

基于水质-水位二元响应关系推求过水型湖泊适宜生态水位研究^{*}

张天衍¹, 董增川^{1,2**}, 罗 贲³, 石晴宜¹, 韩亚雷¹, 崔 璞¹, 周 强⁴, 张 游⁴

(1:河海大学水文水资源学院,南京 210098)

(2:水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,南京 210098)

(3:黄河水利科学研究院,郑州 450003)

(4:江苏省水利厅, 水土保持生态环境监测总站,南京 210029)

摘要: 适宜的生态水位能够反映湖区生态系统的多种需求,是湖泊长期稳定健康运转的基本保障。目前湖泊适宜生态水位的推求大多侧重恢复天然水位情势。然而过水型湖泊承担着防洪、供水、航运等多种功能,频繁的人类活动导致湖泊水位情势异常复杂。同时随着社会经济的快速发展,水质恶化对过水型湖泊生态系统造成了较大的负面影响,仅恢复天然水位情势难以反映过水型湖泊的生态需求。因此,在IHA-RVA法的基础上,本文针对过水型湖泊吞吐性强的特点,利用水质-水位二元响应关系系统地提出了一套逐月修正过水型湖泊适宜生态水位阈值,并确定适宜水位变动率的方法。以洪泽湖为应用实例,结果表明:1)根据湖泊水文情势和入湖污染物变化情况,湖泊调度周期可以划分为平水期(1—4月)、泄水期(5—6月)、蓄水前期(7—9月)和蓄水后期(10—12月);2)各时期内,洪泽湖水位和水质呈现较强的相关性,其中平水期、泄水期和蓄水后期水质均随着水位上升而下降,平均Pearson系数达-0.77,仅在蓄水前期水质随水位上升而改善;3)现阶段洪泽湖的自净能力和污染物滞留比例竞争关系激烈,逐月适宜生态水位阈值为:12.92~12.99、12.79~12.99、12.84~12.99、12.86~12.99、12.71~12.89、12.39~12.63、11.97~12.93、12.50~13.07、12.65~13.26、12.90~13.04、12.90~13.04、12.90~13.04 m,除蓄水前期外,基于水位水质关系修正的适宜生态水位范围较IHA-RVA法计算的天然水位范围缩小了73.4%。总体而言,基于本文方法设计的湖泊适宜生态水位不仅可以满足生态系统对于水体大小的需求,一定程度上也可以体现湖泊生态系统对于水质的要求,为洪泽湖等过水型湖泊的生态调度、水资源管理提供科学依据。

关键词: 适宜生态水位;水位-水质响应关系;过水型湖泊;IHA-RVA法;洪泽湖

Optimum ecological water level of water-carrying lake based on the relationship between water quality and water level^{*}

Zhang Tianyan¹, Dong Zengchuan^{1,2**}, Luo Yun³, Shi Qingyi¹, Han Yalei¹, Cui Can¹, Zhou Qiang⁴ & Zhang You⁴

(1: College of Hydrology and Water Resource, Hohai University, Nanjing 210098, P.R.China)

(2: State Key Laboratory of Hydrology Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210098, P.R.China)

(3: Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou 450003, P.R.China)

(4: Soil and Water Conservation Ecological Environment Monitoring Station, Water Resources Department of Jiangsu Province, Nanjing 210029, P.R.China)

Abstract: The optimum ecological water level (OWL) guarantees stable and healthy operation of the lake in the long term by meeting various needs of the lake ecosystem. Previous studies on OWL mainly focused on restoring natural water level regime. However, water-carrying lakes have complicated water lever regimes resulted from flood control, water supply, shipping and other functions. Meanwhile, the water quality was further deteriorated due to rapid economic development. Consequently, the previous methods could not meet all the ecological needs of water-carrying lakes. Basing on IHA (indicators of hydrological alteration)-RVA (range

* 2021-11-07 收稿;2022-01-28 收修改稿。

国家重点研发计划项目(2018YFC1508200)和江苏省水利科技基金重大项目(JSSL-SZY-2019003)联合资助。

** 通信作者;E-mail:zcdong@hhu.edu.cn.

of variability approach) method and relationship between water quality and water level, this paper proposed a method for identifying of the threshold of monthly OWL and determining the OWL variation of water-carrying lake. Taking Lake Hongze as an example, the results indicate that: 1) The lake regulation cycle can be divided into flat period (January-April), discharge period (May-June), early storage period (July-September) and late storage period (October-December) from the angle of hydrological regime and pollution into the lake. 2) There's a strong correlation between water quality and water level in each period as water quality improves with water level rising during the early storage period and deteriorates in other periods (Pearson coefficient was -0.77). 3) Due to the competition between the lake's self-purification capacity and pollutant retention ratio, the monthly OWL threshold from January to December is: 12.92–12.99, 12.79–12.99, 12.84–12.99, 12.86–12.99, 12.71–12.89, 12.39–12.63, 11.97–12.93, 12.50–13.07, 12.65–13.26, 12.90–13.04, 12.90–13.04 m, respectively. The range of OWL modified by the relationship between water level and water quality is reduced by 73.4% compared with the results of IHA-RVA method except in the early storage period. In general, the OWL designed by methods in this paper can reflect the requirements of lake ecosystem for water quantity and water quality to a certain extent, and provide scientific basis for the ecological regulation and water resource management of Lake Hongze and other water-carrying lakes.

Keywords: Optimum ecological water level; relationship between water level and water quality; water-carrying lake; IHA-RVA method; Lake Hongze

湖泊作为重要的国土资源,具有调节径流、发展灌溉、提供水源、沟通航运以及改善区域生态环境等多种功能,在社会、经济、生态方面有着不可取代的地位^[1]。我国湖泊众多,面积在1 km²以上的自然湖泊就有2693个,其总面积达 8.14×10^4 km²^[2]。随着全球变暖和社会经济的快速发展,国内众多湖泊出现了面积萎缩、水质恶化、生态退化等问题^[3-7],而水位是反映湖泊水文情势和湖泊规划管理的重要指标,其时空变化过程会对湖泊生态系统产生深远的影响,是解决上述问题的关键所在^[8]。因此,科学地研究湖泊生态水文需求,综合量化湖泊生态水位,对于维持湖泊生态功能,保证湖区生态系统健康可持续发展有着重要的意义。

目前关于湖泊生态水位的研究分为两个方面:最小生态水位和适宜生态水位。最小生态水位是满足湖泊生态系统基本需求的水位红线,常见计算方法有湖泊形态分析法、生物最小空间需求法、年保证率法和最低年平均水位法等^[9-13]。最小生态水位往往可在短时期内保护湖泊生态系统功能和结构不受到严重破坏,但长期地维持会导致湖泊流域生态系统退化甚至崩溃^[14],并且最小生态水位多为一固定的水文特征值,难以反映湖泊系统在不同时间节点对水位的要求。因此,确定维持生态系统可持续健康发展的适宜生态水位成为了湖泊生态系统研究的新热点。相较于湖泊生态水位研究,河流生态流量研究起步较早,其中水文变化指标法(indicators of hydrological alteration)是较具有代表性的水文变化评估体系^[15]。淦峰等借鉴IHA指标体系和RVA法(range of variability approach),研究了长时间序列湖泊天然水位变化过程,构建了包括高低水位阈值、发生时间、持续时间和水位变化率等在内的生态水位指标体系,提出了旨在通过恢复天然水位情势来增强湖泊水质、生态多样性的适宜生态水位计算方法——IHA-RVA法^[16]。之后,国内学者针对IHA-RVA法在湖泊适宜生态水位的应用上进行了一系列深入研究^[17-18]。但IHA-RVA法侧重于还原历史资料中的天然水位情势,展现人类干预较少情况下湖泊生态系统对于水量的需求。大型过水型湖泊往往承担着防洪、供水、航运等多种功能,人类活动对其影响显著^[19]。众多研究表明,我国大型过水型湖泊的生态环境均已经发生了较大改变,污染负荷增加使水质状况出现了不同程度的恶化^[20-22]。重金属富集、蓝藻暴发等污染现象时有发生,破坏了湖泊生态系统健康的可持续发展^[23-24]。因此,仅依靠IHA-RVA方法计算的适宜生态水位难以全面地反映生物群落健康发展对生存环境的需求,有必要将水质因素纳入过水型湖泊适宜生态水位推求的考虑范围。目前,国内学者针对过水型湖泊水位—水质相关性开展了大量研究^[25-26],但考虑过水型湖泊水质需求的适宜生态水位研究还较为少见,管理部门多使用最小生态水位作为过水型湖泊的生态需水指标。同时过水型湖泊出入湖水量大的特点,也使现有水质调控的一些成熟经验(如特定时期增加入湖水量改善湖区水质等)的实践应用效果不佳^[27-29]。因此,开展基于水位—水质二元响应关系的适宜生态水位研究是一项具有重要实践应用价值的课题。

