

# 闸坝的水文水环境效应及其量化方法探讨

张永勇<sup>1,2</sup>, 夏 军<sup>1</sup>, 翟晓燕<sup>1</sup>

(1. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072;

2. 中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101)

**摘 要:** 如何正确处理流域开发与生态环境保护的关系, 客观评价闸坝对生态环境的影响, 是我国流域管理中亟待解决的科学问题之一。本文从河流的自然特性入手, 剖析了闸坝修建和调控引起的水文水环境效应, 探讨了闸坝对河流水量水质影响评价的理论基础、关键内容和技术手段等, 提出了基于流域水循环过程认识和模拟的闸坝效应量化体系和分析方法; 并以我国水利工程最密集、污染最严重的淮河流域为例, 初步探索了流域闸坝的水文水环境效应。研究可为多闸坝调控流域水资源开发利用和水污染治理提供理论支持, 为实现流域综合管理及社会经济可持续发展作出贡献。

**关 键 词:** 闸坝; 水文情势; 水环境; 研究框架; 淮河流域

doi: 10.3724/SP.J.1033.2013.00105

## 1 引言

20 世纪中期, 随着全球经济的复苏和人口的膨胀, 人们修建了大量水利工程以抵御洪水威胁并满足日益增长的水资源需求(朱美荣, 1999)。闸坝的数量成为当时衡量一个国家或地区发达程度和人类改造自然能力的重要标志之一。据国际大坝委员会统计, 1998 年全球 140 多个国家已建成大坝(坝高超过 15 m 或库容超过 300 万 m<sup>3</sup>)达 49248 座, 水闸至少 800000 座(McCully, 1996; Tharme, 2003), 其中发展中国家大坝约占总数的 2/3, 中国大坝约有 2200 座(Postel et al, 2003; WCD, 2000)。目前, 世界上有 60% 以上的河流受水利工程控制, 预计到 2025 年将达 70%; 大坝控制了美国和欧盟领土的 60%~65% 的河流; 而亚洲近一半的河流受到闸坝影响(Revenga et al, 1998)。

闸坝在防汛抗旱、蓄水发电、水产养殖、交通运输和休闲旅游等方面起着举足轻重的作用, 但工程建设切断了河流, 极大地改变了河流的自然状态, 产生一系列严重后果, 如泥沙淤积、河床加高, 河流水体污染加剧, 上下游生境破坏, 洄游鱼类通道隔绝, 生物多样性减少等(Powell, 2002; 索丽生, 2005; Wu et al, 2003)。如阿斯旺大坝破坏了尼罗河流域

的生态平衡(Powell, 2002); 黄河筑坝导致下游断流和泥沙淤积现象严重(李小五, 2005; 王兆印等, 2003); 淮河流域闸坝的过度建设和不合理调度导致突发性水污染事故频发, 等等。目前, 整个欧洲要求对 20 世纪 50 年代以前修建的数以千计的水库进行重新审核; 美国在 1999-2003 年期间共拆坝 168 座; 加拿大在 2000 年宣布拆除希尔多西亚水坝; 韩国于 2000 年取消了永越水坝的工程计划; 2001 年日本国土交通省提出“冻结有关大型水库工程计划的新的勘测项目”, 已有 92 座水库面临终止计划(李小五, 2005; 潘家铮, 2004; 林初学, 2005)。我国政府一直高度重视水利工程的修建, 面对河流生态环境日益恶化的问题, 如何正确处理流域开发与生态环境保护的关系, 客观评价闸坝对生态与环境的影响, 是我国流域开发中亟待解决的科学问题之一, 同时也是一项全新的任务, 意义重大。

本文剖析了闸坝修建和调控引起的水文水环境效应, 探讨了闸坝对河流水量水质影响评价的理论基础, 提出了基于流域水循环过程认识和模拟的闸坝效应量化体系和“耦合—分离”的系统分析方法; 并以淮河流域为例, 初步探索了流域闸坝的水文水环境效应。

收稿日期: 2012-05; 修订日期: 2012-12.

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271005, 40901025); 水资源与水电工程科学国家重点实验室开放研究基金项目(2011B078)。

作者简介: 张永勇(1981-), 男, 湖北京山人, 博士, 副研究员, 主要从事环境水文学方面研究。E-mail: zhangyy003@gmail.com

## 2 闸坝水文水环境效应定性分析

### 2.1 闸坝对河道形态的改变

(1) 河流非连续化。大量闸坝的修建,人为切断了河流的连续性,隔断了河流上下游水量和物质交换等,奔腾的河流已变成大小静止的湖泊水库,径流完全受人类控制。

(2) 人工渠系化。河道被人为裁弯取直、渠道横断面几何形状规则化、河床和河岸固化、糙率降低,导致河流水文情势发生显著变化,也对河岸水生生物的生存环境造成严重的破坏(董哲仁, 2003)。

(3) 河床抬高。闸坝导致河流流速变缓、水量变小,河流输沙能力下降,泥沙淤积,河床抬高,行洪蓄水能力降低。

### 2.2 闸坝的水文效应

目前对闸坝水文效应的研究大多着重于闸坝修建和调控对水循环、水量平衡要素及水文情势的影响或改变。闸坝的水文效应包括其对河流流量、流速、蒸发、下渗、洪峰等水文要素的影响。

