

## 三峡工程运行后荆江河段适宜生态流量研究\*

黄宇云<sup>1,2</sup>, 杨卓媛<sup>1,2</sup>, 余飞<sup>3</sup>, 余明辉<sup>2\*\*</sup>, 陆晶<sup>2</sup>

(1: 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 武汉 430010)

(2: 武汉大学, 水资源工程与调度国家重点实验室, 武汉 430072)

(3: 中国电力工程顾问集团中南电力设计院有限公司, 武汉 430071)

**摘要:** 适宜生态流量是维持河流生态系统健康发展的重要条件。本文借鉴 IHA 指标体系, 选用月均流量和年最大/小流量作为代表性指标, 基于三峡工程运行前水文序列, 采用 RVA 法分析三峡工程运行后荆江河段流量过程的变化度, 并计算同时考虑流量和水位的适宜生态流量过程。结果表明, 三峡工程运行后荆江河段流量过程整体改变度为 0.51~0.56。荆江河段适宜生态流量过程包括: 上荆江 1—12 月月均流量分别为 7347、6918、7307、9145、13052、18307、26489、22928、21855、17445、12381、8830 m<sup>3</sup>/s, 年最大流量为 37800 m<sup>3</sup>/s, 年最小流量为 6157 m<sup>3</sup>/s; 下荆江 1—12 月月均流量分别为 4837、4818、5125、6700、10108、13363、19611、16731、15685、13277、8484、6003 m<sup>3</sup>/s, 年最大流量为 30550 m<sup>3</sup>/s, 年最小流量为 4359 m<sup>3</sup>/s; 三峡工程运行后, 上荆江河段适宜生态流量满足程度低于下荆江。研究成果能为长江经济带水安全保障及水生态修复技术提供科学参考。

**关键词:** 荆江河段; 适宜生态流量; 三峡工程; RVA 法; IHA 法

## The suitable ecological discharge of the Jingjiang Reach after the operation of Three Gorges Project\*

Huang Yuyun<sup>1,2</sup>, Yang Zhuoyuan<sup>1,2</sup>, Yu Fei<sup>3</sup>, Yu Minghui<sup>2\*\*</sup> & Lu Jing<sup>2</sup>

(1: Changjiang Survey, Planning, Design and Research Co., Ltd., Wuhan 430010, P.R.China)

(2: State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University, Wuhan 430072, P.R.China)

(3: Central Southern China Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Wuhan 430071, P.R.China)

**Abstract:** Suitable ecological flow is an important condition to maintain the healthy development of river ecosystem. Using the IHA index system for reference, monthly average discharge and the annual maximum/small discharge as selected as representative indicators. The RVA method was used to calculate and determine the change degree of the discharge process of the Jingjiang Reach. The suitable ecological discharge process considering both discharge and water level after the operation of the Three Gorges Project was calculated. The results showed that the overall change degree of the discharge process of the Jingjiang reach after the operation of the Three Gorges Project was 0.51–0.56. The suitable ecological discharge progress of the Upper Jingjiang Reach include: the average monthly discharge from January to December were 7347, 6918, 7307, 9145, 13052, 18307, 26489, 22928, 21855, 17445, 12381 and 8830 m<sup>3</sup>/s, respectively; the annual maximum discharge was 37800 m<sup>3</sup>/s; the annual minimum discharge was 6157 m<sup>3</sup>/s. The suitable ecological discharge of the Lower Jingjiang Reach included: the average monthly discharge from January to December are 4837, 4818, 5125, 6700, 10108, 13363, 19611, 16731, 15685, 13277, 8484 and 6003 m<sup>3</sup>/s, respectively; the annual maximum flow was 30550 m<sup>3</sup>/s; the annual minimum flow was 4359 m<sup>3</sup>/s. The satisfaction degree of the suitable ecological discharge in the Upper Jingjiang Reach was lower than that in the Lower Jingjiang Reach after operation of the Three Gorges Project. The research results can provide scientific reference for the technologies for water security and aquatic ecosystem restoration in

\* 2024-04-29 收稿; 2024-05-29 收修改稿。

国家自然科学基金项目(11972265)、国家重点研发计划项目(2021YFC3200202)和长江勘测规划设计研究有限责任公司自主创新项目(CX2019Z11)联合资助。

\*\* 通信作者; E-mail: mhyu@whu.edu.cn。

the Yangtze River Economic Belt.

**Keywords:** The Jingjiang Reach; suitable ecological discharge; Three Gorges Project; RVA; IHA

长江横贯我国东西,水生生物资源丰富、种类繁多,水域生态类型齐全多样,是具有重要人文、社会经济功能的“黄金水道”<sup>[1-2]</sup>。长江上游系列水利枢纽的建设与运用显著改变了长江中下游河段的水文过程,影响河道内生物的栖息环境。长江中游荆江河段是三峡大坝的近坝段,在三峡工程对下游河道的影响过程中“首当其冲”。同时,荆江河段内分布有石首天鹅洲豚类国家级自然保护区、长江新螺段白鱀豚国家级自然保护区、长江监利段四大家鱼国家级种质资源保护区等7处自然保护区。因三峡工程的调蓄作用,荆江河段年内流量过程坦化,具体表现为汛期流量降低、枯期流量增加;由于水库的拦沙作用,荆江河段河床整体呈冲刷下切的变化趋势,局部河段河势调整剧烈<sup>[3-4]</sup>。这些变化影响了荆江河段内水生生物的生存环境,也影响着位于荆江以下河段的流量过程与江湖关系等,进而影响下游河湖的生态环境<sup>[5]</sup>。因此研究荆江河段的适宜生态流量对长江中下游河湖生态系统健康发展具有重要意义。