本文针对过水型湖泊吞吐性强、水位调控可以有效改变换水周期的特点,提出了一种基于水位—水质的二元响应关系,恢复湖泊天然水位情势的适宜生态水位计算方法。以大型过水型湖泊——洪泽湖为例,首先

采用 IHA-RVA 方法分析其天然水位情势,计算生物群落对于生存空间的需求;再从滞留污染物总量、纳污能力和水位—水质经验公式三方面量化水位与水质的相关关系;最后基于水位—水质响应关系修正天然水位情势,获取可以平衡湖泊自净能力和污染物滞留比例,满足湖泊生态系统对水体大小和水质环境两方面需求的适宜生态水位,为洪泽湖生态保护、水资源管理提供相关借鉴.

1 研究区与数据

1.1 流域概况

洪泽湖地处淮河中下游结合部,汇水面积达 15.8 km^2 ,是中国第四大淡水湖.作为过水型湖泊,洪泽湖吞吐性强,换水周期短.自 1990s 以来,洪泽湖污染逐渐严重,水质恶化,近年来虽有好转,但仍处于轻度富营养化状态.目前,洪泽湖水质多为劣 V 类,总氮是主要污染物,不考虑总氮的情况下,洪泽湖水质可达 III 类标准^[30]. 洪泽湖水体主要依靠地表径流补给,其主要入湖河流为淮河、新汴河、怀洪新河、池河、新濉河、老濉河和徐洪河,主要出湖河流为入江水道、苏北灌溉总渠和入海水道.其中淮河是洪泽湖水量的主要来源,也是入湖总氮的主要来源.洪泽湖地理位置及出入湖河流和水质监测点分布如图 1 所示.

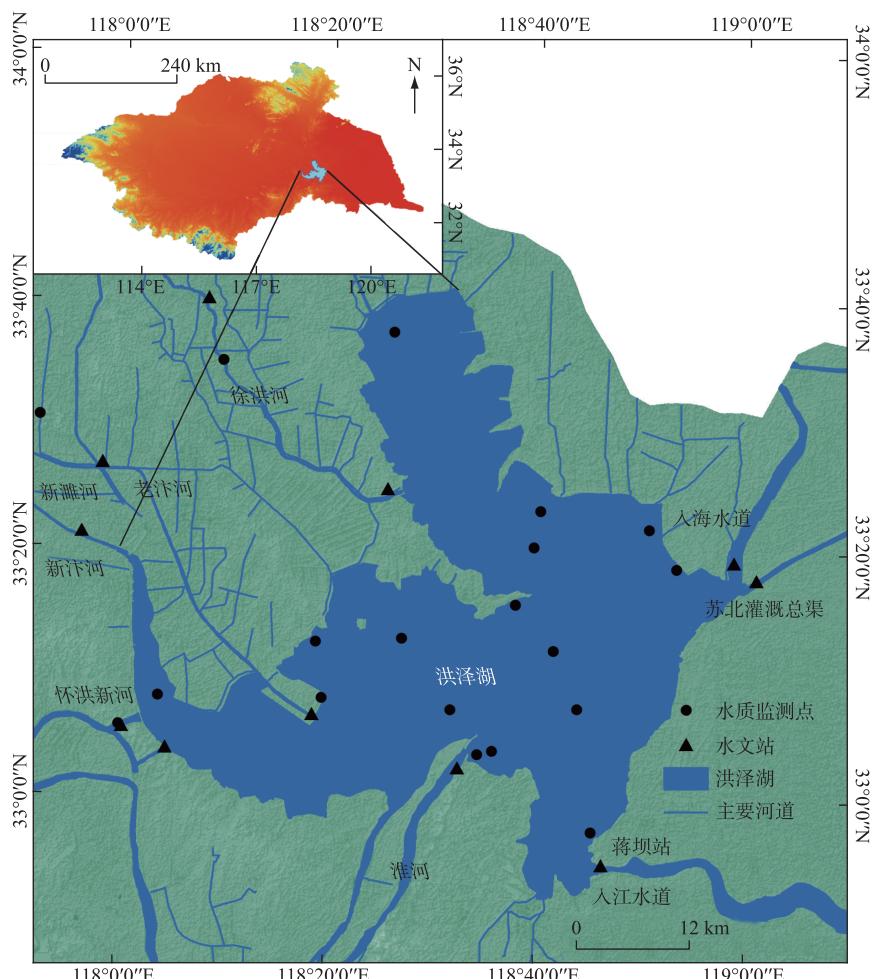


图 1 洪泽湖及出入湖河流的地理位置和水质监测点分布

Fig.1 Location of Lake Hongze and its rivers and water quality monitoring sites

1.2 数据来源

本文涉及的水文数据有 1988—2018 年蒋坝站逐日水位数据和 2003—2014 年洪泽湖主要入湖河道(淮河、新汴河、怀洪新河、池河、新濉河、老濉河和徐洪河)和出湖河道(入江水道、苏北灌溉总渠和入海水道)的逐日流量数据。根据《淮安市水资源公报》,它们分别约占总入湖水资源量和总出湖水资源量的 95% 和 88%。水质数据有 2013—2018 年湖区 15 个水质监测点的逐月总氮监测数据和主要入湖河道(淮河、新汴河、怀洪新河、池河、新濉河、老濉河和徐洪河)逐月入湖总氮浓度数据。文中水文数据来自淮河水文年鉴,水位采用废黄河高程,水质数据来自江苏省环境检测中心。

2 研究方法

2.1 基于 IHA-RVA 法初步计算湖泊适宜生态水位

适宜湖泊生态水位应当为生物群落提供充足的生存空间,满足生物发育、繁衍等活动对水量的需求,保证生物群落的结构稳定。在河流生态流量研究中,IHA 法是具有代表性的水文变化评估体系,其基于长时间序列的水文数据,从流量、频率、发生时间、历时和变化速率 5 个方面 33 个流量指标系统地评价河流水文情势^[31-32]。其中大多数研究选取 IHA 指标发生频率为 25% 和 75% 的值为 RVA 阈值,以确定适宜流量的变动范围,维持河流生态系统的健康^[16]。但目前的湖泊适宜生态水位研究并没有形成统一的评价体系,因此本文借鉴 IHA 指标体系和 RVA 阈值法计算洪泽湖天然水位情势,基于洪泽湖多年逐日水位数据,采用月平均水位($Z_{ave,i}, i = 1 \sim 12, m$)和五日平均日水位变化率($\Delta Z_j, j = 1 \sim 365, m$)作为适宜生态水位计算指标,选取各指标发生频率为 25% 和 75% 的值作为 RVA 阈值,初步确定不同时期湖泊生态系统对于湖泊水体大小与水位变化速率的需求。

