

河道大型水库水力过渡区及其生态影响研究

于国荣^{1,2},夏自强^{1,2},蔡玉鹏²,余文公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.河海大学水资源环境学院,江苏 南京 210098)

摘要 运用河流连续体理论,分析修建大坝对河流水力学要素的影响.根据水力特征的变化,对河道型水库工程影响区域水力过渡区进行划分,重点研究各个水力过渡区内的水文水力特征、空间结构、物质结构和能量结构的变化及其生态响应.研究表明,水文水力特征的变化直接导致了生态环境要素的变化,最终将对河流生态系统产生胁迫.

关键词 河流连续体 生态系统 水力过渡区 水文水力特征 生态环境

中图分类号 :TV62+2 X171 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-1980(2006)06-0618-04

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.河道的地貌形态、物质结构、水文循环和能量输入在河流生物系统中产生一系列反映——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)^[1].Ward^[2]认为河流生态系统应该具有四维结构: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.

河流上大规模筑坝拦截河流量是影响河流生态环境最显著、最广泛、最严重的事件之一^[3].大坝通过截流径流量,人为地改变河流水文水力特性的时空分布,进而改变了生态系统的物质场、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,导致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的改变.本文根据河道大型水库工程对河流水文水力学要素的影响,对影响区域进行区段划分,研究不同区段的结构特征变化及生态响应.

1 水力过渡区划分

在河流上,水库的修建使河流局部范围内的空间地貌形态发生根本性变化,导致水流的水文水力特征发生变化,这种变化影响了该河段及其下游生态系统的能量流动、物质循环和空间结构等,进而影响了该区生物的种群密度、种群结构、生物的多样性和生物的景观格局,称该区域为受水利工程影响的水力过渡区,简称过渡区.

根据河流的功能^[4]、大坝对河流水文水力特征的影响和对生态系统胁迫作用^[5],把水力过渡区划分为回水区、库区、坝区、消能区和惯性区,上下游区为衔接区,见图 1.

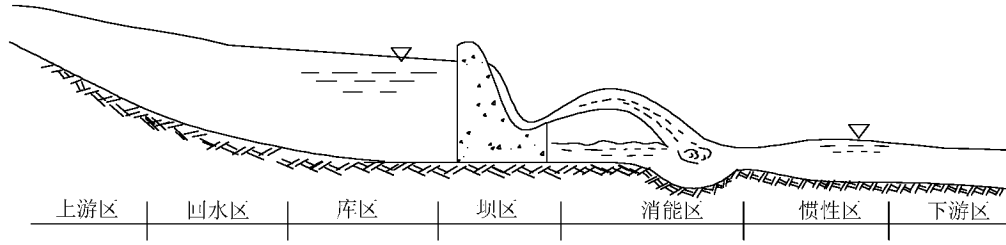


图 1 水利工程影响区的水力过渡区示意图

Fig.1 Sketch of hydraulic transitional region under influences of hydraulic projects

水力过渡区的特征包括能量流动和转化、物质循环、空间地貌形态和水文水力特征变化.天然河流具有

典型的结构特征和独特的服务功能^[6],其特征变化方式和途径是建立在河流连续体基础上的。

2 水力过渡区特征变化分析

2.1 上游区

上游区河流地貌形态、水文水力特征、能量转化、物质交换和空间结构没有发生改变。

2.2 回水区

回水区的地貌变化和泥沙冲淤是其主要问题,并随着水库的调度而发生变化。水库蓄水时,该区水体被雍起,淹没岸边的一些地带。水深、过水面积和水面面积增加,水位升高,水下相同高程位置处的水压力增加,流速减小,泥沙沉积,易于形成回水三角洲。能量转化方面为水流势能增加,水流的摩阻力变小,惯性力增强。物质随泥沙而沉积。水库泄水时则相反,部分物质随水流被带入库区。如三峡工程蓄水后,江面拓宽,江水变深,回水区最远达到重庆港并出现泥沙淤积,将使位于库尾的重庆市洪水位有所抬高。

