J. Lake Sci.(湖泊科学), 2027, 39(1):000-000
DOI 10.18307/2027.0142
©2027 by Journal of Lake Sciences

多要素协同下长江中下游华阳湖群全年生态水位过程构建*

江宇琪[1,2], 姚仕明[1,2], 刘小光[1,2], 丁　兵[1,2], 戚展硕[1,2]
（1：长江科学院，武汉 430010）
（2：长江科学院 水利部长江重点实验室，武汉 430010）

摘　要：华阳湖群作为长江中下游典型湖泊湿地系统，兼具水鸟保护、水文连通、水质净化等核心生态功能，并承担供水、防洪等社会生产保障功能。现有水位调控聚焦单一要素且缺乏全年动态过程线，难以充分支撑其核心生态功能稳定发挥。本文整合近 50 年水文、地形、水质及生境数据，采用 IHA-RVA 法、ArcGIS 空间分析、水动力—水质模型及生境适宜面积法，构建“水文—形态—水质—生境”多要素协同计算框架，提出满足湖群水文稳定与生态健康的全年最适生态水位过程线。结果表明：最适生态水位 11.86 m（4 月）~13.53 m（9 月），阈值范围 11.56 m（3 月）~14.87 m（8 月），且在时间分布上呈“冬春收敛、夏秋扩张”特征，各季节水位适配生物生境、水文节律及水质改善需求。该方案可保障重点鸟类越冬、水生生物栖息及水质净化目标，为长江中下游同类闸控湖泊或湖群生态水位调控提供科学借鉴。
关键词：华阳湖群；生态水位阈值；IHA-RVA 法；湖泊形态参数；水质改善；生境面积

Establishing the annual ecological water level regime for the Huayang Lake Complex through Multi-Objective Coordination, middle-lower reaches of the Yangtze River*

Jiang Yuqi[1,2], Yao Shiming[1,2], Liu Xiaoguang[1,2], Ding Bing[1,2]& Qi Zhanshuo[1,2]
(1: *Changjiang River Scientific Research Institute,Wuhan* 430010, *P.R.China*）
(2: *Ministry of Water Resources Key Laboratory of the Yangtze River,Wuhan* 430010, *P.R.China*）

Abstract: The Huayang Lake Complex is a typical wetland system in the middle and lower Yangtze River Basin. It supports both core ecological functions, such as waterbird conservation, maintenance of hydrological connectivity, and water quality purification, and social production functions, including water supply and flood mitigation. Current water-level regulation relies on a single influencing factor and lacks an annual dynamic process curve, which constrains the stable performance of the lake complex's ecological functions. Using nearly 50 years of field datasets on hydrology, topography, water quality, and habitat, this study constructs a multi-factor collaborative framework that integrates hydrology, morphology, water quality, and habitat. The framework applies the IHA-RVA method, ArcGIS spatial analysis, a hydrodynamic-water quality model, and habitat suitability area methods. Based on these tools, we develop an annual optimal ecological water level hydrograph to sustain hydrological stability and ecological health. Results show that the optimal ecological water level ranges from 11.86 m in April to 13.53 m in September, with threshold values varying from 11.56 m in March to 14.87 m in August. The water level follows a seasonal pattern of convergence in winter and spring and expansion in summer and autumn. This seasonal variation aligns with the requirements of biological habitat maintenance, natural hydrological rhythms, and water quality improvement. The proposed water level scheme benefits overwintering waterbirds, aquatic organism habitation, and in-lake purification. It also offers scientific guidance for ecological water level management in similar gate-regulated lakes and lake groups in the middle and lower Yangtze River Basin.
Keywords: Huayang Lake Complex; ecological water level thresholds; IHA-RVA method; lake morphometric parameters; water quality

* 2025-10-26 收稿;.2026-05-18 收修改稿;2026-05-19 录用.
国家自然科学基金长江水科学研究联合基金重点支持项目（U2240224）和长江中下游河湖动态过程及调控创新团队项目（CKSF2024326/HL）联合资助.
** 通信作者；E-mail:yzhshymq@163.com

improvement; habitat area

华阳湖群由龙感湖、大官湖、黄湖和泊湖串联而成(图 1)，其中龙感湖流域面积 1098 km^2，近 50 年（1972—2021 年）平均水位 13.06 m；大官湖与黄湖流域面积合计 614 km^2，年平均水位 12.83 m；泊湖流域面积 1283.5 km^2，年平均水位 12.61 m，该流域地势西北高、东南低，中部港道连通各子湖，是长江中下游典型的河网型湖泊系统[1-2]。其独特的水文连通性是维系江湖复合生态系统物质能量交换、保障流域生态平衡的核心，可划分为核心生态功能与社会生产保障功能两大层级，核心生态功能包括：作为国际候鸟保护关键栖息地，目前湖群已监测到越冬水鸟 44 种、总数超 12 万只，是白鹤等 20 种国家重点保护水鸟的越冬栖息地[3]（安徽华阳河湖群湿地越冬水鸟同步监测报告(2022—2024)，宿松县林业局）；作为江湖水文连通枢纽，是流域湿地网络关键节点，保障水生生物洄游繁殖与江湖生态系统完整性；具备水质净化与调节能力，可抑制水体富营养化。社会生产保障功能主要为支撑沿岸农业灌溉与城镇供水，并通过华阳河、杨湾河通道及华阳闸、杨湾闸实施流量与水位调控，保障湖群防洪及供水安全[4-5]。

图 1 华阳湖群流域水系图

Fig. 1 River System Map of the Huayang Lake Complex Basin

自通江涵闸及上游梯级水库运行以来，华阳湖群的水文情势发生显著改变，加之围垦造田等人类活动的影响，湿地生态功能持续退化，鸟类栖息地与食物来源受损，水体富营养化与生物多样性下降等问题日益突出，亟需通过科学的水位调控予以缓解[6-8]。国内外关于湖泊生态水位的研究起步较早，其中，长江中下游各类河湖的生态水位研究已形成一定成果[9-10]，郭强等[11]基于鄱阳湖 5 个水文站 1960 年—2014 年的日水位监测数据, 采用 IHA-RVA 法揭示了鄱阳湖生态水位变异程度及其空间差异；王祥荣等[12]基于流域尺度的 RS/GIS 综合评价技术, 识别出长江三峡库区(重庆段)沿江不同敏感度区域；黎育红[13]等建立了武汉东湖生态湖泊群二维水动力水质模型，模拟湖群在不同调水方案下对水质改善结果的差异性；吴东浩等[14]基于 2000 年—2020 年长系列监测数据,分析了太湖水文、水环境、水生态变化特征及相互关系。现有研究多集中于单一要素（如水文、水质或生境要素）的水位调控，缺乏对湖泊水体形态、生境条件等多要素系统的协同分析，且多限于稳态生态水位阈值计算，尚未形成面向闸控湖群、适配全生命周期生态需求的全年动态生态水位过程线。华阳湖群为受闸控高度干预的通江湖群，水位涨落速率、变幅、枯汛转换时机均由闸门调度决定，与鄱阳湖等天然通江湖泊依靠自然水文过程实现年内自我调节的特征存在本质差异，已有研究表明，仅采用枯水期、繁殖期等关键时段水位保障模式存在一定局限，鄱阳湖、洞庭湖等湖泊均出现过“关键期水位达标但前后季节水位衔接断裂”问题，引发生态系统连锁退化。该湖群生态保护目标具有全时段、多物种、多目标叠加特征：枯水期需保障越冬水鸟觅食栖息，春季需满足鱼类产卵与沉水植物萌发，汛期需兼顾防洪调蓄与水质净化，汛后需平稳过渡为越冬期生境创造条件，单一关键时段水位保

