

上游水库水温情势变化对中华鲟产卵江段水温的影响

惠二青¹,毛劲乔²,戴会超²

(1. 中国长江三峡集团公司,北京 100038; 2. 河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098)

摘要:针对三峡水库蓄水运行后中华鲟自然产卵期逐渐推迟的问题,对影响中华鲟繁殖关键要素水温的因素开展研究。基于三峡大坝及葛洲坝上下游典型断面的水温及气温实测资料,分析了三峡水库蓄水后 10 年(2003—2012 年)的水温变化情势和影响葛洲坝下游中华鲟产卵江段特定时段水温的原因。结果表明:三峡水库蓄水后库区在 10 月水温高于蓄水前,对下游中华鲟产卵江段水温产生直接影响;局地气温变化与水温情势变化密切相关,是引起中华鲟产卵江段水温上升的根本原因,对水温上升的贡献度约为 61%。

关键词:三峡水库;水温变化;滞温效应;局地气温;产卵江段;中华鲟

中图分类号:TV213.4;Q959.463 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2018)02-0044-05

Effects of temperature variation at upstream of the Three Gorges Reservoir on Chinese sturgeon spawning reach// HUI Erqing¹, MAO Jingqiao², DAI Huichao² (1. China Three Gorges Corporation, Beijing 100038, China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Focusing on the problem that the spawning time of the Chinese sturgeon has been delayed to November due to the impoundment of the Three Gorges Reservoir (TGR), this paper studied one of the key factors, water temperature, that influences the reproduction process. Based on the measured water temperature and meteorological data at typical cross-sections upstream and downstream of the Three Gorges Dam and the Gezhou Dam, water temperature variation during the first decade after the impoundment of TGR (2003–2012) and its effects on water temperature characteristics in the Chinese sturgeon spawning reach located in the downstream of Gezhou Dam were analyzed. The result shows that after the impoundment of TGR, water temperature in the reservoir is higher than before, having substantial effects on the downstream reaches. Local air temperature variation is closely related with the water temperature variation and it can be a fundamental reason for water temperature rise in the spawning reach, accounting for a contributing degree of about 61%.

Key words: Three Gorges Reservoir; water temperature variations; temperature stagnation effect; local air temperature; spawning reach; Chinese sturgeon

中华鲟是我国特有的大型溯河洄游性底栖鱼类,传统产卵场主要分布在金沙江下游新市至涪陵江段。20 世纪 80 年代中华鲟洄游线路被葛洲坝工程阻断后,仅在葛洲坝下游观测到一处产卵场,种群数量锐减。野外监测表明,位于葛洲坝下游江段的中华鲟产卵时间已由之前的 10 月上旬至 11 月中旬推迟到了 11 月中下旬^[1]。有专家和学者认为导致该现象的主要原因是三峡水库蓄水后的滞温效应,即三峡水库自 2003 年蓄水运行后,深层水下泄可能使得中华鲟产卵适宜水温出现时间推迟,并对中华鲟的性腺发育和繁殖能力产生了不利影响^[2]。上述观点尚需进一步研究证实,如从近年的实测资料

来看,三峡水库水温未明显分层;根据中华鲟研究所、长江水产研究所、中国科学院水生生物研究所、水利部中国科学院水工程生态研究所等多家单位的观测资料,2011 年和 2012 年的 11 月中华鲟进行了两次产卵,产卵数量及规模没有下降,但随后年份出现较多不确定性,2013—2015 年均未发现中华鲟在现存产卵场的自然繁殖行为。此外 2015 年在长江口监测到野生中华鲟幼鱼,表明 2014 年中华鲟可能在下流其他水域进行了自然繁殖,但繁殖的时间和地点并不能确定;2016 年 11 月再次监测到中华鲟在葛洲坝产卵场进行了自然繁殖。由此可见,上游水库运行对中华鲟自然繁殖的影响过程与程度尚需