(1) 径流。汛期闸坝以防洪蓄水为主,坦化峰值,延缓峰现时间;枯水期闸坝以保障下游生产生活用水为主,开闸放水,流量增大;中水期流量增大,时间延长,流量过程的起伏变小。如图1所示,美国科罗拉多河在建Glen Canyon大坝前径流年内变化特征明显;但建坝后,河流流量径流季节分配比较平均,洪枯水流量相差较小,洪峰流量锐减(WCD, 2000);我国淮河流域20世纪70年代大兴水利以来,径流亦呈现类似的变化。

(2) 水文极值。闸坝的调节坦化了洪峰,延长了洪水历时,一些小的洪水过程甚至消失,而枯水期则增大了下泄流量,保障下游用水安全,河道内径流年内变化特征将逐渐趋于平缓。闸坝的调控

降低了河流水文极值出现的概率。

(3) 高低脉冲频繁。闸坝调节常常会改变高、低流量发生的频率(马颖, 2007)。闸门的启闭规律受人调节,闸门开启,下泄流量增加;闸门关闭,下泄流量减小。河流高、低流量的大幅频繁变化极大地改变了下游河流水文情势。美国科罗拉多河受上游水库发电的影响,径流变化极为频繁,每日流量起伏波动显著,都在 $40\sim 54\text{ m}^3/\text{s}$ 之间变化。

(4) 流速。闸坝调控引起河流流量、水文极值等的变化将直接导致流速的变化。如三峡水库建成以后,随着水位抬高,过水面积增大,库区流速迅速减小。天然河道枯水期全江段平均断面流速为 $0.85\text{ m/s}$ ,水库建成以后,库区全江段断面平均流速下降为 $0.17\text{ m/s}$ ,仅为前者的 $1/5$ 。尤其是在坝前深水区,水库建成以后断面平均流速下降为 $0.04\text{ m/s}$ 左右,比天然河道的断面平均流速减小了近5倍(李锦秀等, 2002b)。

(5) 蒸发和下渗。闸坝的大量建设将使河道水面加大,水压增加,水面蒸发和渗漏损失将增加,尤其是在干旱地区或干旱季节,水面蒸发和渗漏损失将更大。据埃及水利部统计,尼罗河上的阿斯旺水库库容 $1820\text{ 亿 m}^3$ ,每年垂直和平行渗漏 $70\text{ 亿 m}^3$ ;而水面蒸发损失水量 $140\text{ 亿 m}^3$ ,两项合计共损失 $210\text{ 亿 m}^3$ 。黄河流域上游干旱地区的水库蒸发和渗漏使水量的损失达40%以上,造成流域在降雨量没有明显减少的情况下,径流量明显减少的现象(陈进等, 2005)。

### 2.3 闸坝的水环境效应

闸坝的水环境效应指闸坝的修建所引起的河流水文情势变化,导致河流污染负荷的迁移转化过程的改变和污染负荷时空分布的变化。闸坝的水环境效应主要包括其对河流水温、泥沙运移、水质

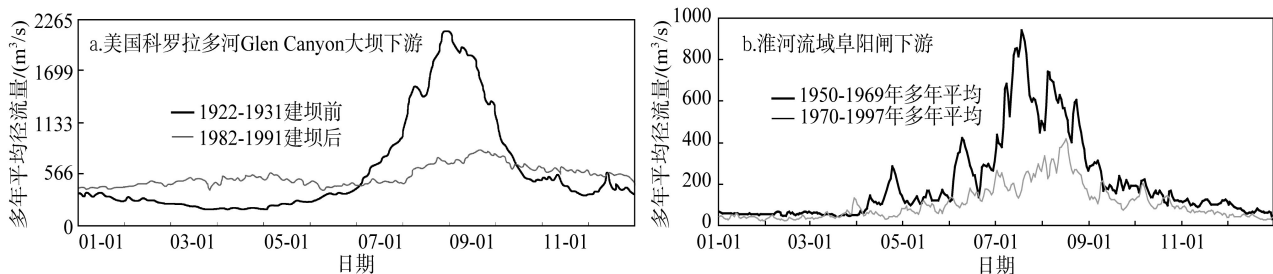


图1 美国科罗拉多河Glen Canyon大坝下游、淮河流域阜阳闸下游多年平均径流量变化  
Fig.1 Runoff variation of the downstream of Glen Canyon dam in Colorado river basin of America, Fuyang sluice of Huai river basin of China

注:图1a数据来源于 United State Geological Survey 2000;图1b数据来源于淮河水利委员会。

过程以及河流纳污能力的影响等。具体表现在:

(1) 水温。在闸坝上游水深大,蓄水多,过流面积增加,在一定时期会出现水温分层现象。如千岛湖库区从水面到水下10 m处,水温在10~30℃之间变动,为变温层;10~25 m之间为温跃层,水温随深度发生变化;从水深25 m至湖底为滞温层,水温常年保持在10℃左右。任华堂等(2007)研究表明,二滩水库在1-3月水体表面混合层较深,没有分层现象;而在5月上部温度较高,形成双温跃层结构;到7月水体混合能力较强,水体温度分层逐渐减弱。此外,闸坝下游水流受闸坝泄流的影响,上游下泄的低温水流将会导致下游水体水温显著变化,出现“滞温”和“滞冷”现象。余文公等(2007)分析表明,三峡水库建成后2004年上游寸滩站年平均水温与多年平均仅相差0.1℃,而下游宜昌站年平均水温比多年平均高0.5℃;3-5月下泄径流水温出现“滞冷”现象,而10月-次年1月下泄径流出现“滞温”现象。