障无法满足全年生态系统稳定需求，必须构建覆盖全年的动态生态水位过程线以支撑精细化闸控调度。因此，开展华阳湖群多要素协同的生态水位过程研究，对实现区域水资源管理与生态保护具有重要意义。

1 研究方法与数据来源

该湖群适宜生态水位是维系其生态健康的核心动态阈值，基于湖群水文连通特性与季节性波动规律、协同多要素需求[15]—水位过高易淹滨岸植被、压缩水鸟栖息空间，过低易致湿地萎缩且生物生境匮乏，故以阈值区间形式兼顾供水与水质调控，维系生态稳定。其内涵聚焦三方面：一是保障湖群与湖滨带水力联系，避免水位骤变破坏水陆交错带连续性，造成栖息地斑块隔离与连通性丧失，即栖息地破碎化；二是提供水生植被及越冬水鸟等适宜生境；三是以水位动态调控平衡自净与氮磷滞留效率、抑制富营养化，且契合湖群汛枯水文调度，实现生态保护与水资源利用协同。本研究以保障湖区生态系统全年稳定和维持湖泊自净能力为目标，综合考虑水文动态过程、水位与水体形态关系、指示物种生境面积响应以及非汛期水位调控对水质改善的关键影响要素，采用多种分析方法系统确定适宜生态水位及其阈值区间，构建华阳湖群多要素协同的全年生态水位过程线，为闸控湖群精细化调度提供科学依据。

1.1 研究方法

针对华阳湖群在通江涵闸运行和人类活动影响下水文情势与生态环境显著改变现状，本研究综合利用近 50 年多站点逐日水位序列、30 m 分辨率 DEM 地形数据以及实测水质监测资料，构建多要素协同的生态水位计算框架。具体而言，首先采用 IHA-RVA 法提取月尺度生态水位阈值[16-17]，以反映湖区水文节律的长期变化特征；其次利用 GIS 平台分析水位与湖泊面积、容积等水体形态参数的关系[18-19]，识别水位波动引发的水体突变阈值；基于 23 个采样点 2015 年 10 月—2016 年 4 月实测数据率定柯氏力常数、糙率等关键参数（水位相对误差≤3.2%，TN/TP 相对误差≤10.5%，误差均在可接受范围内），建立二维水动力—水质耦合模型[20-21]模拟不同水位调控方案下 TN、TP 浓度的时空演变，定量评估非汛期水位抬升对水质改善的贡献，遵循江湖关系、水环境改善、通江涵闸汛前泄水时机及工程防洪安全四项原则，拟定 5 组非汛期华阳湖群生态水位调控方案（表 1）；在生境方面[22]，选取占全球迁徙路线 1%以上的濒危白鹤为指示物种（其觅食依赖水深调控的苦草分布），结合水深适宜度曲线和地形信息计算加权可用生境面积，判定最优栖息水位区间；在此基础上，引入层次分析法（AHP）[23-24]确定水文过程、湖泊形态、水质改善和生境需求四类指标的权重，将各权重代入相关公式耦合计算，形成全年多目标动态生态水位过程线及水位阈值区间，为湖群生态水位精细化调控提供定量数据支撑。

表 1 非汛期华阳河湖群生态水位调控方案

Tab. 1 Non-flood Season Ecological Water Level Regulation Scheme for the Huayang Lake Complex

水位调控方案	调控方式	10 月至次年 2 月控制水位	10 月至次年 1 月控制水位	10 月至 12 月控制水位	1 月至 2 月控制水位	3 月至 4 月控制水位
方案 1	华阳闸联合控制湖区水位	12.2m	/	/	/	11.8m
方案 2		12.5m	/	/	/	11.8m
方案 3		/	13m	/	11.8m	11.8m
方案 4		/	/	13m	12.5m	11.8m
方案 5		/	/	13m	12.2m	11.8m

湖泊水体形态参数变化下不同生态水位阈值加权公式如下：

$$H_{eco}=\alpha\cdot H(A)+\beta\cdot H(P)+\gamma\cdot H(V) \quad (1)$$

式中 α、β、γ 分别为水体面积、周长和容积权重系数，$H(A)$、$H(P)$、$H(V)$为水体面积、周长和容积对应的风险点水位值。

进一步结合栅格数据中各网格单元的水深及典型物种对应的适宜度指数，采用加权可用面积法计算生境面积公式如下（式 2）：

$$WUA = \sum_{i=1}^{n} SIiAi \quad (2)$$

式中，*WUA*为加权可用生境面积（km^2），*Ai*和*SIi*为第 *i* 个网格单元的面积（km^2）和生境适宜度。

全年生态水位阈值区间及最适生态水位计算表达式如下：

$$H_{eco}（max/min）=a\cdot H_{eco}(I)+b\cdot H_{eco}(M)+c\cdot H_{eco}(A)+d\cdot H_{eco}(Q) \quad (3)$$

基于各指标权重构建生态水位调控目标层—准则层—指标层层次结构，采用标度法构造判断矩阵，经一致性检验（CR <0.1）确保矩阵有效后，利用方根法计算各指标权重并归一化处理，将各权重代入公式（4）耦合计算，其中 *a*，*b*，*c*，*d* 分别为华阳湖群 IHA-RVA、水体形态特征、水鸟适宜生境、水质改善下生态水位权重系数，各指标权重随季节动态调整（1—12 月权重范围分别为：a = 0.2433 ~ 0.8448、b = 0.0751 ~ 0.3077、c = 0.2898 ~ 0.4965、d = 0.1851 ~ 0.4608），*Heco(I)*、*Heco(M)*、*Heco(A)* 和 *Heco(Q)*为考虑以上要素计算所得的对应生态水位阈值。

$$H_{eco}=H_{eco}(I_{P=25\%})+b\cdot(H_{eco}(M)-H_{eco}(I_{P=25\%}))+c\cdot(H_{eco}(A)-H_{eco}(I_{P=25\%}))+d\cdot(H_{eco}(Q)-H_{eco}(I_{P=25\%})) \quad (4)$$