随着人类社会对水资源开发利用程度逐渐增加,水生态保护一直是热门的研究主题。基本生态需水量是 Gleick 于 1998 年提出的概念,其含义为保证物种多样性和生态完整性的基本需水量<sup>[6]</sup>;与之类似地,在国内有生态流量、最小生态需水量、适宜生态流量等概念<sup>[7-10]</sup>。其中最小生态流量是指保证河流生态系统中各物种生存的最低条件,是维持河流生态系统不崩溃的最低流量,若长期维持该流量,生态系统无法健康发展<sup>[11]</sup>。河流需要能够维持生态系统结构稳定的适宜生态流量<sup>[10]</sup>,为满足不同时期河道对流量的需求,适宜生态流量应为一个流量过程<sup>[12]</sup>。目前关于生态流量的研究成果丰富,计算方法超过 200 种<sup>[13]</sup>,主要有水力学法(湿周法、R2-CROSS 法)<sup>[14-15]</sup>、水文学法(Tennant 法、Texas 法、7Q10 法及 IHA 法等)<sup>[16]</sup>、整体分析法(南非 BBM 法、澳大利亚 ELOHA 法)<sup>[3]</sup>和生境模拟法(又称栖息地法,包括有效宽度法、IFIM 法)<sup>[13,17-19]</sup>。上述方法中,生境模拟法选取研究区域内指示物种对生境需求的确定生态流量,针对特定的物种,具有一定的局限性<sup>[20]</sup>。整体分析法则从流域整体角度出发,需要多学科专家(水文学、地貌学、水环境、生物学等)共同研究确定生态流量。生境模拟法和整体分析法在使用中需大量的人力和物力。水力学法和水文学法则更为宏观,水力学法以河道断面形态为研究基础,忽略了流量过程与生物特性,水文学法基于研究区域对不同流量保证率的需求计算生态流量,所需要的资料较为单一,操作简单,在生态流量的计算中应用最为广泛<sup>[13]</sup>,但忽略了生物特征。生态系统是具有一定自我调节能力的有机整体,可以认为被强人类活动干扰前(即天然条件下)的水位流量是维持河流生态系统健康发展的水文过程<sup>[18]</sup>。IHA(indicators of hydrological alteration)指标体系是 Richter 等<sup>[21]</sup>提出的维持河流生态系统健康的流量指标群,每个指标都具有一定的生态意义,能够较为全面地从流量过程的角度出发反映河流整体生态健康需求,已应用在多流域的生态流量研究中<sup>[9,22-23]</sup>。水位是湿地生态水文过程的关键因素之一,其改变将影响河滨湿地植被覆盖度和物种组成<sup>[24]</sup>。当前,因受强人类活动的影响,部分河流冲淤平衡被打破,河床发生较大的冲淤调整,加之流量过程的变化,水位过程也有明显变化,从而影响河滨湿地植被的分布<sup>[25]</sup>。水位的周期性波动对河滨动植物生存有着重要意义,也影响着河流生态系统健康发展,但目前的研究成果中少有兼顾水位过程的适宜生态流量。因此,本文研究适宜生态流量时兼顾水位和流量过程,可充分考虑水文情势变化对河流生境的影响,为强人类活动影响下的河流适宜生态流量计算研究提供参考。

本文借鉴 IHA 指标体系,选用月均流量和年最大/小流量作为适宜生态流量过程的代表性指标,以三峡工程运行时间(2003 年)为时间节点,采用 RVA 法分析三峡工程运行后荆江河段流量过程的改变度,基于天然条件下的水文过程计算同时考虑水位和流量过程的适宜生态流量过程,并分析三峡工程运行后荆江河段适宜生态流量的满足程度。

## 1 研究区域与数据资料

本文研究区域为长江中游荆江河段。荆江河段(29°27'~30°17'N,111°31'~113°8'E,图1)上起枝城,下至城陵矶,全长约 347 km;其中藕池口上游称为上荆江,下游称为下荆江。荆江河段位于亚热带季风气候区,雨热同期,夏季高温多雨,河道径流集中于夏季。由于下荆江的蜿蜒曲折降低了该河段的泄洪能力,极

易因洪水壅塞、堤防溃决而引发洪灾,因此有“万里长江,险在荆江”这一说法。本文选用沙市站和监利站分别代表上荆江和下荆江,并选用两站 1955—2019 年的水位流量数据进行研究,水位为冻结吴淞高程。由于三峡水库于 2003 年开始蓄水,且其上游干流的大型水库均在 2003 年后建成蓄水,故认为 1955—2002 年荆江河段流量过程为自然来流过程,因此采用 1955—2002 年流量序列计算荆江河段适宜生态流量;2003 年以后为受强人类活动影响下的流量过程,故本研究选用 2003—2019 年流量序列,计算三峡工程运行后荆江河段流量过程改变度及对适宜生态流量需求的满足程度。

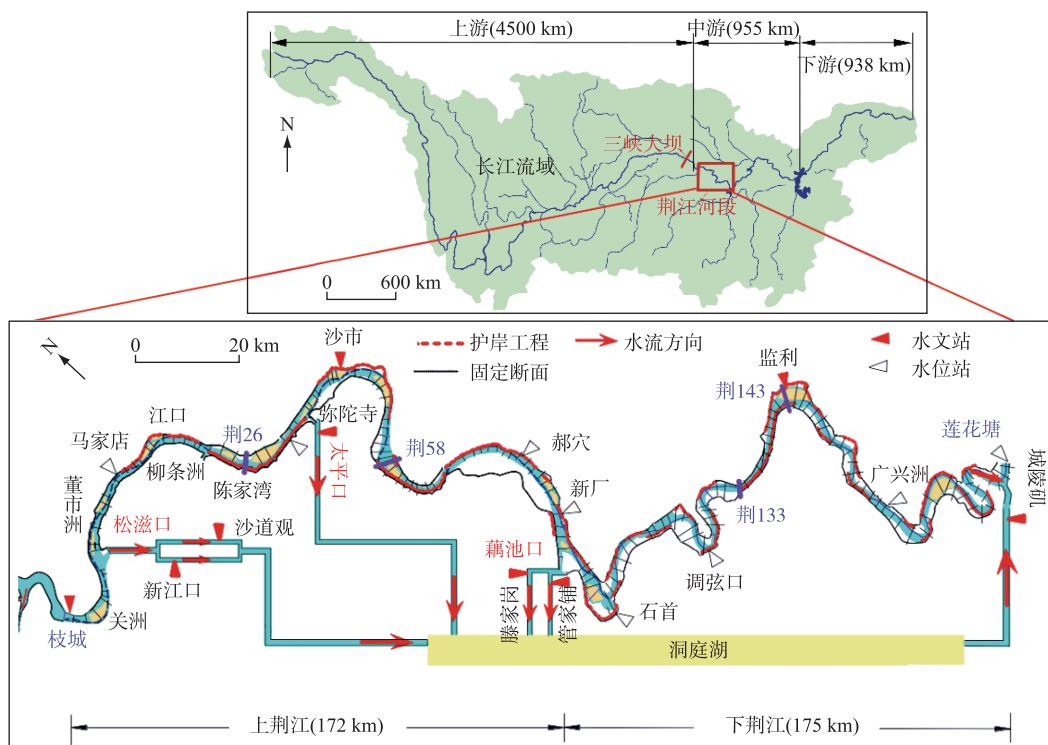


图 1 研究区域地理位置  
Fig.1 Geographical location of research area

## 2 研究方法

### 2.1 IHA 指标

IHA 方法是在 1996 年提出的基于 20 年以上的水文数据系统地计算河流生态流量的指标体系,共 5 组 32 个指标:①年内月均流量;②年流量极值;③年流量极值发生时间;④年高、低流量发生频率及历时;⑤年内流量变化次数及速率<sup>[21]</sup>。IHA 方法在 1998 年增补至 33 个指标<sup>[26]</sup>,该方法在考虑维持河流生态环境最低流量的同时,要求河流保留天然来流过程特征来维持河流河滨生态系统健康。为较全面地计算荆江河段适宜生态流量过程,同时便于实际应用,本文选取年内月均流量和年最大/小流量共 14 个流量指标作为适宜生态流量指标进行研究。

