

基于水生植物修复的玄武湖生态水位研究

孙泽悦,姜翠玲

(河海大学水文水资源学院,江苏 南京 210098)

摘要:在野外采样调查水生植物种类、种群现状和空间分布的基础上,基于湖泊形态分析法和生物空间最小需求法确定了玄武湖最低生态水位,并进一步考虑水生植物的水位需求,制定了水生植物不同生长阶段的生态水位调控方案。结果表明:玄武湖水生植物种类丰富但覆盖度不高,为13.2%,沉水植物的覆盖度很低,为2.1%;玄武湖最低生态水位为9.6 m,萌发期水位为9.9 m时,有利于水生植物尤其是沉水植物的萌发,能达到30%的水生植被覆盖度目标;夏季水位为9.8 m时,能保障湖泊防洪安全,控制过度生长的荷花等挺水植物,促进玄武湖总体水生植物的生长与修复。

关键词:生态水位;水位调控;水生植物修复;城市湖泊;玄武湖

中图分类号:X171.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2023)03-0049-06

Study on ecological water level of Xuanwu Lake based on aquatic plant restoration//SUN Zeyue, JIANG Cuiling
(College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on field sampling surveys of aquatic plant species, population status and spatial distribution, the minimum ecological water level of Xuanwu Lake was determined using the lake morphology analysis method and the biological lowest space demand method. The water level regulation scheme of aquatic plants at different growth stages was formulated considering the water level demand of aquatic plants. The results show that the species of aquatic plants in Xuanwu Lake are rich, but the coverage is not high, which is 13.2%. The coverage of submerged plants is very low with a value of 2.1%. The minimum ecological water level of Xuanwu Lake is 9.6 m. The recommended water level during the germination stage is 9.9 m, which can reach the goal of 30% coverage of aquatic vegetation and is beneficial to the germination of aquatic plants, especially submerged plants. The recommended water level in summer is 9.8 m, which can guarantee flood control security, control overgrown emergent plants such as lotus flowers, and promote the growth and recovery of the overall aquatic plants in the lake.

Key words: ecological water level; water level regulation; aquatic phytoremediation; urban lake; Xuanwu Lake

近年来对城市湖泊各种资源的不断开发利用,不可避免地引发了一系列环境问题,如湖泊富营养化、水华爆发、生物多样性锐减等,对城市湖泊的水文特征和生态服务功能产生了很大影响^[1]。水生植物作为湖泊生态系统的重要组成部分,不仅可以为其他水生生物创造多种生境,还可以起到改善水质、减轻水体富营养化等作用^[2],因此水生植物的修复与重建被认为是改善湖泊生态环境的关键^[3-4]。水位是反映湖泊水文状况的重要特征指标,特别是水位波动的范围、频率和持续时间,是控制湖泊生态系统功能的主要因素,对湖泊水生植物群落的修复具有至关重要的影响^[5-6]。水生植物在不同的生长阶段对水位的需求不同,全面了解这些需求对于修

复湖泊的水生植被极其重要^[7-8],科学合理地对湖泊水位进行调节是修复湖泊水生植被的有效措施^[7,9]。

湖泊生态水位^[10]是维护湖泊生态系统正常运行的合理水位,最低生态水位是生态水位的下限值^[11]。20世纪末以来,湖泊生态水位已成为一个新的研究热点。Dai等^[10]结合天然水位资料法、湖泊形态分析法、生物空间最小需求法、最低年平均水位法4种方法的计算结果,用综合指数法求得洞庭湖的最低生态水位;Ye等^[12]根据生态水文法确定湿地耗水主要为水分蒸发、渗漏和植物需水量等基础的需水量,并以此确定博斯腾湖湿地生态需水量。国内生态需水研究主要集中于最低生态水位计算方

基金项目:国家自然科学基金(32171563);长江勘测规划设计研究院开放创新基金(CX2020K06)

作者简介:孙泽悦(1997—),女,硕士研究生,主要从事水生态环境保护研究。E-mail:2590553633@qq.com

通信作者:姜翠玲(1966—),女,教授,博士,主要从事水生态环境保护研究。E-mail:cljianghu@163.com

法研究及具体湖泊的生态水位核算,使用年保证率设定法、天然水位资料法、湖泊形态分析法、生物空间最小需求法、曲线相关法和最低年平均水位法等生态水位计算方法,研究了南四湖^[13]、博斯腾湖^[14]、艾丁湖^[15]、滇池^[16]等湖泊的生态水位。这些方法的重点主要是研究湖泊的最低生态水位,而非动态水位波动对水生生物的影响^[13,15],然而最低生态水位并不能满足水生植物不同生长阶段的水位需求^[8,17]。因此,亟需一种可以满足水生植物不同阶段生长需求的湖泊生态水位计算方法来指导富营养化城市湖泊的生态修复。