其中,*b*，*c*，*d* 分别为华阳湖群水体形态特征、水鸟适宜生境、水质改善下生态水位权重系数，*Heco(M)*、*Heco(A)*和 *Heco(Q)*为考虑以上要素计算所得的对应生态水位阈值，$H_{eco}(I_{P=25\%})$为 IHA-RVA 计算下湖群适宜生态水位阈值下限水位。

2.2 数据来源

本研究选取宿松水文站、下仓埠水位站和田详嘴水位站分别作为龙感湖、大官湖与黄湖、泊湖的代表性站点。水文数据来源于长江水利委员会水文局等机构，涵盖 1972 年—2021 年逐日水位等观测资料，序列完整连续，可较好地反映区域丰、平、枯不同水文年的水位变化，数据精度满足研究要求。

3 结果与讨论

3.1 基于 IHA-RVA 法的适宜生态水位阈值

采用常用水文学法 IHA-RVA 法分析华阳湖群 1972—2021 年日、月平均水位变化过程特征，并进行湖群全年适宜生态水位阈值计算[9, 17,25,26]。

3.1.1 日平均水位过程变化　分析华阳河湖群各组成湖泊日平均水位变化，各湖泊水位涨落变化趋势基本一致且稳定。龙感湖多年低水位发生在第 48—52 日，高水位发生在第 237—243 日，大官湖、黄湖多年低水发生在第 49—51 日，高水位发生在第 236—242 日，泊湖多年低水位发生在第 56—59 日，高水位发生在第 232—237 日。

3.1.2 月平均水位过程指标阈值　以多年各月平均水位发生频率 25%、75%的值作为当月适宜生态水位阈值要求，构建湖群组成湖泊多年丰水期及枯水期水位累积频率曲线（图 2）。

经 P-III型频率计算，得到各组成湖泊月平均水位过程指标下适宜生态水位阈值，各湖泊全年生态水位阈值变化过程见图 3。湖群多年整体生态水位阈值波动范围为 11.11 ~ 14.92 m。这一规律与 An 等对该湖群水文节律的研究规律相吻合[5]，均反映出“春枯、夏汛、秋退、冬稳”的天然水文特征，验证了此水位阈值的合理性。该水文节律的形成既契合湖群的长期演化规律，又与鲫鱼、鲤鱼等水生生物繁殖需求相匹配[27]:春季水位逐月回升，流速持续增大，结合适宜水温（≥18 ℃）、适宜流速（0.2 ~ 0.8 m/s）及合理水位日涨幅，可为鱼类产卵提供较为适宜的综合水文信号，夏季高水位则可为幼鱼育幼提供充足空间。

3.2 基于水体形态分析法的适宜生态水位阈值

通过拟合水位（*I*）与水体周长（*P*）、面积（*A*）和体积（*V*）的定量关系，得到各形态参数随水位变化的趋势线（图 4）。湖泊周长、面积和体积的变化率基本在水位 10~ 13 m 区间出现峰值，表明该阶段水位变动将引起湖泊形态的剧烈变化，形态稳定性显著降低，此水位区间可视为生态风险水位区间。从生态机制来看，该区间对应湖盆“缓坡—陡坡”的地形过渡带，水位微小变动会引发水陆交错带面积的剧烈扩张或萎缩[28]，因此该风险区间水位（约 10~ 13 m）应作为水位控制的下限阈值，以防止湖滨带湿地植被（如芦苇）、沉水植被（苦草等）生境萎缩、水生生物栖息地剧烈变动及底质稳定性破坏，保障湖泊生态

系统结构和功能免受突变性水文扰动。龙感湖、大官湖/黄湖和泊湖三者生态风险水位存在差异，主要源于湖盆地形与初始容积的不同：龙感湖湖底高程较高，形态参数变化峰值出现相对更早；泊湖湖底高程较低，且容积随水位增幅更为显著，因此风险水位相对偏低且变化幅度较大；大官湖与黄湖水体形态特征变化介于前二者之间。在实际生态水位调控中，需依据各子湖的风险水位分别制定差异化调控策略，以维持湖群整体生态稳定性。

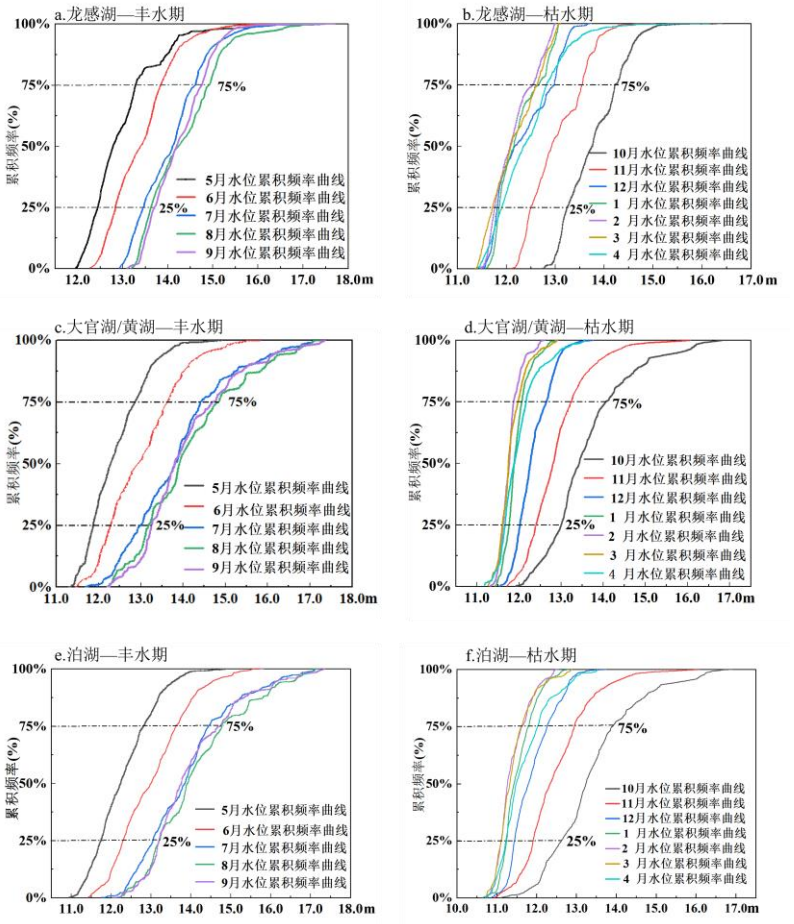

图 2 龙感湖、大官湖/黄湖、泊湖多年丰水期、枯水期水位累积频率曲线

Fig. 2 Multi-year Water Level Cumulative Frequency Curves for Wet/Dry Seasons in Lakes Longgan, Daguan, Huanghu and Bo