2.2 湖泊水位—水质反馈关系的量化分析

过水型湖泊吞吐性强的特点加剧了水位调控对污染物滞留比例的影响,使水位与水质的相关性更加显著。但其年内水位变动剧烈,不仅容易削弱生态系统稳定性和自净能力,当入湖污染负荷较重时,也容易造成水质恶化。因此,本文从历史经验关系、逐月水位变化率和纳污能力 3 个角度出发,分别量化过水型湖泊水位—水质反馈关系,以期得到减少湖体污染物浓度、改善湖泊水质的水位区间过程。根据以往研究成果,总氮是洪泽湖水质的决定性因素,且近年来浓度较为稳定^[30],因此本文采用总氮浓度作为洪泽湖水质指标,以 V 类水质为目标进行研究。

2.2.1 分阶段绘制湖泊水位—水质关系图 湖泊水位—水质响应关系的分析量化结果可以对适宜生态水位进行科学的调整。但湖泊水质影响因素众多、彼此之间关系复杂,以全年为时间尺度进行水位—水质关系的分析可能会导致相关性不够明显。因此,本文基于多年平均数据,从水文因素变化趋势(水位、入湖水量)和入湖污染物负荷变化趋势(入湖总氮浓度、入湖总氮总量)两个方面对水位—水质反馈关系进行年内分期;再在每个时段内绘制洪泽湖水位—水质站点达标比例散点图;最后依据历史数据拟合经验公式,计算满足 V 类水质目标要求的适宜生态水位取值范围。

2.2.2 计算湖区逐月水位变化率 湖区水位变化率反映了湖泊出入湖水量差值的变动,对湖泊的污染物总量有直接影响。大量蓄滞入湖径流可以提升湖泊自净能力,然而当入湖河流水质较差时,反而会造成湖区水质快速下降;同样,防洪泄水可以降低污染物滞留比例,但是泄水过快会削弱湖泊生态系统稳定性和自净能力。为避免水位剧烈变化导致水质恶化,本文选用发生频率为 75% 和 25% 的多年月水位变化率作为逐月水位变化率的阈值,计算公式为:

$$\Delta HZ'_i = P_{75\%}(\Delta Z') \quad (1)$$

$$\Delta LZ'_i = P_{25\%}(\Delta Z') \quad (2)$$

式中, $\Delta HZ'_i$ 和 $\Delta LZ'_i$ 分别为湖泊逐月水位变化率的上限和下限, $m/\text{月}$; $P_{75\%}(\Delta Z')$ 和 $P_{25\%}(\Delta Z')$ 为 75% 和 25% 发生频率的湖泊多年月水位变化率, $m/\text{月}$ 。

2.2.3 计算湖区纳污能力 纳污能力是指在区域最大自净能力下,环境所能容纳的污染物的最大量,湖泊的纳污能力随其水位上升而增强。适宜生态水位下,湖泊的纳污能力应大于输入的污染物量,将水质长期维持在可接受范围内。本文根据《水域纳污能力计算规程》(GB/T 25173—2010),选取 Dillon 模型计算洪泽湖主要污染

物总氮的纳污能力,并基于多年月平均出湖水量和入湖污染物计算适宜生态水位下限。该模型计算公式为:

$$W = 10^{-6} \cdot \frac{\rho_s Z Q_a A}{(1 - R_p) V} \quad (3)$$

$$R_p = 0.426 e^{-0.271 \frac{Q}{V}} + 0.547 e^{-0.00949 \frac{Q}{V}} \quad (4)$$

$$Q_a = Q \times 12/n \quad (5)$$

式中, W 为湖泊中总氮的纳污能力, t/a ; ρ_s 为总氮控制目标浓度, mg/L ; Z 为湖泊平均深度, m ; Q_a 为年出湖水量, m^3 ; A 为湖泊面积, m^2 ; V 为湖泊库容, m^3 ; R_p 为总氮在湖泊中的滞留系数, a^{-1} ; Q 为时期内出湖水量, m^3 ; n 为时期内月数。

2.3 适宜生态水位阈值修正

过水型湖泊水位变动趋势随季节变化较为显著, 不同时期内水位变化情势对水质的影响差别较大。因此本文将湖泊水位变动趋势分为下降趋势、波动趋势和上涨趋势 3 类, 并采用相应的修正策略对适宜生态水位进行调整。波动趋势多出现于非汛期, 出入湖水量较小, 水位在较小的范围内波动, 此类水位变化趋势对水质的负面影响主要体现在入湖污染物的滞留比例过高和纳污能力不足两方面。因此应以水质调控水位直接替换不符合水质需求的适宜生态水位阈值(图 2a), 基于水位—水质响应关系对于波动趋势 IHA-RVA 计算结果进行逐月水位阈值修正的计算公式为:

$$HZ'_i = \begin{cases} HZ_{wq} & HZ_i > HZ_{wq} \\ HZ_i & HZ_i \leq HZ_{wq} \end{cases} \quad (6)$$

$$LZ'_i = \begin{cases} LZ_{wq} & LZ_i < LZ_{wq} \\ LZ_i & LZ_i \geq LZ_{wq} \end{cases} \quad (7)$$

式中, HZ'_i 为修正后波动期第 i 月适宜生态水位上限, m ; LZ'_i 为修正后波动期第 i 月适宜生态水位下限, m ; HZ_{wq} 为水质调控水位上限, m ; LZ_{wq} 为水质调控下限, m ; HZ_i 为修正前波动期第 i 月适宜生态水位上限, m ; LZ_i 为修正前波动期第 i 月适宜生态水位下限, m 。

下降趋势多由汛前泄水增加防汛库容导致, 出湖水量较大, 水位快速下降, 此类水位变化趋势对于水质的负面影响主要体现在湖底冲刷加强和岸边生态系统稳定性降低两方面; 持续的上涨趋势多由雨季降水或汛后蓄水需求导致, 入湖水量较大, 水位抬升速率较快, 此类水位变化趋势对于水质的负面影响主要体现在蓄水过程导致入湖污染物总量和滞留比例增加两方面。因此, 对这两类水位变化趋势应根据式(6)~(7), 通过水质调控水位限制水位总变动幅度, 再按天然水位情势和纳污能力分配水位变动过程(图 2b, 2c)。水位变动过程分配的计算公式为:

$$HZ'_k = \begin{cases} \frac{(HZ_k - HZ_0)}{(HZ_j - HZ_0)}(HZ_r - HZ_0) + HZ_0 & HZ_j > HZ_{wq} \\ HZ_i & HZ_j \leq HZ_{wq} \end{cases} \quad (8)$$

$$LZ'_k = \begin{cases} LZ_i & LZ_j > LZ_{wq} \\ \max\left\{\frac{(LZ_k - LZ_0)}{(LZ_j - LZ_0)}(LZ_r - LZ_0) + LZ_0, LZ_p\right\} & LZ_j \leq LZ_{wq} \end{cases} \quad (9)$$

式中, HZ'_k 为修正后第 k 月适宜生态水位上限, m ; LZ'_k 为修正后第 k 月适宜生态水位下限, m ; LZ_k 为修正前第 k 月适宜生态水位上限, m ; HZ_0 为修正前第 k 月适宜生态水位下限, m ; LZ_0 为水位变动前一月修正后适宜生态水位上限, m ; LZ_p 为水位变动前一月修正后适宜生态水位下限, m ; LZ_r 为基于水位水质经验关系计算出的水位上限, m ; LZ_p 为基于水位水质经验关系计算出的水位下限, m ; j 为基于纳污能力计算出的水位下限, m ; j 为水位变化期间总月数; $k = 1, 2, \dots, j - 1$ 。