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0401708);国家自然科学基金(51379059);中央高校基本科研业务费专项(2015B15314)

作者简介:惠二青(1977—),男,高级工程师,博士,主要从事水环境水生态研究。E-mail:hui_erqing@ctg.com.cn

通信作者:毛劲乔(1978—),男,教授,博士,主要从事水利水电工程研究。E-mail:jingqm@163.com

进一步探讨^[3-6]。本文基于三峡水库蓄水前后大坝及葛洲坝上下游典型断面 10 月水温 and 气温实测资料,比较三峡水库蓄水前后中华鲟产卵江段水温以及气温变化情况,以分析三峡水库蓄水后水温情势变化对葛洲坝下游中华鲟产卵江段水温的影响。

1 中华鲟自然繁殖的基本情况

葛洲坝水利枢纽截流后,中华鲟产卵群体被阻隔在葛洲坝以下江段,在坝下至古老背江段形成了新产卵场,这是目前唯一已知的长江中华鲟现存产卵场。三峡工程运行后,长江中下游的水文水动力条件进一步发生改变,对中华鲟的自然繁殖生长产生了新的影响^[7]。中华鲟繁殖季节一般在 10 月中旬至 11 月中旬,产卵适宜水温为 17~20.2℃,超出这一范围则产卵频次会显著下降^[8-12]。监测表明,近年来葛洲坝下游江段中华鲟产卵期有一定程度延后,从每年的第 300 天左右推迟到第 325 天左右,产卵规模逐年下降。从图 1 可以看出,在 2003 年三峡水库蓄水前,中华鲟产卵规模已呈较明显下降趋势;三峡水库蓄水后,产卵规模进一步下降,整体上在百万粒规模的较低水平波动。

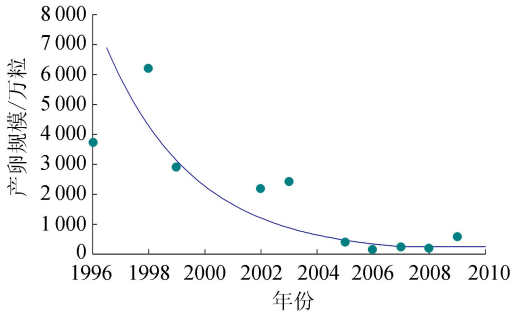


图 1 三峡水库蓄水前后中华鲟产卵规模变化情况

2 三峡大坝上下游水温与气温变化趋势

2.1 蓄水后上下游断面水温比较

三峡水库是狭长的河道型水库,本文以水库上游寸滩断面入库水流水温为背景,探讨大坝上下游断面水温变化情势。选取庙河、黄陵庙和宜昌 3 个典型断面进行分析,其中庙河断面位于三峡大坝上游 17 km 处,黄陵庙断面位于三峡大坝下游 13 km 处,宜昌断面则位于葛洲坝下游中华鲟产卵江段,距葛洲坝 6 km,距三峡大坝 44 km。由于水温监测资料所限,以及考虑到 2013 年后中华鲟产卵出现了更多的不确定性,因此本文选择三峡水库蓄水后 10 年(2003—2012 年)庙河、黄陵庙和宜昌断面的平均水温资料,分析 10 月中华鲟产卵江段水温变化情况,并对各断面进行比较分析。2003—2012 年三峡大坝上下游典型断面 10 月水温如图 2 所示。

