

DOI: 10.11913/PSJ. 2095-0837. 22313

吴航, 韩惠莹, 支永威, 邓兆林, 周靖喆, 李伟, 袁龙义, 操瑜. 基于开放性围栏研究洪湖退垸还湖区沉水植物生长限制因子[J]. 植物科学学报, 2023, 41(5): 583~593

Wu H, Han HY, Zhi YW, Deng ZL, Zhou JZ, Li W, Yuan LY, Cao Y. Enclosure study on the limiting factors of submerged macrophyte growth in restored sites of Honghu Lake [J]. *Plant Science Journal*, 2023, 41(5): 583~593

基于开放性围栏研究洪湖退垸还湖区沉水植物生长限制因子

吴航^{1,2}, 韩惠莹^{1,2}, 支永威^{2,3}, 邓兆林⁴, 周靖喆^{2,3},
李伟^{2,3}, 袁龙义^{1*}, 操瑜^{2,3*}

(1. 长江大学园艺园林学院, 湖北荆州 434025; 2. 中国科学院武汉植物园水生植物研究中心, 武汉 430074; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 湖北洪湖湿地自然保护区管理局, 湖北洪湖 433299)

摘要: 为探讨不同退垸还湖区的环境因子对沉水植物恢复的影响, 本研究在两种不同类型的退垸还湖区(阳柴湖和八卦洲)内分别建立开放性围栏, 选取3种不同生长型(共9种)沉水植物为实验对象, 基于不同围栏、围栏内外及不同生长时间(7、30 d)的生长指标差异来评估限制不同沉水植物生长的环境因子并排序。结果显示, 保留部分功能的单退垸区域风浪干扰较小, 比完全去除圩垸的双退垸区域更适合沉水植物的生长。密刺苦草(*Vallisneria denseserrulata* Makino)是适合洪湖退垸还湖区沉水植物群落恢复的先锋物种。部分植物如黑藻(*Hydrilla verticillata* Royle)在围栏内外生长指标的显著差异也表明草(杂)食性鱼类的潜在影响。研究结果表明, 退垸还湖工程应在去养殖功能化后保留现有围堤, 这样更有利于沉水植被的恢复, 此外, 构建保护性围栏有助于沉水植物的迅速建群。

关键词: 生态修复; 沉水植物; 洪湖; 浅水湖泊; 开放性围栏

中图分类号: Q948

文献标识码: A

文章编号: 2095-0837(2023)05-0583-11

Enclosure study on the limiting factors of submerged macrophyte growth in restored sites of Honghu Lake

Wu Hang^{1,2}, Han Hui-Ying^{1,2}, Zhi Yong-Wei^{2,3}, Deng Zhao-Lin⁴, Zhou Jing-Zhe^{2,3},
Li Wei^{2,3}, Yuan Long-Yi^{1*}, Cao Yu^{2,3*}

(1. College of Horticulture and Gardening, Yangtze University, Jingzhou, Hubei 434025, China; 2. Research Center of Aquatic Plant, Wuhan Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430074, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Hubei Honghu Wetland Nature Reserve Administration Bureau, Honghu, Hubei 433299, China)

Abstract: To explore the effects of different environmental factors on the recovery of submerged macrophytes, two enclosures were established in two different types of restored sites (Yangchajihu and Baguazhou) to investigate the roles of influencing factors, e.g., types of restoration method, inner and outside enclosures, length of growing period (7 d and 30 d), and macrophyte species, on macrophyte growth. Results showed that restored sites retaining a partial bank from the former fishery enclosure, exhibiting an advantage of reduced wind, were more conducive to macrophyte community restoration than restored sites with total bank removal. Macrophyte species was also an important factor affecting macrophyte growth. Among the nine selected

收稿日期: 2023-03-08, 修回日期: 2023-07-24。

基金项目: 洪湖保护区水环境综合治理项目原养殖水体水生植被恢复研究示范项目; 武汉市科技局知识创新专项-基础研究项目。

This work was supported by grants from the Research and Demonstration of Aquatic Vegetation Restoration of Original Aquaculture Water Bodies of Restored Sites of Comprehensive Water Environment Management Project of Honghu Lake, and Knowledge Innovation Program of Wuhan-Basin Research.

作者简介: 吴航(1996-), 男, 硕士研究生, 研究方向为风景园林与生态修复(E-mail: 910215854@qq.com)。

*通讯作者(Authors for correspondence. E-mail: yly35@qq.com; caoyu@wbgcas.cn)。

species, *Vallisneria denseserrulata* emerged as the best pioneer species for Honghu Lake. Certain species (e.g., *Hydrilla verticillata*) showed differences between the interior and exterior of the enclosure, indicating that herbivorous or omnivorous fish were also potentially important for macrophyte growth. In summary, our study indicated that preserving the bank of fishery enclosures after fishery removal can facilitate the recovery of macrophyte communities. In addition, the construction of protective enclosures is critical for rapid establishment of macrophyte communities.