3 结果和分析

3.1 IHA-RVA 法初步计算洪泽湖适宜生态水位分析

1988—2018 年洪泽湖水位并没有发生较为明显的突变^[33], 基于 IHA-RVA 计算得出的适宜生态水位阈

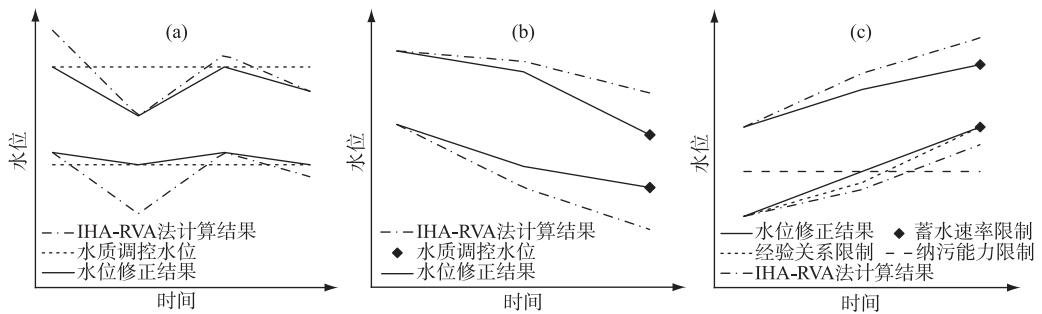


图 2 适宜生态水位修正方法示意图

Fig.2 Schematic diagram of suitable ecological water level correction method

值和适宜逐日水位变动率分别见图 3a 和 3b。非汛期洪泽湖水位变化幅度较小,汛期洪泽湖水位呈现先降后升的趋势(图 3a);洪泽湖的大幅度水位变动主要发生在 5—8 月,其中 5—6 月呈下降趋势而 7—8 月呈上升趋势,年内其余时段的水位波动幅度较小(图 3b)。洪泽湖适宜逐日水位变化范围为 12.92~13.31、12.79~13.31、12.84~13.36、12.86~13.38、12.71~13.2、12.11~12.81、11.97~12.93、12.50~13.07、12.65~13.26、12.65~13.26、12.58~13.29、12.58~13.29、12.68~13.35、12.78~13.41 m;适宜逐日水位变化率为-0.06~0.05 m。适宜生态水位区间范围与五日平均水位变化率区间范围具有较强的相关关系,两者的最小区间范围和最大区间范围分别出现在 1—4 月和 6—7 月。

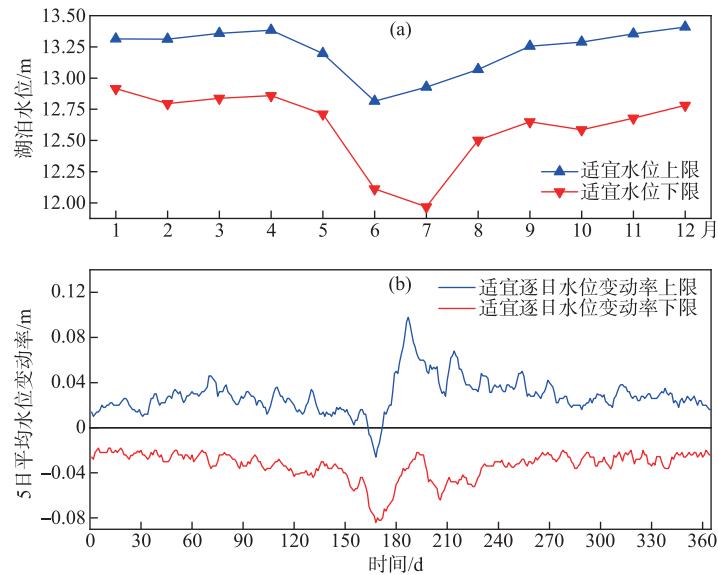


图 3 IHA-RVA 法计算结果

Fig.3 Results of IHA-RVA method

3.2 洪泽湖水位—水质响应关系量化

3.2.1 年内时段划分 洪泽湖多年月平均水位变化范围为 12.05~13.14 m(图 4a)。受人为调控影响,洪泽湖水位呈现出反季相水位变化趋势,入湖、出湖水量在汛期达到峰值,而水位却达到谷值。多年逐月入湖水量和出湖水量在 5—10 月差距较大,其余时期较为接近。多年逐月入湖水量变化范围为 8.0 亿~86.5 亿 m³,全年可分为 3 个水量变化时期:1—6 月洪泽湖入湖水量较少,总体呈波动趋势;7 月入湖水量达到峰值,随后 8—9 月呈下降趋势,但总量较大,7—9 月入湖水量占全年入湖水量的 65.9%;10—12 月入湖水量大幅下降,

12月的入湖水量不足10月的一半。按五日水位变化率全年可以分为4个时期:1—4月洪泽湖水位在13~13.14 m之间小幅波动;5—6月由于汛期的防汛需求,洪泽湖水位迅速下降;7月后随着汛期来水湖泊水位迅速上涨;汛期结束后,10—12月水位缓慢抬升(图4b)。洪泽湖入湖水量和水位的关系为时间序列循环曲线,可被分为4个具有明显特征的阶段(图4c)。

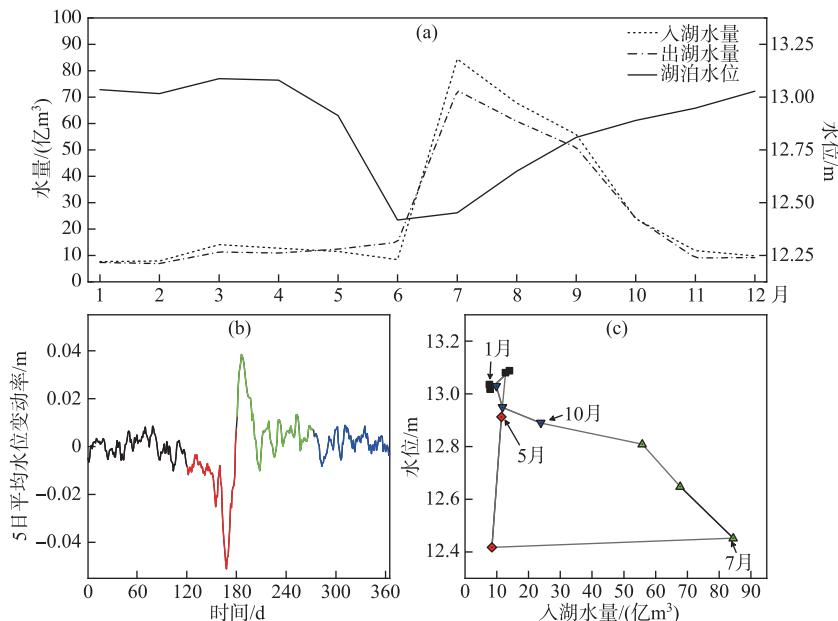


图4 洪泽湖水文因素逐月变化趋势

Fig.4 Monthly variation of hydrological factors in Lake Hongze

2013—2018年洪泽湖湖区年内水质变化趋势比较统一,水质站点达标平均比例年内变化如图5a所示。按水质站点达标比例可将洪泽湖年内水质变化分为4个时期:1—3月洪泽湖水质站点达标比例稳定在50%左右;4—6月水质站点达标比例出现了小幅增长;7—9月洪泽湖大面积湖区水质先恶化至V类以下,然后出现了明显反弹,水质达到全年最佳水平;10—12月,水质又逐渐变差。根据入湖总氮浓度和入湖总氮总量,可将洪泽湖污染负荷年内变化分为4个时期(图5b)。洪泽湖逐月平均总氮入湖浓度范围为1.96~3.75 mg/L,年内变化为:1—4月浓度在3.37~3.75 mg/L之间波动;5—6月浓度呈小幅下降趋势;7—9月由于汛期入湖水量迅速增加,造成总氮浓度大幅下降,9月仅为1.75 mg/L;10—12月总氮浓度出现大幅反弹。总体而言,洪泽湖各入湖河道总氮浓度严重超标,多数月份浓度远高于湖泊V类水质标准,即2 mg/L。洪泽湖多年