(2) 泥沙。闸坝的修建对河流泥沙输移影响明显。上游来水挟带的大量泥沙将在坝前沉淀淤积,水库河床抬高,库容随之损失。同时由于泥沙沉淀,河水含沙量和输沙量减少,水库清水下泄将冲刷下游河床和河岸,改变河道原有的水沙平衡。根据全国236座有实测资料的水库统计,到1981年底总淤积量达115亿 $\text{m}^3$ ,占调查水库总库容的14.2%(余文公等, 2007)。褚中信(2006)估算2003年长江三峡库区寸滩至宜昌江段淤积了约1.247亿t,而三峡大坝清水下泄导致宜昌—沙市段河道冲刷严重,在2003年6月1-10日期间,冲刷量约为47.59万t。

(3) 水质。主要表现在:①蓄水后,库内水体流速慢,滞留时间长,降低了水气界面交换的速率,因此复氧能力减弱,水库水体自净能力降低;②有利于悬浮物的沉降,悬移质沉积于库底,长期累积不易迁移;③库内透明度增大,有利于藻类光合作用,导致叶绿素浓度增加和富营养化现象;④由于流量、流速的变化导致河流污染负荷、水质扩散系数、降解系数在时间上明显改变(黄真理, 1999; 李锦秀等, 2000, 2002a);⑤闸坝阻断了上游污染负荷与下游水体的自然联系,在重污染河流极易导致污水团下泄,形成较长的污染带,如2004年7月,淮河流域爆发突发性水污染事故;⑥闸坝的修建导致大量植被和土地淹没,有机质腐烂变质使水体中

氮、磷、碳等元素含量增加,水面温室气体排放量的增加(Petts, 1984; Fearnside, 2004)。

(4) 纳污能力。在闸坝上游,一方面水体体积较大,污染负荷滞留时间较长,有利于污染物的沉淀,纳污能力较强;但是另一方面,库内流速较小,扩散能力和降解能力较低。闸坝下游的纳污能力随高、低脉冲泄流而频繁变动:闸门关闭,下游水体流动性较差,自净能力较低;闸门开启,水体流动性增强,自净能力有所提高。目前对于水利工程对河流纳污能力的影响研究还存在较大争议,量化方法也存在很大差异。如长江水利委员会计算的三峡库区纳污能力结果表明,库区水体的纳污能力随着水库蓄水位升高而不断降低(索丽生, 2005; 袁弘任, 2004)。

### 3 闸坝水文水环境效应定量评价的理论基础与研究框架

#### 3.1 理论基础

##### 3.1.1 变化环境下水循环理论

水循环理论是水文学的基础内容之一,也是环境科学、水利学、生态学等多个学科中重要的基本理论之一。随着气候变化和人类活动对自然水循环的影响加剧以及人类对水循环认识的加深,在水循环理论中衍生出变化环境下水循环理论,重点关注全球变化和人类活动对水循环的影响,是国际水文学与水资源学科及地理、生态等众多学科交叉的前沿性问题。大量闸坝的修建和频繁的人工调节使流域内河道特征、水文情势等均发生了显著变化,严重改变了流域自然水循环中各个环节的基本特征。流域内水与生态、水与环境、水与气候、水与社会等都存在着复杂的相互作用关系,因此闸坝的水文水环境效应研究必须以变化环境下流域水循环理论为支撑,在流域尺度上从水循环的角度分析闸坝建设和调控对水文循环各个要素的影响,以及由此引起的污染物迁移转化机制的变化。

##### 3.1.2 河流非连续性理论

河流非连续性的概念是Ward等(1983)通过分析大坝控制下的Colorado和Montana河流生物、物理要素变化而提出的,其目的是为了评价和预测闸坝对河流环境、生态系统结构及其功能所产生的影响。该理论认为大坝是造成河流连续性分裂并引起河流环境和生物参数等在河流上下游之间变化



的不连续体。河流非连续性的研究包括了水文学、生物过程、河流工程系统和流域经济机制等领域,而且还涉及对大尺度、长期水文过程和生物动力过程的综合研究(张水龙等, 2005)。

这一理论体系在河道纵向、垂向和横向3个方向上综合考虑了闸坝调节对河流连续性的影响,并定义了“不连续体距离”和“闸坝影响强度”两个变量来预测闸坝调控对河流生态环境系统中各个要素的影响。其中“不连续体距离”是指作为水坝所导致的不连续的结果,物理或生物变量沿上游或下游方向发生变化的距离。“闸坝影响强度”是指闸坝调控引起的河流生态环境系统中某一指标的变化幅度,常用偏离自然或参照状况的程度来表示。

河流非连续性体系是对河流连续性体系的继承和发展,综合考虑了人为干扰(如大坝等)对河流系统的影响,揭示了水坝存在下河流生态环境系统的变化规律(Ward et al, 1983),真实反映了流域的客观现实状况,因此其理论体系是闸坝水文水环境效应研究不可缺少的理论基础之一。