Key words: Ecological restoration; Submerged macrophytes; Honghu Lake; Shallow lakes; Enclosure

自 20 世纪 50 年代起, 长江中下游诸多浅水湖泊内大规模的围网养殖导致了自然湖泊的面积和数量逐步缩减, 使湖泊的生态功能发生了退化^[1], 其中沉水植物受到的影响尤为显著^[2-4]。沉水植物是湖泊生态系统的重要组成部分, 不仅为其他水生生物提供氧气、食物和庇护场所^[5, 6], 还有净化水体、维持湖泊清水稳态的作用^[7, 8]。退化湖泊的修复往往是围绕改善湖泊生态环境和保护生物多样性, 以恢复沉水植物群落、建立清水稳态为目标来展开的^[9, 10]。目前, 浅水湖泊中沉水植被的恢复主要是通过营养体的直接移栽, 但大量案例表明, 在存在原有沉水植物生长限制因子的前提下, 实施湖泊修复工程后的沉水植物难以长期存活^[11, 12]。

在退化湖泊中, 沉水植物的生长会受到非生物因素(光照、水质及风浪等)和生物因素(水生动物和藻类等)的制约。如, 在富营养化条件下, 水体中浮游和附着藻类的过量生长以及蓝藻水华释放的藻毒素可以抑制沉水植物的生长^[13, 14], 同时, 过高的铵态氮浓度也会对一些沉水植物产生生理胁迫并影响其生长^[15]; 草食性或杂食性水生动物的摄食会直接影响沉水植物的生长并造成其衰亡^[16]; 风浪搅动会导致底泥再悬浮, 引起的遮荫会显著减少沉水植物所获得的光照, 导致其生长受到限制^[17-22]。不同生长型沉水植物对环境的响应也有较大差异, 如莲座型植物苦草 (*Vallisneria natans* (Lour.) Hara) 相比其他物种更耐水下弱光条件, 黑藻 (*Hydrilla verticillata* (L. f.) Royle) 可以通过快速增加节间长度以适应水位的骤然上升^[23, 24]。自然湖泊中沉水植物的生长往往受多个因子的共同影响, 且难以区分。

洪湖是江汉平原上最大的浅水湖泊, 具有调蓄、航运、灌溉等多种功能^[25, 26]。但近几十年洪湖的水环境状况发生了较大的变化, 从草型清水湖

泊逐渐转入浊水稳态, 湖心区的沉水植物逐步消亡^[27, 28]。近年来在洪湖全面启动了“退垸还湖(还湿)工程”, 以期恢复沉水植物群落和生态系统健康。当前, 洪湖退垸还湖区域分单退垸和双退垸两种类型, 前者是指部分保留圩垸, 后者是指围埂全部拆除, 埤垸全部去功能化^[29-32]。洪湖实施退垸还湖后, 仍未见大面积的沉水植物自然恢复。当前还不清楚该区域的沉水植物生长限制因子, 洪湖的单退垸和双退垸区虽然水系相通, 但生境差异较大, 限制因子可能有所不同。明确沉水植物生长的限制因子对目前退垸还湖区沉水植物群落的恢复至关重要。

本研究分别在单退垸和双退垸的典型区域构建原位围栏体系, 通过比较两个围栏之间和围栏内外沉水植物的生长情况, 识别洪湖退垸还湖区限制沉水植物生长的重要因素, 研究结果旨在为后期退垸还湖工程的实施及沉水植被的恢复提供科学的解决方案。

1 材料与方法

1.1 研究区域

洪湖位于湖北省荆州市洪湖市($29^{\circ}39' \sim 30^{\circ}12'N$, $113^{\circ}7' \sim 114^{\circ}05'E$), 水域面积为 3314 km^2 , 属亚热带季风气候, 年均气温 16.6°C , 湖底高程 $22 \sim 22.8 \text{ m}$, 平均水深 1.35 m ^[33, 34]。本研究在阳柴湖(双退垸)和八卦洲(单退垸)退垸还湖区分别设置了 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ 和 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ 的实验围栏。两处退垸还湖区地理位置十分接近, 但退垸形式不同。阳柴湖(A)作为双退垸区, 埤垸已完全移除, 四周空旷, 没有大型水生植物群落, 水域面积宽阔, 风浪吹程较大, 水面的风能随之增大^[35, 36]。八卦洲(B)作为单退垸区, 其外围保留部分堤埂以及较多芦苇 (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.)、莲 (*Nelumbo nucifera*

