

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2016.05.025

三峡工程对水环境与水生态的影响及保护对策

邹家祥, 翟红娟

(长江水资源保护科学研究所, 湖北 武汉 430051)

摘要:介绍三峡工程水环境与水生态现状,分析三峡工程对库区及坝下水文情势、水质、库区及支流富营养化等水环境的影响,以及工程运行对水生生态系统、饵料生物、鱼类及珍稀水生动物等水生态的影响,提出优化水库调度、加强城镇生活污水处理、工业废水防治、农村面源治理、饮用水源地保护等水环境保护对策,以及开展栖息地保护、物种保护、人工增殖放流、生态调度等水生生态保护对策。

关键词:三峡工程;水环境影响;水生态影响;水环境保护;水生态保护

中图分类号:X171.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2016)05-0136-05

Impacts of Three Gorges Project on water environment and aquatic ecosystem and protective measures

ZOU Jiexiang, ZHAI Hongjuan

(Changjiang Water Resources Protection Institute, Wuhan 430051, China)

Abstract: This paper introduces the water environmental and aquatic ecological status of the Three Gorges Project. The impacts of the project on the aquatic environment, involving hydrological regimes, water quality, reservoir eutrophication, and water blooms in the tributaries, are analyzed. The project's impacts on aquatic ecology, including the aquatic ecosystem, food organisms, fish species, and rare aquatic animals, are also analyzed. Several measures are proposed to protect the water environment, including optimization of reservoir regulation, urban sewage treatment, industrial waste water control, rural non-point source pollution control, and drinking water source protection. For the protection of the aquatic ecosystem, some measures are put forward, including habitat conservation, species conservation, artificial enhancement and release of fish, and ecological reservoir regulation.

Key words: Three Gorges Project; water environmental effect; aquatic ecological effect; water environment protection; aquatic ecology protection

三峡水库总库容(校核洪水位以下)450.5 亿 m³, 防洪库容 221.5 亿 m³, 兴利调节库容 165.0 亿 m³^[1]。三峡工程运行后,年内径流时空分配过程发生变化,对水环境、水生态及其他环境因子造成长期影响。关于三峡工程施工及运营后对生态环境的影响,国内外学者们开展了大量研究工作,并取得了丰富的成果^[2-5]。本文主要从水环境和水生态的角度,根据三峡水库初期蓄水至试验性蓄水的调查与相关研究

成果,分析三峡工程蓄水运行对水环境和水生态系统的影响,并提出水环境保护和水生态保护的对策。鉴于三峡工程影响范围较广,本文重点分析三峡工程对库区及坝下江段水环境和水生态的影响。

1 三峡工程水环境与水生态现状

1.1 水环境

长江流域的径流主要由降水形成。三峡库区坝

基金项目:国家自然科学基金(41201558)
作者简介:邹家祥(1940—),男,教授级高级工程师,主要从事水资源保护科学研究与环境影响评价工作。E-mail:zoujx2005@sina.com
通信作者:翟红娟,高级工程师。E-mail:hongjuanzhai@126.com

下游宜昌站多年平均径流量 4 510 亿 m³,多年平均流量 14 300 m³/s,多年平均输沙量 5. 26 亿 t;长江年入海径流量 9 600 亿 m³。

2014 年水质监测统计分析表明,三峡库区 7 个干流断面中,朱沱、铜罐驿、寸滩、清溪场、沱口、官渡口和太平溪断面水质均符合Ⅲ类标准;库区的主要支流中,嘉陵江的北碚和临江门断面水质符合Ⅱ类标准,乌江的武隆断面符合Ⅲ类标准,其余 4 条主要入库断面均为Ⅳ类,主要超标因子为 TP,库区大部分支流处于中营养至轻度富营养状态^[6];三峡坝址下游江段水质基本满足Ⅲ类水质标准;三峡库区及坝下游江段,重庆、宜昌、武汉、九江等城市排污量大,形成不同程度的污染带。

1.2 水生态

三峡库区干、支流生境多样,为不同水生生物的栖息和繁殖提供了适宜场所,水生生物资源丰富。三峡库区及坝下游工程影响区共有浮游植物 164 种,以硅藻、蓝藻和绿藻占优势;浮游动物 70 余种,以原生动物、轮虫为主;水生维管束植物 40 余种;底栖动物 20 余种,主要为摇蚊幼虫和寡毛类。