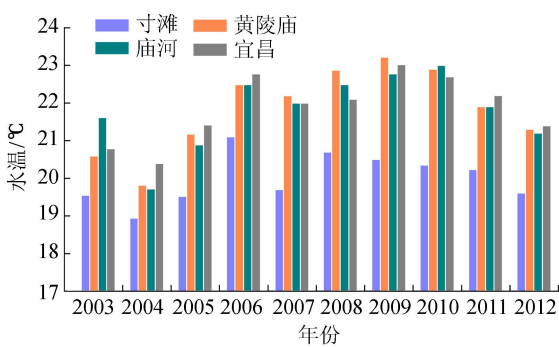


图 2 2003—2012 年三峡大坝上下游典型断面 10 月水温比较

三峡水库蓄水后大坝上下游断面 10 月水温总体呈升高趋势,但在 2011 年后又有所下降。比较庙河、黄陵庙和宜昌断面之间的水温可以发现,庙河断面和宜昌断面水温温差平均值为 0.38℃,其变化幅度在-0.7~0.8℃之间(负号代表宜昌水温高于庙河水温),最大温差出现在 2003 年 10 月。三峡水库蓄水前,三峡大坝附近水温变化过程较寸滩滞后,存在小幅相位差^[1];蓄水后寸滩与庙河的 10 月水温差有较明显地增加,表明库区水温高于同期蓄水前水温。由于 3 个断面之间并无较大支流和工业热污染源汇入,若三峡水库滞温效应是下游江段水温变化的唯一影响源,则黄陵庙、宜昌和庙河断面水温变化规律应基本一致。但由图 2 可知,3 个断面水温尽管相对差别较小,但互有高低,并未表现出十分明显的相似性规律。由此可合理推测,三峡水库蓄水并非造成中华鲟产卵江段水温变化的唯一因素。

如图 3 所示,三峡水库蓄水运行后,中华鲟产卵江段 10 月日均水温平均值及最小值均呈现增大趋势,2005 年后日均水温最小值均超过了产卵适宜水温,这是中华鲟自然产卵期逐渐推迟到了 11 月的原因。上游三峡水库蓄水后,宜昌断面水温在 10 月内的变化幅度趋于收窄,尤其是 2005 年后,宜昌断面 10 月逐日水温变化范围已小于 1℃。鉴于此,采用月均水温资料对整体水温情势进行分析是较为适宜的。

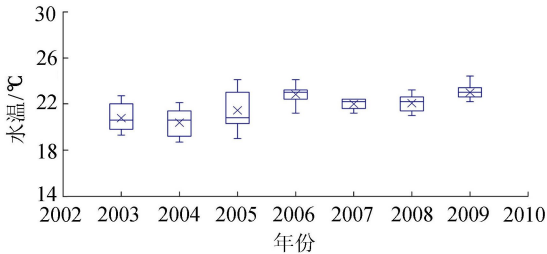


图 3 三峡大坝蓄水后宜昌断面各年 10 月逐日水温分布箱式图

2.2 上下游地区气温变化趋势分析

下游江段水温偏高的潜在原因包括气候变暖、上游水库滞温效应影响、周边人类活动影响等^[13-17]。

全球气温近百年来升高了1℃左右,长江流域也不例外:上海 1877—2003 年气温升速是全球平均的 2.1 倍,武汉 1953—2003 年气温升速是全球的 2.0 倍,河源区沱沱河站气温升速是全球的 0.7 倍;1980 年以来长江流域增温加快,上海、武汉和沱沱河站气温增速分别是全球平均的 2.9 倍、3.1 倍和 1.2 倍^[18-22]。由此可见,长江流域气温持续升高是整体江段水温升高的大背景。

重庆市 1924—2003 年多年平均气温 18.4℃, 1980—2003 年多年平均气温 18.3℃。研究发现: 1924—1983 年重庆气温并没有反映出变暖的趋势, 气温反而略有降低;1984 年后,重庆呈持续增温趋势,仅 20 年气温就增加了约 0.7℃。1984—2003 年重庆站气温距平与全球平均气温距平相关性极显著,其气象增速是全球气温增速的 1.9 倍^[22]。