20 世纪 70 年代以来,由于多年严重的环境污染,玄武湖中水生高等植物群落不断退化,且经过 4 次大规模的底泥清淤疏浚,水生高等植物覆盖度和种类大大减少,现存的水生植物大多在 2002 年由人工选培而成^[18]。近年来,玄武湖水生植物生长状况良好,但总体水生植被覆盖度不高,尤其是沉水植物覆盖度和应用频度皆较低^[19]。为进一步修复玄武湖水生植物,本文从水生植物生长所需的水位波动需求角度为玄武湖制定生态水位调控方案。

1 研究区概况与数据资料

1.1 研究区概况

玄武湖位于南京市玄武区,湖泊面积为 5.5 km²,其中水面面积 3.8 km²,属于典型的天然小型城市浅水湖泊,是江南 3 大名湖之一,被誉为“金陵明珠”^[20]。玄武湖分为东南湖、东北湖、西南湖、西北湖 4 大湖区,常年水位为 9.8 ~ 10.2 m,最高水位为 11.15 m,最低水位为 9.80 m,除 6—9 月为 9.80 m 外,其余月份维持在 10.0 ~ 10.2 m 之间,水面标高 10 m 时,平均水深 1.14 m,库容 429 万 m³^[21],水位基本上由人工控制^[20]。玄武湖水生植物物种较为丰富,但群落结构简单,尤其是沉水植物的种类及数量缺乏。

1.2 数据资料

地形数据资料来自 2017 年实测地形数据。水生植物资料来自 2022 年 5 月在玄武湖进行的实地调查。根据样地布设原则^[22],在调查区域内采用典型取样方法设置样地,在每个样地中设置 1 ~ 3 条样带,每条样带宽 2 m,长 4 ~ 14 m。每条样带设 2 ~ 8 个样方,样方面积为 2 m × 2 m^[23]。此次调查在玄武湖内共设置样地 24 个,样带 52 条,样方 144 个,样地分布见图 1。识别和记录每个样方内的植物,计算样方内各物种覆盖面积;估算全湖水生植物尤其是沉水植物的覆盖面积,计算其植被覆盖度;并用米尺测量沉水植物和挺水植物的水位分布范围下限。

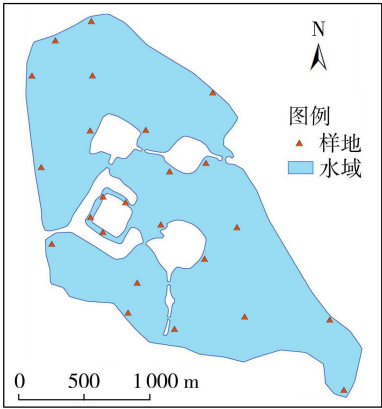


图 1 玄武湖的调查样地分布

2 研究方法

2.1 湖泊形态分析法

湖泊形态分析法是一种用于计算湖泊最低生态水位的方法,适用于玄武湖这类湖盆发育规则的湖泊,在缺乏长系列自然水文资料、生态资料的湖泊得到广泛应用^[14]。该方法根据湖泊水位和面积资料,建立两者的关系曲线。湖泊面积变化率是湖泊面积与水位关系函数的一阶导数,最大变化率对应的水位为湖泊最低生态水位。当水位降到最低生态水位以下时,湖泊的表面积将显著减少,湖泊功能将严重退化^[24]。该方法可以表示为

$$A = f(Z) \tag{1}$$

$$\frac{\partial^2 A}{\partial Z^2} = 0 \tag{2}$$

式中:A 为湖面面积,m²;Z 为湖泊水位,m。 $\frac{\partial^2 A}{\partial Z^2}$ 为 0 时的水位即为最低生态水位。

2.2 生物空间最小需求法

生物空间最小需求法也是一种用于计算湖泊最低生态水位的方法,适用于玄武湖这类湖盆比较浅平的湖泊,对于湖盆窄深的湖泊有很大的局限性^[11]。该方法用湖泊各类生物对生存空间的最小需求来确定最低生态水位,这个最小生存空间对应的水位就是湖泊最低生态水位。鱼类是对低水位最为敏感的生物,且鱼类在生态系统中地位特殊,一般用鱼类作为指示物^[25]。因此,将最低生态水位确定为湖底高程加上鱼类生存所需的最小水深。

2.3 水生植物水位需求法

水生植物水位需求法是一种以水生植物为指标的湖泊生态水位计算方法,适用于有修复水生植被需求的湖泊。该方法将植物生长期分为萌发期、幼苗生长期、生长扩散期、成熟期、种子扩散期、休眠期 6 个阶段,将萌发期确定为水生植被修复的关键期和水位调节的基准期,根据湖泊水位数据与湖底地