长江流域共有 280 多种鱼类,上游约有 200 种鱼类,其中特有鱼类 75 种。三峡库区江段共有鱼类 140 种,其中长江上游特有种 47 种。三峡工程影响区有 6 种国家重点保护水生动物:国家Ⅰ级重点保护水生动物白鱉豚、白鲟、中华鲟、长江鲟;国家Ⅱ级重点保护水生动物江豚和胭脂鱼。三峡库区上游江津至坝下游湖北武穴为长江“四大家鱼”重要产卵场所,其中重庆至三斗坪江段有 11 处,宜昌至城陵矶江段有 11 处,城陵矶至武穴江段有 8 处。

2 三峡工程运行对水环境与水生态的影响

2.1 对水环境的影响

2.1.1 水文情势变化

a. 库区水文情势。三峡水库正常蓄水位时,水库全长 663km,水面平均水宽 1. 1 km,总面积 1 084

km²,回水末端位于寸滩上游。在相同流量情况下,自库尾至坝前流速逐渐减缓。

水库来水来沙特性方面:1990 年代以来,长江上游径流量变化不大。库区干流泥沙主要淤积在常年回水区,集中在库区宽谷段,而窄深段泥沙淤积少,或略有冲刷。

b. 坝下水文情势。坝址年均径流量宜昌站长系列均值为 4 510 亿 m³。蓄水后,2003—2015 年实测宜昌、汉口和大通站径流量分别为 3 978 亿 m³、6 694 亿 m³ 和 8 377 亿 m³,较蓄水前分别减少 8%、6% 和 7%,主要原因是长江上游来水量比蓄水前平均减少 6. 6%。

三峡水库调度对坝下游径流过程的年内分配有不同程度影响,这种影响在试验性蓄水期间特别明显。中下游 12 月至次年 4 月径流量有不同程度的增加,而在三峡水库蓄水的 9—10 月,中下游来水出现不同程度的减少。宜昌站径流年内分配对比情况见表 1。

三峡水库运行调节对长江中下游干流沿程水位有不同程度影响。试验性蓄水期间,莲花塘、汉口、湖口、大通站 9—11 月月平均水位同比最大降幅分别为 2. 08、1. 99、1. 51 和 1. 22 m,12 月至次年 5 月平均水位则同比最大抬升分别为 1. 09、0. 96、0. 57 和 0. 45 m。

蓄水后,年输沙量大幅减少。宜昌、汉口和大通水文站 2003—2012 年年均输沙量分别为 0. 482 亿、1. 14 亿和 1. 45 亿 t,比蓄水前分别减少 90%、71% 和 66%。

三峡工程蓄水运用后,清水下泄导致长江中游河床总体表现为冲刷态势,且冲刷逐渐向下游发展。宜昌至湖口河段年均冲刷泥沙 1. 13 亿 m³。宜昌至湖口河段总体河势基本稳定,河床平面形态、洲滩格局大体未变,但局部河段(特别是沙质河床)的河势调整比较剧烈,崩岸时有发生。

表 1 三峡水库蓄水运用前后宜昌站径流年内分配对比

蓄水前后各阶段	1 月		2 月		3 月		4 月		5		6 月		7 月		8 月		9 月		10 月		11 月		12 月		全年	
	径流量/ 百分	亿 m ³ 比/%	径流量/ 百分	亿 m ³ 比/%	径流量/ 百分	亿 m ³ 比/%	径流量/ 百分	亿 m ³ 比/%	径流量/ 百分	亿 m ³ 比/%	径流量/ 百分	亿 m ³ 比/%	径流量/ 百分	亿 m ³ 比/%	径流量/ 百分	亿 m ³ 比/%	径流量/ 百分	亿 m ³ 比/%	径流量/ 百分	亿 m ³ 比/%	径流量/ 百分	亿 m ³ 比/%	径流量/ 百分	亿 m ³ 比/%	径流量/ 百分	亿 m ³ 比/%
	亿 m ³	比/%	亿 m ³	比/%	亿 m ³	比/%	亿 m ³	比/%	亿 m ³	比/%	亿 m ³	比/%	亿 m ³	比/%	亿 m ³	比/%	亿 m ³	比/%	亿 m ³	比/%	亿 m ³	比/%	亿 m ³	比/%	亿 m ³	比/%
蓄水前 (1950—2002 年)	114	2.62	93.7	2.14	116	2.64	171	3.92	311	7.12	466	10.7	805	18.4	734	16.8	657	15	484	11.1	260	5.95	157	3.6	4369	100
蓄水后实测 (2003—2012 年)	137	3.45	121	3.05	147	3.69	182	4.58	312	7.84	431	10.8	727	18.3	647	16.3	560	14.1	329	8.27	233	5.85	152	3.83	3978	100
试验性蓄水期实测 (2008—2012 年)	152	3.79	138	3.43	156	3.89	194	4.84	333	8.29	421	10.46	729	18.14	692	17.21	513	12.75	284	7.06	251	6.25	156	3.89	4019	100
2015 年	167	4.29	155	3.99	208	5.35	262	6.74	337	8.68	459	11.80	552	14.19	434	11.16	534	13.74	362	9.30	236	6.06	183	4.70	3887	100