自 1984 年以来,宜昌 10 月气温总体呈上升趋势(图 4),这与全球气候变暖有较为密切的关系。2000—2012 年平均气温相对 1990—1999 年平均气温呈现升高趋势,升高了约 0.8℃,尤其是在 2006 和 2009 年 10 月,宜昌气温均超过了 20℃。1990—2003 年,长江流域城市数由 197 座增加到 262 座,干支流 22 个主要城市的建成区总面积增加了 179%,城市道路铺装总面积增加了 8 倍,其中三峡库区上下游地区所在城市如重庆、宜昌等增速排在前列^[23]。随着三峡库区周边城市化进程加快,库区人口、城区面积以及流域不透水面积急剧上升,造成库区温室气体排放量增加,这是造成库区局地气温上升的重要原因之一。

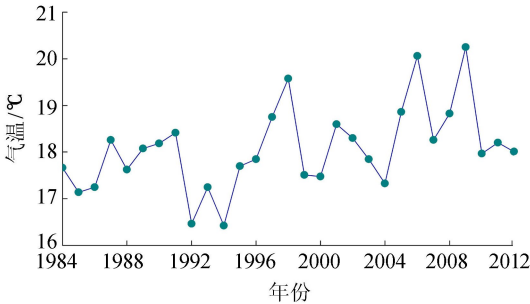


图 4 1984—2012 年宜昌断面 10 月气温变化趋势

3 断面水温与气温相关关系分析

3.1 庙河和黄陵庙断面

庙河和黄陵庙断面 10 月水温与气温相关分析分别如图 5 和图 6 所示。从图 5 可以看出,在庙河断面,除少数异常年份外水温与气温整体呈线性相关关系:

$T_w = 1.099T_a + 1.808 \quad (R^2 = 0.81) \quad (1)$

式中: T_w 为水温,℃; T_a 为气温,℃。由图 6 可知,黄

陵庙断面水温与气温相关性较好,两者关系可以近似表达为二次多项式:

$T_w = -0.358T_a^2 + 14.288T_a - 119.13 \quad (R^2 = 0.78) \quad (2)$

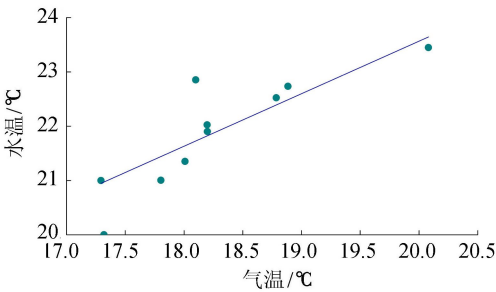


图 5 庙河断面水温与气温相关关系

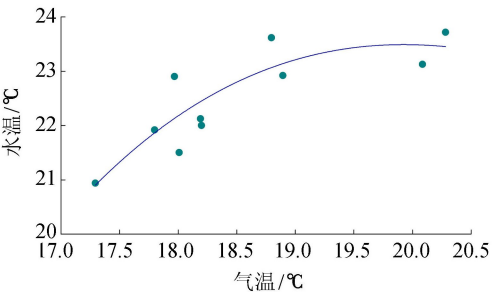


图 6 黄陵庙断面水温与气温相关关系

由图 5 和图 6 可知,庙河与黄陵庙断面的水温与气温有着显著正相关性,据此可合理推断全球气候变暖的大背景和城市不透水面积的急剧增加而引起的该区域气温上升,是上述断面水温上升的主要原因之一。

3.2 宜昌断面

利用宜昌水文站 10 月水温与气温资料,分析比较三峡水库蓄水前后的变化趋势(图 7),并对其相关性进行分析(图 8)。从图 7 可以看出,从 2000 年以来,宜昌断面水温和气温变化趋势基本一致,两者均呈上升趋势。2003 年 6 月三峡水库开始蓄水,但实际监测资料表明 2003—2004 年水温变化却低于前几年;2006 年 4—6 月三峡水库近坝区水域首次出现的较大温差现象,极有可能是由 2005 年蓄水导致的。因此,在分析三峡水库蓄水对下游水温的影