### 2.2 RVA 方法

Richter 等在 1997 年提出了 RVA (range of variability approach) 法计算 IHA 法中指标可接受的阈值<sup>[27]</sup>,大部分研究选取 IHA 各指标发生频率为 25% 和 75% 的值作为该指标参数 RVA 阈值<sup>[9,28-30]</sup>,该阈值可用于评价强人类活动干扰下水文条件改变程度的大小<sup>[25]</sup>,也可用于计算生态流量。

对本文所采用的 14 个指标计算改变度,改变度的计算公式如下:

$$C = \left| \frac{N_e - N_b}{N_b} \right| \tag{1}$$

式中,  $C$  为改变度;  $N_e$  为干扰后指标数值落在 RVA 阈值内的频率;  $N_b$  为干扰前指标数值落在 RVA 阈值内的频率。当  $0 \leq C < 0.25$  时, 认为指标的改变程度小; 当  $0.25 \leq C < 0.5$  时, 认为指标的改变程度中等; 当  $C \geq 0.5$  时, 认为指标的改变程度大。

为对受干扰后流量过程的变化程度进行合理评估, 本文采用整体改变度作为评估依据, 整体改变度计算公式如下<sup>[31]</sup>:

$$AC = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C^2} \tag{2}$$

式中,  $AC$  为整体改变度, 整体改变度评价标准同改变度。

### 3 结果分析

#### 3.1 工程运行后荆江河段流量特征变化分析

3.1.1 年内月均流量 三峡工程运行后, 荆江河段年内流量过程坦化(图2)。沙市站1—5月和12月月均流量有所增加, 2月增幅最大, 达48.45%, 12月增幅最小, 为9.74%; 6—11月月均流量有所减少, 10月降幅最大, 达23.09%, 6月降幅最小, 为3.27%。监利站1—6月和12月月均流量有所增加, 2月增幅最大, 达48.73%, 6月增幅最小, 为2.70%; 7—11月月均流量有所减少, 10月降幅最大, 达20.93%, 11月降幅最小, 为3.15%。由于三峡工程运行后三口分流流量减小<sup>[32]</sup>, 沙市站流量在6月减少, 而监利站流量有所增加。

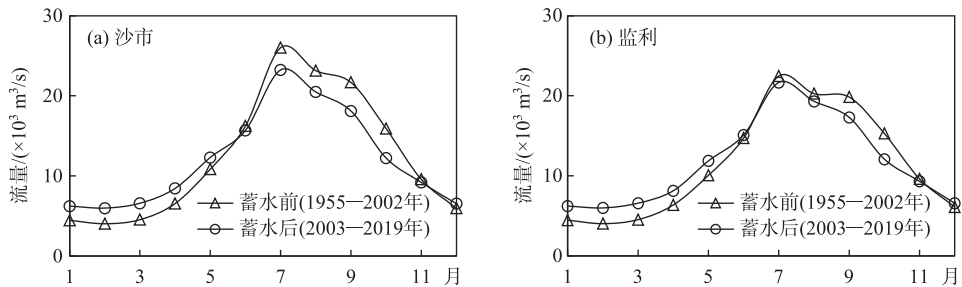


图2 三峡工程运行前后荆江河段月均流量

Fig.2 Average monthly discharge of the Jingjiang Reach before and after the operation of the Three Gorges Project

三峡工程运行后荆江河段月均流量改变度如图3所示, 上荆江非汛期流量改变度为0.21~0.89, 汛期流量改变度为0.06~0.69; 下荆江非汛期流量改变度为0.06~0.89, 汛期流量改变度为0.10~0.44; 总体而言, 上荆江流量改变度大于下荆江, 非汛期流量改变度大于汛期。

3.1.2 年最大/小流量 三峡工程运行前上荆江年最大流量为27000~55000 m<sup>3</sup>/s, 多年平均值为41990 m<sup>3</sup>/s, 三峡工程运行后上荆江年最大流量为23800~47000 m<sup>3</sup>/s, 多年平均值为33588 m<sup>3</sup>/s, 较运行前有明显的降低, 且年际浮动范围变小。三峡工程运行前上荆江年最小流量为2900~4570 m<sup>3</sup>/s, 多年平均值为3629 m<sup>3</sup>/s, 三峡工程运行后上荆江年最小流量为3270~6170 m<sup>3</sup>/s, 多年平均值为5297 m<sup>3</sup>/s, 较运行前有了明显的升高, 且年际浮动

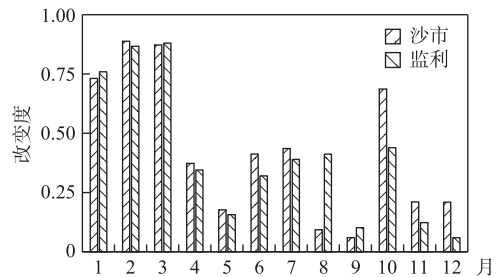


图3 三峡工程运行后荆江河段月均流量改变度

Fig.3 Variation degree of monthly average discharge in the Jingjiang Reach after the operation of the Three Gorges Project

范围变小(图 4a)。

三峡工程运行前下荆江年最大流量为 24000~46200 m<sup>3</sup>/s, 多年平均值为 34650 m<sup>3</sup>/s, 三峡工程运行后下荆江年最大流量为 23300~41600 m<sup>3</sup>/s, 多年平均值为 31647 m<sup>3</sup>/s, 较运行前有了明显的降低, 且年际浮动范围变小。三峡工程运行前下荆江年最小流量为 2700~4210 m<sup>3</sup>/s, 多年平均值为 3508 m<sup>3</sup>/s, 三峡工程运行后下荆江年最小流量为 3530~6290 m<sup>3</sup>/s, 多年平均值为 5335 m<sup>3</sup>/s, 较运行前有了明显的升高, 且年际浮动范围变小(图 4b)。