2.3 库区

a. 空间结构变化。原有河岸及陆地被水淹没,来水被蓄积起来,库区横断面变大,库区河底的淤积使河底平坦化。如三峡水库正常蓄水位时,淹没了云阳、秭归、巫山、奉节和忠县,受影响人口大约为 54 万人。

b. 水文水力特征的变化。水深增加,水面宽广,蒸发量大,流速减慢或出现静水,库区出现淤积,水流含沙量减少,风浪作用明显,换水周期变长。水位、流量随水库蓄或泄急剧增加或降低。蓄水时,水位升高,对洪峰具有调节作用,使下游年内洪水发生的频率减少。泄水时则相反。

c. 能量转化的变化主要是水位势能的增加和水体温度分层变化。影响温度变化的因素非常复杂,可分为影响水体蓄热量大小和决定热量在水体蓄水体内的空间分布因素。大型水库水体受太阳辐射、对流混合和热量传输作用,出现温度分层、水体温度变化和季节性水体分层,使库区和库岸间的能量交换发生变化,水体温度的变化对坝下水体的温度过程有调节作用。如三峡水库,根据水交换次数法,正常蓄水位 175 m 时,水库不会出现稳定的温度分层结构,但存在弱分层现象。用 Fr 法计算,水位 175 m 时,水库有弱分层现象,但冬季枯水期气温通常低于水温,限制水库分层的发展,5 月以后 $Fr > 1$,不会发生明显分层^[7]。

d. 物质结构的物理、化学和生物的变化主要受水体流动缓慢和温度变化影响。物理变化为水流缓慢使水体透明度增强、水体复氧作用降低、污染物质稀释和迁移能力变小,从而使污染物在库区滞留时间变长。化学变化为水体溶解氧分布控制水体中氧化/还原反应界面的垂直运移,温度分层直接影响生源要素在水库中的运移、循环和更新。生物变化为上层水体和浅水区在风速等作用下混合强烈,水生植物的光合作用使得水体中溶解氧含量较高。

2.4 坝区和消能区

a. 空间结构。坝区和消能区河道人为修建有规则断面的溢流坝、泄流孔、管道或溢洪道等,把自然河流的复杂形状变成梯形、矩形及弧形等规则几何断面,坝阻隔了河流上下游之间的纵向联系。横向上,渠道的边坡及河床采用混凝土、砌石等硬质材料,阻隔了河道与洪泛区、河岸水陆生态之间的横向联系。

b. 水流连续性被破坏,水体脱离了河床,水流通过溢流坝、泄流孔或溢洪道等下泄。过水断面规则化。流量与流速水头和过水面的形式及尺寸有关,并出现时段均一化。水流通过建筑物(如高坝、闸等)集中下泄,流速增大,属于高速水流,不同的泄水建筑物形式及不同布置方式等对水流的水力学特性的影响也不相同,如三峡大坝的泄洪建筑物采用深孔结合表孔,其中深孔最大流速为 39.5 m/s,表孔最大流速为 37.9 m/s,设计泄洪能力(水位 175 m)为 72 220 m³/s。坝底出现冲击压强。消能区过水断面变小,水流流态变为急流,水流对水面有很大的冲击力,形成切变流、漩涡流和高掺气水流,出现雾化现象。

c. 能量转化。坝区是把蓄积的势能转化为用于发电的机械能和水流动能。在发电状态下,位能转变为机械能和动能。泄洪状态下,位能转变为动能,具有很大的冲击力。消能区是通过工程措施把水流的动能消耗掉。水体温度的变化主要受库区水体温度影响。从水库深处泄出的水,夏天比河水水温低,冬天比河水水温高,而从水库顶部附近出口放出的水,全年都比河水水温高^[8]。

d. 物质结构的变化。清水下泄使含沙量、有机质及盐分等含量减少,出流水体的营养物质、泥沙、溶解氧等含量与泄流建造物高程、结构等有关,坝区水流的散射和消能区水流的强烈掺混作用,使水体掺气量有所增加,冲刷作用增强。

2.5 惯性区

惯性区空间结构的变化受水库下泄水量的影响。泄水时,河道变宽。蓄水时,河道变窄。水文水力特征的

变化.流速受消能区末端水体惯性力的作用而变大,导致水流对河道的冲刷能力增强,流量和水位随着水库的调度出现时段均一化.能量转化主要是消能并不能把所有的多余动能都消耗掉,所以水流还具有很大的动能,能量方程中流速水头项起决定性作用,动量方程中惯性力起主要作用.物质结构的变化表现为水流的含沙量、有机质量、矿物质量和营养盐分等含量降低,水库的调节作用使洪水涨落变小,再加上两岸护岸工程的修建,河道、河岸和湿地之间的物质交换受阻.