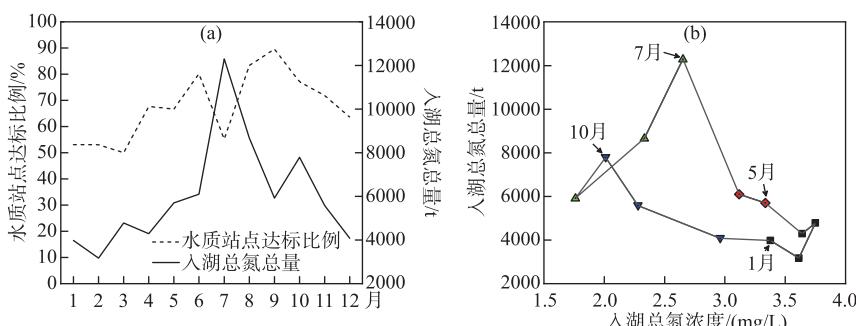


图5 洪泽湖水质因素逐月变化趋势

Fig.5 Monthly changes in water quality factors in Lake Hongze

月平均总氮入湖总量变化范围为 3170.44~12301.92 t, 汛期入湖量远大于非汛期, 年内变化趋势以 7 月为界主要呈现单峰变化, 先增后减, 10 月出现小幅反弹。

基于洪泽湖水文情势和总氮负荷年内变化趋势(表 1), 本文将全年分为 4 个时期: 平水期(1—4 月)、泄水期(5—6 月)、蓄水前期(7—9 月)和蓄水后期(10—12 月), 分别进行水位-水质反馈关系的量化。

表 1 洪泽湖水文因素和总氮负荷年内变化趋势^{*}

Tab.1 Changes of hydrological factors and load of total nitrogen in Lake Hongze

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
湖泊水位												
入湖水量												
入湖总氮浓度												
入湖总氮总量												

* 灰色为小幅波动, 蓝色为缓慢上升, 深蓝色为快速上升, 橙色为缓慢下降, 棕色为快速下降。

3.2.2 洪泽湖水位-水质经验关系拟合 根据洪泽湖 2013—2018 年水位和水质站点达标比例绘制不同时期的散点图, 可以发现两者之间具有显著的相关性, 如图 6 所示。蓄水前期水质有随水位升高而变好的趋势, 而余下各时段的水质均与水位呈负相关关系。入湖总氮浓度偏高是平水期、泄水期和蓄水后期洪泽湖水位-水质形成显著负相关性的主要原因。在平水期等温度较低的时期, 生态系统自净能力较弱, 水位抬升会增加总氮滞留比例, 加重污染负荷, 导致水质恶化。在蓄水前期等温度较高的时期, 藻类大量繁殖, 生态系统对营养盐的消耗能力有较大的提升, 但也具备了蓝藻水华暴发的条件。有研究显示, 流速较快、水体浑浊抑制了洪泽湖藻类大规模繁殖^[34]。但洪泽湖北部湖区流速缓慢, 水位抬升有利于蓝藻向表层上浮、扩散, 增加蓝藻水华等恶性水质事件发生的可能性。去除部分水位变动趋势异常数据后, 本文采用 SPSS 软件对这 3 个时期的水位-水质站点达标比例进行相关性计算和经验关系公式拟合, 结果显示平均 Pearson 系数达 -0.77(图 6)。

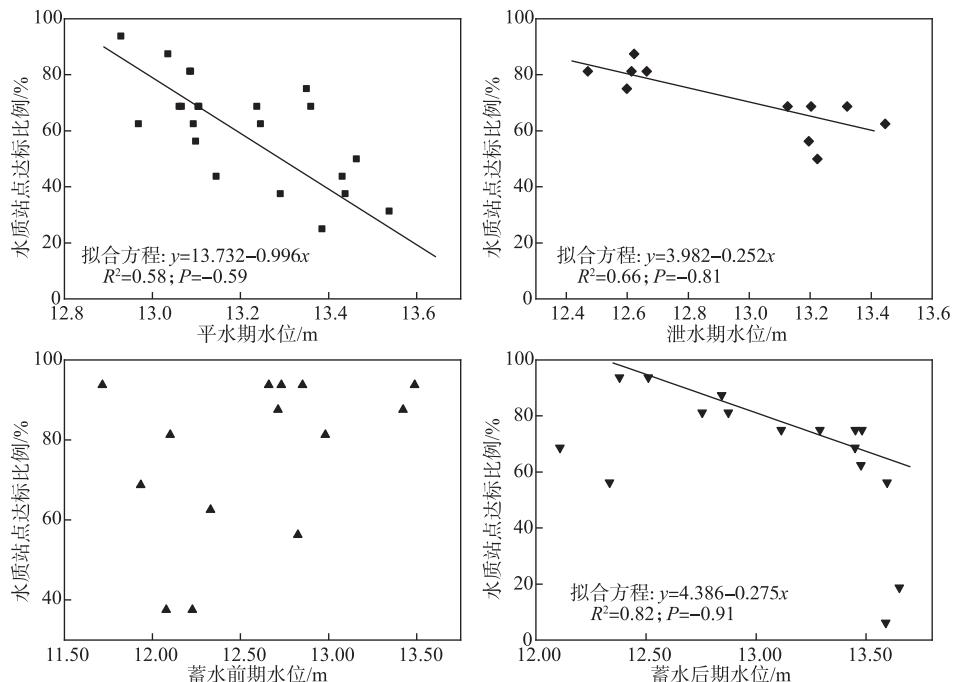


图 6 洪泽湖水位-水质站点达标比例散点图

Fig.6 Scatter diagram of water level and proportion of water quality stations meeting standard in Lake Hongze

蓄水前期洪泽湖水位—水质关系在低水位情况下相关性较差,但随着水位升高,两者的正相关性会逐渐增强。蓄水前期低水位情况多发生在7月,此时由于洪水携带大量上游污染物,入湖总氮总量达到全年最高水平;且洪泽湖7月多年平均水深仅为1.65 m,洪水对湖底造成了剧烈的冲刷,沉积在底泥中的氮元素大量释放进湖体,两者综合造成了7月湖体水质的下降。但随着汛期的进行,入湖河道的总氮浓度逐渐降低,减轻了生态系统净化压力,且蓄洪导致的水位抬升也减轻了对湖区底泥的冲刷情况,使得湖区水质情况迅速好转。

3.2.3 逐月水位变化率计算 洪泽湖入湖河流常年总氮浓度较高,导致洪泽湖水位过快上升会对湖体造成严重污染。洪泽湖在2016年10月内水位抬升2.16 m,同时入湖径流的总氮浓度较高,平均为2 mg/L,导致湖区总氮浓度在10月内翻倍。而高水位造成湖内总氮滞留比例和换水周期增加,使得湖泊水质在接下来的数月内逐渐恶化,一定程度上抵消了入湖水量的稀释作用(图7)。因此,在入湖河流水质较差的情况下,需要限制不同月份的水位变动幅度,才能平衡污染物总量和湖泊纳污能力,改善水质。根据公式(3)~(5)计算的洪泽湖多年适宜逐月水位变化率为-1.12~0.79 m(表2),泄水期在5~6月,蓄水时期在7~9月,年内其余时期水位变动较小。