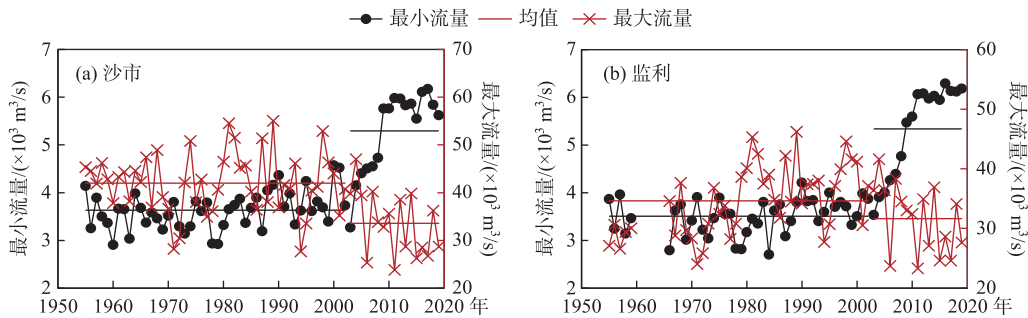


图 4 三峡工程运行前后荆江河段年内最大/小流量

Fig.4 Annual maximum/minimum discharge of the Jingjiang Reach before and after the operation of the Three Gorges Project

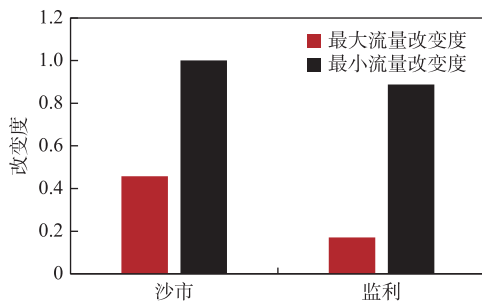


图 5 三峡工程运行后荆江河段年最大/小流量改变度

Fig.5 Annual maximum/minimum discharge change degree of the Jingjiang Reach after the operation of the Three Gorges Project

三峡工程运行后年最小流量改变度大于年最大流量, 上荆江年最大/小流量改变度大于下荆江(图 5)。三峡工程运行后上荆江年最大流量改变度为 0.46, 年最小流量改变度为 1; 下荆江年最大流量改变度为 0.17, 年最小流量改变度为 0.89。

计算荆江河段 14 个指标的整体改变度, 上荆江河段整体改变度为 0.56, 下荆江河段整体改变度为 0.51。整体而言, 三峡工程运行后荆江河段流量过程整体改变程度较大, 且上、下荆江流量过程改变程度相当。

### 3.2 荆江河段适宜生态流量

3.2.1 基于流量过程 根据三峡工程运行前数据计算荆江河段月均流量 RVA 阈值(上限为 Q25%, 下限为 Q75%), 其与三峡工程运行后多年平均月均流量对比图如图 6 所示。三峡工程运行后上荆江 5—9 月及 11 月多年平均月均流量位于 RVA 阈值内, 1—4 月和 12 月多年

平均月均流量高于 Q25%, 10 月多年平均月均流量低于 Q75%。三峡工程运行后下荆江 6—9 月及 11 月多年平均月均流量位于 RVA 阈值内, 1—5 月和 12 月多年平均月均流量高于 Q25%, 10 月多年平均月均流量低于 Q75%。

如图 6 和表 1 所示, 取 RVA 阈值下限(Q75%)作为荆江河段适宜生态流量<sup>[22]</sup>, 上荆江适宜生态流量 1—12 月月均流量分别为 4113、3702、3890、5452、9157、14140、22325、19166、17698、13738、8485、5461 m<sup>3</sup>/s, 年最大流量为 37800 m<sup>3</sup>/s, 年最小流量为 3350 m<sup>3</sup>/s; 下荆江适宜生态流量 1—12 月月均流量分别为 4049、3659、3890、5185、8404、12415、18332、16676、15685、13277、8241、5459 m<sup>3</sup>/s, 年最大流量为 30550 m<sup>3</sup>/s, 年最小流量为 3240 m<sup>3</sup>/s。

3.2.2 基于水位过程 利用三峡工程运行前数据计算的荆江河段月均水位 RVA 阈值(上限为 Z25%, 下限为 Z75%)与三峡工程运行后月均水位对比图如图 7 所示。从图中可以看出, 三峡工程运行后上荆江月均水位均

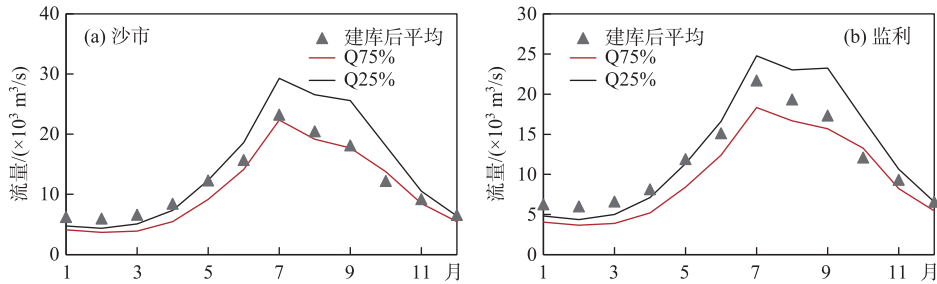


图 6 荆江河段月均流量过程 RVA 阈值

Fig.6 RVA threshold of monthly average discharge process in the Jingjiang Reach

表 1 荆江河段年最大/小流量以及水位 RVA 阈值

Tab.1 Suitable ecological discharge and water level in the Jingjiang Reach ( annual maximum/minimum discharge)

荆江河段	基于流量过程				基于水位过程			
	年最大值/(m <sup>3</sup> /s)		年最小值/(m <sup>3</sup> /s)		年最大值/m		年最小值/m	
	Q25%	Q75%	Q25%	Q75%	Z25%	Z75%	Z25%	Z75%
上荆江	46100	37800	3887	3350	43.80	40.09	32.88	31.14
下荆江	38472	30550	3800	3240	35.85	34.13	24.08	23.27

低于 Z75% ;三峡工程运行后下荆江 4—9 月及 11—12 月的月均水位位于 RVA 阈值范围内,1—3 月的月均水位高于 Z25% ,10 月的月均水位低于 Z75%。取 Z75% 作为荆江河段的适宜生态水位,上荆江 1—12 月的适宜生态水位分别为 32.10、31.77、32.07、33.33、35.43、37.55、40.01、39.03、38.71、37.24、35.11、33.13 m,年最大水位为 40.09 m,年最小水位为 31.14 m;下荆江 1—12 月的适宜生态水位分别为 23.80、23.78、24.10、25.54、27.92、29.66、32.23、31.14、30.62、29.26、26.88、24.94 m,年最大水位为 34.13 m,年最小水位为 23.27 m。从月均水位的角度分析三峡工程运行后适宜生态水位的满足程度,上荆江河段 1—12 月和下荆江河段 10 月的月均水位小于 Z75% ,不满足适宜生态水位的需求。

