

生态水工学理论及其在河流生态修复中的应用

刘 猛^{1,2} 夏自强^{1,2} 韩 帅²

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098 ;

2. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

摘要 简要介绍了生态水工学的基本理论, 分析了该学科在河流生态系统修复中的应用, 指出主要应用措施包括河道整治、水库工程、人工湿地及生态景观等生态水工技术。最后展望了生态水工学理论在河流生态修复中的研究前景。

关键词 生态水工学 ; 生态修复 ; 河流生态系统 ; 修复技术

中图分类号 :X171.4 **文献标识码** :B **文章编号** :1004-693X(2008)S1-0118-04

近代兴建水利工程的目的是为满足人们供水、防洪、灌溉、发电、航运、渔业及旅游等需求。水利工程为经济发展、社会进步发挥了巨大推动作用。同时, 水利工程在生态建设方面也同样具有积极作用, 通过调节水量丰枯, 抵御洪涝灾害对生态系统的冲击, 通过调节生态用水, 改善干旱与半干旱地区生态状况等。但是, 事物无不具有两重性, 一些水利工程的兴建, 在不同程度上降低了河流形态的多样性, 生境的变化导致水域生物群落多样性的降低, 使生态系统的健康和稳定性都受到不同程度的影响^[1]。人类活动对于生态系统造成的不利影响, 生态学中称为“胁迫(stress)”。

水利工程对于河流生态系统的胁迫主要表现在两方面: ①自然河流的渠道化。河流的渠道化改变了河流蜿蜒型的基本形态, 急流、缓流、弯道及浅滩相间的格局消失, 而横断面上的几何规则化, 也改变了深潭、浅滩交错的形势, 生境的异质性降低, 河流生态系统的结构与功能随之发生变化, 特别是生物群落多样性将随之降低, 可能引起淡水生态系统退化。②自然河流的非连续化。筑坝使流动的河流变成了相对静止的人工湖, 流速、水深、水温及水流边界条件都发生了重大变化。库区内原来的森林、草地或农田被淹没水底, 陆生动物被迫迁徙。水库形成后也改变了原来河流营养盐输移转化的规律。由于水库截留了河流的营养物质, 气温较高时, 促使藻类在水体表层大量繁殖, 产生水华现象。另一类非

连续性是由于筑堤引起的。堤防也有两面性, 一方面起防洪作用, 另一方面又妨碍了汛期主流与岔流之间的沟通, 阻止了水流的横向扩展, 形成另一种侧向的水流非连续性。堤防把干流与滩地和洪泛区隔离, 使岸边地带和洪泛区的栖息地发生改变。原来可能扩散到滩地和洪泛区的水、泥沙和营养物质, 被限制在堤防以内的河道内, 使得植被面积明显减少, 鱼类、无脊椎动物等大幅度减少, 导致滩区和洪泛区的生态功能退化。

1 生态水工学的基本理论

对于水利工程对河流生态系统的胁迫, 应该采取正视而不是回避的态度。现代科学发展使我们认识到, 传统意义上的水利工程学在力图满足人的需求时, 却在不同程度上忽视了河流生态系统本身的需求。而河流生态系统的功能退化, 也会给人们的长远利益带来损害。未来水利工程的进一步发展应吸收生态学的理论及方法, 促进水利工程学与生态学的交叉融合, 用以改进和完善水利工程的规划及设计理论, 形成水利工程学的新的学科分支——生态水利工程学(Eco-Hydraulic Engineering)。生态水利工程学作为水利工程学的一个新的分支, 是研究水利工程在满足人类社会需求的同时, 兼顾河流生态系统健康与可持续性需求的原理与技术方法的工程学^[2-3]。

现在的水利工程学的学科基础主要是水文学和

水力学、结构力学、岩石力学等工程力学体系。学科的进一步发展需要吸收生态学的理论及方法,促进水利工程学与生态学的交叉融合,用以改进和完善水利工程的规划方法及设计理论。所以生态水利工程学将是一门交叉学科,也是一门应用性工程学科。

生态水工学的基本原理包括遵循生态系统的自我设计、自我组织、自我修复和自我净化的规律;研究河流生态系统的特点,不同区域水文与水质因子与生物群落的相关关系,水利工程与河流生态系统的交互作用,生态型水利工程对生态系统补偿的原理和机制等。