注:资料来源于长江水利委员会水文局三峡水库蓄水运用以来的水文泥沙观测研究成果,以及 2013 年 10 月三峡工程可持续运用水沙调度和生态环保技术研讨会资料。

2.1.2 水环境变化

a. 污染源。库区主要污染源为农田径流污染,其次为畜禽养殖污染,城市生活污水、工业废水、城市径流污染以及农村生活污水污染、船舶流动污染等。主要污染物依次为 TP、COD、挥发酚、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、氰化物和石油类。

b. 库区及坝下游水质。1998—2015 年,三峡库区长江干流水质总体保持Ⅱ、Ⅲ类的良好状态,蓄水前后库区干流水质总体稳定。库区干流 15 个断面中,蓄水前的 1998 年、1999 年水质基本符合Ⅱ类标准,2000—2002 年有部分断面出现水质超标。蓄水后,干流水质基本未出现超标现象。库区支流水质主要为Ⅱ~Ⅲ类。蓄水前,支流水质差别较大,属于Ⅴ类水质的断面比例达 34.4%,属于Ⅱ类水质断面比例占 23.8%。蓄水后支流水质总体比干流差,坝前支流水质较库中、库尾水质差。三峡工程运行对坝下游水质的影响,主要表现在蓄水时段坝下游流量减少,水体稀释能力减弱,但坝下江段污染物浓度没有明显增加态势,因为大坝拦蓄,泥沙悬浮物含量反而减少^[7]。枯水期 1—3 月向坝下游补水,对水质总体有利。坝下南津关断面水质代表参数的质量浓度基本持平或略有降低。坝下游范围广,对水质的影响还有待进一步监测分析。

c. 水库富营养化情况。三峡水库蓄水前,各支流均为典型的河流流态,2000—2002 年 13 条支流 TN 质量浓度在 0.35 ~ 9.34 mg/L, TP 质量浓度在 0.01 ~ 2.44 mg/L, COD_{Mn} 质量浓度为 0.81 ~ 23.39 mg/L,库区具备发生富营养化的条件。2004—2015 年间,库区部分支流出现不同程度的富营养化现象,但大多属于轻度富营养化,只有芄溪河、花溪河富营养化程度相对较重,属中度富营养状态,这主要与承接了万州区大量污染负荷有关。支流富营养化敏感的时段为 3—10 月,主要因为本时段水温逐渐升高,干流流量逐渐增大,补给了支流营养物质。支流的富营养化分布大致以芄溪河汇口为界,芄溪河汇口以上支流富营养化较重,以下支流富营养化相对较轻。

d. 库区支流“水华”现象。三峡水库 2003 年开始蓄水,库区部分支流回水区先后出现不同程度的“水华”。2008 年 175 m 水位蓄水以来,“水华”频度较初期蓄水增加。但总体上看,受天气和水库水位调节的影响,目前库区的“水华”是一种间歇的局部的富营养化现象。三峡库区“水华”暴发频率较高的月份为 3—6 月,推测可能与期间水温适宜藻类生长、水体氮磷含量较高、水体滞留时间较长有关。在空间分布上,“水华”多发生在回水顶托区。三峡库

区出现的“水华”藻类非常丰富,优势种群主要包括隐藻、硅藻、甲藻、绿藻和蓝藻等,其中蓝藻“水华”逐渐成为常见种。

上述三峡工程蓄水运行后的水环境变化情况与环境影响报告书的预测结论基本一致。

2.2 对水生态的影响

三峡工程蓄水后,库区及坝下游水文情势、水环境等均发生一定变化,库区水生态变化较明显。坝下游水生态的变化涉及中下游干流、中游通江河湖和河口生态系统^[7],其变化是一个长期的过程,有待进一步监测。根据成都勘测设计研究院和有关水生生物研究单位的资料和近年的调查成果,三峡工程初期运行后,水生态变化的主要特征如下。