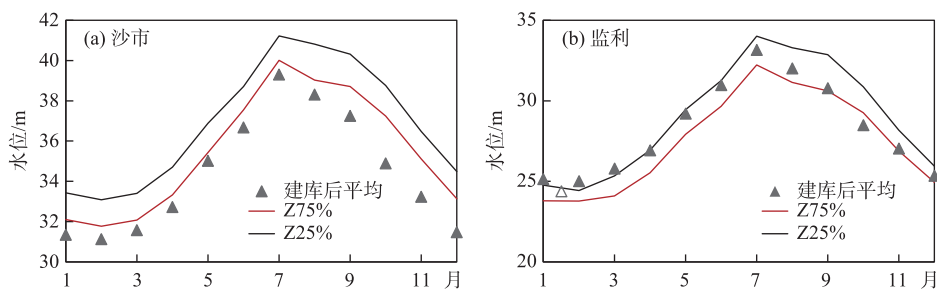


图 7 荆江河段月均水位过程 RVA 阈值

Fig.7 RVA threshold of monthly average water level process in the Jingjiang Reach

根据三峡工程运行后荆江河段水位—流量关系(图 8),与适宜生态水位过程对应的流量过程为:上荆江 1—12 月分别为 7347、6918、7307、9145、13052、18307、26489、22928、21855、17445、12381、8830 m<sup>3</sup>/s,年最大流量为 26799 m<sup>3</sup>/s,年最小流量为 6157 m<sup>3</sup>/s;下荆江 1—12 月的适宜生态水位过程对应的流量过程分别为:4837、4818、5125、6700、10108、13363、19611、16731、15480、12551、8484、6003 m<sup>3</sup>/s,年最大流量为 25547 m<sup>3</sup>/s,年最小流量为 4359 m<sup>3</sup>/s。

3.2.3 适宜生态流量 适宜生态流量计算结果如表 2 所示,为同时满足基于流量过程和基于水位过程的生态

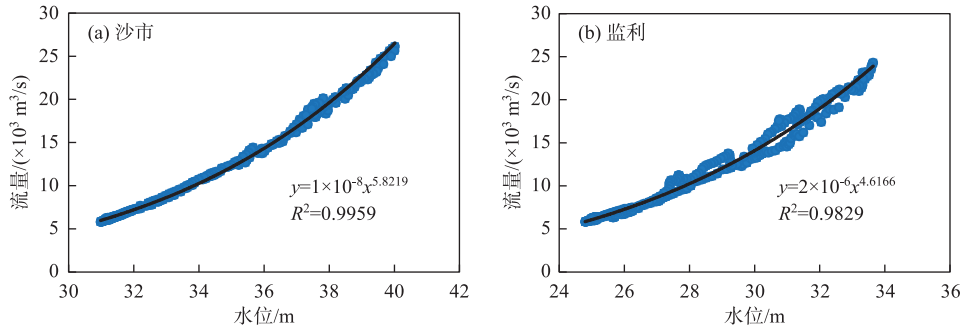


图 8 三峡工程运行后荆江河段水位-流量关系

Fig.8 Water level-discharge relationship of the Jingjiang Reach after the operation of the Three Gorges Project

流量需求,本研究取两者较大值为荆江河段适宜生态流量,即上荆江 1-12 月月均流量分别为 7347、6918、7307、9145、13052、18307、26489、22928、21855、17445、12381、8830 m<sup>3</sup>/s,年最大流量为 37800 m<sup>3</sup>/s,年最小流量为 6157 m<sup>3</sup>/s;下荆江 1-12 月月均流量分别为 4837、4818、5125、6700、10108、13363、19611、16731、15685、13277、8484、6003 m<sup>3</sup>/s,年最大流量为 30550 m<sup>3</sup>/s,年最小流量为 4359 m<sup>3</sup>/s。

表 2 三峡工程运行后荆江河段适宜生态流量(m<sup>3</sup>/s)

Tab.2 Suitable ecological water discharge of the Jingjiang Reach after the operation of the Three Gorges Project (m<sup>3</sup>/s)

时间	基于流量过程		基于水位过程		适宜生态流量过程		建库后平均	
	上荆江	下荆江	上荆江	下荆江	上荆江	下荆江	上荆江	下荆江
1 月	4113	4049	7347	4837	7347	4837	6248	6241
2 月	3702	3659	6918	4818	6918	4818	5997	6006
3 月	3890	3890	7307	5125	7307	5125	6603	6598
4 月	5452	5185	9145	6700	9145	6700	8450	8143
5 月	9157	8404	13052	10108	13052	10108	12317	11879
6 月	14140	12415	18307	13363	18307	13363	15695	15109
7 月	22325	18332	26489	19611	26489	19611	23235	21671
8 月	19166	16676	22928	16731	22928	16731	20491	19317
9 月	17698	15685	21855	15480	21855	15685	18117	17314
10 月	13738	13277	17445	12551	17445	13277	12246	12092
11 月	8485	8241	12381	8484	12381	8484	9205	9325
12 月	5461	5459	8830	6003	8830	6003	6550	6580
年最大值	37800	30550	26799	25547	37800	30550	33588	31647
年最小值	3350	3240	6157	4359	6157	4359	5297	5335

分析三峡工程运行后适宜生态流量满足率。从多年平均月均流量的角度来看(图 9),上荆江河段 3-5、7-9 月适宜生态流量满足率大于 20%,1-2、6、10-12 月适宜生态流量满足率不足 20%,其中 12 月满足率最低,4 月满足率最高,达 41%;下荆江河段 1、3、5、6、8 和 12 月适宜生态流量满足率大于 80%,2、4、11 月适宜生态流量满足率位于 60%~80%之间,7、9-10 月适宜生态流量满足率小于 60%,其中 10 月满足率最低,为 35%,3 月满足率最高,达 94%。整体而言,下荆江河段适宜生态流量的满足率高于上荆江河段。

### 4 讨论

#### 4.1 上下荆江计算结果差异性分析

天然条件下,由于三口分流等因素影响,下荆江流量小于上荆江,但整体差异较小,因此上、下荆江基于



流量过程的适宜生态流量计算值差异不大。已有研究表明,三峡工程运行后,大量泥沙被拦蓄在水库内,荆江河段河床冲刷下切,导致同流量一枯水位呈现明显下降趋势<sup>[33-34]</sup>;虽然三峡工程补水作用使得枯期流量增加,但河床冲刷的影响占主导,沙市站枯期水位降低,荆江河段同流量一洪水位未出现下降态势<sup>[34]</sup>,但由于汛期流量减小,高水位有所下降,因此上荆江基于水位过程的适宜生态流量计算值大于基于流量过程的计算值。由于下荆江河床冲刷量小于上荆江(图 10),加之三口分流和城陵矶枯期水位上升<sup>[17]</sup>的影响,监利站枯期多年平均水位略有增加,沙市站水位降幅大于监利站<sup>[33-34]</sup>,因此上荆江基于水位过程的适宜生态流量计算值明显大于下荆江。