### 3.1.3 生态水利工程理论

生态水利工程学是研究水利工程在满足人类社会需求的同时,兼顾水域生态系统健康与可持续性需求的原理及技术方法的工程学。它是水利工程学、生态水文学等的交叉学科。生态水利工程学以人与自然和谐共处为指导思想,以工程力学和生态学为理论基础,其理论框架包括(董哲仁, 2003; 董哲仁等, 2007):① 协调供水、防洪、发电、航运效益与生态系统建设的关系,研究已建水利工程的调度、管理等,为江河湖库的水生态系统恢复提供支持。② 综合考虑满足社会和健全生态系统对水的需求,全面权衡满足人类所需的经济效益与环境效益之间的关系,正确把握两种需求的尺度。③ 建立工程项目“经济技术—生态环境”效益评估指标体系,改变现行单一的经济技术评估指标体系。④ 将江河湖泊看作是生态系统中的重要组成部分,研究包括水在气候系统、水文循环中的运移转换规律,还包括在特定的生态系统中,特定的生物群落与水体的相互依存关系。⑤ 加强相关范围的生态系统调查,重点是生物群落的历史与现状调查。⑥ 在开发利用时,明确河流与其上下游、左右岸的生物群落处于一个完整的生态系统中,进行统一的规划、设计和建设。

水利工程结合生态建设,是发展的必然趋势。

分析已建闸坝的水文水环境效应是生态水利工程建设和评价的基础,这也正是生态水利工程理论框架中的研究内容之一。因此,闸坝对河流水量水质影响的量化研究必须在生态水利工程的理论框架下进行,才能最终实现流域人水和谐和可持续发展。

### 3.2 关键内容与技术手段

目前闸坝效应评估使用较多的方法有:数学模式法、类比调查法、专业判断法和物理模型法等。数学模式法能给出定量的预测结果,但需一定的计算条件和输入必要的参数、数据。选用数学模式时要注意其应用条件,如实际情况不能很好满足模式的应用条件时,要对模式进行修正和验证。类比调查法是选择自然环境、功能特性和运行方式与所评价工程相似的地区进行对比分析,属于半定量性质。专业判断法是依据专家意见定性反映水利工程的环境影响。物理模型法定量化程度较高,再现性好,能反映比较复杂的环境特征,但需要有合适的试验条件和必要的基础数据,而且建立复杂环境下模型需要花费较大的人力、物力和时间。

流域已建闸坝水文水环境效应量化研究涵盖变化环境下流域水循环、污染物迁移转化机制、生态水利工程等方面。研究必须从维护河流健康和“人水和谐”的高度,客观评价闸坝修建以及闸坝群运行调度对河流水文水环境的影响。研究面临高强度人类活动的影响,流域环境复杂、相关资料缺乏,且需要综合考虑水文、水资源、社会、经济、生态、环境、水利工程调度等方方面面,单采用以上介绍的4种评价方法难以满足评价的要求。因此本文采用流域分布式水循环及水质数值模拟、多情景分析及综合评价等多种技术手段相结合,提出了基于水循环过程认识和模拟的闸坝水文水环境效应评价体系和“耦合—分离”的系统分析方法,从流域尺度上探明流域闸坝群对河流水文及水环境的作用机理。关键研究内容应包括:

#### 3.2.1 耦合闸坝系统的分布式水系统模拟

分布式水系统模型在复杂流域内气候变化、土地覆被变化以及人类活动等对水循环要素和水质的影响研究具有不可比拟的优势,可以较好解决资料缺乏和环境变化对水循环研究带来的制约。在闸坝的影响分析中,无闸坝调控河流的水量水质过程可以通过耦合闸坝系统的分布式水系统模拟获得。耦合闸坝调度规则的分布式水系统模型需要

实现闸坝调度规则、分布式水文模型、污染物运移模型(河道、湖泊)三者之间的耦合。这是闸坝影响评价研究的核心和难点问题之一。

3.2.2 闸坝群对流域水循环要素影响评价

根据闸坝现有功能和运行方式,研究闸坝人为调节对蒸发、径流特征要素(径流总量、发生频率、历时、周期和变化速率等)、下渗等主要水文要素时空分布的影响;对比分析重点断面有无工程情况下各水循环要素的变化过程,提出评价闸坝对流域水循环要素影响的指标体系和方法。

3.2.3 闸坝群对河流水环境的影响评价

闸坝与水污染是目前流域管理中的争议问题之一,也是闸坝水文环境效应研究中必须回答的核心问题之一。本文采用对比分析有无闸坝、有无污染等多种条件下河流主要污染物指标浓度、负荷等的变化,综合考虑闸坝与排污对河流水质的影响,从而分离二者对河流水污染的贡献程度。即:

(1) 在相同排污负荷条件下,对比分析不同调度规则情况下重点断面由水文情势变化导致的污染物降解系数、纳污能力和水质浓度的变化,以及流域污染负荷空间分布的改变,从而提出闸坝调控对污染物负荷总量、浓度等时空分布影响的评价指标体系及评价方法。

(2) 在闸坝运行条件不变情况下,对比污染物超标排放和达标排放条件下的负荷、浓度变化情况,分析污染源对水质负荷、浓度过程的影响。提出评价污染源控制与排放对水质影响的评价指标体系及评价方法。