2.2.1 水生态系统结构

a. 库区水生态系统。三峡水库蓄水后,库中和坝前江段流速变缓,越近坝前越缓;库尾江段仍基本保持流水生境。水生生境的变化引起生物群落结构的变化,水体中适应静水性的生物物种增多,浮游生物、底栖动物生物量增加;一些支流浮游生物过多,出现“水华”。库区鱼类类群结构发生相应变化,适应静水或缓流水鱼类比例增加,而适应流水性鱼类比例降低,并从库尾木洞至坝前秭归江段呈递减趋势。库尾以上江段仍保持河流状态,呈现河流生物群落结构特征。目前水库生态系统结构正向“河库型”的体系演化。库区部分支流已经开始表现出典型的河库型生态系统特征。从库尾至坝前形成河流区、过渡区和湖泊区水库生态系统结构,上游江段与水库构成新的河库复合生态系统。

b. 坝下游水生态系统。三峡水库蓄水后,坝下游年内径流进行重新分配,枯水期下泄流量增加,汛后蓄水期流量减少。清水下泄,河床滩槽受到不同程度冲刷,底质层遭到破坏;大坝下游水温出现春夏季低、秋冬季高的现象,同时坝下游出现溶解性气体过饱和现象。由于水库调节作用和泥沙来量减少,坝下游各江段水生生境受到不同程度的影响^[7-8]。

长江中下游干流长达 1 893 km,江湖水沙变化过程复杂,坝下游水生态系统的变化是一个缓慢的过程,其空间结构特性尚不十分明显,有待进一步监测研究。

2.2.2 饵料生物

库区各江段浮游植物、浮游动物、底栖动物、着生藻类和水生维管束植物的种类组成和生物量发生相应变化,干流坝前至库中及支流回水区喜流水型物种比例呈下降趋势,显示出水库生态系统特征。

a. 浮游植物。干流江段以硅藻为优势种群,库区浮游植物生物量升高。

b. 浮游动物。库区各断面浮游动物呈现先增加后降低趋势。浮游动物物种数峰值出现在 2004 年。浮游动物组成中,轮虫所占比例上升。

c. 底栖动物。库区干流江段喜流水性底栖动物物种减少,支流回水区喜静水性底栖动物物种增多。

d. 着生藻类。干流和支流仍以硅藻门占优势。

e. 水生维管束植物。库区水流变缓及消落区是适合水生维管束植物的库段,蓄水后水生维管束植物的种类和数量较多。

但蓄水后,长江中下游浮游动植物和底栖动物的变化不明显。

2.2.3 鱼类及珍稀水生动物

a. 库区鱼类组成和群落结构。库区鱼类组成,从空间分布变化上看,蓄水后库区秭归、万州、木洞及库区上游合江江段鱼类种类较蓄水前明显增加,而宜宾江段的变化较小。从鱼类群落结构上看,蓄水后从上游至坝前适应流水的鱼类比例逐渐减少,适应静水性的鱼类比例逐渐增多。库区渔获物中,外来种出现的种类较多,采集到斑点叉尾鮰、短盖巨脂鲤、胡子鲶等 13 种,但这主要受周边水产养殖的影响,与三峡工程无必然的联系。长江中下游鱼类组成中,宜昌至湖口江段特有鱼类比例下降,“四大家鱼”的比例呈先降后升的趋势,出现回升在 2005 年前后。

b. 长江上游特有鱼类的变化。库区干支流江段长江上游特有鱼类蓄水后总数 47 种,比历史记录的 44 种增加 3 种,但鱼类原种类减少了 10 种,反映鱼类组成发生了变化。蓄水后,库区及上游各江段圆口铜鱼、长鳍吻鮡资源呈下降趋势,圆筒吻鮡总体变化不大,长薄鳅资源呈增加趋势。长江上游特有鱼类资源的变动,不仅受三峡水库蓄水的影响,而且受过度捕捞、采砂、航道整治、水电开发、水质污染等的叠加影响。

c. 长江下游洄游性经济鱼类的变化。20 世纪 70 年代至 2012 年,凤鲚捕捞量总体呈波动下降趋势。刀鲚捕捞量 20 世纪 70 年代至今持续下降,至蓄水前的 2002 年下降 80% 以上。长江河口鳊苗总捕捞量明显波动,呈周期性特征。

d. 珍稀水生动物的变化。中华鲟繁殖群体数量和产卵规模下降,规模维持在较低水平。三峡工程蓄水后,坝下水文泥沙情势改变,低温水下泄和河床冲刷变化,可能是造成中华鲟近年来产卵期推迟及群体数量规模下降的原因^[9-10]之一,当然,也可能与船闸运行、河势调整工程、水体中环境雌激素含量等有关,其变化规律和机理有待进一步研究。