2 在河流生态系统修复中的应用

2.1 国内外研究概况

面对河流治理中出现的水利工程对生态系统的某些负面影响问题,西方工程界对水利工程的规划设计理念进行了深刻的反思,认识到河流治理不但要符合工程设计原理,也应符合自然原理。在工程实践方面,20世纪80年代阿尔卑斯山区相关国家——德国、瑞士、奥地利等国,在山区溪流生态治理方面积累了丰富的经验。莱茵河“鲑鱼——2000”计划实施成功,提供了以单一物种目标的大型河流生态的经验。90年代美国的凯斯密河及密苏里河的生态修复规划实施,标志着大型河流的全流域综合生态修复工程进入实践阶段。

近20年来,随着生态学的发展,人们对于河流治理有了新的认识。认识到水利工程除了要满足人类社会的需求以外,还要满足维护生物多样性的需求,相应发展了生态工程技术和理论。河川的生态工程在德国称为“近自然河道治理工程”,提出河道的整治要符合植物化和生命化的原理。在日本被称为“多自然型建设工法”或“生态工法”,在美国则被称为“自然河道设计技术”。一些国家已经颁布了相关的技术规范和标准。

近年来,我国水利部门开始关注河流生态系统建设问题,提出了保持河流最低生态需水量的问题,开展了相关的科学研究和试点工作。同时,连续几年实施了塔里木河、黑河等调水行动,改善河流的水文条件,对于遏制这些河流生态系统退化发挥了明显作用。另外,我国东南部一些省份结合河道整治和防洪建设开展河流环境建设。特别是一些大中城市把河流整治与城市景观建设相结合,水利工程又被赋予了休闲、旅游等新的功能。

2.2 河流生态系统修复技术

生态水工学理论是水体生态修复的重要依据。

其指导思想是人与自然和谐共处,就是水利工程在满足人对水的多种需求的同时,为保持和提高生物多样性提供必要的生境条件。目前,运用较多、较成功的生态修复技术有:河道整治、水库工程、人工湿地及生态景观等。

2.2.1 河道整治

河流在长期的自然演变中,受河谷坡度与宽度、河床和河岸材料等的影响,会自然地形成一种蜿蜒的形态各异的地貌^[4],即河流形态多样性,它是流域生态系统生态环境的核心,是生物群落多样性的基础^[5]。河道整治包括河道形态修复和河床修复,具体措施有裁弯取直段的复原、更换河床材料、拆除大坝、岸线改造等。河道整治的修复可引起河流的水文水力条件发生变化,通过水沙的相互作用,重新创造出一系列的深潭、浅滩、边滩等河流自然形态以及急流、缓流、近岸的洄流、适合各种生物生存和繁殖的流场等。

2.2.2 水库工程

众所周知,兴建的大量水利工程满足了人们对供水、防洪、灌溉、发电、航运、渔业及旅游等需求,水利工程对于经济发展、社会进步的作用巨大。水利工程在生态建设方面也同样具有积极作用,通过调节水量丰枯,抵御洪涝灾害对生态系统的冲击,改善干旱与半干旱地区生态状况以及调节生态用水等方面,水利工程同样贡献巨大。

水库工程创造了大型人造湖泊,改变了当地环境和景观。有时,这种局部气候和当地栽培结构的改变有利于当地库周围区域农业栽培的发展。成功的例子可在葛洲坝、丹江口、东江库区发现。建设大坝也能改善水生环境和促进渔业发展。因此,通过库区的综合开发计划,有可能提供更好的条件发展新的栽培业和渔业,改善当地人民的生活条件。发展旅游是大坝建设带来的另一好处,许多水库都已成为著名的风景区,吸引了大量旅游者和当地居民参观访问。通过合理的景观设计和重建,某些具有广阔水面的平原水库成为非常美丽的公园和鸟的栖息地。黄河三角洲的平原水库已获得天鹅湖的称号,极大地促进了当地旅游业的发展。利用水库蓄水向湿地、干枯的湖泊补水,改善生态环境。如最近正在进行的利用岳城水库向干枯的白洋淀补水。

2.2.3 人工湿地

湿地是重要的滨岸带景观,具有丰富的资源、独特的生态结构和功能。如果没有湿地,流域将丧失维持生物地球化学平衡的能力,深水系统也将失去对高地的缓冲^[6]。在洪水季节,当水体冲出河道进

入一个植被覆盖的湿地滨岸带时,这些植被的根,尤其是扎根较深的植被,能固定土壤,减轻水流对土壤的冲刷。地上部分可吸收水流能量,降低流速与侵蚀能力,过滤颗粒物和动植物残骸。此外,植被还有一个重要的作用,即有效地吸收、过滤有机污染物,净化河流水体,也可使河水免受来自陆地污染水体的影响。