(3) 综合闸坝和排污对河流污染物负荷、浓度等过程的影响,采用归一化、权重分析法等分离闸坝调度和排污对河流水环境影响的贡献大小。

3.3 评价指标体系

闸坝水文水环境效应的评价原则应以流域作

为整体,全面系统考虑闸坝调度下流域水文循环各个要素和污染物迁移转化机制,掌握闸坝尤其是闸坝群调度对各个要素的影响作用;评价方法和指标体系的选择必须有扎实的科学理论作为基础,评价方法客观、公正、科学,综合考虑闸坝修建前后或调控对水文循环和水环境各个要素的可能影响;选择的指标必须具备科学性、可行性、完备性、独立性而且易获取;评价结论应以定量为主,具有可操作性。

评价指标体系是由一系列能够代表流域水文、水环境方面特性的指标组成。评价指标体系必须根据闸坝的功能、特性和评估目的,综合考虑流域社会经济发展、河流开发利用、水污染防治、生态修复及保护等问题。目前闸坝影响的评价指标众多,并没有形成统一的指标体系,归结来说,指标可分为基本评价指标和综合评价指标两大类。基本评价指标是代表闸坝对河流某一要素影响程度的基本单元,在评价中这些指标容易实际监测或数值模拟获得。常见指标可以参考《中华人民共和国水利部/能源部标准-水利水电工程环境影响评价规范》(SDJ302-88)。综合评价指标是指能够综合代表闸坝对河流某一方面和多方面影响程度的指标,这些指标在选取时必须全面考虑闸坝对某一方面中各个要素的影响,主观性较强,需要有较强的理论基础支撑。

4 案例研究

淮河流域是中国闸坝最多、人口最密集、水污染最严重的流域。为“防汛抗旱”的需要,全流域已修建闸坝 11000 多座,总库容 303 亿 m<sup>3</sup>,占多年平均径流量的 51%。淮河水文情势由此发生了较大变化,随着入河污染负荷逐年上升,水污染逐渐加剧。1994 年 7 月,淮河突降暴雨,水库超过警戒水

表 1 闸坝的水文环境效应重点评价指标

Tab.1 Key indices for assessment of hydrological and environmental effects of dams and sluices

类型		指标
基础 指标	气候	降水、气温、蒸发、湿度等
	水文情势	水位、水深、流速等流态特征指标;径流总量、发生频率、历时、周期和变化速率等方面径流特征指标
	水温	库内水温分布、下泄水体水温等
	水质	pH、藻类、BOD、COD等有机质,不同形态的氮、磷等营养物质等
	泥沙	泥沙冲刷率、泥沙输移率;
	河道形态	淤积程度、河道剖面等
综合指标		流量变异系数、水文极值发生概率、纳污能力、自净能力、不连续体距离、闸坝影响强度等

位而开闸泄洪。蓄积在闸上的污水集中下泄导致河水泛浊,鱼虾丧生,下游居民饮水告急,经济损失数亿元,发生了震惊中外的“淮河水污染事件”。据2005年中国环境状况公报显示淮河流域水质为Ⅳ类及以上的河流占83%,居七大流域之首。淮河流域水生态系统健康状态也不容乐观,2006年调查表明,64%的站点已处于亚健康或不健康状态(赵长森等, 2008)。如何正确认识淮河流域闸坝对河流水文水环境的影响,是我国各级政府高度关注的问题,也是流域水污染治理、闸坝联合调度研究中亟需解决的问题。选取淮河蚌埠闸以上流域为例,对主要水系重点闸坝群的水文水环境效应进行初步分析。

4.1 耦合闸坝调度规则的分布式水系统构建

基于改进的SWAT模型,构建淮河流域耦合闸坝调度规则的分布式水系统模型,将研究区划分为129个子流域和468个水文响应单元,所有29座评估闸坝按其所在地理位置作为相应子流域的出口控制断面加入模型中。

选取1991-2000年实测径流资料对水文参数率定和检验,其中参数率定期为1991-1998年,检验期为1999-2000年(图2a)。受实测水质资料的限制,仅对1999-2000年氨氮和高锰酸盐指数浓度过程进行模拟(图2b、2c)。在径流模拟中,率定期内平均相

关系数0.83,平均效率系数为0.66;检验期内平均相关系数为0.77,平均效率系数为0.54。对于水质模拟,氨氮和高锰酸盐指数浓度模拟达标率分别为55%和64%,平均相关系数分别为0.47和0.50。

4.2 评价指标和结果

闸坝对河流水文情势的影响是通过对比有无闸坝影响下年径流总量的变化进行分析;而闸坝对水质的影响评价,主要是对流域内有闸坝与现状排污、无闸坝与现状排污、有闸坝与污染物达标排放3种情景,分别模拟各情景下不同断面水质浓度过程,对比分析三者之间的差异和影响因素,从而分离闸坝和排污各自对水质变化的影响程度。评价指标见表2。结果表明(Zhang et al, 2010; 张永勇等, 2011):

(1) 淮河流域闸坝对水文情势的影响从多年平均来看(1991-2000年),受闸坝调蓄作用的影响,流域出口流量比全体无闸坝情况下减少了2%,其中非汛期减少了5%,而汛期变化不大。在丰水年(1991年),为防洪需要,闸门敞开,闸坝对总径流量影响不大,主要是改变水量的年内时间分布,汛期径流总量比无闸时增加了8%;而非汛期减少了12%。在枯水年(1999年),为确保用水,闸坝以蓄水为主,流量与无闸时相比大幅度减少(图3a)。