形数据,建立萌发期植被覆盖度与水位的定量关系,从而得到萌发期水位,再根据湖泊水生植物生长的水位需求得到其余生长期的适宜水位^[8]。具体计算步骤如下:

a. 依据水位和湖底地形,建立水位 Z 与湖面面积 A 的关系式,即 $A=f(Z)$ 。

b. 建立潜在萌发区域面积 A_0 与萌发期水位 Z_g 的关系式。潜在萌发区域面积为水生植物理论上萌发区域的面积,不同生活型的水生植物萌发的水位高程不同,挺水植物和湿生植物具有重叠的水位分布区域,最高都可在常水位 Z_c 发芽,大多数挺水植物最低可以在水下 0.2 m 发芽^[26],湿生植物则不能。将挺水植物和湿生植物的萌发期水位下限记为 Z_e ,则 $Z_e=Z_g-0.2$,挺水植物和湿生植物萌发期水位分布范围为从 Z_e 到 Z_c ;浮叶植物和沉水植物具有重叠的水位分布区域,最高都可在 Z_g 发芽,而沉水植物可以在较低的水位萌发,沉水植物的水位下限为 $Z_g-S_D/0.6$ (S_D 为湖泊透明度)^[7],浮叶植物和沉水植物萌发期水位分布范围为从 $Z_g-S_D/0.6$ 到 Z_g 。综合所有水生植物水位分布范围,得出总体水位分布范围,再根据函数 $A=f(Z)$ 得出水生植物的萌发区域面积,建立 $A_0=f(Z_g)$ 。

c. 建立潜在植被覆盖度 C_0 与萌发期水位 Z_g 的关系。潜在植被覆盖度为潜在萌发区域面积 A_0 与常水位下的湖面面积 A_c 的比值,即

$$C_0 = \frac{A_0}{A_c} \times 100\% \tag{3}$$

d. 重复步骤 b 与式(3)计算步骤,计算任意萌发期水位下的潜在植被覆盖度。将 Z_g 从 $Z_{\min}$ 赋值到 $Z_{\max}$,以 0.2 m 为增量,其中 $Z_{\min}$ 为湖泊最低生态水位, $Z_{\max}$ 为一年中日水位的最高值。得出潜在植被覆盖度与萌发期水位之间的关系式:

$$C_0 = f(Z_g) \tag{4}$$

e. 建立植被覆盖度 C 与萌发期水位 Z_g 的关系,并计算给定目标覆盖度下的萌发期水位,再得到其余时期的生态水位。由于该方法主要考虑水位、水深和透明度对植物生长的影响,因此湖泊实际覆盖度与潜在覆盖度之间存在数量关系。将湖泊实际萌发期水位代入 $C_0=f(Z_g)$ 可得该水位下的潜在植被覆盖度,结合潜在植被覆盖度与实际植被覆盖度的数量关系,可得

$$C = f(Z_g) \tag{5}$$

根据式(5)计算出给定目标覆盖度下的萌发期水位,再由湖泊水生植物的生长需求来调节其余生长期水位。

3 结果与分析

3.1 水生植物种类

根据实地调查结果,玄武湖共有水生植物 48 种,其中挺水植物 10 种,浮叶植物 5 种,沉水植物 6 种,湿生植物 27 种,水生植物总覆盖度为 13.2%。其中应用频度和覆盖度高的水生植物主要包括挺水植物荷花、空心莲子草和芦苇,湿生植物早熟禾和马蹄金,浮叶植物浮萍和睡莲,沉水植物苦草和菹草等。挺水植物的优势种为荷花、空心莲子草和芦苇等,其中荷花分布最广,出现的频率最高;浮叶植物优势种为睡莲和浮萍;湿生植物优势种为早熟禾和马蹄金;沉水植物优势种为苦草和菹草。玄武湖的挺水植物覆盖度最大,其次是湿生和浮叶植物,均主要分布在湖滨岸边;湿生植物种类较多,但多零散分布;沉水植物分布范围稍广,不仅分布于湖滨岸边,近湖心区域也有分布,但覆盖度最小,仅为 2.1%,轮叶黑藻和轮叶狐尾藻分布较少。玄武湖大量的荷花和睡莲覆盖了水面,减少了水下光照,阻碍了该区域沉水植物的生长,是沉水植物分布不多的原因之一。

与历史资料相比,玄武湖水生植物多样性增加,但植被覆盖面积变化不大;沉水植物种类增多但覆盖度依然较低^[19]。总而言之,其水生植物种类较为丰富,但覆盖度不高,沉水植物应用不广泛,应增加净化能力强的植物(如沉水植物),减少蔓延严重的植物(如荷花),以构建适宜的水生植物群落。