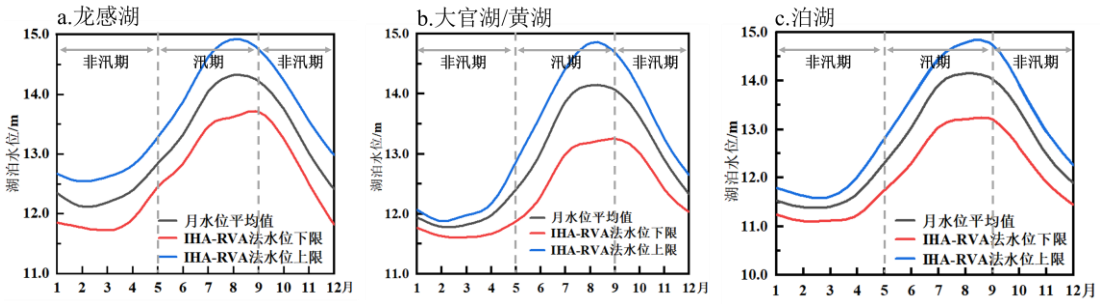

图 3 龙感湖、大官湖/黄湖、泊湖全年生态水位阈值变化过程

Fig. 3 Annual Variation Process of Ecological Water Level Thresholds in Lakes Longgan, Daguan, Huanghu and Bo

以 IHA-RVA 法确定的各月生态水位阈值（图 3）作为动态波动范围，结合 AHP 法构建的湖泊水体形态参数权重体系，建立了融合水文节律与生态功能的权重分配机制。依据专家咨询与层次结构模型，逐月确定了水体面积、周长和容积的权重，反映不同时期生态服务需求的差异。将全年逐月权重系数代入加权公式（1）中进行水位加权求和，计算出各湖泊全年水体形态参数变化下不同生态水位阈值（图 5）。

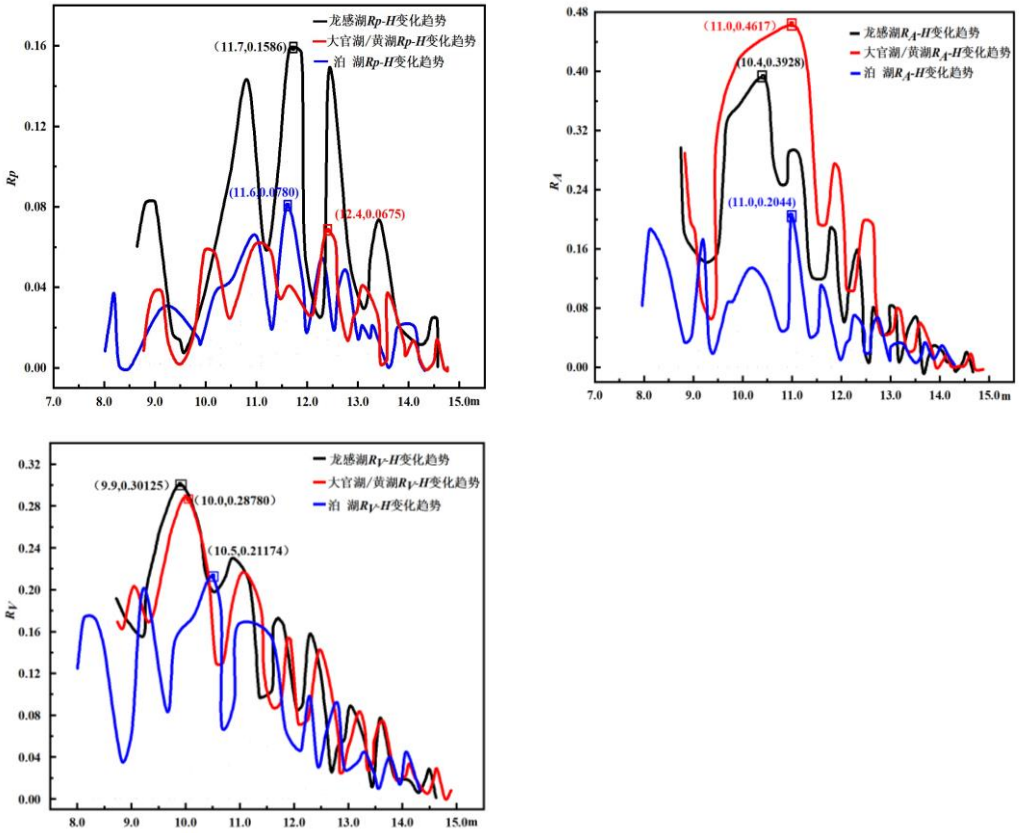

图 4 湖群各组成湖泊水位-水体周长(a)、水位-面积（b）及水位-容积（c）变化率变化趋势线

Fig. 4 Trend lines of water level-perimeter(a), water level- area (b)
and water level-volume (c) change rate for individual lakes within the Huayang Lake Complex

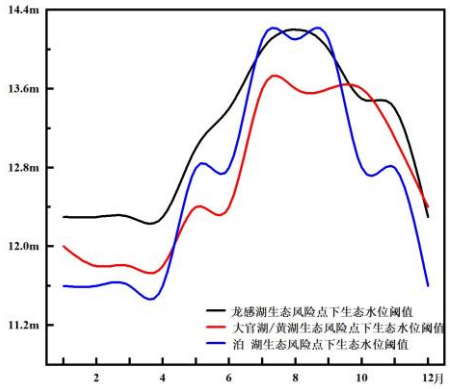

图 5 湖群各湖泊水体形态参数变化下全年生态水位阈值

Fig. 5 Annual Ecological Water Level Thresholds Under Water Morphology Changes for Lakes in the Huayang Lake Complex