人工湿地系统是将土壤和填料(如卵石等)填入具有一定形状的洼地中,组成填料床,床体表面种植芦苇或其他水生植物,污染水体可以在床体的填料缝隙或床体表面曲折地流动,污染物通过沉淀、过滤作用被截留,进而被微生物利用或被植物吸收。人工湿地污水处理技术具有处理效果好、出水水质稳定、氮磷去除能力强、对负荷变化适应能力强等特点。研究表明,在进水浓度较低的情况下,人工湿地对BOD₅的去除率可达85%~95%,对COD的去除率可达80%。

2.2.4 生态景观

进行河流生态修复规划的尺度应该是流域,而不是区域,也不能仅仅局限于河流廊道本身或者局限于具体河段,要从生态系统的结构和功能出发,掌握生态系统各个要素间的交互作用,提出修复河流生态系统的整体、综合的系统方法,而不是仅仅考虑河道水文系统的修复问题,也不仅仅是修复单一动物或修复河岸植被。

以流域作为尺度进行河流生态修复规划更能反映生态系统整体性特征。河流具有上中下游连续性的特征,才使得河流成为物质流、能量流和信息流的载体,成为水生生物的生命线。河流生态修复不可将河流的上下游、左右岸割裂开来,孤立地修复某一区域或者某一河段的生态。在进行河流修复时应全面考虑所修复河段上下游、干支流的形势,要综合研究流域内河流、湖泊、水塘、湿地、地下水、农田、森林、草地、道路、城镇等缀块——廊道——基底镶嵌体的结构和生物过程,进行一体化的生态修复规划。

在流域尺度下需要研究改善全流域景观的空间格局配置,达到河流生态修复的目的。需要合理规划各种类型的缀块的数量、几何特征、性质,充分发挥河流廊道连接孤立缀块的功能。还要研究河流廊道与其他形式的廊道的协调关系,比如沿河林带、沿河公路等。运用边缘效应、临界阈值理论、渗透理论、等级理论、岛屿生物地理学理论等景观生态学理论,采取调整土地利用格局,增加景观多样性,引入新的景观缀块,建立基础性缀块,运用不同尺度的缀块的互补效应等措施,谋求提高景观格局的空间异质性。

2.3 应用实例

2.3.1 我国塔里木河生态修复

塔里木河是我国最大的内陆河,流域面积102万km²,全长1321km,水资源总量429亿m³。流域平均年降雨量仅40mm,属于极端干旱区。由于水资源管理不善,用水无度,水资源利用效率低,导致下游大西海子以下363km河道自20世纪70年代起断流。生态系统严重破坏,胡杨林面积减少,草场退化,沙漠化面积增加。为了抢救塔里木河下游日益恶化的生态系统,2000年5月起,水利部组织4次向塔河下游应急输水,博斯腾湖累计输出13多亿m³,大西海子水库下泄7亿m³,重现台特玛湖,结束了塔里木河下游300多km河道近30年的断流历史,挽救了濒临消亡的沙漠植被,胡杨柳复苏,天鹅返回,生态系统呈现恢复势头。

2.3.2 美国基西米河生态修复

美国基西米河原是一条地貌形态多样、生物资源丰富的蜿蜒型河流。20世纪60年代水利工程的建设,导致该河流生态系统发生了严重退化。为了恢复河流原有的生态面貌,当局进行了一系列的生态修复实验,包括连续回填被渠道化的河道,开挖新的河道,重新连接原有自然河道,同时建设中还加强了干流与洪泛区的连通性,为鱼类和野生动物提供了丰富的栖息地,重建阔叶林湿地栖息地等,使涉水鸟禽类可充分利用洪泛区的湿地。近年来的监测结果表明,这些措施已引起河道洪泛区栖息地的物理、化学和生物的重大变化,生物栖息地形式增加,溶解氧水平显著提高,洪泛区阔叶林湿地得到了恢复,许多已经匿迹的鸟类又重新返回基西米河。

2.3.3 欧洲莱茵河生态修复

莱茵河流域内有瑞士、德国、法国、比利时和荷兰等9国。二次大战以后莱茵河沿岸国家工业急剧发展,造成污染不断蔓延。到20世纪70年代污染风险加大,大量未经处理的有机废水倾入莱茵河,导致莱茵河水的氧气含量不断降低,生物物种减少,标志性生物——鲑鱼开始死亡。1986年,在莱茵河上游史威查豪尔发生了一场大火,有10t杀虫剂随水流进入莱茵河,造成鲑鱼和小型动物大量死亡,其影响河长达500多km,直达莱茵河下游。成立于1950年的莱茵河保护国际委员会(ICPR)于1987年提出了莱茵河行动计划,得到了莱茵河流域各国和欧共体的一致支持。这个计划的鲜明特点是以生态系统恢复作为莱茵河重建的主要指标。主攻目标是:到2000年鲑鱼重返莱茵河,所以将这个河流治理的长远规划命名为“鲑鱼——2000计划”。这个规划详细提出了要使生物群落重返莱茵河及其支流所需要