白鲟在蓄水前数量已经很少,蓄水后在三峡库区和长江上游水域没有误捕记录。目前长江鲟在库区及上游种群数量很小,大部分在宜宾至泸州附近江段,在库区主要在万州以上库段。蓄水后,胭脂鱼在库区江段数量较蓄水前有所增加,可能与增殖放流有关。由于人为活动加剧,白鱈豚已功能性灭绝,江豚数量持续下降。三峡水库清水下泄加剧了对下游江段的冲刷,使栖息生境进一步发生变化。

e. “四大家鱼”产卵场的变化。三峡工程建设前,重庆至三斗坪共分布有 11 个“四大家鱼”产卵场,产卵规模占全江总量 29.6%。三峡水库蓄水后,6 处产卵场消失,5 处产卵场变化不大或上移。三峡水库蓄水后长江上游“四大家鱼”产卵规模有增大趋势,主要因为三峡水库缓流,形成类似湖泊生境,并与上游保护区江段形成新的河床复合生态系统,为“四大家鱼”提供了繁殖产所。总体上,三峡水库蓄水后对鱼类的影响情况与环境影响报告书预测的基本一致。

3 水环境与水生生态保护对策

3.1 加强水环境保护

a. 优化水库调度,开展泥沙问题研究^[11]。根据各方面对水资源利用的需求,研究并优化新的水沙情势下,以三峡水库为核心的上游水库群的联合调度模式。开展泥沙问题综合研究,权衡水库淤积、下游河道冲刷、水资源利用需求等情况,进一步采取三峡水库优化调度措施,加强原型观测和实测资料分析,改善库区和坝下游河段的泥沙冲淤环境。

b. 落实最严格水资源管理制度,加强水功能区限制纳污红线管理,促进水生态系统的保护与修复。

c. 加强城镇生活污水处理和工业废水防治。提高已建生活污水处理厂的运行和管理能力,完善迁建新城区的雨污分流制,维护库区水环境安全。

d. 加强农村面源污染防治,控制“水华”频发现象。针对支流富营养化、“水华”频发的问题,进一步开展面源污染防治,并进行“水华”特征、发生机理、富营养化成因及过程的跟踪调查研究,以增强应急措施的有效性。

e. 加强饮用水水源地保护。进一步加强库区饮用水源地的综合治理,开展水源地保护区规范化建设,完善水源地安全预警措施与管理,确保饮用水水源地安全。

f. 强化环境监测的法制建设,完善环境监测制度,提高环境监测效率、水平和应急监测能力。

3.2 完善水生态保护

a. 加强栖息地保护,健全完善自然保护区的管

理。加强和完善长江上游珍稀特有鱼类自然保护区、长江湖北宜昌中华鲟自然保护区等的管理,有效保护水生生物栖息繁殖。继续加大对保护区的投入,提高保护区管理和运行效率,切实发挥保护水生生物的作用。

b. 建立和完善物种保护工程,深入开展鱼类生境保护、修复和人工繁殖等技术研究,保护重要物种资源。在长江流域通过水产种质资源保护区、珍稀特有鱼类救护中心,专项救护濒危物种,并采取建设濒危水生野生动物繁殖场等措施,建立较为完整的水生生物多样性和濒危物种保护体系,健全和完善三峡工程水生生物保护体系。进一步发挥珍稀特有鱼类驯养救护和物种保护的机构和科研部门的作用,结合三峡工程各项水生生物保护措施,深入开展珍稀特有鱼类人工繁殖技术研究,以保护重要物种资源。

c. 加强人工增殖放流,进一步开展珍稀特有鱼类人工繁殖技术等的研究,增加珍稀特有鱼类放流的种类及规模。三峡工程自 2005 年以来实施珍稀特有和重要经济鱼类的增殖放流,2009—2015 年组织实施了长江上游珍稀特有鱼类人工繁殖、放流技术试点示范推广项目。建议进一步加强珍稀特有和重要经济鱼类的放流监测和效果评价,开展放流野生群体种群动态、结构的调查和基础研究,完善增殖放流的管理制度,增加增殖放流的种类、数量和有效性。