从生态水位控制的实际意义来看：面积权重反映水面生境规模对生物生存空间的影响，周长权重关联湖滨带结构与岸线生境稳定性，容积权重体现水体容量及污染物稀释能力，三者共同约束水位调控需维持的水体形态—生态平衡[29]。结合湖群上述生态水位数据（全年水位 11.6～14.2 m，3—4 月 11.6～12.3 m、7—9 月主汛期 13.6～14.2 m、11 月—次年 2 月枯水期 11.6～13.4 m），湖泊形态参数变化率关键区间与沉水植物种子发育进程及水鸟、鱼类生存紧密耦合：3—4 月为沉水植物萌发及幼苗发育期，对应周长、面积权重变化率平缓区间，稳定的岸线及生境规模可保障幼苗扎根，同时为华阳湖群土著优势种（产黏性卵的鲫鱼、鲤鱼）提供产卵附着基（沉水植物根系与茎叶）、并为早春水鸟营造觅食浅滩；7—9 月为繁殖体形成期，对应形态参数变化率最低波动区间，低幅水位波动可促进繁殖体扩散，充足沉水植物生物量支撑鱼类饵料与栖息及夏候鸟觅食；11 月—次年 2 月为休眠越冬期，对应容积权重变化率次稳定区间（次于主汛期、优于发育期），稳定的水体环境可保障休眠体安全越冬，同时维系越冬水鸟栖息觅食及鱼类越冬生境[30-33]。主汛期生态水位上移至接近 IHA-RVA 阈值下限，适度消落可维持其处于繁殖体形成期适配区间，兼顾水质改善、行洪安全，规避对沉水植物及水鸟、鱼类的不利冲击；枯水期生态水位偏向阈值上限，可将形态参数变化率稳定于休眠越冬期适宜区间，维系越冬生物生境及湖滨带功能完整，且维持底质湿润以保障苦草等沉水植被休眠体存活。

3.3 基于水质改善的生态水位阈值

基于 5 个非汛期华阳河湖群生态水位调控方案[34]（表 1）进行水动力-水质模型模拟，结果表明：方案 4 下 TN 浓度降幅 8.7%～19.7%、TP 浓度降幅 8.5%～15%，方案 5 下 TN 降幅 9.1%～19.7%、TP 降幅 8.5%～17.7%，相较于其他 3 类方案（方案 1：TN 降幅 2.3%～4.7%，TP 降幅 0～11.6%；方案 2：TN 降幅 2.7%～12.5%，TP 降幅 2.8%～11.7%；方案 3：TN 降幅 8.7%～21.5%，TP 降幅 4.5%～12.6%）其水质改善效果相对最优，调查得知 1 月至 3 月华阳湖群 TN 和 TP 浓度较高，方案 4 下在此时期维持更高水位，可更有效改善该时段湖群水环境，最终拟定最优控制水位：1—2 月为 12.5 m、3—4 月为 11.8 m、10—12 月为 13 m。该湖群水位调节对水质影响相关研究表明，非汛期闸控水位对水质（TN、TP）改善有显著作用，与本节的研究结论相适配[5-6]，水位抬升能够增大水体容积、延长水力停留时间并促进水体垂向混合，进而强化颗粒物沉降与微生物降解，提升氮磷去除效果，水质改善与栖息地维持的水位需求总体契合，可通过季节动态调控实现协同优化。10—次年 2 月高水位可提升水体容积与水力停留时间，提高氮磷的沉淀与生物降解效率；3—4 月适度降低水位（11.8 m）可减少滨岸带土壤氮磷淋溶，兼顾水质改善与沉水植物萌发需求，且符合《地表水环境质量标准》（GB 3838—2002）中湖库III类水域限值要求（TN≤1.0 mg/L、TP ≤ 0.05 mg/L），可保障沿岸农业灌溉用水的水质安全性，实现“生态水质改善—社会水资源利用”协同优化。

3.4 基于适宜生境维持的生态水位阈值

华阳湖群是白鹤、东方白鹳等濒危水鸟的重要越冬与迁徙停歇地。本研究选取白鹤为指示物种，鉴于水深直接影响其主要觅食对象—苦草的生长分布，进而决定觅食可及性，因此构建以水深为关键因子的越冬水鸟生境适宜度评价曲线[22,35-37]，水深适宜度曲线显示，0 ～ 60 cm 为水鸟有效觅食水深范围，20 ～ 40 cm 为最适水深区间，该结果为确定维持水鸟觅食功能的生态水位提供了定量依据。以 IHA-RVA 法确定的 11 月—次年 3 月生态水位阈值为基础范围，采用加权可用面积公式（2）计算华阳湖群越冬水鸟的适宜生境面积，构建各组成湖泊生境适宜度及最佳生境面积下适宜生态水位变化曲线如图 6 所示。

从生态水位调控的实际意义来看，*WUA* 指标直接反映水鸟栖息地的可用性与质量，其最大值对应的水位可作为生态水位优选值，为越冬期水鸟的觅食机会与栖息地稳定提供保障。图 8 趋势显示，“高—缓降—稳”的水位变化规律与水鸟迁徙节律、沉水植被生存需求契合：11 月（抵达期）维持 12.6～13.3 m 高水位，既适配初抵水鸟的觅食适应需求，又能保障湖底底质湿润，为沉水植被后续生长储备条件；12 月至次年 1 月（高峰期）水位从 12.6 m 缓降至 11.3 m，合理控制缓降速率，既能避免水位过低导致植被覆盖率下降、满足鸟群峰值期觅食空间需求，又能防止苦草资源过度消耗；2—3 月（迁飞期）维持在 11.3～12.6 m 稳定水位，为水鸟迁飞准备提供稳定的栖息环境，同时衔接沉水植被春季萌发的水分条件。整体生态水

位覆盖 IHA-RVA 阈值核心区间，既保障了苦草等沉水植物的生长条件（衔接 4—5 月萌发期水位≥11.3 m）与底质湿润状态，又为水鸟提供了稳定的觅食空间和核心食物供给。结果表明，基于越冬水鸟适宜生境面积确定的水位调控模式，与沉水植被生活史水位需求形成良好协同，在水位季节变化与生境面积响应规律上与鄱阳湖等通江湖泊已有研究结论基本吻合[22,35-38]。

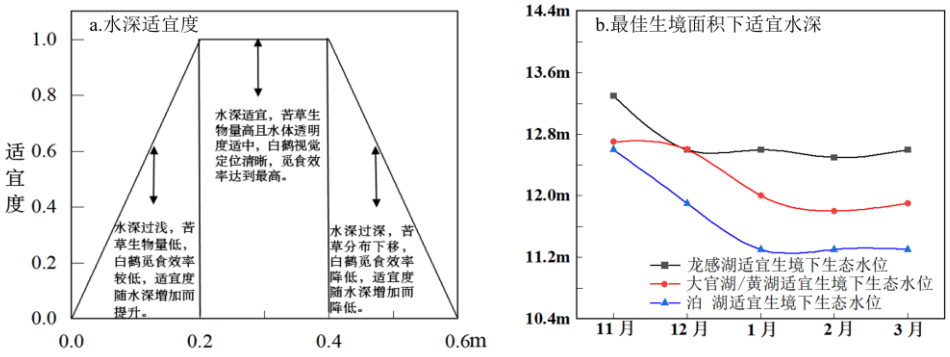

图 6 各组成湖泊生境适宜度及白鹤最佳生境面积下生态水位变化曲线

Fig.6 Ecological Water Level Variation Curves Based on Habitat Suitability and Optimal White Crane Habitat Area for Individual Lakes in the Huayang Lake Complex