(2) 淮河流域闸坝的修建和调控对河流水质

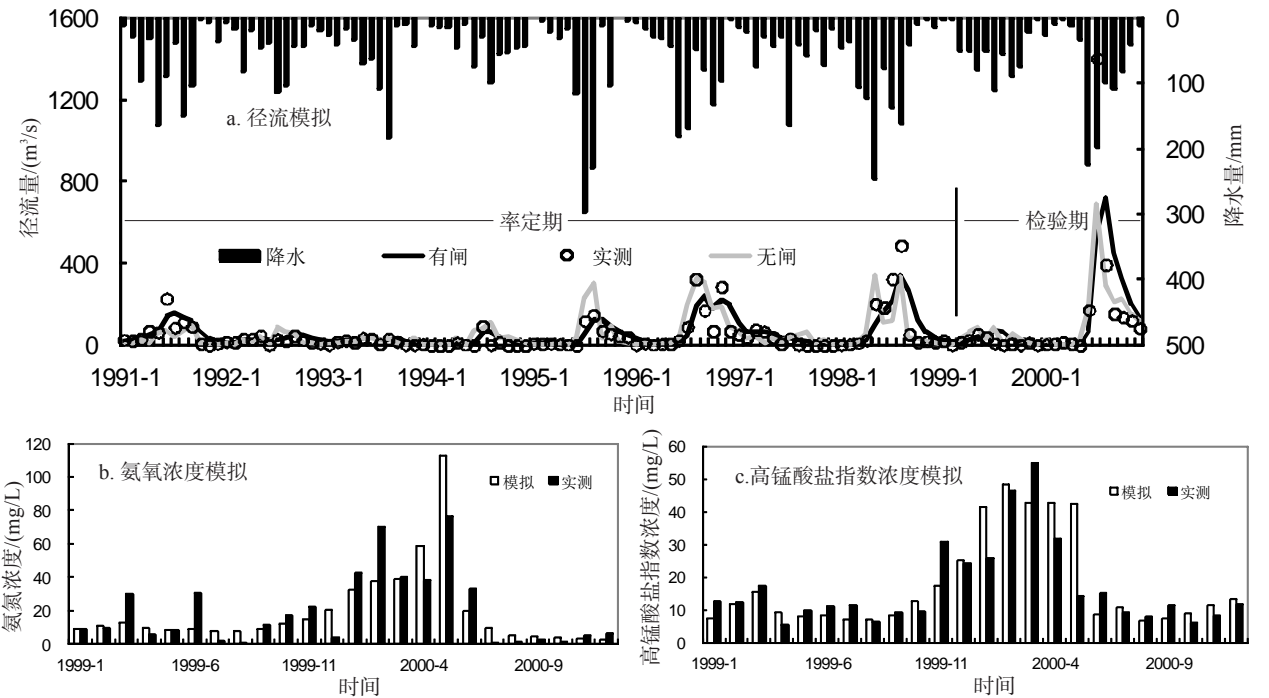


图2 槐店闸径流量、氨氮及高锰酸盐指数浓度过程模拟

Fig.2 Simulation of discharge, NH<sub>3</sub>-N and CODMn concentration at Huadian sluice



表 2 淮河闸坝的水文环境效应评价指标

Tab. 2 Indices of the hydrologic–environmental effect of dams and sluices in Huai river basin

序号	指标名称	指标	对比描述
1	闸坝对年径流量的影响	$R/Y$	(无闸坝-有闸坝)/有闸坝
2	闸坝对水质变化的影响程度	$\eta_{\text{闸}}$	(无闸有污染-有闸有污染)/有闸有污染
3	控制污染源排放对水质变化的影响程度	$\eta_{\text{污}}$	(有闸无污染-有闸有污染)/有闸有污染
4	闸坝对水质变化的影响所占比重	$\varepsilon_{\text{闸}}$	$\varepsilon_{\text{闸}} = \frac{\eta_{\text{闸}}}{\eta_{\text{闸}} + \eta_{\text{污}}}$
5	控制污染源排放对水质变化的影响所占比重	$\varepsilon_{\text{污}}$	$\varepsilon_{\text{污}} = \frac{\eta_{\text{污}}}{\eta_{\text{闸}} + \eta_{\text{污}}}$