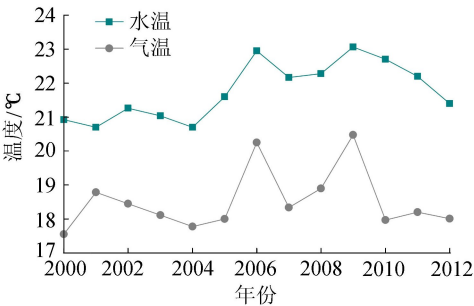


图 7 2000—2012 年宜昌断面 10 月水温与气温变化比较

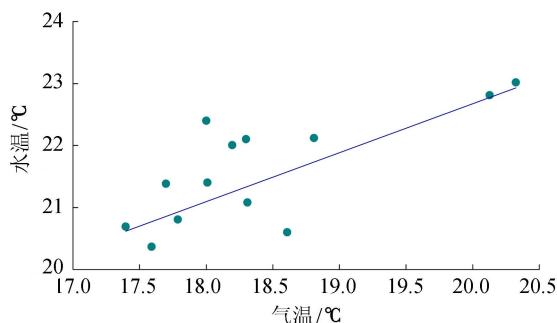


图8 宜昌断面水温与气温相关关系

响时,以2005年为时间节点,前5年(2000—2004年)宜昌断面的平均水温和平均气温分别为20.70℃和17.88℃,后5年(2005—2009年)分别为22.26℃和19.26℃。对比可以发现,后5年的平均水温和气温分别上升了1.56℃和1.38℃。

从图8可以看出,除少数异常年份外宜昌断面水温与气温之间整体呈线性相关关系:

$$T_w = 0.767T_a + 7.4012 \quad (R^2 = 0.67) \quad (3)$$

由式(3)可知,宜昌断面水温变化 ΔT_w 与气温变化 ΔT_a 的比值为

$$\Delta T_w / \Delta T_a = 0.767 \quad (4)$$

引起宜昌断面水温上升的影响因素包括全球气候变暖和城市不透水面积急剧增加引起的气温上升、上游水库调度运行影响、电站机组过流影响、沿岸工业热污染源等各种因素。因为资料相对匮乏,外部因素对水温上升的贡献难以准确量化,因此除气温上升引起的贡献单独计算外,其他因素归并为一类进行分析。三峡水库蓄水后除少数异常年份外,在2003—2012年宜昌断面平均水温和气温相比蓄水前分别上升了0.83℃和0.67℃,结合式(4)可以估算得出因气温上升引起的水温上升约为0.51℃,占水温上升总量的比例约为61%。三峡水库蓄水并非葛洲坝下游中华鲟产卵江段水温上升的唯一主要影响因素,产卵江段水温上升也与局部气温上升密切相关。气候变化是水温基本变化趋势的主导因素,三峡水库上下游气温和水温整体均呈上升趋势。气温变化不但直接影响到产卵场水温,同时也会通过持续影响上游三峡水库库区的水温,在特定时段使得滞温效应进一步凸显,通过水库蓄放水调度操作对下游河段会产生影响。从另一方面来看,尽管三峡水库蓄水引起了一定的滞温效应,但三峡水库的调度使得中华鲟产卵江段水温变化幅度变小,有可能在较长一段时间维持最适宜水温,一定程度上有利于中华鲟产卵。

4 结 语

针对三峡水库蓄水后水温情势及对葛洲坝下游

中华鲟产卵江段造成的影响,本文以三峡水库上游断面为背景,基于三峡大坝上下游典型断面水温、水情以及气温实测资料开展了定量分析,结果表明:三峡水库上下游水温、气温整体均呈上升趋势,且两者相关关系存在显著正相关性;三峡水库蓄水并非葛洲坝下游中华鲟产卵江段水温上升的唯一主要影响因素,中华鲟产卵江段水温上升受到局地气温上升的重要影响,其对水温上升的贡献份额约为61%。本文分析结果可在一定程度上反映三峡水库蓄水在葛洲坝下游江段引起的滞温效应,但三峡水库蓄水至今水温资料较短,需依托后续数据加以追踪分析。

参考文献:

- [1] 邢领航,刘孟凯,黄国兵. 葛洲坝坝下江段水温变化影响因素分析[J]. 长江科学院院报,2013,30(8):90-96. (XING Linghang, LIU Mengkai, HUANG Guobing. Influencing factors and their contributions to water temperature variation near downstream Gezhouba Dam in the Yangtze River [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2013, 30(8): 90-96. (in Chinese))
- [2] 郭文献,王鸿翔,夏自强,等. 三峡-葛洲坝梯级水库水温影响研究[J]. 水力发电学报,2009,28(6):182-187. (GUO Wenxian, WANG Hongxiang, XIA Ziqiang, et al. Effects of Three Gorges and Gezhouba reservoirs on river water temperature regimes [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2009, 28(6): 182-187. (in Chinese))
- [3] 左建,陆宝宏,顾磊,等. 基于综合调度的三峡水库汛末蓄水研究[J]. 水力发电,2015,41(12):85-92. (ZUO Jian, LU Baohong, GU Lei, et al. Study on impounding schemes after flood season for Three Gorges Reservoir by considering integrated scheduling [J]. Water Power, 2015, 41(12): 85-92. (in Chinese))
- [4] 陈永柏. 三峡水库运行影响中华鲟繁殖的生态水文学机制及其保护对策研究[D]. 北京:中国科学院研究生院,2007.
- [5] 余文公,夏自强,于国荣,等. 三峡水库水温变化及其对中华鲟繁殖的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2007,35(1):92-95. (YU Wengong, XIA Ziqiang, YU Guorong, et al. Water temperature variation in Three-Gorges Reservoir and its influences on procreation of Chinese sturgeon [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2007, 35(1): 92-95. (in Chinese))
- [6] 赵越,周建中,张华杰,等. 三峡水库提前蓄水对中华鲟产卵的影响[J]. 水力发电学报,2013,32(5):83-89. (ZHAO Yue, ZHOU Jianzhong, ZHANG Huajie, et al. Impact of Three Gorges Reservoir operation with ahead impounding water on *Acipenser sinensis* spawning [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32(5): 83-89. (in Chinese)).