#### 4.2 水位流量关系

本文利用沙市与监利两站的水位—流量关系推求基于水位过程的适宜生态流量,由于断面所处位置不同,水动力条件不同,断面水位—流量关系规律也不相同。如图 8 所示,沙市站同水位下流量波动范围较小,最大约 2500 m<sup>3</sup>/s;因受洞庭湖顶托作用等因素影响,监利站水位—流量关系更为复杂,同水位下流量波动范围较大,最大约 4000 m<sup>3</sup>/s。由于本文中适宜生态流量计算值为月均值,在实施过程中,可根据河段实际水流条件取用水位—流量关系中上、下包线范围内的流量进行控制。

#### 4.3 适宜生态流量 Tennant 法评价

Tennant 法,也称为 Montan 法,是利用河流的多年径流资料来确定河流生态流量,以年平均流量的百分比作为基流量<sup>[22]</sup>。采用 Tennant 法评价标准<sup>[35]</sup>对本研究成果进行评价,对比分析荆江河段适宜生态流量计算值与多年平均流量的比值,评价结果如表 3 所示,上荆江适宜生态流量在年内较枯时段(11 月至翌年 4 月,下同)占多年年均流量的 55%~99%,依据 Tennant 法评价标准,适宜生态流量处在很好至最佳的范围内,在年内较丰时段(5—10 月,下同)占多年年均流量的 105%~212%,依据 Tennant 法评价标准,适宜生态流量均在大于最佳范围内,其中 7 月达到最大;下荆江适宜生态流量在年内较枯时段占多年年均流量的 42%~74%,依据 Tennant 法评价标准,适宜生态流量处在很好至最佳的范围内,在年内较丰时段占多年年均流量的 88%~172%,依据 Tennant 法评价标准,适宜生态流量在最佳至大于最佳范围内。总体而言,荆江河段生态流量计算值大部分时间都是很好至大于最佳的程度,河流生态系统非常健康,能够为水生生物提供良好生存环境。值得注意的是,上荆江 7 月适宜生态流量计算值达到了最大程度,由于上荆江冲刷强度大,需要更大的流量满足基于水位过程的适宜生态流量计算值,超出了 Tennant 法评价标准中的最大标准(200%,下同);计算三峡工程建设前沙市站长时段月均流量过程与多年平均流量的比值,7 月份达 209%,因此天然情况下,沙市站 7 月份月均流量亦超出了最大标准,因此本文计算的适宜生态流量满足河流生态健康发展的需求。

### 5 结论

本文借鉴 IHA 指标体系与 RVA 方法,选用月均流量和年最大/小流量作为代表性指标,分析三峡工程

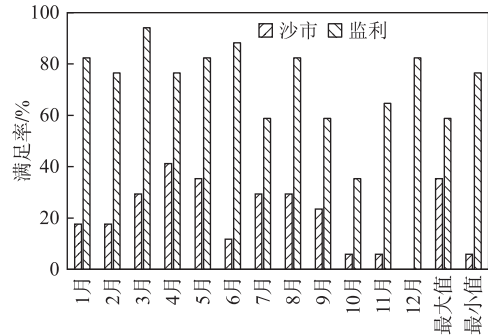


图 9 三峡工程运行后荆江河段适宜生态流量满足率

Fig.9 Satisfying frequency of suitable ecological discharge in the Jingjiang Reach after the operation of the Three Gorges Project

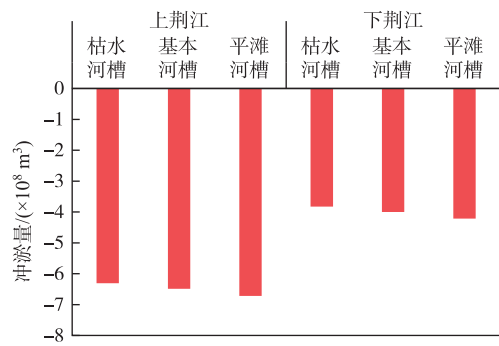


图 10 三峡工程运行后荆江河段冲淤量

Fig.10 Erosion and siltation of the Jingjiang Reach after the operation of the Three Gorges Project



表3 三峡工程运行后荆江河段适宜生态流量 Tennant 法评价

Tab.3 Evaluation of river ecological flow of the Jingjiang Reach by Tennant method after the operation of the Three Gorges Project

时间	上荆江		下荆江	
	与多年年均流量的比值/%	Tennant 评价法	与多年年均流量的比值/%	Tennant 评价法
1月	59	很好	42	很好
2月	55	很好	42	很好
3月	59	很好	45	很好
4月	73	最佳	59	很好
5月	105	>最佳	88	最佳
6月	147	>最佳	117	>最佳
7月	212	最大	172	>最佳
8月	184	>最佳	146	>最佳
9月	175	>最佳	137	>最佳
10月	140	>最佳	116	>最佳
11月	99	最佳	74	最佳
12月	71	最佳	53	很好

运行后荆江河段流量过程的改变度,计算同时考虑水位流量过程的适宜生态流量过程,并分析三峡工程运行后荆江河段适宜生态流量满足率。主要结论如下:

1) 三峡工程运行后,荆江河段流量过程整体改变度大于0.5,其中非汛期改变度大于汛期,年最小流量改变度大于年最大流量,上荆江改变度大于下荆江。

2) 荆江河段适宜生态流量包括:上荆江1—12月月均流量分别为7347、6918、7307、9145、13052、18307、26489、22928、21855、17445、12381、8830 m<sup>3</sup>/s,年最大流量为37800 m<sup>3</sup>/s,年最小流量为6157 m<sup>3</sup>/s;下荆江1—12月月均流量分别为4837、4818、5125、6700、10108、13363、19611、16731、15685、13277、8484、6003 m<sup>3</sup>/s,年最大流量为30550 m<sup>3</sup>/s,年最小流量为4359 m<sup>3</sup>/s。采用Tennant法评价分析得出,前述适宜生态流量过程满足河流生态健康发展的需求。

3) 三峡工程运行后,上荆江河段适宜生态流量满足程度较下荆江低。上荆江河段3—5、7—9月适宜生态流量满足程度大于20%,1—2、6、10—12月适宜生态流量满足程度不足20%,其中12月满足程度最低,4月满足程度最高;下荆江河段1、3、5、6、8和12月适宜生态流量满足程度大于80%,2、4、11月适宜生态流量满足程度位于60%~80%之间,7、9—10月适宜生态流量满足程度小于60%,其中10月满足程度最低,3月满足程度最高。

