

美国基西米河生态修复工程的经验

吴保生, 陈红刚, 马吉明

(清华大学 水利水电工程系, 北京 100084)

摘要:美国佛罗里达州基西米河1962~1971年的河道渠化工程, 将本来蜿蜒的天然河流变成了几段近似直线的人工运河, 提高了河道的排洪能力, 但同时也对河流生态环境造成了严重的负面影响。为了恢复河流原有的生态面貌, 进行了一系列的生态修复试验, 包括改变上游水库的运用方式, 塑造具有季节性变化的来流条件; 修建拦河坝, 人为抬高水位以恢复两岸的湿地; 回填被渠化的河道, 恢复其自然蜿蜒状态。基西米的经验告诉我们, 在利用渠化工程行洪时, 不可忽视其对生态影响; 通过恢复河道的自然水文水力条件进而重建其生态环境是有效措施。

关键词:基西米河; 河道渠化; 河流生态; 生态修复

中图分类号: X171.4 **文献标识码:** A

河流是一个与河道形态和水流运动特性密切相关的生态系统, 河道的形态特征和水流运动特性决定了河流及其两岸生物群落的多样性和完整性。人们为了自身的安全和利益, 通常兴修水利工程和进行河道整治, 结果导致河流的长度缩短, 浅滩和深潭消失, 沿河的洪泛平原和湿地消失, 沿河两岸的植被减少^[1]。河流地貌形态和水力特性的这些变化, 改变了河流原有生态系统的能量交换和物质循环过程, 进而改变系统内各个要素之间的有机联系, 破坏系统的稳定性, 造成河流生态环境的退化。河流生态环境的退化严重影响了人类对河流的可持续利用, 我国对修复严重受损河流生态系统的要求越来越迫切^[1~8]。河流生态修复就是重建受损生态系统的功能及有关物理、化学和生物特征, 恢复生态系统的原有结构和功能, 再现一个自然的、能自我调节的河流生态系统^[2]。河流是一个具有流动特性的生态系统, 水流不仅以化学成份和物理性质的变化影响河流生态系统, 而且还以其流量、水位、水力坡度、流速、泥沙输移等水动力特性改变河流生态系统。通过调整河流的水力特性以达到河流生态的要求, 是河流生态系统修复的一个重要途径, 已经引起了河流管理与生态保护工作者的高度重视。

位于美国佛罗里达州的基西米河(Kissimmee River), 出于防洪的需要于1962~1971年进行了渠化, 将蜿蜒的自然河道改造成了几段近似直线的人工运河, 达到了尽快渲泄洪水的目的。然而渠化后的河道及其两岸的生态环境遭到严重破坏, 从20世纪70年代后半期开始, 美国相关部门组织了一系列基西米河生态修复试验, 并于1990年开展了大规模的生态修复工程, 包括改变上游水库的运用方式、修建拦河坝、回填被渠化的河道等, 以便恢复河道原有的自然水文水力条件, 进而修复其生态环境系统。本文将对基西米河生态的修复研究和实践加以总结, 以便于我国的河流生态环境建设借鉴应用。

1 河道渠化工程

基西米河位于美国佛罗里达州中南部, 经由基西米湖向南流入奥基乔比湖(见图1), 以基西米湖出口

收稿日期: 2004-01-02

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(2003CB415206)

作者简介: 吴保生(1959-), 男, 河南安阳人, 博士, 教授, 主要从事水力学及河流动力学研究。

E-mail: baosheng@tsinghua.edu.cn

为界分为上游和下游。流域总面积为6 320km²(不包括伊斯卡托波加湖),其中上游41 230km²,下游2 000km²。介于基西米湖和奥基乔比湖之间的干流,渠化前在长约90km、宽1.6~3.2km的河漫滩上蜿蜒盘行166km,水深一般为0.3~0.7m。由于降雨充沛、季节差异较大,使得水流具有明显的丰枯特点。加上河道的自然蜿蜒状态,河水流动非常缓慢,河水经常漫过自然河岸,在两岸滩地上形成约140km²的沼泽和湿地,为各种水生生物提供了极为适宜的生存条件,有多达300种以上的野生动植物栖息其中。整个基西米河流域内湿地生物群落发育繁荣,食物链复杂,是佛州重要的自然生态环境和旅游资源。