3.2 湖泊最低生态水位

根据玄武湖湖泊水位和湖面面积资料,绘制湖面面积与水位关系曲线(图 2(a)),推导出湖面面积变

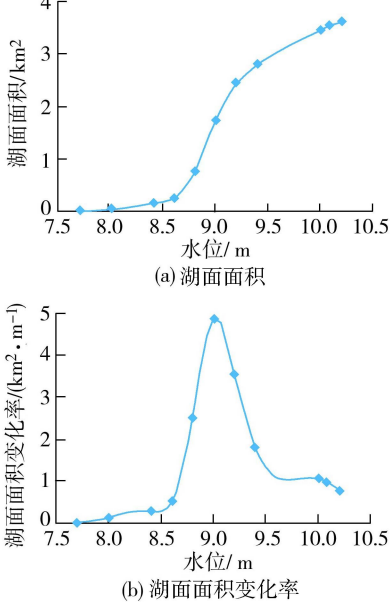


图2 玄武湖湖面面积、湖面面积变化率与水位变化的关系曲线

化率与水位对应的关系曲线(图2(b))。湖面面积变化率在水位为9.0 m时达到最大值。因此,根据湖泊形态分析法计算的玄武湖最低生态水位为9.0 m。

根据《水电水利建设项目河道生态用水、低温水和过鱼设施环境影响评价技术指南(试行)》函规定,鱼类生境参数中最大水深的最低标准为鱼类体长的2~3倍。玄武湖的鱼类中鳊鱼和鲢鱼占80%~90%,鲢鱼体长一般约60 cm,鳊鱼体长一般为30~40 cm,鱼类所需的最小水深为1.2 m。根据水下地形资料,玄武湖湖底平均高程为8.4 m。因此,根据生物空间最小需求法求得的玄武湖最低生态水位为9.6 m。

湖泊形态分析法与生物空间最小需求法求得的最低生态水位分别为9.0 m与9.6 m。湖泊形态分析法基本思想是要使湖泊生态系统不出现严重退化,必须使湖泊水文和地形子系统不严重退化,该方法考虑了湖泊的最基本组成部分,但是没有和实际生态指标建立联系;而生物空间最小需求法根据湖泊中多种生物对水位的要求,最后选取各项指标最大值即鱼类作为最低生态水位指标,考虑了湖泊生物多样性的保护,兼顾了湖泊的生态和经济生产多方面的效益,且将玄武湖多年平均最低水位9.8 m作为参考值,综合考虑选取生物空间最小需求法的计算结果作为最低生态水位,即9.6 m。

3.3 各生长期适宜生态水位

水生植物水位需求法中湖泊水生植被保护与修复的目标取决于湖泊管理的目标^[8]。在对玄武湖植物群落人工恢复的研究中,建立恢复区时,挺水植物、湿生植物、沉水植物面积之比为15:2:6^[18],沉水植物占比不低;玄武湖空心莲子草和大量的荷花遮盖水面,影响了沉水植物的生长^[19],如今沉水植物面积仅为水生植物的16%;且长江中下游大多数湖泊沉水植物覆盖度和生物量均较高,挺水植物覆盖度和生物量较低^[27],与玄武湖的情况恰恰相反,说明玄武湖沉水植物面积占比太小,应改善群落结构。沉水植物因能净化水质、保持水体美观及改善景观生态环境,是当前湖泊水体磷修复的主推植物品种^[28]。苦草是玄武湖沉水植物优势种,且苦草具有多种优良品质:对水体物理环境的改善作用显著,如改变水中溶解氧等水体参数;能吸收水体中的营养盐,抑制底质沉积物中营养盐的释放,减少其循环;对藻类有抑制作用,能抑制藻类的生长;生存适应性强,在轻度、中度、重度富营养化水体中均有较好的生存能力^[29]。因此,综合考虑玄武湖水生植物群落结构与水体富营养化的情况,将苦草作为水生植物修复的目标植物。

3.3.1 生长期的划分

《中国植物志》^[30]中记载苦草一般在每年的春季(3—5月)萌发,大多数水生植物在2—3月萌发,幼苗在4—5月生长,综合苦草与其他水生植物的生长习性,将2—3月划分为萌发期,4—5月划分为幼苗生长期,其他生长期分别为生长扩散期(6—7月)、成熟期(8—9月)、种子扩散期(10—11月)和休眠期(12月至次年1月)。

3.3.2 萌发期水位

2021年玄武湖2—3月平均透明度约为0.5 m,常水位 Z_c 约为10.08 m。水生植物水位需求法中,挺水植物与湿生植物萌发期水位分布范围应为从 $Z_g-0.2$ m至 Z_c 。实地调查发现,玄武湖中挺水植物与湿生植物近湖滨岸边分布,湖心一般建设水上游玩设施或游船规划区,不栽种挺水植物与浮叶植物,挺水植物与湿生植物分布的最低水位高程为9.4 m,而沉水植物分布的水位高程则并不受限制。根据玄武湖水生植物分布特点与透明度等资料,挺水植物与湿生植物萌发期水位分布范围应为从 $\max(Z_g-0.2, 9.4)$ m至 Z_c ,沉水植物萌发期水位分布范围应为从 $Z_g-0.8$ m至 Z_g 。

