker M E. Effects of disturbance on river food webs [J]. *Science*, 1996, 273:1558 - 1561.
- [30] Collier M, Webb R H, Schmidt J C. *Dams and rivers: primer on the downstream effects of dams*[M]. Reston (VA):US Geological Survey Circular no, 1126, 1996.
- [31] Pringle C M, Freeman M C, Freeman B J. Regional effects of hydrologic alterations on river macrobiota in the New World: Tropical temperate comparisons[J]. *Bioscience*, 2000, 50:807 - 823.
- [32] Nilsson C, Berggren K. Alterations of riparian ecosystems caused by river regulation[J]. *Bioscience*, 2000, 50(9):783 - 792.
- [33] Graf W L. Dam nation: a geographic census of American dams and their larger scale hydrological impacts[J]. *Water Resources Research*, 1999, 35:1305 - 1311.
- [34] Mander U, Kuusemets V, Krista L, *et al.* Efficiency and dimensioning of riparian buffer zones in agricultural catchments[J]. *Ecological En*

- gineering, 1997, 8: 299 - 324.
- [35] Stanley E H, Doyle M W. Phosphorus transport before and after dam removal from a nutrient-rich creek I southern Wisconsin[J]. Bulletin of the North American Benthological Society, 2001, 18:172.
- [36] 陈吉泉. 河岸植被特征及其在生态系统和景观中的作用[J]. 应用生态学报, 1996, 7(4):439 - 448.
- [37] 关文彬, 谢春华, 马克明, 等. 景观生态恢复与重建是区域生态安全格局构建的关键途径[J]. 生态学报, 2003, 23(1):54 - 73.
- [38] Kauffman J B, Beschta R L, Otting N, *et al.* An ecological perspective of riparian and stream restoration in the Western uniteds states[J]. Fisheries, 1997, 22(5): 12 - 24.
- [39] 尚宗波, 高 琼. 流域生态学——生态学研究的一个新领域[J]. 生态学报, 2001, 21(3):468 - 473.
- [40] Constanza R, d'Arge R, Groot R D, *et al.* The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. Nature, 1997, 387:253 - 260.
- [41] Moss B. Biodiversity in fresh waters - an issue of species preservation or system functioning[J]. Environm Cons, 2000, 27:1 - 4.
- [42] National Research council (US). Committee on restoration of aquatic ecosystems—science, technology and public policy[A]. Restoration of aquatic ecosystems[C]. Washington DC:National Academy Press, 1992.
- [43] Beschtra R L, Platts W S, Kauffman J B. Field review of fish habitat improvement projects in the Grande Ronde and John Bay River basins of eastern Oregon[A]. DOE/BP-21493-1. U. S. Department of Energy, Bonneville Power Administration[C]. Portland, OR, 1991.
- [44] Gregory S V, Bisson P A. Degradation and loss of anadromous salmonid habitat in the Pacific Northwest[A]. Stouder D J, Bisson A, Naiman R J. Pacific salmon and their ecosystems: status and future options[C]. New York: Chapman and Hall, 1997.
- [45] Uehlinger U. Resistance and resilience of ecosystem metabolism in a flood-prone river system[J]. Freshwater Biology, 2000, 45:319 - 332.
- [46] Case R L. Structure, Biomass, and succession dynamics of forested riparian ecosystems of the Upper Grande Ronde basin[D]. M. S. thesis Oregon State University, Corvallis, 1995.
- [47] Kauffman J B, Beschta R L, Platts W S. Fish habitat improvement projects in the fifteenmile Creek and Trout Creek basins of central Oregon: field review and management recommendations[A]. DOE/BP-18955-1. U. S. Department of Energy, Bonneville Power Administration, Portland, OR, 1983.
- [48] ASCE(American Society of Civil Engineers). Guidelines for retirement of dams and hydroelectric facilities[A]. New York: American Society of Civil Engineers, 1997.

Advances in effects of dams on river ecosystem^{*}

MAO Zhan-po, WANG Yu-chun, PENG Wen-qi, ZHOU Huai-dong

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

Abstract: River systems are the major transport channel between land ecosystem and aquatic ecosystem, but the constructed dams fragmented the river ecosystems, that can change their physical, chemical and biological characteristics. The detail effect of the dams are reviewed on the hydrological and hydrodynamic characteristics, the nutrients transportation, the structure and functions of the river ecosystem, and the corresponding measures for the ecological restoration. With larger dams as major component of the hydrological cycle, their effects on the watershed ecosystem health is increasing. We need to study their negative effects on the ecosystem and the corresponding restoration measures.

Key words: dams; river; ecosystems; ecological restoration

* The project is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 40103008) and Key Basic Research Programme of China (No. 2002CB41230).