随着区域社会经济的发展,出于防洪排涝的需要,基西米河在1962~1971年期间逐渐被渠化为一条长90km,深9m,宽仅100m的几段近似直线的人工河道组成的运河,河长缩短了38%,河道的过流能力得到提高,可以防御5年一遇洪水。此外,为了航运的需要沿河修建了6级拦河坝,除最上游一级直接控制基西米湖的出流外,沿河形成5级河道型水库(见图1)。

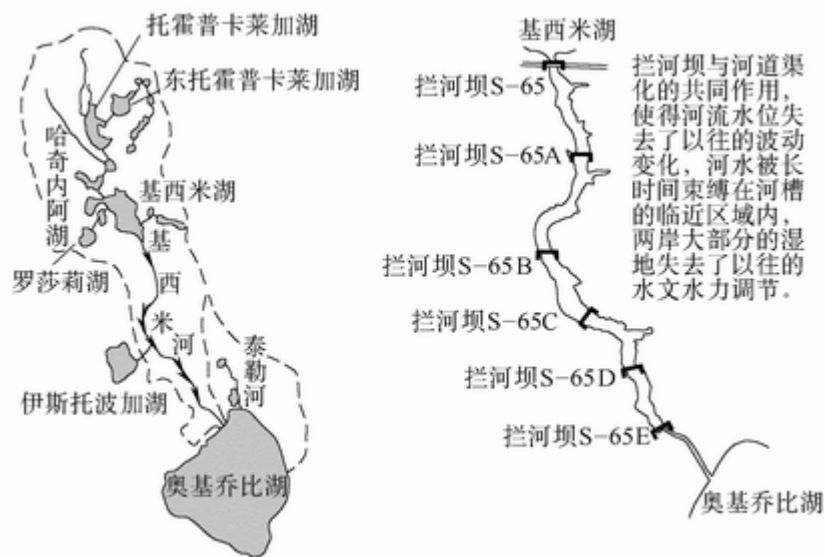


图1 基西米河流域和渠化后的河道和系列水库分布示意

随着渠化工程的实施,河流周边地区的生态系统发生了急剧变化。首先,堆放开挖河槽的泥土占用了滩地面积约32km²,其中湿地面积约25km²。更重要的是,渠化工程和拦河坝控制破坏了以往的自然水文水力条件。由于每一级库区的水位基本保持不变,使得季节性的水位浮动消失,水流失去了大面积漫滩的机会,两岸原有的大片河滩沼泽湿地由于缺水而迅速消失,减少面积达105~125km²。此外,部分原有沟道和河槽却因为长期的低流量或者无流量状态使得其中滋长了大量的外来浮游植物,死去植物所形成的有机质堆积层消耗了水体中大部的溶解氧,恶化了水质,影响到下游区域的引水。而各种生活其中的鱼类和水禽也因为赖以生存的自然环境的破坏而渐渐减少消失,原有的食物链遭到破坏^[9]。

2 生态修复示范工程

20世纪70年初期开始,基西米河流域由于河道渠化造成的生态破坏局面受到重视。1976年,佛州议会通过了《基西米河生态修复法案》,从而确立了对基西米河生态系统修复的尝试。由美国陆军工程兵团(U. S. Army Corps of Engineers)负责,于1975~1985年研究了基西米河防洪工程的影响。最初的目标主要是修复沼泽湿地和改善基西米河的水质,这使得后继的工作相对狭小地集中在如何恢复湿地植被和如何改善水质上,特别是富营养化问题。提出的比选方案包括维持现状计划、部分回填计划、整合湿地计划、以及示范工程计划等7个方案。由于当时对方案的评估仍然是以获得最大经济效益为目的,没有把恢复生

态环境作为最主要的目标，结果认为联邦政府不必介入基西米河防洪工程的改建。

在联邦政府第一次可行性研究的基础上，南佛罗里达水资源管理局在1984~1990年开展了基西米河示范工程，如图2所示。工程的主要内容是在拦河坝S-65A和S-65B之间横跨河道修建3个拦河坝，安装有可以开启的钢制拦河闸，并预留开口以保证通航，将来水抬高并引导到运河两旁原有的河道和河滩湿地里，同时通过调整上游水库运用方式，在面积达11km²的湿地上重新形成原有的季节性水位浮动，营造一个水流能漫溢的沼泽湿地生态系统。