由最低生态水位计算结果可得,萌发期水位最小值为9.6 m,即 $Z_{\min}$ 为9.6 m;同时玄武湖日水位一般不超过10.4 m,因此 $Z_{\max}$ 为10.4 m。当 Z_g 为9.6 m时,沉水植物、挺水植物的萌发区域的水位分别为8.8~9.6 m、9.4~10.08 m。由式(4)计算得出湖泊的潜在植被覆盖度 C_0 为78.37%,即萌发期水位为9.6 m时,湖泊的潜在覆盖度可达78.37%。重复上述计算步骤,将 Z_g 赋值为9.6 m、9.8 m、…、10.8 m,每次计算增加0.2 m,算出各萌发期水位对应的潜在植被覆盖度,如图3所示。可见随着萌发期水位的升高,潜在植被覆盖度逐渐降低,水生植物潜在覆盖度与萌发期水位呈显著负相关关系。采用多项式拟合方法建立了任意萌发期水位下的湖泊潜在植被覆盖度预测模型:

$$C_0 = (57.748Z_g^2 - 1236.8Z_g + 6626.9) \times 100\% \quad (9.6 \text{ m} \leq Z_g \leq 10.4 \text{ m}) \quad (6)$$

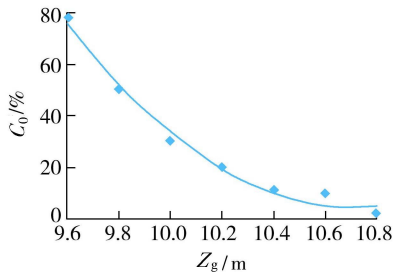


图3 玄武湖水生植物潜在覆盖度与萌发期水位的关系曲线

由于营养物质、种子库和基质类型等其他因素也可能限制水生植物的分布,因此预测的覆盖度将大于实际观测值。2021 年 2—3 月玄武湖月平均水位约为 10.2 m,代入式(6)可得植被潜在覆盖度约为 19.64%,而实际玄武湖总覆盖度为 13.2%,约为模型预测值的 67.2%。2020 年玄武湖萌发期水位约为 10.2 m,植被覆盖度约为 13.4%,约为模型预测值的 68.2%。可假设营养物质、种子库和基质类型等其他因素限制下,玄武湖植被覆盖度约为萌发期水位下的潜在覆盖度的 70%,即水生植物覆盖度公式为

$$C = (57.748Z_g^2 - 1236.8Z_g + 6626.9) \times 70\% \quad (9.6\text{ m} \leq Z_g \leq 10.4\text{ m}) \quad (7)$$

1998 年玄武湖进行生态治理,计划沉水植物区覆盖度为 30%,从而使鱼类和沉水植物达到动态平衡^[31],因此水生植被覆盖度目标设定为 30%,由式(7)可得,此时萌发期水位应为 9.89 m。但由于该水位在湖泊实际水位调控过程中难以控制,因此给 30% 目标植被覆盖度设置 1% 的误差区间,即为 29%~31%,得出萌发期生态水位范围为 9.88~9.91 m,选择 9.9 m 作为玄武湖萌发期实际生态水位,而玄武湖最低生态水位确定为 9.6 m,萌发期水位为 9.9 m,高于最低生态水位,符合要求。

3.3.3 各生长期水位

2—3 月为萌发期,在 30% 植被覆盖度目标下,萌发期水位应保持在 9.9 m。4—5 月为幼苗生长期,苦草作为生态修复的目标植物,该阶段水深一般保持在 0.3 m 以内^[32],其他水生植物处于幼苗生长期,对水分和空间的生长需求逐渐增大,在这段时间内宜逐渐提高水位,因此 4—5 月水位宜逐渐上升,水位范围为 9.9~10.2 m。6—7 月为生长扩散期,8—9 月为成熟期,而玄武湖 6—9 月要求水位不超过汛限水位 9.8 m,且适当低水位能控制荷花、空心莲子草和睡莲的疯长,有利于其他水生植物尤其是沉水植物的生长,因此 6—9 月水位为 9.8 m。10—11 月为种子扩散期,适当的高水位会促使种子随水流飘荡,有利于种子的传播,但水位变化幅度不宜过大,可选为每月增加 0.2 m,即 10 月水位为 10.0 m,11 月水位为 10.2 m;休眠期为 12 月至次年 1 月,保持较低水位可给种子提供充足的光照条件,促进植物种子和繁殖体的萌发^[33],且根据大多数湖泊自然水位波动规律,该阶段水位宜保持较低水位,可与萌发期保持一致,即 12 月至次年 1 月水位为 9.9 m。

Zhang 等^[4]研究发现,在植物萌发期保持较高水位的水位波动方式会妨碍植物萌发,不利于沉水植物的生长。2021 年月平均水位与规划的每月生态水位调控方案(图 4)对比可知,玄武湖水生植物