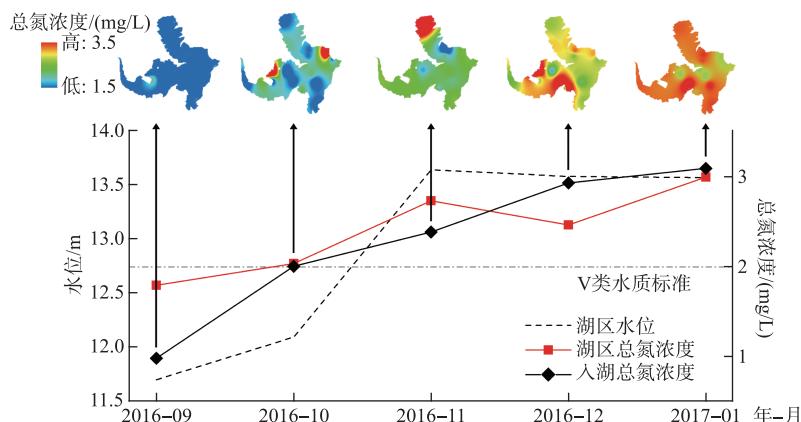


图7 2016年汛期后洪泽湖水位和水质变化趋势

Fig.7 Monthly changes of water level and water quality in Lake Hongze after flood season in 2016

表2 洪泽湖适宜逐月水位变化率(m/月)

Tab.2 Suitable change rate of water level in Lake Hongze (m/month)

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
上限	0.12	0.13	0.22	0.08	-0.05	-0.45	0.79	0.54	0.41	0.13	0.16	0.30
下限	-0.16	-0.16	-0.10	-0.26	-0.49	-1.12	0.02	-0.20	-0.31	-0.28	-0.14	-0.16

3.2.4 基于 Dillon 模型的湖区纳污能力计算 出湖水量和湖泊水位是富营养化湖泊纳污能力的主要影响因素。根据2003—2018年逐月出湖水量和2013—2018年逐月入湖污染物量,采用公式(3)~(5)以V类水质标准计算得出的平水期、泄水期和蓄水后期适宜生态水位下限分别为11.08、12.39和12.90 m(表3)。从全年来看,受益于较短的换水周期,洪泽湖纳污能力大于入湖总氮总量。但受到出入湖水量年内时程分布不均的影响,洪泽湖年内不同时期的多年平均纳污能力差距较大。较高的入湖总氮浓度使泄水期和蓄水后期的湖区自净压力较大,对水位要求较高,而对于入湖总氮总量最小的平水期和入湖总氮浓度最小的蓄水前期来说,湖泊的纳污能力则有所富余。

3.3 洪泽湖适宜生态水位修正结果及讨论

基于上文推求的天然水位情势和水位—水质响应关系,本文以全湖80%的水质监测点达到V类及更好水质标准为目标,计算洪泽湖适宜生态水位,逐月适宜生态水位阈值为12.92~12.99、12.79~12.99、12.84~

表 3 洪泽湖纳污能力计算结果
Tab.3 Water environmental capacity of Lake Hongze

时期	多年平均入湖总氮/t	多年平均纳污能力/t	纳污能力富余比例/%	适宜生态水位下限/m
平水期	16226.61	19005.83	14.43	11.08
泄水期	11800.75	11925.18	1.08	12.39
蓄水前期	26888.94	59281.53	54.64	—
蓄水后期	17450.69	17564.13	0.19	12.90

12.99、12.86~12.99、12.71~12.89、12.39~12.63、11.97~12.93、12.50~13.07、12.65~13.26、12.90~13.04、12.90~13.04、12.90~13.04 m(图 8). 相较于 IHA-RVA 法,本文基于水质因素修正的适宜生态水位区间出现了较大幅度的缩减. 除蓄水前期外,各时期的适宜生态水位区间平均缩小了 73.4%,说明湖泊自净能力和污染物滞留总量存在激烈的竞争关系,对洪泽湖生态系统造成了较大的压力.

此外,各时期适宜生态水位修正的原因并不相同. 平水期洪泽湖的入湖水量处于全年最低水平,多年逐月平均入湖水量仅为 $8 \times 10^8 \text{ m}^3$, 入湖河流总氮浓度处于年内峰值,因此需要降低湖泊适宜生态水位上限缩短湖泊换水周期,减少总氮滞留比例;为降低防洪风险,泄水期湖区水位快速降低,水体交换率有一定的提升,但这一时期内入湖总氮浓度仍维持在较高水平,同时气温上升,因此不仅需要降低适宜生态水位上限减少蓝藻水华暴发的可能性,也需要抬升适宜生态水位下限维持湖泊生态系统的稳定性和自净能力;蓄水后期为满足来年供水需要大量蓄水,但此时入湖径流的总氮浓度上升,蓄水过程不仅会造成水质下降,也会增大总氮滞留比例,致使湖泊水体总氮浓度进一步上升,因此需要控制适宜生态水位区间来平衡洪泽湖的纳污能力和污染物滞留总量;蓄水前期较为特殊,该时期内洪泽湖换水周期平均仅为 12.64 d,极大的降低了蓝藻水华发生的可能性,且入湖河流中的总氮浓度处于年内最低水平,两者综合作用下减小了蓄水前期的洪泽湖水质压力,适宜生态水位范围基本没有变化.

目前关于洪泽湖适宜生态水位的研究较少,现有研究多集中于水位变化对周边植被的影响. 邱新天等认为,3 月水位控制在 13 m 和 7 月控制在 12.34 m 时可以有效改善鸟类栖息地的植物生长状况^[35]. 秦敬岚等的研究从挺水植物的角度出发,认为 3、5、7、9 月适宜生态水位分别为 13.20、13.10、12.70、12.85 m^[36]. 本文基于水质因素计算的适宜生态水位区间总体上与这些研究成果较为相近,可以在控制水质的同时在一定程度上满足洪泽湖及周边生态系统的需求. 而各研究 3 月的适宜生态水位研究成果有所差距,主要原因有两方面:一是关注的功能目标不同,本研究以天然水位情势和水体总氮浓度控制为目标,在目前淮河高强度总氮输入的背景下,适宜生态水位上限受到了较大的限制;二是采用的水文基础数据时间尺度不同,邱新天等和秦敬岚等采用的是 1950—2019 年的蒋坝站水位数据,本文考虑到闸坝建设对水位情势的影响,采用的是 1988—2018 年的蒋坝站水位数据. 根据本文的方法,在确定了湖泊适宜生态水位后,即可为洪泽湖多目标优化调度提供生态约束,协调防洪、供水、航运等目标之间的矛盾,将适宜生态水位研究落实到最终的水位调控方案,为洪泽湖生态保护和水资源管理提供相关借鉴. 此外,在研究的深化过程中,可以建立水质水动力模型,根据湖泊长期规划开展不同流域污染负荷条件下洪泽湖适宜生态水位研究.

4 结论与展望

针对过水型湖泊主要入湖污染物对湖泊水质的影响问题,本文基于量化的水位-水质二元响应关系对洪泽湖适宜生态水位的设计开展研究,提出了一套综合考虑生存空间和湖泊水质需求的过水型湖泊适宜生

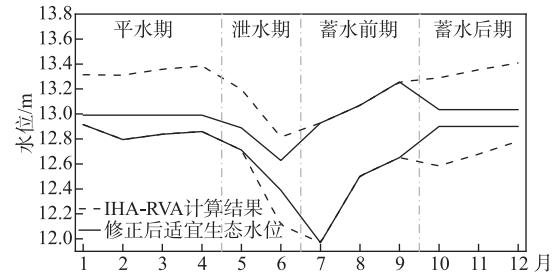


图 8 修正后洪泽湖适宜生态水位阈值
Fig.8 Revised threshold of suitable ecological water level in Lake Hongze

态水位计算的方法。该方法首先借鉴 IHA-RVA 法初步计算逐月适宜生态水位阈值和适宜逐日水位变化率；然后通过水文情势和污染物输入变化趋势区分年内不同时期，在不同时期内从水位—水质经验公式、逐月水位变动率、纳污能力 3 个方面分别量化水位—水质响应关系；最后在保留天然水位情势的基础上，基于水质调控水位对适宜生态水位阈值进行修正。本文得出主要结论如下：