示范工程在有限河漫滩上重新塑造出了渠化前的水流流动方式。水位浮动和回水增加了河滩沼泽地带的淹没频率，恢复到河道渠化前原有频率的25%，因此形成的沼泽地与河道间的水流交换将沼泽地里的有机质累积层重新带回河道内，使原有的沙质覆盖层得到了更新。动植物也对示范工程显现出积极的反应，植物群落新的适宜的水文环境条件下，开始重塑原有的自然状态，无脊椎动物、鱼类、水鸟以及涉禽也因为自然生态环境的恢复而开始重现。所有原有的动植物无论在种类和数量上都得到了增加，这一切积极的效果都说明了示范工程中所采取的措施是有效的，可以通过恢复原有的

的水文环境来修复流域的生态功能。

1988年10月南佛罗里达水资源管理局在奥兰多市召开了基西米河生态修复研讨会。会议基于示范工程得到的成果和发现，确定了基西米河生态系统修复的环境目标，即重建基西米河生态系统的生态完整性(Ecological Integrity)。同时，提出了用于描述河流生态系统完整性和健康性的5类参数(见表1)，形成了一套有价值的生态修复理论。

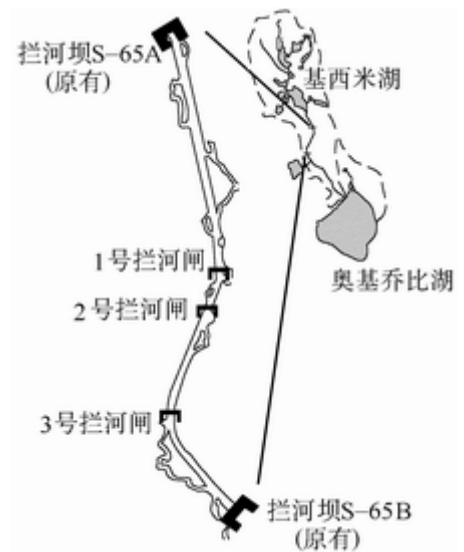


图2 基西米河示范工程布置

表1 描述流域生态系统完整性的5类参数

编号	类别	参数描述
1	能量	系统中能量循环的数量、能量种类的来源和有效能量的季节性特点。
2	水质	水质参数，包括混浊度、pH值、溶解氧水平、营养物质的输入以及水中的化学物质、重金属含量。
3	栖息地质量	生物栖息地的水深、流速以及所有生物需要的适应环境。
4	水文水力学	水文水力条件、水体容量及其空间分布和流量分布。
5	生物间作用	生物间的交互作用，如种群间的竞争、捕食等自然状态。

应该指出，上述5类参数不是独立的，虽然都能适用于流域生态系统，但在具体情况下还是具备主次关系的。对于渠化前的基西米河流域，水文水力条件起到的是主要作用，最终水质的恶化、生物栖息地的损失和系统能量循环的破坏等都是由于以往的水文水力环境不再得以维持而造成的。研究的结论认为，由于特定的水文水力过程维持了基西米河原有的生态系统平衡，所以通过重新控制并形成原有的自然水文水力状态，就可以最大限度地达到修复工程的目的。或者说，自然的水文水力过程可以修复复杂的生态系统，并维持其环境特性。这一概念得到了示范工程的证明^[9]。依据这一指导原则，研究组最后得出结论，修复工程的基本目标就是尽可能地重建渠化前的水文水力特性，并针对基西米河生态修复工程制定了表2的水文水力标准。

表2 基西米河生态恢复工程水文水力标准

编号	参数要求	参数效果
1	形成与渠化前可比的水流状态,包括持续时间和变幅。7~10月维持水流持续流动,最大流量应出现在9~10月,最小流量应出现在3~5月。	提供水体更新,在夏秋两季维持适宜的溶解氧水平;在春季鱼类的繁殖期保证水流连续,恢复流域内生物栖息地的时空完整性。
2	当水流通过河道时,平均流速介于0.3~0.6m/s。	保护河流生态区免受过渡的冲刷,维护对生物有重要意义的食物来源和繁殖条件。
3	当流量大于40~56m ³ /s时,水位流量关系应该能保证水位高于滩岸而淹没两岸大部分的滩地。	重建河道与两岸滩地之间的物理、化学及生物交换功能。
4	水位的回落速度一般不超过每月0.3m的量级。	维护河水与滩地间相互交换,维持一定水质,特别是对于区域内的水禽水鸟有重要作用。较为缓慢的排水速度保证了水中的鱼虾数量,给处于繁殖孵化期的水禽提供足够的食物来源。
5	无论在各季节内或长时期内,河滩沼泽被淹没的频率都要与渠化前的频率可比。	能够维持适宜的季节性干湿水文特性循环,从而在时间、空间上维持原有水文特性,不至于长期处于缺水状态。