运行后荆江河段流量过程的改变度,计算同时考虑水位流量过程的适宜生态流量过程,并分析三峡工程运行后荆江河段适宜生态流量满足率。主要结论如下:

## 6 参考文献

- [1] 谈广鸣,李奔. 河流管理学. 北京:中国水利水电出版社,2008.
- [2] Guo WX, Xia ZQ. Study on ecological flow in the middle and lower reaches of the Yangtze River. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, **38**(S1): 619-623. DOI: 10.1007/s11434-007-0440-5. [郭文献,夏自强. 长江中下游河道生态流量研究. 水利学报, 2007, **38**(S1): 619-623.]
- [3] Fanatic YY, Hu CY, Chen MF. Response of bed evolution in Jingjiang River to water and sediment process before and after operation of Three Gorges Reservoir. *Yangtze River*, 2020, **51**(10): 1-6. [樊咏阳,胡春燕,陈莫非. 三峡水库蓄水前后荆江河段冲淤与水沙过程响应. 人民长江, 2020, **51**(10): 1-6.]
- [4] Hu CH, Zhang SH. Discussion on development and protection strategy of Yangtze River. *Yangtze River*, **51**(1): 1-5. [胡春宏,张双虎. 论长江开发与保护策略. 人民长江, 2020, **51**(1): 1-5.]
- [5] Pan LW, Zhou JZ, Jiang XJ et al. Influence of Three Gorges Project on eco-environment in middle and lower reaches of Yangtze River. *Water Resources and Power*, 2012, **30**(4): 97-99, 201. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7709.2012.04.029. [潘立武,周建中,江兴稳等. 三峡工程对长江中下游生态环境的影响. 水电能源科学, 2012, **30**(4): 97-99, 201.]
- [6] Gleick PH. Water in crisis: Paths to sustainable water use. *Ecological Applications*, 1998, **8**(3): 571. DOI: 10.2307/2641249.
- [7] 余明辉,孙昭华,周毅等. 基于下游水环境改善的三峡水库出库流量调控研究. 北京:科学出版社,2020.
- [8] Cui BS, Zhao X, Yang ZF. Eco-hydrology-based calculation of the minimum ecological water requirement for lakes. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, **25**(7): 1788-1795. DOI: 10.3321/j.issn:1000-0933.2005.07.036. [崔保山,赵翔,杨志峰. 基于生态水文学原理的湖泊最小生态需水量计算. 生态学报, 2005, **25**(7): 1788-1795.]
- [9] Shu C, Liu SX, Mo XG et al. Estimation of instream ecological flow based on RVA. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, **19**(5): 1151-1155. [舒畅,刘苏峡,莫兴国等. 基于变异性范围法(RVA)的河流生态流量估算. 生态环境学报, 2010, **19**(5): 1151-1155.]
- [10] Chen MJ, Feng HL, Wang LQ et al. Calculation methods for appropriate ecological flow. *Advances in Water Science*, 2007, **18**(5): 745-750. DOI: 10.3321/j.issn: 1001-6791.2007.05.018. [陈敏建,丰华丽,王立群等. 适宜生态流量计算方法研究. 水科学进展, 2007, **18**(5): 745-750.]
- [11] Li QX, Guo SL, Deng LL et al. Calculation and evaluation of minimum and suitable ecological flows of Qingjiang River. *Journal of China Hydrology*, 2021, **41**(2): 14-19. [李千珣,郭生练,邓乐乐等. 清江最小和适宜生态流量的计算与评价. 水文, 2021, **41**(2):