1) 基于 IHA-RVA 法初步计算的洪泽湖适宜生态水位包括以下内容：逐月水位变化为 12.92~13.31、12.79~13.31、12.84~13.36、12.86~13.38、12.71~13.2、12.11~12.81、11.97~12.93、12.50~13.07、12.65~13.26、12.65~13.26、12.58~13.29、12.58~13.29、12.68~13.35、12.78~13.41m；逐日水位变化率为 -0.06~0.05 m。受防洪调度原因，洪泽湖适宜生态水位呈现独特反季相水位变化特征，在 5—9 月水位先降后升。

2) 按水位流量关系和入湖污染物变化情况，洪泽湖的年内水位—水质响应关系可被分为 4 个时期：平水期（1—4 月）、泄水期（5—6 月）、蓄水前期（7—9 月）和蓄水后期（10—12 月）。洪泽湖各时期水位和水质之间有较强的相关性，蓄水前期水质随水位上升而改善，其余各时期水质均随着水位提升而降低。年内逐月水位变化率为 -1.12~0.79 m，基于湖区纳污能力反推出的平水期、泄水期和蓄水后期适宜生态水位下限分别为 11.08、12.39 和 12.90 m。

3) 根据水位—水质经验公式和纳污能力要求修正的逐月适宜生态水位阈值为：12.92~12.99、12.79~12.99、12.84~12.99、12.86~12.99、12.71~12.89、12.39~12.63、11.97~12.93、12.50~13.07、12.65~13.26、12.90~13.04、12.90~13.04、12.90~13.04 m；洪泽湖蓄水前期适宜生态水位范围变化较小，但其他时期适宜生态水位范围较 IHA-RVA 法计算范围缩小了 73.4%，表明现阶段洪泽湖的自净能力和污染物滞留比例竞争较为激烈。

该套方法将水质作为生存环境需求纳入了适宜生态水位的考虑因素，拓宽了适宜生态水位的适用范围，但是也存在以下几个问题需要继续改进与完善：1) 本文在实例中仅计算了多年平均来水条件下的洪泽湖适宜生态水位，未考虑不同来水频率对于水质的影响，应增加预设情况；2) 在本文所提方法中，水位与水质的响应关系是通过对历史实测数据拟合得到的，存在数据尺度大，代表性不足的问题，在未来的研究中可以建立水质模拟模型，对水位—水质的反馈关系进行进一步的探索。

5 参考文献

- [1] Rao EM, Xiao Y, Ouyang ZY *et al.* Status and dynamics of China's lake water regulation. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(21): 6225-6231. DOI: 10.5846/stxb201310122456. [饶恩明, 肖燚, 欧阳志云等. 中国湖泊水量调节能力及其动态变化. 生态学报, 2014, 34(21): 6225-6231.]
- [2] Ma RH, Yang GS, Duan HT *et al.* China's lakes at present: number, area and spatial distribution. *Scientia Sinica: Terra*, 2011, 41(3): 394-401. DOI: 10.1007/s11430-010-4052-6. [马荣华, 杨桂山, 段洪涛等. 中国湖泊的数量、面积与空间分布. 中国科学: 地球科学, 2011, 41(3): 394-401.]
- [3] Yuan WH, Wang H, Zeng YC *et al.* Spatiotemporal variation of driving factors of algal proliferation in a large river-connected lake. *Environmental Engineering*, 2021, 39(10): 64-71, 128. DOI: 10.13205/j.hjgc.202110009. [袁伟皓, 王华, 曾一川等. 大型通江湖泊藻类增殖驱动要素的时空分异特征. 环境工程, 2021, 39(10): 64-71, 128.]
- [4] Zhang M, Shi XL, Yang Z *et al.* The variation of water quality from 2012 to 2018 in Lake Chaohu and the mitigating strategy on cyanobacterial blooms. *J Lake Sci.*, 2020, 32(1): 11-20. DOI: 10.18307/2020.0102. [张民, 史小丽, 阳振等. 2012—2018 年巢湖水质变化趋势分析和蓝藻防控建议. 湖泊科学, 2020, 32(1): 11-20.]
- [5] Guo J, Wang CM, Huang DZ *et al.* Pollution characterization and water quality assessment of Dongting Lake. *Environmental Chemistry*, 2019, 38(1): 152-160. [郭晶, 王丑明, 黄代中等. 洞庭湖水污染特征及水质评价. 环境化学, 2019, 38(1): 152-160.]
- [6] Li N, Li JX, Li GW *et al.* The eutrophication and its regional heterogeneity in typical lakes of China. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2018, 42(4): 854-864. [李娜, 黎佳茜, 李国文等. 中国典型湖泊富营养化现状与区域性差异分析. 水生生物学报, 2018, 42(4): 854-864.]
- [7] Zhu W, Tan YQ, Wang RC *et al.* The trend of water quality variation and analysis in typical area of Lake Taihu, 2010-2017. *J Lake Sci.*, 2018, 30(2): 296-305. DOI: 10.18307/2018.0202. [朱伟, 谈永琴, 王若辰等. 太湖典型区 2010—2017 年间水质变化趋势及异常分析. 湖泊科学, 2018, 30(2): 296-305.]