2.6 下游区

a. 空间结构受水库调度影响.当水库蓄水时,下泄流量减少导致河道浅滩、河漫滩和湿地等萎缩或消失,河道中心的沙滩易于露出,入海的河流会出现海水倒灌;当水库泄水时,下泄流量同天然河道比有所增加,地下水位升高,土壤会出现潜育化、沼泽化.

b. 水文水力特征发生本质上的变化.水库对洪峰的调节,改变了自然河流下游年内丰枯的水文周期规律.流量趋于均一化,洪水年内发生的频率减少.水位同期相比,在洪水期偏低,而在枯水期偏高.如三峡水库蓄水运行后,2005年5~6月监利断面洪峰削平,涨幅明显减少,主要表现为5月份监利水位缓慢上涨,6月10日后,监利水位处于缓慢下降过程,下泄水流的含沙量减少,葛洲坝下游河道将经历较长时期的冲刷—平衡—回淤过程.

c. 物质结构的变化.水流的含沙量、有机质量、矿物质量和营养盐分等含量降低,泛洪区湿地景观减少.水库下泄流量的稳定化会减少河道与河漫滩、湿地,通河(江)湖泊之间水与营养物质交换频率,导致物质更新速率降低.

3 过渡区的生态响应

不同生态阻隔区生态环境要素发生变化的情况不同,各个生态阻隔区的生态响应也不同.

a. 上游区水文水力特征没有发生变化,但大坝阻隔了向上游洄游鱼类,使上游洄游鱼类减少.如葛洲坝工程阻隔了中华鲟的洄游,主要产卵场分布改在葛洲坝坝下——宜都清江口(约40 km)段.回水区内的三角洲,其丰富的有机质,使部分适应缓流条件生存的生物易于生存和发展.河岸淹没时间的改变会改变植被的覆盖类型.延长淹没时间,植被功能发生变化,对树木有致命的影响,水生生物的浅滩生态环境丧失.

b. 库区自养静水生物的形成.库区中原有陆地及丘陵生态环境被破碎化、片断化,陆生动物被迫迁徙,流动的河流变成了相对静止的人工湖,生长在岸边和底部的生物群落结构和外形就会越接近静水中的模式.库内的地形和环境梯度变化不仅在不同时间、空间尺度上改变了栖息地、物种的分布和丰度以及水生群落的组成和多样性,而且会导致土著物种多样性的丧失.河岸淹没时间的改变会改变植被的覆盖类型,也促进了浮游动物的发展,它在数量和分布上都表现出对浮游植物的依存性.

c. 坝区和消能区生态屏障的形成.坝下到消能区之间的混凝土护岸,使水陆交错带被破坏,阻止能量、物质和生物运动的发生,坝区和消能区内河床材料的硬化化,切断或减少了地表水与地下水的有机联系通道,沙土、砾石或黏土中数目巨大的微生物再也找不到生存环境,水生植物和湿生植物无法生长,使食植的鱼类、两栖动物、鸟类及昆虫失去生存条件.水力发电的机械、消能工、固化边界等破坏了水的流态,形成高切变流,使大型鱼类受伤害或死亡.坝阻隔了河流上下游的连通性,对于洄游生物有致命的伤害.如1981年修建的葛洲坝水利工程阻断了中华鲟溯河产卵洄游通道.坝区下至消能末端急剧变化的速度、压强、掺气对生物的影响最为严重.过大的流速有利于水流的掺气,使水中的溶解氧含量很大,有利于生物对氧的需求,但过高的含氧量使得很多生物不能生存和繁殖.泄水过大的流速限制了生物体继续生存在河流段落中的能力,该区基本没有生物长期生存和发展.

d. 惯性区是连接消能区和下游天然河道的过渡区域.区内主要动物为适应高速水流的小型动物或底息动物,由于植物、藻类不能着床生长,植被面积明显减少,致使鱼类无法进入产卵和觅食.水流对于河岸的冲刷,可能引起河势变化,带走了大量的营养物质.由于水库泥沙淤积及营养物质被截流,使大坝下游河流廊道的营养物质输移扩散规律发生改变.这些因素都会使生物栖息地特征发生改变,使植物、藻类及底息动物不能着床生长,植被面积明显减少,使得植食性鱼类、两栖动物、鸟类及昆虫数量大大减少.