对水位的需求主要体现在萌发期应保持较低的水位,以促进种子的萌发。

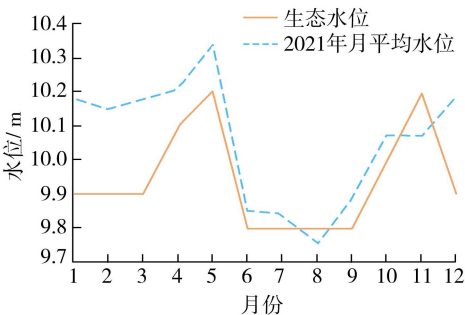


图 4 30% 植被覆盖度目标下的每月生态水位

4 结 论

a. 玄武湖挺水植物和浮叶植物种类丰富,但总体覆盖度不高,沉水植物覆盖度和应用频度皆较低。应增加净化能力强的沉水植物,减少荷花、空心莲子草和睡莲等蔓延严重的植物。

b. 湖泊形态分析法计算得出的玄武湖最低生态水位为 9.0 m,生物空间最小需求法计算结果为 9.6 m,综合两种计算方法,最低生态水位为 9.6 m。

c. 基于确定的最低生态水位,根据水生植物水需求法,确定了玄武湖植被覆盖度与萌发期水位的关系式,水生植物的覆盖度与萌发期水位呈显著负相关关系。为实现 30% 的水生植被覆盖度目标,萌发期水位宜为 9.9 m,以促进沉水植物萌发;幼苗生长期缓慢升高水位,以满足苦草萌发及其他水生植物生长需求;生长扩散期与成熟期保持汛限水位 9.8 m,确保湖泊防洪防汛安全,控制荷花、空心莲子草和睡莲的疯长;种子扩散期保持适当高水位,以促进种子的播散;休眠期保持较低水位 9.9 m。

参考文献:

[1] 徐紫萱,周长芳,潘璠,等.城市湖泊富营养化对水生植物叶片 C、N、P 化学计量特征的影响[J].长江流域资源与环境,2020,29(6):1322-1332. (XU Zixuan, ZHOU Changfang, PAN Fan, et al. Influences of urban lakes eutrophication on the C, N and P stoichiometric characteristics in leaves of aquatic macrophytes [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2020, 29(6):1322-1332. (in Chinese))

[2] BORNETTE G, PUIJALON S. Response of aquatic plants to abiotic factors: a review [J]. Aquatic Sciences, 2011, 73(1):1-14.

[3] FERREIRA T F, CROSSETTI L O, MARQUES D M L M, et al. The structuring role of submerged macrophytes in a large subtropical shallow lake: clear effects on water chemistry and phytoplankton structure community along a vegetated-pelagic gradient [J]. Limnologia, 2018, 69:

- [4] ZHANG Xiaoke, ZHANG Junwang, LI Zhifei, et al. Optimal submerged macrophyte coverage for improving water quality in a temperate lake in China[J]. Ecological Engineering, 2021, 162: 106177.
- [5] LEIRA M, CANTONATI M. Effects of water-level fluctuations on lakes; an annotated bibliography [J]. Hydrobiologia, 2008, 613(1): 171-184.
- [6] CASANOVA M T, BROCK M A. How do depth, duration and frequency of flooding influence the establishment of wetland plant communities? [J]. Plant Ecology, 2000, 147(2): 237-250.
- [7] WANG Hongzhu, WANG Haijun, LIANG Xiaomin, et al. Empirical modelling of submersed macrophytes in Yangtze lakes [J]. Ecological Modelling, 2005, 188 (2/3/4): 483-491.
- [8] LIU Xueqin, YANG Zhendong, YUAN Saibo, et al. A novel methodology for the assessment of water level requirements in shallow lakes[J]. Ecological Engineering, 2017, 102: 31-38.
- [9] 王磊, 胡效卿, 张卓伦, 等. 不同水深和基质下苦草 (*Vallisneria natans*) 的生理生态适应策略[J]. 生态学杂志, 2021, 40 (8): 2421-2430. (WANG Lei, HU Xiaoqing, ZHANG Zhuolun, et al. Physiological and ecological adaptation strategies of *Vallisneria natans* to different water depths and sediments[J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(8): 2421-2430. (in Chinese))
- [10] DAI Lingquan, MAO Jingqiao, WANG Yu, et al. Optimal operation of the Three Gorges Reservoir subject to the ecological water level of Dongting Lake[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(14): 1111.
- [11] 李新虎, 宋郁东, 李岳坦, 等. 湖泊最低生态水位计算方法研究[J]. 干旱区地理, 2007, 30 (4): 526-530. (LI Xinhui, SONG Yudong, LI Yuetan, et al. Calculation methods of lowest ecological water level of lake[J]. Arid Land Geography, 2007, 30(4): 526-530. (in Chinese))
- [12] YE Zhaoxia, LI Weihong, CHEN Yaning, et al. Investigation of the safety threshold of eco-environmental water demands for the Bosten Lake wetlands, western China[J]. Quaternary International, 2017, 440: 130-136.
- [13] 徐志侠, 陈敏建, 董增川. 湖泊最低生态水位计算方法[J]. 生态学报, 2004, 24 (10): 2324-2328. (XU Zhixia, CHEN Minjian, DONG Zengchuan. Researches on the calculation methods of the lowest ecological water level of lake[J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24 (10): 2324-2328. (in Chinese))
- [14] 凌瑜楠, 刘英, 彭佳宾, 等. 博斯腾小湖最低生态水位与水量盈缺分析[J]. 环境工程, 2020, 38 (10): 26-32. (LING Yunan, LIU Ying, PENG Jiabin, et al. Analysis of minimum ecological water level and water surplus in Xiaohu lake district in Bosten Lake [J]. Environmental Engineering, 2020, 38(10): 26-32. (in Chinese))
- [15] 周蕾. 艾丁湖最低生态水位分析研究[J]. 四川水利, 2021, 42 (1): 95-98. (ZHOU Lei. Analytical research of the lowest ecological water level of Aiding Lake [J]. Sichuan Water Resources, 2021, 42 (1): 95-98. (in Chinese))
- [16] 顾世祥, 陈欣, 苏建广, 等. 基于水生态修复的滇池运行水位确定[J]. 水利水电科技进展, 2014, 34 (2): 40-45. (GU Shixiang, CHEN Xin, SU Jianguang, et al. Determination of water level of Dianchi Lake based on aquatic ecological rehabilitation[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2014, 34(2): 40-45. (in Chinese))
- [17] ZHENG Lilin, ZHAN Pengfei, XU Jinying, et al. Aquatic vegetation dynamics in two pit lakes related to interannual water level fluctuation[J]. Hydrological Processes, 2020, 34(11): 2645-2659.
- [18] 鞠澍. 玄武湖湿地生态系统植物群落人工恢复研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2003.
- [19] 俞欣, 金哲, 朱亮, 等. 玄武湖水生植物调查及影响因素[J]. 安徽农业科学, 2020, 48 (24): 81-86. (YU Xin, JIN Zhe, ZHU Liang, et al. Aquatic plants investigation of Xuanwu Lake and its influence factors [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2020, 48 (24): 81-86. (in Chinese))
- [20] 李静会, 高伟, 张衡, 等. 除藻剂应急治理玄武湖蓝藻水华实验研究[J]. 环境污染与防治, 2007, 29 (1): 60-62. (LI Jinghui, GAO Wei, ZHANG Heng, et al. Emergency control of blue algal bloom by algaecide: experimental study in Xuanwu Lake [J]. Environmental Pollution & Control, 2007, 29(1): 60-62. (in Chinese))
- [21] 逢敏, 宋为威, 钱程. 引调水改善玄武湖水质的水量优化方法[J]. 水资源保护, 2021, 37 (4): 133-139. (PANG Min, SONG Weiwei, QIAN Cheng. Water quantity optimization method for improving water quality of Xuanwu Lake by water diversion[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(4): 133-139. (in Chinese))
- [22] 王国宏, 方精云, 郭柯, 等. 《中国植被志》研编内容与规范[J]. 植物生态学报, 2020, 44 (2): 128-178. (WANG Guohong, FANG Jingyun, GUO Ke, et al. Contents and protocols for the classification and description of Vegetation Formations, Alliances and Associations of vegetation of China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2020, 44(2): 128-178. (in Chinese))
- [23] 陈元君. 北京市野鸭湖自然保护区湿地维管束植物多样性及其保护研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2008.
- [24] 周建中, 刘志明, 娄思静, 等. 一种湖泊分级分期旱限水位确定与动态控制方法[J]. 水利学报, 2022, 53 (2): 127-138. (ZHOU Jianzhong, LIU Zhiming, LOU Sijing, et al. A method for determining and dynamic controlling the limit water level of lakes by classification and stages[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53 (2): 127-138. (in Chinese))

(下转第 76 页)

程科学学报,2014,22(5):877-886. (YANG Zhonghua, BAI Fengpeng, HU Zhaoyang. PIV experiments of flow around the tetrahedron frame under two different arrangements [J]. Journal of Basic Science and Engineering,2014,22(5):877-886. (in Chinese))

[22] 张婧,王东,何岸霞,等. 不同绕流结构对河道水流的影响 [J]. 水利水电科技进展,2018,38(6):26-31. (ZHANG Jing, WANG Dong, HE Anxia, et al. Influence of different structures on channel flows [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018, 38 (6):26-31. (in Chinese))

[23] 吕升奇,唐洪武,闫静. 有无植物条件下明渠水流紊动特性对比 [J]. 水利水电科技进展,2007,27(6):64-68. (LYU Shengqi, TANG Hongwu, YAN Jing. Comparison of turbulence characteristics of water flow in open channels with and without vegetations [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2007, 27 (6):64-68. (in Chinese))

[24] 张少济,杨敏. 消力塘透水底板脉动压力特性试验研究 [J]. 水力发电学报,2010,29(6):85-89. (ZHANG Shaoji, YANG Min. Experimental study on characteristics of pressure fluctuations on the pervious bottom slab of a plunge pool [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29 (6):85-89. (in Chinese))

[25] 胡杰龙. 新型透水丁坝水力特性及其对鱼类行为影响研究 [D]. 重庆:重庆交通大学,2021.