- [7] 杜浩,危起伟,张辉,等. 三峡蓄水以来葛洲坝下中华鲟产卵场河床质特征变化[J]. 生态学报,2015,35(9): 3124-3131. (DU Hao, WEI Qiwei, ZHANG Hui, et al. Changes of bottom substrate characteristics in spawning ground of Chinese sturgeon downstream the Gezhouba Dam from impounding of Three Gorge Reservoir [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35 (9): 3124-3131. (in Chinese))
- [8] 危起伟. 中华鲟繁殖行为与资源评估[D]. 北京:中国科学院研究生院,2003.
- [9] 毛劲乔,戴会超. 重大水利水电工程对重要水生生物的影响与调控[J]. 河海大学学报(自然科学版),2016,44(3):240-245. (MAO Jingqiao, DAI Huichao. Effects of large water conservancy and hydropower projects on major aquatic species and regulation [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2016, 44 (3): 240-245. (in Chinese))
- [10] 曹广品,惠二青,胡兴娥. 三峡水库蓄水以来近坝区水温垂向结构分析[J]. 水利学报,2012,43(10):1254-1259. (CAO Guangjing, HUI Erqing, HU Xing'e. Analysis of the vertical structure of water temperature in the vicinity area of Three Gorges Dam since the Three Gorges Reservoir impounds [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 43(10):1254-1259. (in Chinese))
- [11] 陶江平,乔晔,杨志,等. 葛洲坝产卵场中华鲟繁殖群体数量与繁殖规模估算及其变动趋势分析[J]. 水生态学杂志,2009,2(2):37-43. (TAO Jiangping, QIAO Ye, YANG Zhi, et al. Estimation on the spawning population and spawning sizes of Chinese sturgeon (*Acipenser sinensis*) and trend analysis of their change in recent years [J]. Journal of Hydroecology, 2009, 2 (2): 37-43. (in Chinese))
- [12] WANG Yuankun, XIA Ziqiang. Assessing spawning ground hydraulic suitability for Chinese sturgeon (*Acipenser sinensis*) from horizontal mean vorticity in Yangtze River [J]. Ecological Modelling, 2009, 220(11):1443-1448.
- [13] YU Zhenzhen, WANG Lingling, MAO Jingqiao, et al. Effects of water temperature on chlorophyll-a concentration stratification in the tributary bay of Three Gorges Reservoir [J]. Journal of Aerospace Engineering, 2013, 26(4):667-675.
- [14] 詹晓群,陈建,胡建军. 山口岩水库水温计算及其对下游河道水温影响分析[J]. 水资源保护,2005,21(1):29-35. (ZHAN Xiaoqun, CHEN Jian, HU Jianjun. Water temperature calculation for Shankouyan Reservoir and influence on temperature of river downstream [J]. Water Resources Protection, 2005, 21(1):29-35. (in Chinese))
- [15] 李褪来,陈黎明,王向明. 梯级水电站对库区和河道水温的影响预测[J]. 水利水电科技进展,2013,33(3):23-28. (LI Tila, CHEN Liming, WANG Xiangming. Influence forecast of the cascade power stations on water temperature of reservoirs and rivers [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2013, 33 (3): 23-28. (in Chinese))
- [16] 刘军英,贾更华,韩龙喜,等. 水库下游河道水温沿程分布的解析解及与其他方法的比较[J]. 水资源保护,2012,28(4):28-32. (LIU Junying, JIA Genghua, HAN Longxi, et al. Analytical solution of water temperature distribution in river downstream of reservoir and comparison with another method [J]. Water Resources Protection, 2012, 28(4):28-32. (in Chinese))
- [17] 蔡为武. 水库及下游河道的水温分析[J]. 水利水电科技进展,2001,21(5):20-23. (CAI Weiwu. Water temperature analysis for reservoirs and downstream rivers [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2001, 21(5):20-23. (in Chinese))
- [18] GAO Xin, LIN Pengcheng, LI Mingzheng, et al. Impact of the Three Gorges Dam on the spawning stock and natural reproduction of Chinese sturgeon in Changjiang River, China [J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2016, 34(5):894-901.
- [19] 张天宇,陈正洪,孙佳,等. 三峡库区近百年来气温变化特征[J]. 长江流域资源与环境,2012,22(2):138-144. (ZHANG Tianyu, CHEN Zhenghong, SUN Jia, et al. Variation characteristics of temperature in the Three Gorges Reservoir area during the past nearly 100 years [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2012, 22(2):138-144. (in Chinese))
- [20] 郭志华,刘祥梅,郑刚,等. 基于GIS的三峡库区生态环境综合评价:Ⅲ. 1951年以来的气温变化[J]. 气象科学,2010,10(3):323-331. (GUO Zhihua, LIU Xiangmei, ZHENG Gang, et al. In tegrated assessment of eco-environment in Three Gorges Reservoir area based on GIS and DEM: Ⅲ. temperature change assessment since 1951 [J]. Scientia Meteorologica Sinica, 2010, 10 (3): 323-331. (in Chinese))
- [21] 周英,袁久坤. 三峡库区“腹心”地带蓄水前后气温变化特征[J]. 气象科技,2016,44(5):783-787. (ZHOU Ying, YUAN Jiukun. Analysis of temperature variation before and after impoundment of Three Gorges Reservoir [J]. Meteorological Science and Technology, 2016, 44 (5): 783-787. (in Chinese))
- [22] 何应平. 长江流域的生态应力研究[D]. 北京:清华大学,2005.
- [23] YANG Le, LU Fei, ZHOU Xiaoping, et al. Progress in the studies on the greenhouse gas emissions from reservoirs [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(4):204-212.

(收稿日期:2017-04-13 编辑:熊水斌)