e. 下游区生态系统的变化主要受下泄水量的影响.水库下泄流量稳定使外来生物容易入侵,导致生物局部灭绝,威胁土著物种,改变种群组成.水、营养物质与河漫滩等交换频率的下降使河漫滩等地的植物幼苗干化,植物种子扩散条件变差.下泄频繁能增加冲刷使敏感物种丧失,破坏生物生命循环.丰水期高流量对很

多物种迁徙时间和许多鱼类产卵起到提示作用,水库对径流的调节作用使下游季节性高峰流量丧失,导致鱼类产卵、孵化和迁徙激发因素中断,鱼类无法进入湿地,改变了水生生物的食物网结构,岸边植被复原能力降低或消失,植被生长速度减缓.长时间的小流量导致水生生物聚集,植被减少或消失,植物生理胁迫导致植物生长速度降低.这些变化最终会破坏河流生态系统的动态平衡.

4 结 论

河流的生态系统能否健康发展主要受河流地貌形态多样性、水文水力特征变化和生态系统结构稳定性等因素的影响.兴修水利枢纽时,水利工程在局部使河流地貌形态和水文水力特征发生根本性的变化,这些变化直接导致生态系统的失衡,甚至使生态系统生物多样性和种群结构发生变化.水利枢纽对生态环境的影响包括以下两个方面:

- a. 水利工程修建后改变了河道原有的水文水力学要素,如流速、流量、断面面积、天然径流量、水温等,改变了生物生存的原有生态环境条件.
- b. 坝、护岸和硬质河床等对河流横向、纵向及垂向上的阻隔作用,使河流的生态功能发生变化.河流连续性遭到破坏,阻隔了上下游、河道与河岸动植物间的物质和能量交换以及洄游性鱼类的洄游、繁殖和育肥等.

水利枢纽建成后,天然河流原有的生态平衡将遭到破坏,在自然环境的长期变化过程中,河流地貌形态和生态系统的生物多样性、物种及种群结构、生物资源量等都会发生变化,经过自然选择,重新形成和发展为一种新的生态平衡.这种新的平衡需要以牺牲一些生物为代价.为了减少这种代价,今后应加强对各个不同过渡区内的水文水力特征变化的研究,从而为生态水利工程规划、设计、施工及管理提供理论依据.未来的生态水利工程应该是有直接功效的供水、防洪、发电、航运的综合性工程,并且还应该是有利于生态系统健康与稳定的生态工程.

参考文献:

[1] MEYBECK M C. Nitrogen and phosphorus transport by world rivers[J]. Am JSCI,1982,282 :401-450.
[2] WARD J V. The four dimensional nature of logic ecosystems[J]. Journal of the North American Benthological Society,1989(8) :2-8.
[3] PETTS G. Impounded rivers : perspectives for ecological management[M]. New York : Wiley,Chichebster,1984.
[4] 夏自强,李琼芳,姜翠玲,等. 河流自然功能的利用及保护研究[C]//水利部国际合作与科技司. 河流生态修复技术研讨会论文集.北京 中国水利水电出版社,2005 :52-59.
[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] 栾建国,陈文祥. 河流生态系统的典型特征和服务功能[J]. 人民长江,2004,35(9) :41-43.
[7] 黄真理. 三峡工程中的几个环境水力学问题[C]//黄真理,傅伯杰,杨志峰. 21 世纪长江大型水利工程中的生态与环境保护.北京 中国环境科学出版社,1998 :139-145.
[8] MCCULLY P. Silenced River[M]. London : Zed Books Ltd,1996 :100-130.

Hydraulic transitional region and ecological effects
of river-type large-scale reservoirs

YU Guo-rong^{1,2}, XIA Zi-qiang^{1,2}, CAI Yu-peng², YU Wen-gong²

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and
Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China ;
2. College of Water Resources and Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract :The influences of dam construction on hydraulic elements of rivers were analyzed by use of the theory of river continuum, and the hydraulic transitional region under influences of river-type reservoir project was classified. The emphasis of the study was placed on hydrological and hydraulic characteristics, variations of spatial structure, matter structure, and energy structure, and ecological response of each transitional region. The research shows that the variation of hydrological and hydraulic characteristics directly causes the variation of eco-environmental elements, and finally leads to the ecological stress on river ecological system.

Key words :river continuum ; ecosystem ; hydraulic transitional region ; hydrological and hydraulic characteristic ; habitat