[26] 张凯,董志勇,赵文倩,等. 三角孔多孔板下游空化流场的 PIV 剖析 [J]. 水力发电学报,2017,36(10):56-64. (ZHANG Kai, DONG Zhiyong, ZHAO Wenqian, et al. PIV analysis of cavitating water flows behind triangular multi-orifice plates [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2017, 36 (10):56-64. (in Chinese))

[27] 文华东,王彬,段文杰,等. 基于单相流模型的水下多孔板减流特性影响因素数值仿真研究 [J]. 武汉理工大学学报 (交通科学与工程版), 2023, 47 (1): 121-125. (WEN Huadong, WANG Bin, DUAN Wenjie, et al. Numerical simulation research on influencing factors of underwater multi-orifice plate flow reduction characteristics based on single-phase flow model [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2023, 47 (1): 121-125. (in Chinese))

[28] 周珏西,张婧,何岸霞. 堆积体对近床面水流紊动强度试验研究 [J]. 水力发电学报,2018,37(4):49-59. (ZHOU Juexi, ZHANG Jing, HE Anxia. Experimental study on turbulent intensity of near-bed flows in rivers affected by deposit [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2018, 37 (4):49-59. (in Chinese))

[29] 唐彬欣. 开孔促淤板水流特性研究 [D]. 长沙:长沙理工大学,2021.

(收稿日期:2022-06-04 编辑:熊水斌)

(上接第 54 页)

[25] 李波. 水库生态需水计算方法对比浅析 [J]. 治淮, 2021 (1): 14-16. (LI Bo. Comparison of calculation methods for reservoir ecological water demand [J]. Governing Huai River, 2021 (1): 14-16. (in Chinese))

[26] 曹昀. 江滩湿地植物恢复的影响因子与技术研究 [D]. 南京:南京师范大学,2007.

[27] 袁赛波,张晓可,刘学勤,等. 长江中下游湖泊水生植被的生态水位管理策略 [J]. 水生生物学报,2019,43(增刊1):104-109. (YUAN Saibo, ZHANG Xiaoke, LIU Xueqin, et al. Ecological water level management strategy for aquatic vegetation in the mid-lower Yangtze shallow lakes [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2019 (Sup1): 104-109. (in Chinese))

[28] 周楠楠,王赢,高顺峰,等. 两种不同根系特征沉水植物对沉积物剖面不同形态磷的影响 [J]. 环境科学学报, 2021, 41 (6): 2222-2228. (ZHOU Nannan, WANG Ying, GAO Shunfeng, et al. Effects of two submerged macrophytes with different root systems on different fractions of phosphorus in sediment profiles [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, 41 (6): 2222-2228. (in Chinese))

[29] 张嵘梅,马博馨,杨志杰,等. 沉水植物苦草属在水体环境修复中的研究进展和应用现状 [J]. 中国农学通报, 2016, 32 (28): 144-154. (ZHANG Rongmei, MA Boxin, YANG Zhijie, et al. Research advances and application situation of vallisneria in water environmental restoration [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016, 32 (28): 144-154. (in Chinese))

[30] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志:第 8 卷 [M]. 北京:科学出版社,1992:177-179.

[31] 苏守德. 南京玄武湖生态治理工程全面开工 [J]. 湖泊科学, 1998, 10 (1): 96. (SU Shoude. Comprehensive construction of Nanjing Xuanwu Lake ecological control project [J]. Journal of Lake Sciences, 1998, 10 (1): 96. (in Chinese))

[32] 王瑞,何亮,张萌,等. 中国苦草属 (*Vallisneria*) 植物萌发与生长的影响因素 [J]. 湖泊科学, 2021, 33 (5): 1315-1333. (WANG Rui, HE Liang, ZHANG Meng, et al. Factors on seed germination, tuber sprout and plant growth of *Vallisneria* species in China [J]. Journal of Lake Sciences, 2021, 33 (5): 1315-1333. (in Chinese))

[33] 陈昌才. 巢湖水生植物对生态水位的需求研究 [J]. 中国农村水利水电, 2013 (2): 4-7. (CHEN Changcai. A study of ecological water level requirement of Chaohu aquatic plant [J]. China Rural Water and Hydropower, 2013 (2): 4-7. (in Chinese))

(收稿日期:2022-06-27 编辑:俞云利)