3.5 耦合多要素的全年适宜生态水位过程线

基于水文过程、湖泊水体形态、水鸟生境及水质改善多重要素，采用 AHP 层次分析法确定各要素权重[40]，耦合计算得到华阳湖群多目标协同下的全年生态水位阈值及适宜水位过程。综合考虑 IHA-RVA 法所提供的生态水位上下限，采用公式（3）和公式（4）计算得出华阳湖群全年综合生态水位及其阈值动态变化曲线见 7。

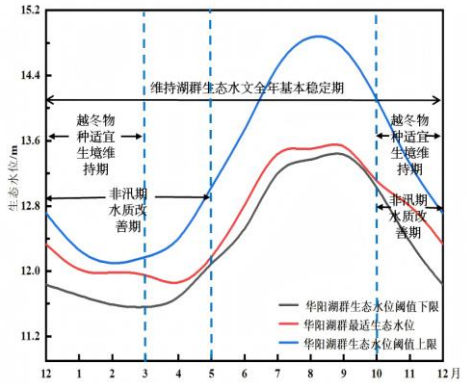

图 7 华阳湖群全年生态水位及其阈值动态变化曲线

Fig. 7 Dynamic Variation Curves of Annual Ecological Water Level and Its Thresholds for the Huayang Lake Complex

华阳河湖群全年生态水位阈值区间呈现明显的季节性分异特征，各时期阈值特征与主导生态保护目标紧密相关。在 1—2 月（枯水越冬期）：生态水位处于年度谷值，适宜水深范围为全年最窄（差值＜ 0.6 m），此时浅水生境范围相对缩小，是越冬水鸟等生物最敏感的生态临界期。狭窄的阈值范围反映了该时期生态系统的敏感性和脆弱性，水位需稳定维持在较高水平（近阈值上限），且需避免水位骤变—水位骤变会导致栖息地分割，形成孤立斑块，即生境破碎化，破坏生物迁徙与觅食连通性，同时避免水位过低导

致苦草等沉水植物休眠体失活、植株衰败死亡及湖滨带湿地退化；在 3—5 月(生态恢复与繁殖期),生态水位阈值下限以约 0.27 m/月的速率上升，适宜水深范围持续扩张，此阶段是鱼类产卵、沉水植被（苦草等）萌发及候鸟栖息地修复的关键时期，适当抬升水位可衔接苦草 4 月萌发需求，有助于扩大水生生物繁殖空间，促进湖滨带湿地植被恢复，同时提升水体污染物稀释能力；在 6—8 月（汛期高水位阶段），水位阈值上限以 0.57 m/月速率增至年度极值 14.87 m，适宜水深范围宽度达到峰值（约 1.5 m）。宽幅阈值适应了汛期水文变幅大的自然特点，较高水位有利于实现行洪调蓄，同时也可维持一定水深，抑制部分湖区富营养化发生；在 9 月（汛末过渡期），生态水位阈值上下限呈非对称下降趋势，可由汛期高水位逐步向越冬适宜水位过渡，该过程有利于契合越冬水鸟、鱼类等生物的季节生境需求，维持栖息地空间的相对连续性，减轻水位快速变动带来的不利影响，同时退水缓慢有助于保持湖底底质湿润，为苦草等沉水植物越冬与次年自然恢复提供较为有利的水文条件，该水位调控兼顾了退水速率对湿地植被稳定性的影响，避免水位骤降导致水生生物搁浅或生境破碎化；在 10—2 月及次年 1—5 月（枯水维持与再生期），这两个时段最适生态水位及其阈值范围大小整体较为接近,主要源于其生态目标的一致性：即维持越冬水鸟生境质量、保障枯水期适宜生态水位和支撑春季生态复苏。水位调控应保持月变幅≤ 0.40 m、单日变幅≤ 0.10 m，避免剧烈波动，为核心保护物种提供持续稳定的适宜生境。

4 结论与建议

本研究针对华阳湖群生态水位调控单一要素导向、缺乏全年动态过程线的问题，整合近 50 年水文、地形等多源数据，构建“水文—形态—水质—生境”多要素协同计算框架，耦合确定了湖群全年适宜生态水位过程线。主要结论如下：

1）明确了湖群关键生态保护对象的水位响应阈值，越冬水鸟适宜生境水位为 11.3~ 13.3 m，低于 11.3 m 会导致苦草生物量下降威胁其食物来源；华阳湖群土著产粘性卵鱼类产卵与沉水植被萌发关键期（3—5 月）的最适生态水位为 11.86 ~ 12.17 m，该区间可避免水体形态参数剧变，同时为鱼类粘性卵提供稳定附着载体；湖群水质改善的敏感水位区间为 11.8 m ~ 13.0 m，此水位下湖区 TN、TP 浓度降幅达 8.5% ~ 19.7%，水体自净能力显著提升且可满足周边农业灌溉水质要求。

2）厘清了湖群全年适宜生态水位的时空分异特征，全年最适生态水位为 11.86 m（4 月） ~ 13.53 m（9 月），整体阈值区间为 11.56~ 14.87 m，时间分布呈“冬春收敛、夏秋扩张”特征；年内可分为三个阶段，1—3 月枯水期水位低且变幅平缓（平均月变幅≤ 0.07 m），阈值区间狭窄（＜ 0.61 m），生态系统敏感性高；4—8 月春夏季水位持续抬升（月变幅峰值达 1.64 m），阈值区间扩张至 1.5 m，与天然水文节律高度适配；9—12 月汛后水位非对称回落，退水速率对湿地植被和生物群落稳定性影响至关重要。

3）揭示了闸控湖群多要素季节耦合规律，枯水越冬期需稳定近阈值上限的高水位，生态恢复繁殖期逐步抬升水位可协同满足生物繁殖与植被恢复需求，汛期高水位宽阈值可兼顾行洪调蓄与富营养化抑制，汛后过渡期缓降水位可减低生境破碎化程度，各要素的协同响应要求湖群生态水位调控实现季节动态下的多目标协同优化。