提供的条件,治理总目标是莱茵河要成为“一个完整的生态系统的骨干”。到2000年莱茵河全面实现了预定目标,沿河森林茂密,湿地发育,水质清澈洁净。鲑鱼已经从河口洄游到上游——瑞士一带产卵,鱼类、鸟类和两栖动物重返莱茵河。

3 研究前景展望

从技术层面上看,有以下问题值得重视和研究:

a. 从水利工程规划设计的指导思想看,建设水利工程的目的是不仅应满足人们对水的需求,同时要满足维持河流生态系统健康的需求,其中的关键问题之一是尽可能地保护河流形态的多样性。

b. 新建水库工程要充分论证由于水库建设改变河流生态系统为静水生态系统的利弊得失,采取必要的补偿工程措施和生物措施。

c. 开展已建水库的生态系统健康评估与预测,加强库区生物群落调查,注重水库生态系统退化的恢复及富营养化控制问题,通过水库库区生态建设及水生生物的合理结构设计,提高水库水体自净能力和自我修复能力,开发与推广生态系统的治污技术,开发人工湿地、生物廊道、生态浮岛等经济实用技术。

d. 合理调度水库及其他水利设施。水库调度在满足人的需求的同时,兼顾生态系统的健康需求,克服静水、深水对生物群落的不利影响。充分利用乡土种生物,慎重引进外来物种,防止生物入侵。

e. 保持河流的蜿蜒性是保护河流形态多样性的重点之一。在河道整治工程中,尊重天然河道形态,避免直线和折线型的河道设计。灌溉渠道设计也要注意模仿河流自然形态的特点。对于河流的裁

弯取直工程要充分论证,取慎重态度。

f. 保持河流断面形状的多样性,尊重河流原有的自然断面形态。河道整治工程中应尽可能避免采用几何规则断面,疏浚工程施工中避免河道断面的均一化。

g. 河道防护工程的岸坡采用有利植物生长的透水材料,特别注意采用当地天然材料。注意整理、发掘和发展我国各地的传统治河工法和材料。开发和推广输水渠道新型衬砌材料,可供植物生长并具有一定防渗性能。

h. 水利工程设计应为植物生长和动物栖息创造条件,提供鱼类产卵条件以及鸟类和水禽栖息地和避难所,建设符合生态学原理的过坝鱼道,开发新型丁坝、人工浮岛及生态型城市雨洪利用系统技术。

参考文献:

- [1] 董哲仁. 水利工程对生态系统的胁迫[J]. 水利水电技术, 2003(7):1-5.
- [2] 董哲仁. 生态水工学的理论框架[J]. 水利学报, 2003(1):1-6.
- [3] 董哲仁. 河流生态恢复的目标[J]. 中国水利, 2004(10):1-5.
- [4] PETERSEN M M. A natural approach to watershed planning, restoration and Management[J]. Water Science Technology, 1999, 39(12):347-352.
- [5] 董哲仁. 保护和恢复河流形态多样性[J]. 中国水利, 2003(11):53-57.
- [6] MITSCH W J. Restoration of our lakes and rivers with wetlands-an important application of ecological engineering[J]. Water Science Technology, 1995, 31(8):167-177.

(收稿日期 2008-03-17 编辑 徐娟)

(上接第117页)

采用地膜覆盖措施,平均每年减少土壤水损失16263万 m^3 。采用秸秆还田措施,增加土壤有机质和土壤含水率,平均每年增加土壤贮水量58069 m^3 。

减少土壤水蒸发、充分利用土壤水的措施有秸秆覆盖、地膜覆盖、秸秆还田以及非土壤水调控充分灌溉技术等,可以根据当地的水资源情况和地理地质特点,灵活运用,以达到保护和充分利用土壤水的目的。

参考文献:

- [1] 刘昌明. 水文水资源研究理论与时间[M]. 北京:科学技

术出版社, 2004:425-431.

- [2] 王浩, 王建华, 贾仰文, 等. 现代环境下的流域水资源评价方法研究[J]. 水文, 2006, 26(3):18-21.
- [3] 崔毅. 农业节水灌溉技术及应用实例[M]. 北京:化学工业出版社, 2005.
- [4] 韩永俊, 尹大庆, 赵艳忠. 秸秆还田的研究现状[J]. 农机化研究, 2003(2):34-40.
- [5] 关连珠. 普通土壤学[M]. 北京:中国农业大学出版社, 2007:37-57.

(收稿日期 2008-06-06 编辑 高渭文)