修复计划中,最重要的限制因素是两岸的防洪需要。这就是为什么在随后展开的基西米河生态修复工程中只有35.4km的河道(两湖之间的渠化河道全长90km)被回填,涉及的河道附近多是没有人居住的地带。

3. 大规模生态修复工程

根据1988年10月基西米河生态修复研讨会制定的标准和目标,南佛罗里达水资源管理局在1990年提出了《可选方案评估与初步设计报告》,提出了一系列的修复流域生态的比选工程计划,主要有:(1)拦河坝计划:新建10个拦河坝,抬高水位,使河水能漫溢到两岸的河滩沼泽;(2)堵塞计划:新建10个永久的河道塞堵结构,同样起到抬高水位、引流入滩的作用;(3)一级回填计划:回填10个部位,将水引导到渠道附近的原有河道,保留部分现有建筑;(4)二级回填计划:从拦河坝S-65B形成的水库中部开始,持续回填河道一直到拦河坝S-65E以北3.2km处。该计划将拆除3个拦河建筑物(S-65B、S-65C和S-65D)和相关溢洪道、附属建筑以及束水堤(后实际改为2个:S-65B和S-65C)。随后对上述比选方案的评估认为^[10],拦河坝计划、塞堵计划以及一级回填计划不能满足生态修复的目标。这些计划有可能形成过大的河流流速、过快的水位回退速度以及不充分的浸没条件,通过在84km长的河道上和97.1km²的滩地上重建渠化前的水文特性,二级回填计划可以达到生态恢复的目标。一级回填计划可以恢复面积约为90.6km²的河流系统的生态完整性。

1990年美国陆军工程兵团负责展开了第二次可行性研究。研究以南佛罗里达水资源管理局提出的二级回填计划为基础,集中在如何具体实施基西米河生态修复工程,并对其效果进行跟踪观测和研究。整个工程可以分为上游生态复兴工程和下游二级回填工程,从奥兰多市以南一直向南延伸到奥基乔比湖(包括了整个基西米河的上下游流域),共计7 000多km²。工程总费用1997年估价为4.14亿美元,为最初渠化工程费用的8倍,其中一半的资金来源于佛州拨款,另外一半由联邦政府提供。

3.1 基西米河上游生态复兴工程 该部分是下游回填工程的基础和前提,其目的是通过调整上游一系列湖链间湖水的调节方式和调控设施,在上游的湖中形成更明显的或者恢复到渠化前的水位浮动,进而重新形成具备季节性特点的水流从基西米湖流入下游。涉及的工程改建有:对入汇基西米湖的C36和C37两条运河的扩宽改进,提升基西米河南出口处的拦河坝S-65的过流能力等^[11]。目前上游区域的工程已绝大部分完成^[12]。

3.2 基西米河下游二级回填工程 下游工程的目的是回填部分被渠化的河道,恢复到渠化前的自然蜿蜒状态,加上上游来水的调整,形成原有的季节性水位浮动,最终达到全面重塑基西米河生态系统的目的。工程将回填共计35.4km的渠化河道,重新开挖渠化工程中被回填掉的原有大约14.5km的河道,以配合部分残余河道连接形成蜿蜒形态的河道,还将拆除S-65B和S-65C两处拦河坝,此外还有一系列相应的河堤改造、附属设施更替等。整个回填工程开始于1999年春,最终计划在2010年全部完成。

为了对生态修复的效果进行监测,在工程进行的同时,组织实施了4个监测项目:(1)生态监测,包括有野生物种监测、濒危物种监测、鱼类栖息地分析、水质监测以及生态功能研究等;(2)水力监测;(3)泥沙淤积监测;(4)工程稳定性监测。

4 结语

始于20世纪70年代后期的基西米河生态修复工程是人类在认识、反省人为因素对流域生态环境的破坏,并因此探索、改造直至恢复自然环境、实现生态和谐的一次主动尝试,具有重要的实践意义和借鉴作用。应该指出的是,整个基西米河生态修复工程不仅仅是一个独立流域内的生态问题,它的指导意义还在于为其它更大的类似区域提供了有益的尝试和实践经验。