d. 在试验性生态调度基础上,研究实施科学合理的生态调度方案。自 2011 年开始,连续 3 年针对“四大家鱼”的三峡水库生态调度试验,对“四大家鱼”的自然繁殖起到了促进作用。建议进一步开展生态调度全方位分析论证,科学评估不同洪水调度规模和方式对鱼类繁殖的影响,并扩大生态调度的目标,开展生态调度效果的监测评估,为优化生态调度提供科学依据。

参考文献:

[1] 陆佑楣,曹广晶. 长江三峡工程[M]. 北京:中国水利水电出版社,2010.

[2] 李锦秀,禹雪中,幸治国. 三峡库区支流富营养化模型开发研究[J]. 水科学进展,2005,16(6): 777-783. (LI Jinxiu, YU Xuezhong, XING Zhiguo. Eutrophication model for the branch of Three Gorges Reservoir[J]. Advances in Water Science,2005,16(6): 777-783. (in Chinese))

[3] 王子成,王保栋,辛明,等. 三峡水库正常蓄水后长江口海域营养盐分布与结构变化[J]. 海洋科学进展,2015,33(1): 100-106. (WANG Zicheng, WANG Baodong, XIN Ming, et al. Changes of distributions and compositions of

nutrients in the Changjiang Estuary after normal operation of the Three Gorges Reservoir [J]. Advances in Marine Science,2015,33(1): 100-106. (in Chinese))

[4] 严恩萍,林辉,王广兴,等. 1990—2011 年三峡库区生态系统服务价值演变及驱动力[J]. 生态学报,2014,34(20): 5962-5973. (YAN Enping, LIN Hui, WANG Guangxing, et al. Analysis of evolution and driving force of ecosystem service values in the Three-Gorge Reservoir region during 1990—2011 [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014,34(20): 5962-5973. (in Chinese))

[5] 李崇明,黄真理,张晟,等. 三峡水库藻“水华”预测[J]. 长江流域资源与环境,2007,16(1): 1-5. (LI Chongming, HUANG Zhenli, ZHANG Sheng, et al. Risk forecas of algal bloom in the Three-Gorge Reservoir [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2007,16(1): 1-5. (in Chinese))

[6] 水利部长江水利委员会. 长江流域及西南诸河水资源公报[M]. 武汉:长江出版社,2014.

[7] 唐萍,翟红娟,邹家祥. 三峡库区水环境保护与生态修复初步研究[J]. 水资源保护,2011,27(5): 43-46. (TANG Ping, ZHAI Hongjuan, ZOU Jiaxiang. Preliminary study on water environmental protection and ecological restoration in Three Gorges Reservoir area [J]. Water Resources Protection,2011,27(5): 43-46. (in Chinese))

[8] 董增川,梁忠民,李大勇,等. 三峡工程对鄱阳湖水资源生态效应的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2012,40(1): 13-18. (DONG Zengchuan, LIANG Zhongmin, LI Dayong, et al. Influences of Three Gorges Project on water resources and ecological effects in Poyang Lake [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2012,40(1):13-18. (in Chinese))

[9] 李建,夏自强,戴会超,等. 三峡初期蓄水对典型鱼类栖息地适宜性的影响[J]. 水利学报,2013,44(8): 892-900. (LI Jian, XIA Ziqiang, DAI Huichao, et al. Effect of the Three Gorges Reservoir initial filling on downstream habitat suitability of the typical fishes [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44 (8): 892-900. (in Chinese))

[10] 曹文宣. 有关长江流域鱼类资源保护的几个问题[J]. 长江流域资源与环境,2008,17(2): 163-164. (CAO Wenxuan. Several problems related to the protection of fish resources in Yangtze River Basin [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2008,17(2): 163-164. (in Chinese))

[11] 肖杨,彭杨,王太伟. 基于遗传算法与神经网络的水库水沙联合优化调度模型[J]. 水利水电科技进展,2013,33(2),9-13. (XIAO Yang, PENG Yang, WANG Taiwei. Water sediment coordinated optimized dispatch model of reservoir based on genetic algorithm and neural network [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2013,33(2):9-13. (in Chinese))

(收稿日期:2016 - 03 - 04 编辑:彭桃英)