- 14-19.]
- [12] Chen J, Huang W. Environmental flow of Changjiang River. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2007, **24**(6): 1-5. DOI: 10.3969/j.issn.1001-5485.2007.06.002. [陈进, 黄薇. 长江的生态流量问题. 长江科学院院报, 2007, **24**(6): 1-5.]
- [13] Tharme RE. A global perspective on environmental flow assessment: Emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers. *River Research and Applications*, 2003, **19**(5/6): 397-441. DOI: 10.1002/rra.736.
- [14] Shi FF, Huang W. Minimum instreaming ecological discharge by using improved wetted perimeter method. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2009, **26**(4): 9-12. DOI: 10.3969/j.issn.1001-5485.2009.04.003. [史方方, 黄薇. 用改进湿周法计算河道内最小生态流量. 长江科学院院报, 2009, **26**(4): 9-12.]
- [15] Wu ZH. Applicability and optimization of R-2CROSS method in ecological flow calculation of small-and-medium sized rivers in South China. *China Rural Water and Hydropower*, 2021, (4): 113-119. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2284.2021.04.019. [吴朱昊. R2CROSS方法在南方中小型河道生态流量计算中的适用性和优化讨论. 中国农村水利水电, 2021, (4): 113-119.]
- [16] Zhang Q, Cui Y, Chen YQ. Evaluation of ecological instream flow of the Pearl River Basin, South China. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, **19**(8): 1828-1837. [张强, 崔瑛, 陈永勤. 基于水文学方法的珠江流域生态流量研究. 生态环境学报, 2010, **19**(8): 1828-1837.]
- [17] Sun JL, Lei XH, Jiang YZ *et al.* Review of research on river ecological water demand. *South-to-North Water Diversion and Water Science & Technology*, 2012, **10**(1): 112-115. DOI: 10.3724/SP.J.1201.2012.01112. [孙甲岚, 雷晓辉, 蒋云钟等. 河流生态需水量研究综述. 南水北调与水利科技, 2012, **10**(1): 112-115.]
- [18] Huang YY, Yu MH, Lu J *et al.* Suitable ecological water level of the East Lake Dongting after the Three Gorges Project operation. *J Lake Sci*, 2020, **32**(2): 417-427. DOI: 10.18307/2020.0211. [黄宇云, 余明辉, 陆晶等. 三峡建库后东洞庭湖适宜生态水位需求分析. 湖泊科学, 2020, **32**(2): 417-427.]
- [19] Zhang WG, Huang Q, Jiang XH. Study on instream ecological flow based on physical habitat simulation. *Advances in Water Science*, 2008, **19**(2): 192-197. DOI: 10.3321/j.issn:1001-6791.2008.02.007. [张文鸽, 黄强, 蒋晓辉. 基于物理栖息地模拟的河道内生态流量研究. 水科学进展, 2008, **19**(2): 192-197.]
- [20] Yi YJ, Zhang SH. Review of aquatic species habitat simulation method and modelling. *Scientia Sinica Technologica*, 2019, **49**(4): 363-377. DOI: 10.1360/N092018-00217. [易雨君, 张尚弘. 水生生物栖息地模拟方法及模型综述. 中国科学(技术科学), 2019, **49**(4): 363-377.]
- [21] Richter BD, Baumgartner JV, Powell J *et al.* A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems. *Conservation Biology*, 1996, **10**(4): 1163-1174. DOI: 10.1046/j.1523-1739.1996.10041163.x.
- [22] Wang HX, Sang MQ, Cha HF *et al.* Ecological flow of Xiangjiang River based on eco-hydrological method. *Yangtze River*, 2019, **50**(8): 70-73. [王鸿翔, 桑明崎, 查胡飞等. 基于生态水文学法的湘江生态流量研究. 人民长江, 2019, **50**(8): 70-73.]
- [23] Du BC. RVA based study on river eco-water demand. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2013, **44**(1): 27-30. [杜保存. 基于RVA法的河流生态需水量研究. 水利水电技术, 2013, **44**(1): 27-30.]
- [24] Yao X, Yang GS, Wan RR *et al.* Impact of water level change on wetland vegetation of rivers and lakes. *J Lake Sci*, 2014, **26**(6): 813-821. DOI: 10.18307/2014.0601. [姚鑫, 杨桂山, 万荣荣等. 水位变化对河流、湖泊湿地植被的影响. 湖泊科学, 2014, **26**(6): 813-821.]
- [25] Nilsson C, Jansson R, Zinko U. Long-term responses of river-margin vegetation to water-level regulation. *Science*, 1997, **276**(5313): 798-800. DOI: 10.1126/science.276.5313.798.
- [26] Richter BD, Baumgartner JV, Braun DP *et al.* A spatial assessment of hydrologic alteration within a river network. *Regulated Rivers: Research & Management*, 1998, **14**(4): 329-340. DOI: 10.1002/(sici)1099-1646(199807/08)14:4329:aid-rrr505>3.0.co;2-e.
- [27] Richter B, Baumgartner J, Wigington R *et al.* How much water does a river need? *Freshwater Biology*, 1997, **37**(1): 231-249. DOI: 10.1046/j.1365-2427.1997.00153.x.
- [28] Li XP, Huang GR, Jiang T. Evaluating alterations of runoff after Fenshuba reservoir Construction based on RVA method. *Water Resources and Power*, 2009, (3): 18-21. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7709.2009.03.006. [李兴拼, 黄国如, 江涛. RVA法评估枫树坝水库对径流的影响. 水电能源科学, 2009, (3): 18-21.]
- [29] Yang T, Zhang Q, Chen YD *et al.* A spatial assessment of hydrologic alteration caused by dam construction in the middle and lower Yellow River, China. *Hydrological Processes*, 2008, **22**(18): 3829-3843. DOI: 10.1002/hyp.6993.
- [30] Xue LQ, Zhang H, Yang CB *et al.* Quantitative assessment of hydrological alteration caused by irrigation projects in the Tarim River Basin, China. *Scientific Reports*, 2017, **7**(1): 4291. DOI: 10.1038/s41598-017-04583-y.
- [31] Yang M, Mao DH, Liu PL *et al.* Analysis of characteristics of annual runoff and sediment in Dongting Lake during 1951-2015. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2018, **51**(12): 1050-1062. DOI: 10.14188/j.1671-8844.2018-12-003. [杨敏, 毛德华, 刘培亮等. 1951-2015年洞庭湖水沙变化特征分析. 武汉大学学报: 工学版, 2018, **51**(12): 1050-1062.]
- [32] Chen B, Li ZW, Hu XY *et al.* An empirical method of diversion discharge calculation of the three major outlets of Jingjiang River after the

- impoundment of Three Gorges Reservoir. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2021, **30**(3): 667-676. DOI: 10.11870/cjlyzy-hj202103014. [陈帮, 李志威, 胡旭跃等. 三峡水库蓄水后荆江三口分流量计算方法. 长江流域资源与环境, 2021, **30**(3): 667-676.]
- [33] Zhu LL, Yang X, Xu QX. Response of low water level change to bed erosion and the operation of Three Gorges Reservoir in upper Jingjiang reach. *Acta Geographica Sinica*, 2017, **72**(7): 1184-1194. DOI: 10.11821/dlxb201707005. [朱玲玲, 杨霞, 许全喜. 上荆江枯水位对河床冲刷及水库调度的综合响应. 地理学报, 2017, **72**(7): 1184-1194.]
- [34] Chai YF, Deng JY, Yang YP *et al.* Evolution characteristics and driving factors of the water level at the same discharge in the Jingjiang reach of Yangtze River. *Acta Geographica Sinica*, 2021, **76**(1): 101-113. DOI: 10.11821/dlxb202101008. [柴元方, 邓金运, 杨云平等. 长江中游荆江河段同流量—水位演化特征及驱动成因. 地理学报, 2021, **76**(1): 101-113.]
- [35] 水电工程生态流量计算规范: NB/T 35091—2016. 2016.

## 关于“高温干旱背景下太湖藻情变化特征及机制” (DOI: 10.18307/2023.0611) 一文的勘误

经核实,《湖泊科学》2023年第6期刊发的论文“高温干旱背景下太湖藻情变化特征及机制”(DOI: 10.18307/2023.0611)(作者:康丽娟等,页码:1866-1880页)存在以下编校错误:

- (1)第1867页:倒数第3行,“2005以来”应为“2005年以来”;
  - (2)第1869页:倒数第17行,“运算后以满足”应为“运算以满足”;倒数第12行,“其中汛期”应为“2022年汛期”;倒数第7行,“均值的58.2%”应为“均值58.2%”;倒数第2行,“2.09 m/s,8月份平均风速最低,为1.05 m/s;其次”应为“2.09 m/s;8月份平均风速最低,为1.05 m/s,其次”;
  - (3)第1870页:第4行,“2022年”应为“2021年”;倒数第3行,“5月”应为“如5月”;
  - (4)第1871页:图4,横坐标最后一个标值“2020”应为“2022”;
  - (5)第1872页:倒数第7行,“氮磷的进行分析”应为“氮磷进行分析”;倒数第2行,“其TP8、TN8,2月”应为“TP8、TN8,2月”;
  - (6)第1873页:图6图题第5行,“February in Lake Taihu”应为“winter in Lake Taihu”;
  - (7)第1875页:表2表注,“\*:P<0.05”删除;
  - (8)第1875页:表2下3.1.2节第6行,“生物量较高;这与”应为“生物量较高,这与”。
- 特此勘误。

(《湖泊科学》编辑部)