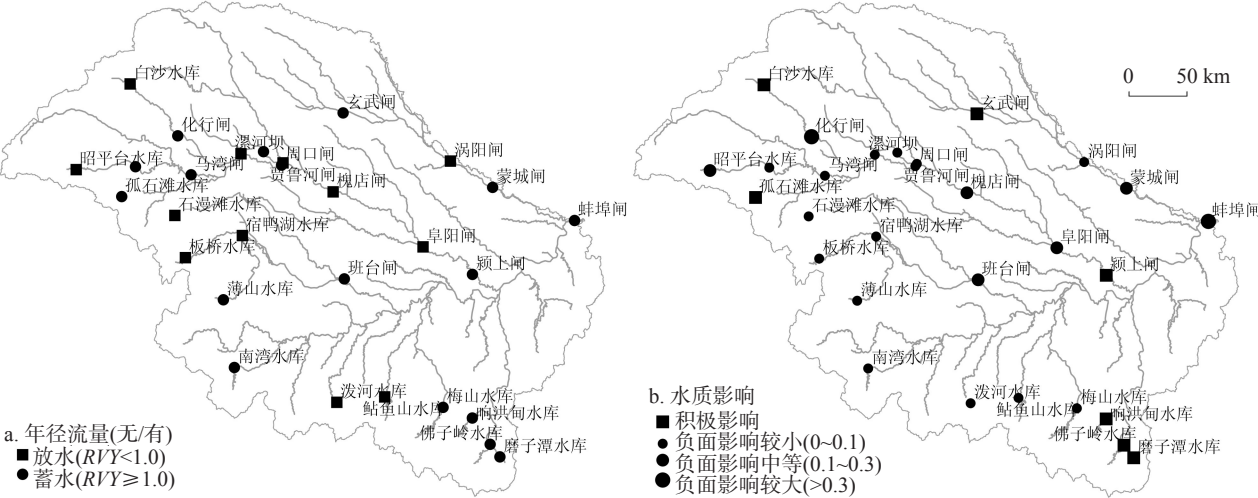


图 3 淮河流域重点闸坝对年径流总量(a)、水质(b)的影响

Fig. 3 Effects of dams and sluices on annual runoff and water quality in Huai river basin

产生一定程度的影响。从上游到下游来看,闸坝对河流水质的影响逐渐从正效应过渡到负效应。位于源头的水库和水闸对改善河流水质起着积极作用。在中下游地区闸坝调控与入河污染负荷的相互迭加,共同加剧了河流水质恶化。闸坝贡献率在40%以内,平均贡献率为8.6%,而污染源的贡献在60%以上(图3b)。因此污染源控制仍是淮河流域水污染整治的根本。为实现淮河水“变清”,必须从排污控制、闸坝调度等多方面着手,在加大治污力度的同时,对闸坝进行科学调度,兼顾经济利益和生态环境保护双重目标。

参考文献(References)

Chen J, Huang W. 2005. Preliminary study on the change of water flow and sediment process in the changjiang river. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 14(6): 786-791. [陈进, 黄薇. 2005. 梯级水库对长江水沙过程影响初探. 长江流域资源与环境, 14(6): 786-791.]

Chu Z X. Effects of the Three Gorges Reservoir Phase-I water

storage on the Yangtze River sediment [D]. Qingdao, China: Ocean University of China, 2006. [褚中信. 三峡水库一期蓄水对长江泥沙的影响 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2006.]

Dong Z R. 2003. The concept of ecological engineering. China Water Conservancy, (1): 63-66. [董哲仁. 2003. 生态水利学的工程理念. 中国水利, (1): 63-66.]

Dong Z R, Sun D Y. 2007. The theory and technology of ecological engineering. Beijing, China: China Water Power Press. [董哲仁, 孙东亚. 2007. 生态水利工程原理与技术. 北京: 中国水利水电出版社.]

Fearnside P M. 2004. Greenhouse gas emissions from hydroelectric dams: Controversies provide a springboard for rethinking a supposedly “clean” energy source. Climatic Change, 66: 1-8.

Huang Z L. 1999. Some questions of Three Gorges Reservoir in environmental hydraulics. China Three Gorges Construction, (9): 36-39. [黄真理. 1999. 三峡工程中的几个环境水力学问题. 中国三峡建设, (9): 36-39.]