从基西米河生态修复工程的实践过程看,已经显现出的效果无疑是积极而有效的。其主要经验可以归纳为:(1)抓住了影响河流生态系统的关键因素,即水文水力的季节性波动特性,所有生态修复工程措施都是以恢复河流的自然水文状态和水流运动方式为标准,通过恢复原有的水文环境达到修复生态功能的目的;(2)对于受到影响的河流生态系统,尽早开展了相关的研究和工程措施,在原有湿地生态系统的功能刚刚失衡、但还未形成深层次的功能损坏前进行了修复,使得恢复成功的可能性得到了保证;(3)合理协调了上下游的水文与流量关系,积极的上游湖水调控措施无疑是下游恢复工程的重要保证;(4)有效利用了原有滩地中的河道和沟渠,使得河水上滩后能迅速恢复到原有的水文分布状态。

从基西米河的生态修复工程措施和结果来看,河道渠化应遵循这样一个生态平衡的指导原则,即在追求河道过流能力的同时,不要完全割断主河槽与河漫滩之间的有机联系,保留一定的槽蓄作用,使河槽与滩地具备上水更新的能力。在利用渠化工程行洪的同时,不可忽视由此引发的生态变化,一旦渠化工程产生了负面影响,通过恢复河道的自然水文水力条件进而重建其生态环境是一种标本兼治的有效措施。

参考文献:

- [1] 王薇,李传奇. 河流廊道与生态修复[J]. 水利水电技术, 2003, (9): 56-58.
- [2] 姜跃良,王美敬,李然,罗麟. 生态水力学原理在城市河流保护及修复中的应用[J]. 水利学报, 2003, (8): 75-78.
- [3] 孙宗凤. 国外生态水利研究状况分析与点评[J]. 水利水电技术, 2003, (11): 21-23.
- [4] 董哲仁. 生态水工学[J]. 水利水电技术, 2003, (1): 14-16.
- [5] 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.
- [6] 董哲仁. 生态水工学的理论框架[J]. 水利学报, 2003, (1): 1-6.
- [7] 董哲仁. 河流形态多样性与生物群多样性[J]. 水利学报, 2003, (11): 1-6.
- [8] 董哲仁. 生态水工学的工程理念[J]. 中国水利, 2003, (1): 63-66.
- [9] South Florida Water Management District. Central and Southern Florida Project, Environmental Restoration

of the Kissimmee River, Florida: Final Integrated Feasibility Report and Environmental Impact Statement [R]. Florida: U. S. Army Corps of Engineers, 1992.

[10] U. S. Environmental Protection Agency. Notes on Environmental Restoration: In Florida, Corps of Engineers' Kissimmee River Restoration Aims To Return to Re-Channelization Environmental Conditions[R]. Florida: South Florida Water Management District, 1992.

[11] U. S. Army Corps of Engineers. Central and Southern Florida Project, Kissimmee River Headwaters Revitalization Project: Integrated Project Modification Report and Supplement to the Final Environmental Impact Statement[R]. Florida: U. S. Army Corps of Engineers, 1996.

[12] South Florida Water Management District. Kissimmee River Restoration Projects Progress[EB/OL], http://www.sfwmd.gov/org/erd/krr/construct/krr_const_sum.pdf, 2002.

Review of the ecosystem restoration of Kissimmee River in USA

WU Bao-sheng, CHEN Hong-gang, MA Ji-ming
(Tsinghua University, Beijing 100083, China)

Abstract: The Kissimmee River, a naturally meandering stream, was reformed into a man-made canal from 1962 to 1971. The channel consists of several basically straight reaches. The discharge capacity of the river was improved after channelization and the flood control standard was elevated. At the same time, the adverse effect on ecosystem of the river basin emerged. Studies and experiments were carried out for restoration of the ecological function of the river and a large-scale river restoration project for the whole river was launched in 1990. The restoration plan includes the modification of water regulation schedule for upper chain of lakes to reestablish seasonal inflow to the lower basin, building the flow-control structures to raise water levels and floodplain inundations frequency, backfilling of the earth to the canal and restoring the meandering characteristic of the river. The lesson of the Kissimmee River shows that proper consideration should be given to the adverse ecological effects when channeling a river to improve its flood control capacity.

Key words: Kissimmee River; river channelization; river ecosystem; ecosystem restoration