结合华阳闸、杨湾闸±0.05 m 的工程调控精度，建议对华阳湖群实施分期动态水位调度：11 月—次年 3 月将水位控制在 11.56~ 13.32 m 并保持稳定，保障越冬水鸟栖息与沉水植物生存安全；4—6 月以约 0.30 m/月的速率逐步抬升水位至 11.68~ 13.74 m，匹配水生生物繁殖与植被萌发需求；7 月至 9 月在防洪约束下控制水位不超过 14.87 m，减轻持续高水位对滨岸带草本植被的不利淹没影响；10—11 月控制月降幅≤ 0.40 m，平稳衔接越冬期水位调控要求。本研究提出的生态水位过程线可为现有华阳湖群闸控调度优化提供参考。需要说明的是，本研究未考虑丰、平、枯不同水文年型差异与极端气候事件的影响，也未纳入浮游生物、底栖动物等生物类群的响应特征，后续可结合长序列水文数据、多情景模拟与多生物类群监测，进一步完善分年型生态水位适应性调度及极端气候应急调控策略，提升研究成果的实用性与可操作性。

5 参考文献

[1] Zhang L, Yang QH, Zeng K *et al*. Study on water quality improvement effect of different water level regulation schemes in Huayang Lake Group during

non-flood season. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power*: *Natural Science Edition*, 2020, **41**(3): 67-73. DOI: 10.19760/j.ncwu.zk.2020037. [张琳, 杨启红, 曾凯等. 华阳河湖群非汛期水位调控水质改善效应研究. 华北水利水电大学学报: 自然科学版, 2020, **41**(3): 67-73.]

[2] Zeng K, Wang JS, Zhang YC *et al*. Influence of water level fluctuation on water quality of Huayang River and lake group. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2020, **37**(8): 49-53, 68. [曾凯, 王家生, 章运超等. 华阳河湖群水位变化对水质的影响.长江科学院院报, 2020, **37**(8): 49-53, 68.]

[3] Zhang SH, Chen YZ. Impact of wetland management regulations on the protection of Huayang Lake provincial wetland reserves. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2020, **48**(22): 73-76. [张胜华, 陈一佐. 湿地管理条例对华阳河湖群省级湿地保护区的保护影响.安徽农业科学, 2020, **48**(22): 73-76.]

[4] Huang Y, Chen XS, Zhu LL. Differential responses of ecosystem stability to climatic and anthropogenic factors in connected and isolated lake basins on the Yangtze River. *Journal of Environmental Management*, 2024, **359**: 121014. DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.121014.

[5] An LS, Liu C, Fan ZY *et al*. Effects of water level variations on the water quality of Huayang Lakes, China. *Journal of Geographical Sciences*, 2025, **35**(1): 173-188. DOI: 10.1007/s11442-025-2317-4.

[6] Fan ZY, Wang Z, Li YP *et al*. Water level fluctuation under the impact of lake regulation and ecological implication in Huayang Lakes, China. *Water*, 2020, **12**(3): 702. DOI: 10.3390/w12030702.

[7] 巴亚东, 柳雅纯. 华阳河湖群生态环境现状及保护措施研究. 2017（第五届）中国水生态大会论文集. 长江水资源保护科学研究所，2017: 93-98.

[8] Tan BL. The characteristics of water level adjustment during non-flood season in the lake groups surrounding Huayang River in the middle and lower reaches of the Yangtze River and its impact on the control gates for entering the river. *China Flood & Drought Management*, 2023, **33**(11): 57-60. [檀北来. 长江中下游华阳河湖群非汛期水位调整特征及对入江控制闸的影响. 中国防汛抗旱, 2023, **33**(11): 57-60.]

[9] Zhang C, Chen WB, Huang FF. Determining the suitable ecological water level based on the response relationship between landscape connectivity and water level: A case study of Poyang Lake, China. *Ecological Indicators*, 2025, **175**: 113562. DOI: 10.1016/j.ecolind.2025.113562.

[10] Mao JQ, Zhang PP, Dai LQ *et al*. Optimal operation of a multi-reservoir system for environmental water demand of a river-connected lake. *Hydrology Research*, 2016, **47**(S1): 206-224. DOI: 10.2166/nh.2016.043.

[11] Guo Q, Meng YK, Fan LF *et al*. Study on ecological water level variation of Poyang Lake based on IHA and RVA method in recent years. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, **28**(7): 1691-1701. DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201907019. [郭强, 孟元可, 樊龙凤等. 基于 IHA/RVA 法的近年来鄱阳湖生态水位变异研究. 长江流域资源与环境, 2019, **28**(7): 1691-1701.]

[12] 王祥荣. 基于 RS/GIS 的长江三峡库区(重庆段)沿江区域景观模拟及生态调控[学位论文]. 上海: 复旦大学, 2005.

[13] Li YH, He SL. A 2-D model coupling hydrodynamics and water quality for the water connection and diversion of shallow lake group. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2015, **32**(1): 21-27, 38. [黎育红, 贺石磊. 浅水湖泊群连通与调水的二维水动力-水质耦合模型研究.长江科学院院报, 2015, **32**(1): 21-27, 38.]

[14] Wu DH, Chen FF, Meng XC *et al*. Suitable ecological water level of Lake Taihu. *China Environmental Science*, 2023, **43**(4): 1834-1843. [吴东浩, 陈芳斐, 孟晓辰等. 基于沉水植物的太湖适宜生态水位研究. 中国环境科学, 2023, **43**(4): 1834-1843.]

[15] Ge YH, Liu XM, Yang JS *et al*. The threshold value of all-seasons suitable ecological water level coupled with nutrient load in Lake Chagan. *J Lake Sci*, 2023, **35**(6): 1979-1989. [葛裕豪, 刘雪梅, 杨敬爽等. 耦合营养负荷的查干湖全季节适宜生态水位阈值研究.湖泊科学, 2023, **35**(6): 1979-1989.]

[16] Gu GH, Yang K, Yang WC *et al*. Research on the suitable ecological water level of Fuxian Lake and analysis of water level variation degree. *China Rural Water and Hydropower*, 2021(7): 54-60. [谷桂华, 杨侃, 杨文春等. 抚仙湖适宜生态水位研究及水位改变度分析.中国农村水利水电, 2021(7): 54-60.]

[17] Yang M, He ZH. Analysis of hydrological situation changes in the Qianzhong karst basin based on IHA-RVA method. *Journal of Hydroecology*, 2025, **46**(2): 91-102. [杨梅, 贺中华. 基于 IHA-RVA 法的黔中喀斯特流域水文情势变化分析. 水生态学杂志, 2025, **46**(2): 91-102.]

[18] Liu YX, Li MC, Zhou MX *et al*. Quantitative analysis of the waterline method for topographical mapping of tidal flats: A case study in the Dongsha sandbank, China. *Remote Sensing*, 2013, **5**(11): 6138-6158. DOI: 10.3390/rs5116138.