Li J X, Huang Z L, Lv P Y. 2000. Study on the flow longitudi-

- nal dispersion coefficient in Three Gorges Project Reservoir. *Journal of hydraulic engineering*, (8): 84-87. [李锦秀, 黄真理, 吕平毓. 2000. 三峡库区江段纵向离散系数研究. *水利学报*, (8): 84-87.]
- Li J X, Liao W G. 2002a. The Effect of water flow on the biodegradation of organic pollutant. *Research of Environmental Sciences*, 15(3): 45-48. [李锦秀, 廖文根. 2002a. 水流条件巨大变化对有机污染物降解速率影响研究. *环境科学研究*, 15(3): 45-48.]
- Li J X, Liao W G, Huang Z L. 2002b. Prediction of the impact of three gorges project on water flow and water quality in the reservoir. *Water resources and hydropower engineering*, 33(10): 22-25. [李锦秀, 廖文根, 黄真理. 2002b. 三峡工程对库区水流水质影响预测. *水利水电技术*, 33(10): 22-25.]
- Li X W. 2005. On influence of Dams to human environment and relative regulations. *Law Sciences Magazine*, (6): 3-5. [李小五. 2005. 水坝对人类环境的影响及其规制. *法学杂志*, (6): 3-5.]
- Lin C X. 2005. The investigation and thinking of the reverse dam movement and dam removal in USA. *China Three Gorges Construction*, (Z1): 44-57. [林初学. 2005. 美国反坝运动和拆坝情况的考察和思考. *中国三峡建设*, (Z1): 44-57.]
- Ma Y. Hydrological and hydraulic responses to large-scale water projects in the Yangtze River Ecosystem [D]. Nanjing, China: Hohai University, 2007. [马颖. 长江生态系统对大型水利工程水文水力学响应研究 [D]. 南京: 河海大学, 2007.]
- McCully P. 1996. *Silenced Rivers: The Ecology and Politics of Large Dams*. London and New Jersey: ZED books.
- Pan J Z. 2004. Dams construction or removal. *China Water Resources*, (23): 26. [潘家铮. 2004. 建坝还是拆坝. *中国水利*, (23): 26.]
- Petts G. 1984. *Impounded Rivers: perspectives for ecological management*. New York: Wiley, Chichester.
- Postel S, Richter B. 2003. *Rivers for life: Managing water for people and nature*. Washington D.C.: Island Press.
- Powell K. 2002. Open the floodgates. *Nature*, 420: 356-358.
- Ren H T, Chen Y C, Liu Z W. 2007. Temperature simulation in large reservoir. *Journal of Hydrodynamics: Series A*, 22(6): 667-675. [任华堂, 陈永灿, 刘昭伟. 2007. 大型水库水温分层数值模拟. *水动力学研究与进展: A辑*, 22(6): 667-675.]
- Revena C, Murray S, Abramovitz J, et al. 1998. *Watersheds of the world: Ecological value and vulnerability*. Washington D.C.: World Resources Institute and Worldwatch Institute.
- Suo L S. Dams and ecology. *China rural hydropower and electrification. Rural Hydropower & Electrification in China*, (8): 3-5. [索丽生. 2005. 闸坝与生态. *中国农村水电及电气化*, (8): 3-5.]
- Tharme R E. 2003. A global perspective on environmental flow assessment: Emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers. *River Research and Applications*, 19(5-6): 397-441.
- The World Commission on Dams (WCD). 2000. *Dams and Development: A New Framework for Decision-Making*. London and Sterling, VA: Earthscan Publications Ltd.
- Wang Z Y, Lin B N. 2003. Sedimentation Studies in China-Review and Prospect. *Journal of Sediment Research*, (4): 73-81. [王兆印, 林秉南. 2003. 中国泥沙研究的几个问题. *泥沙研究*, (4): 73-81.]
- Ward W, Stanford J A. 1983. The intermediate disturbance hypothesis. An explanation for biotic diversity patterns in lotic ecosystems//Fontaine T D, Bartell S M. *Dynamics of Lotic Ecosystems*. Ann Arbor, MI: Ann Arbor Scientific Publishers: 347-356.
- Wu J G, Huang J H, Han X G, et al. 2003. Three-Gorges Dam-Experiment in Habitat Fragmentation. *Science*, 300(5623): 1239-1240.
- Yu W G, Xia Z Q, Cai Y P, et al. 2007. Research on water temperature variation of TGP reservoir before and after impoundment and its influence. *Yangtze River*, 38(1): 20-23. [余文公, 夏自强, 蔡玉鹏, 等. 2007. 三峡水库蓄水前后下泄水温变化及其影响研究. *人民长江*, 38(1): 20-23.]
- Yuan H R. Water environmental capacity of Three Gorges Reservoir. *China Water Conservancy*, (20): 19-22. [袁弘任. 2004. 三峡水库纳污能力分析. *中国水利*, (20): 19-22.]
- Zhang S L, Feng P. 2005. Serial discontinuity concept and its development status in river ecosystem research. *Advance in Water Science*, 16(5): 758-762. [张水龙, 冯平. 2005. 河流不连续体概念及其在河流生态系统研究中的发展现状. *水科学进展*, 16(5): 758-762.]
- Zhang Y Y, Xia J, Chen X S, et al. 2011. Study and application of hydrologic and environmental effects in the highly regulated river basins. Beijing: China WaterPower Press. [张永勇, 夏军, 程绪水, 等. 2011. 多闸坝流域水文环境效应研究及应用. 北京: 中国水利水电出版社.]
- Zhang Y Y, Xia J, Liang T, et al. 2010. Impact of water proj-



- ects on river flood regime and water quality in Huai River Basin. *Water Resources Management*, 24(5): 889-908.
- Zhao C S, Xia J, Wang G S, et al. 2008. Evaluation and analysis on aquatic ecology and environmental quality of Huai River basin. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 12(2): 1698-1704. [赵长森, 夏军, 王纲胜, 等. 2008. 淮河流域水生态环境现状评价与分析. *环境工程学报*, 12(2): 1698-1704.]
- Zhu M R. 1999. The research on the comparison between arrangement migration and development migration: the arrangement of chinese reservoir migration. *Progress in geography*, 18(3): 201-207. [朱美荣. 1999. 水库移民中安置性移民与开发性移民的比较研究. *地理科学进展*, 18(3): 201-207.]

## The hydrologic–environmental effects of dams and sluices and the assessment frameworks

ZHANG Yongyong<sup>1,2</sup>, XIA Jun<sup>1</sup>, ZHAI Xiaoyan<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Key Laboratory of Water Cycle and Related land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

**Abstract:** How to resolve the conflicting relationship between basin development and the protection of ecological environment, and to provide an objective assessment of the effects of dams and sluices on the environment, have become one of pressing scientific challenges and a new task of great significance. From the perspective of the natural characteristics of rivers, this paper explores the theories, key topics, and methodologies for the analysis of hydrological and environmental effects of dams and sluices, i.e., quantity and quality of waters, and proposes a quantitative framework to study and simulate water cycle at the river basin scale. As a case study in Huai river basin, one of the areas with most water projects and most polluted water, this paper presents a preliminary analysis of the effects of dams and sluices on the hydrological environment of the area. This study provides a theoretical basis for the management of water resources and control of water pollutions in the areas of dam-sluice regulated river basins, and contributes to the strategies for comprehensive management of river basins and for sustainable socio-economical development of the country.

**Key words:** dams and sluices; hydrologic regimes; water environment; research framework; Huai river basin