- [8] Liu XM, Chen LW, Zhang GX *et al.* Spatiotemporal dynamics of succession and growth limitation of phytoplankton for nutrients and light in a large shallow lake. *Water Research*, 2021, **194**: 116910. DOI: 10.1016/j.watres.2021.116910.
- [9] Xu ZX, Chen MJ, Dong ZC. Researches on the calculation methods of the lowest ecological water level of lake. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2004, **24**(10): 2324-2328. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-0933.2004.10.035.[徐志侠, 陈敏建, 董增川. 湖泊最低生态水位计算方法. 生态学报, 2004, **24**(10): 2324-2328.]
- [10] Yu DY, Jia L. Discuss on ecological water level on Hongze Lake. *Water Resources Planning and Design*, 2005, (2): 56-60.[郁丹英, 贾利. 关于洪泽湖生态水位的探讨. 水利规划与设计, 2005, (2): 56-60.]
- [11] Li XH, Song YD, Li YT *et al.* Calculation methods of lowest ecological water level of lake. *Arid Land Geography*, 2007, **30**(4): 526-530.[李新虎, 宋郁东, 李岳坦等. 湖泊最低生态水位计算方法研究. 干旱区地理, 2007, **30**(4): 526-530.]
- [12] Xu ZX, Wang H, Dong ZC *et al.* Minimum ecological water requirement for Nansi Lake. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006, **37**(7): 784-788. DOI: 10.3321/j.issn: 0559-9350.2006.07.003.[徐志侠, 王浩, 董增川等. 南四湖湖区最小生态需水研究. 水利学报, 2006, **37**(7): 784-788.]
- [13] Xu ZX, Wang H, Tang KW *et al.* Minimum ecological water requirements for lakes taking in-sending out water. *Resources Science*, 2005, **27**(3): 140-144. DOI: 10.3321/j.issn: 1007-7588.2005.03.023.[徐志侠, 王浩, 唐克旺等. 吞吐型湖泊最小生态需水研究. 资源科学, 2005, **27**(3): 140-144.]
- [14] Xu ZX. Research on ecological water requirements for rivers and lakes[Dissertation]. Nanjing: Hohai University, 2005.[徐志侠. 河道与湖泊生态需水研究[学位论文]. 南京: 河海大学, 2005.]
- [15] 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.
- [16] Gan F, Tang L, Guo HC *et al.* New method and application of estimating ecological water level of the Lake Poyang. *J Lake Sci*, 2015, **27**(5): 783-790. DOI: 10.18307/2015.0504.[淦峰, 唐琳, 郭怀成等. 湖泊生态水位计算新方法与应用. 湖泊科学, 2015, **27**(5): 783-790.]
- [17] 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.]
- [18] Wang HX, Zhu YW, Zha HF *et al.* Ecological water level and its safeguard measures in Lake Dongting. *J Lake Sci*, 2020, **32**(5): 1529-1538. DOI: 10.18307/2020.0524.[王鸿翔, 朱永卫, 查胡飞等. 洞庭湖生态水位及其保障研究. 湖泊科学, 2020, **32**(5): 1529-1538.]
- [19] Zhang BF, Chen F, Tian XQ *et al.* Research on water quality variation of seven major water systems in China from 2005 to 2017. *Yangtze River*, 2020, **51**(7): 33-39.[张宝锋, 陈峰, 田晓庆等. 2005—2017年中国七大水系水质变化趋势分析. 人民长江, 2020, **51**(7): 33-39.]
- [20] Wen CY, Liu JT, Hu F *et al.* Water quality change characteristics and eutrophication assessment of Poyang Lake. *China Rural Water and Hydropower*, 2020, (11): 83-88.[温春云, 刘聚涛, 胡芳等. 鄱阳湖水质变化特征及水体富营养化评价. 中国农村水利水电, 2020, (11): 83-88.]
- [21] Xu Y, Feng L, Hou XJ *et al.* Four-decade dynamics of the water color in 61 large lakes on the Yangtze Plain and the impacts of reclaimed aquaculture zones. *Science of the Total Environment*, 2021, **781**: 146688. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.146688.
- [22] Wang W, Fan XK, Huang CG *et al.* Monitoring and comparison analysis of heavy metals in the five great lakes in Jiangsu Province. *J Lake Sci*, 2016, **28**(3): 494-501. DOI: 10.18307/2016.0304.[王伟, 樊祥科, 黄春贵等. 江苏省五大湖泊水体重金属的监测与比较分析. 湖泊科学, 2016, **28**(3): 494-501.]
- [23] Meng W, Liu Y, Zhu SJ *et al.* Distribution and ecological risk of heavy metals in sediment across the Dongting Lake Basin. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2021, **19**(4): 739-749, 767.[孟婉, 刘扬, 朱士江等. 洞庭湖流域沉积物重金属分布特征及其生态风险. 南水北调与水利科技: 中英文, 2021, **19**(4): 739-749, 767.]
- [24] Wang MQ, Wang JC, Wang Q *et al.* Characteristics of plankton community structure and eutrophication status in Dongting Lake in the season with normal water level. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, **37**(8): 2418-2429. DOI: 10.13292/j.1000-4890.201808.004.[汪梦琪, 汪金成, 王琪等. 洞庭湖区平水期浮游生物群落结构特征及富营养化现状. 生态学杂志, 2018, **37**(8): 2418-2429.]

- [25] Du BX, Xu LG, Zhang J et al. The spatial-temporal characteristics of eutrophication in Poyang Lake and its relationship with the water level. *Research of Environmental Sciences*, 2019, 32(5): 795-801. DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2018.10.07.[杜冰雪, 徐力刚, 张杰等. 鄱阳湖富营养化时空变化特征及其与水位的关系. 环境科学研究, 2019, 32(5): 795-801.]
- [26] Wang X, Xiao WH, Zhu WY et al. Effects of water level variation on water quality in Dongting Lake. *South-to-North Water Diversion and Water Science & Technology*, 2012, 10(5): 59-62.[王旭, 肖伟华, 朱维耀等. 洞庭湖水位变化对水质影响分析. 南水北调与水利科技, 2012, 10(5): 59-62.]
- [27] Wang MJ, Du ZP, Duan ZZ et al. Estimating the eco-environmental water demand of a river and lake coupled ecosystem: A case study of Lake Dianchi Basin. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(4): 1341-1348. DOI: 10.5846/stxb201908121685.[王明净, 杜展鹏, 段仲昭等. 河湖生态系统生态用水优化研究——以滇池流域为例. 生态学报, 2021, 41(4): 1341-1348.]
- [28] Zhu J, Wang LM, Jia FX et al. Calculation methods and case study of wetland ecological water demand in Northern China. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2007, 1(11): 112-118.[朱婧, 王利民, 贾凤霞等. 我国华北地区湿地生态需水量研究探讨与应用实例. 环境工程学报, 2007, 1(11): 112-118.]
- [29] Yang W, Zhao YW, Liu Q et al. A systematic literature review and perspective on water-demand for ecology of Lake Baiyangdian. *J Lake Sci*, 2020, 32(2): 294-308. DOI: 10.18307/2020.0202.[杨薇, 赵彦伟, 刘强等. 白洋淀生态需水: 进展及展望. 湖泊科学, 2020, 32(2): 294-308.]
- [30] Li Y, Zhang Z, Cheng JH et al. Water quality change and driving forces of Lake Hongze from 2012 to 2018. *J Lake Sci*, 2021, 33(3): 715-726. DOI: 10.18307/2021.0308.[李颖, 张祯, 程建华等. 2012—2018年洪泽湖水质时空变化与原因分析. 湖泊科学, 2021, 33(3): 715-726.]
- [31] Wang HX, Zha HF, Zhuo ZY et al. The evaluation of hydrological regime in four river basins based on IHA-RVA method. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2019, 17(3): 169-177.[王鸿翔, 查胡飞, 卓志宇等. 基于IHA-RVA法四水流域水文情势变化评估. 中国水利水电科学研究院学报, 2019, 17(3): 169-177.]
- [32] Guo WX, Li Y, Wang HX et al. Assessment of eco-hydrological regime of lower reaches of Three Gorges Reservoir based on IHA-RVA. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2018, 27(9): 2014-2021. DOI: 10.11870/cjlyzy-hj201809012.[郭文献, 李越, 王鸿翔等. 基于IHA-RVA法三峡水库下游河流生态水文情势评价. 长江流域资源与环境, 2018, 27(9): 2014-2021.]
- [33] Mei HP, Wang ZL, Liu M et al. Characteristic water levels of Hongze Lake in the past five decades: Variation rules and influencing factors. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2021, 38(1): 35-40. DOI: 10.11988/ckyyb.20191272.[梅海鹏, 王振龙, 刘猛等. 洪泽湖近50a特征水位变化规律及影响因素. 长江科学院院报, 2021, 38(1): 35-40.]
- [34] Wu TH, Liu JS, Deng JM et al. Community structure of phytoplankton and bioassessment of water quality in a large water-carrying lake, Lake Hongze. *J Lake Sci*, 2019, 31(2): 440-448. DOI: 10.18307/2019.0213.[吴天浩, 刘劲松, 邓建明等. 大型过水性湖泊——洪泽湖浮游植物群落结构及其水质生物评价. 湖泊科学, 2019, 31(2): 440-448.]
- [35] Qiu XT, Yin XN, Liu HR et al. Optimized scheme for planting aquatic plants to protect waterfowl habitat in Hongze Lake wetland. *Journal of Hydroecology*, 2020, 41(5): 107-114. DOI: 10.15928/j.1674-3075.2020.05.013.[邱新天, 尹心安, 刘洪蕊等. 面向鸟类栖息地保护的洪泽湖湿地植被种植方案研究. 水生态学杂志, 2020, 41(5): 107-114.]
- [36] Qin JL, Yin XN, Liu HR et al. Analysis of effect of lake water level changes on emergent plants: A case study in the Hongze Lake. *Environmental Engineering*, 2020, 38(10): 53-60. DOI: 10.13205/j.hjgc.202010009.[秦敬嵒, 尹心安, 刘洪蕊等. 湖泊水位变化对挺水植物影响分析: 以洪泽湖为例. 环境工程, 2020, 38(10): 53-60.]