[19] Mason DC, Davenport IJ, Robinson GJ *et al*. Construction of an inter-tidal digital elevation model by the 'Water-Line' Method. *Geophysical Research Letters*, 1995, **22**(23): 3187-3190. DOI: 10.1029/95GL03168.

[20] Fan ZY, Liu ZJ, Bai J *et al*. Hydrodynamic water quality characteristics and driving mechanism in Hengshui Lake. *Journal of Environmental Engineering*

Technology, 2023, **13**(3): 1001-1010. [范振宇, 刘振杰, 白静等. 衡水湖水动力水质特征及驱动机制. 环境工程技术学报, 2023, **13**(3): 1001-1010.]

[21] Lai XJ, Jiang JH, Huang Q *et al*. Two-dimensional numerical simulation of hydrodynamic and pollutant transport for Lake Poyang. *J Lake Sci*, 2011, **23**(6): 893-902. [赖锡军, 姜加虎, 黄群等. 鄱阳湖二维水动力和水质耦合数值模拟.湖泊科学, 2011, **23**(6): 893-902.]

[22] Chen LG, Chen LM, Jia JW *et al*. Quantitative effects of water level variation on the habitat area of wintering waterfowl in dry season of the Poyang Lake. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2019, **50**(12): 1502-1509. [陈炼钢, 陈黎明, 贾建伟等. 鄱阳湖枯季水位变化对越冬水鸟生境面积的定量影响. 水利学报, 2019, **50**(12): 1502-1509.]

[23] Zhang ZY. Application of AHP in health assessment of rivers and lakes. *Henan Water Resources and South-to-North Water Diversion*, 2024, **53**(10): 7-8, 29. [张志业. 层次分析法在河湖健康评价中的应用.河南水利与南水北调, 2024, **53**(10): 7-8, 29.]

[24] Xu ZP, Min SA, Zhu X *et al*. Ecosystem evaluation of plateau lakes based on hierarchical analysis: A case study of Shahu Lake. *Environmental Science Survey*, 2024, **43**(4): 83-87. [徐志鹏, 闵嵩傲, 朱翔等. 基于层次分析法的高原湖泊生态系统评价——以沙湖为例. 环境科学导刊, 2024, **43**(4): 83-87.]

[25] Zhuo ZY, Qian Z, Jiang H *et al*. Evaluation of hydrological regime in Xiangjiang Basin based on IHA-RVA method. *China Rural Water and Hydropower*, 2020(8): 188-192. [卓志宇, 钱湛, 姜恒等. 基于 IHA-RVA 法的湘江流域水文情势评价. 中国农村水利水电, 2020(8): 188-192.]

[26] Le Z. Optimal selection of the most ecologically relevant hydrological indicators and their evolutionary attributions. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, **42**(17): 7068-7079. DOI: 10.5846/stxb202108232345.

[27] Ban X, Chen S, Pan BZ *et al*. The eco-hydrologic influence of the Three Gorges Reservoir on the abundance of larval fish of four carp species in the Yangtze River, China. *Ecohydrology*, 2017, **10**(1): e1763. DOI: 10.1002/eco.1763.

[28] Hollister JW, Milstead WB, Urrutia MA. Predicting maximum lake depth from surrounding topography. *PLoS One*, 2011, **6**(9): e25764. DOI: 10.1371/journal.pone.0025764.

[29] 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.]

[30] Maihemuti B, Aishan T, Simayi Z *et al*. Temporal scaling of water level fluctuations in shallow lakes and its impacts on the lake eco-environments. *Sustainability*, 2020, **12**(9): 3541. DOI: 10.3390/su12093541.

[31] Zhao FB, Fang X, Zhao ZY *et al*. Effects of water level fluctuations on the growth characteristics and community succession of submerged macrophytes: A case study of Yilong Lake, China. *Water*, 2021, **13**(20): 2900. DOI: 10.3390/w13202900.

[32] Du F, Wang SY, Han Z *et al*. Impact of hydrological processes on wetland landscapes and wintering migratory birds in a large floodplain lake (Poyang Lake, China). *Ecohydrology*, 2022, **15**(8): e2469. DOI: 10.1002/eco.2469.

[33] Foubert A, Le Pichon C, Mingelbier M *et al*. Modeling the effective spawning and nursery habitats of northern Pike within a large spatiotemporally variable river landscape (St. Lawrence River, Canada). *Limnology and Oceanography*, 2019, **64**(2): 803-819. DOI: 10.1002/lno.11075.

[34] Chai ZH, Yao SM, Liu TH *et al*. Ecological operation scheme of artificial river-communicating lakes in non-flood period. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2020, **37**(6): 28-33. DOI: 10.11988/ckyyb.20190276. [柴朝晖, 姚仕明, 刘同宦等. 人工通江湖泊非汛期生态调度方案研究. 长江科学院院报, 2020, **37**(6): 28-33.]

[35] Chen LG, Chen LM, Xu YF *et al*. Ecological water level for proposed hydraulic construction locking Lake Poyang based upon wintering waterfowls habitat modelling. *J Lake Sci*, 2020, **32**(5): 1519-1528. DOI: 10.18307/2020.0523. [陈炼钢, 陈黎明, 徐祎凡等. 基于越冬水鸟生境模拟的拟建鄱阳湖水利枢纽生态控制水位探讨. 湖泊科学, 2020, **32**(5): 1519-1528.]

[36] Chen LG, Chen LM, Xu YF *et al*. Effects of water level fluctuation on the potential habitat area of *Vallisneria natans* in Poyang Lake. *Advances in Water Science*, 2020, **31**(3): 377-384. [陈炼钢, 陈黎明, 徐祎凡等. 水位变化对鄱阳湖苦草潜在生境面积的影响. 水科学进展, 2020, **31**(3): 377-384.]

[37] Cui BS, Hua YY, Wang CF *et al*. Estimation of ecological water requirements based on habitat response to water level in Huanghe River Delta, China. *Chinese Geographical Science*, 2010, **20**(4): 318-329. DOI: 10.1007/s11769-010-0404-6.

[38] Li L, Ding MM, Jeppesen E. Variation in growth, reproduction, and resource allocation in an aquatic plant, *Vallisneria spinulosa*: The influence of amplitude and frequency of water level fluctuations. *Aquatic Sciences*, 2020, **82**(4): 81. DOI: 10.1007/s00027-020-00754-8.

[39] Gou MM, Feng XY, Li JR *et al*. Assessing ecosystem health changes in UlanSuhai Lake using hierarchical analysis and entropy method. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2025, **44**(2): 93-100. [勾芒芒, 冯雪瑶, 李建茹等. 基于层次分析-熵权法的乌梁素海湖泊生态系统健康评价. 灌溉排水学报, 2025, **44**(2): 93-100.]