Gaertn.) 等挺水植物, 因空间受限, 八卦洲围栏面积较小。虽然实验期间未测定风浪的大小, 但多次现场调查时观测到, 与阳柴湖围栏相比, 八

卦洲围栏风浪吹程较短, 受风浪的影响较小。研究区域围栏设计, 内外的水深、透明度见图1、表1。

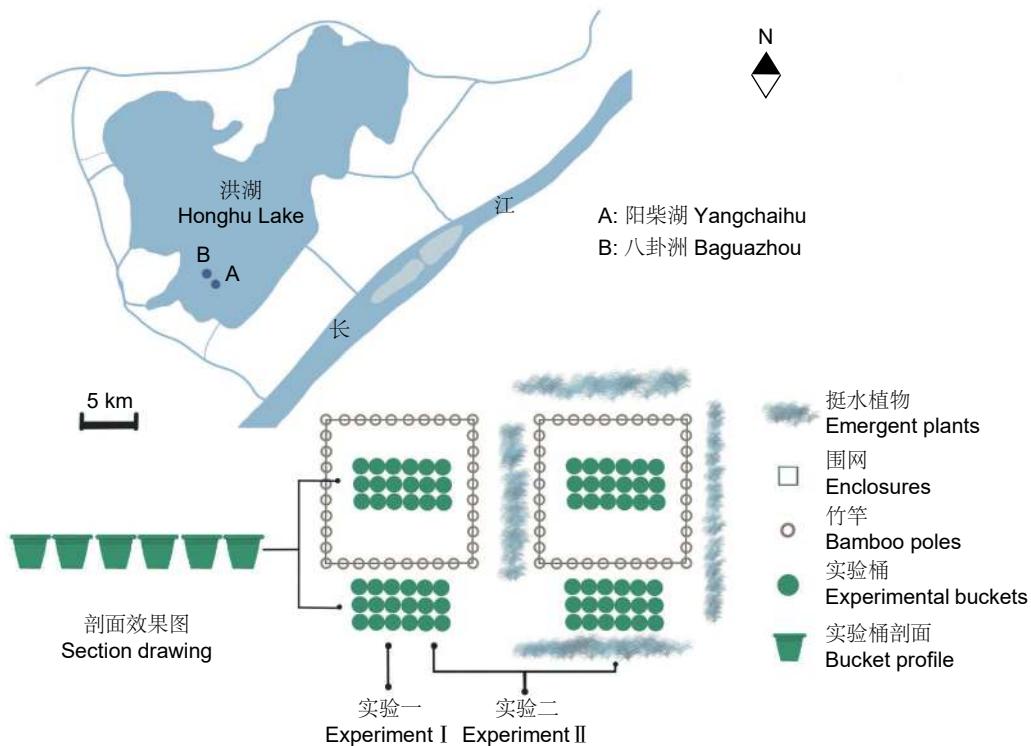


图1 围栏实验设计及位置
Fig. 1 Location and set-up of two enclosures in Honghu Lake

实验一在阳柴湖围栏(A)进行; 实验二分别在阳柴湖(A)、八卦洲(B)围栏进行。

Experiment I was carried out in enclosure of Yangchai Lake (A); Experiments II were carried out in enclosures of Yangchai Lake (A) and Baguazhou (B).

表1 实验一、二洪湖水质环境参数
Table 1 Water quality and environmental parameters of Honghu Lake in Experiments I & II

实验 Experiment	位置 Site	时间 Time / d	透明度 Transparency / cm	水深 Water depth / cm
实验一	阳柴湖	7	20.0 ± 2.0	68.0 ± 4.0
	阳柴湖	30	30.0 ± 2.0	187.0 ± 5.0
	八卦洲	7	29.0 ± 4.0	140.0 ± 10.0
实验二	八卦洲	30	37.0 ± 5.0	196.0 ± 13.5
	阳柴湖	7	26.0 ± 0.5	145.0 ± 5.0
	阳柴湖	30	30.0 ± 0.5	196.0 ± 2.0

1.2 植物材料

本研究共使用9种沉水植物, 分别是眼子菜型的光叶眼子菜(*Potamogeton lucens* L.)、微齿眼子菜(*P. maackianus* A. Bennett)、竹叶眼子菜(*P. wrightii* Morong), 伊乐藻型的伊乐藻(*Eloea nuttallii* Michx.)、黑藻、水蕴草(*Egeria densa* Caspary)和莲座型的密刺苦草(*V.*

denseserrulata Makino)、刺苦草(*V. spinulosa* Yan)、苦草^[37]。材料取自中国科学院武汉植物园水生植物资源圃。选择生长状况良好、平均株高约20 cm的幼苗为实验材料。

1.3 原位围栏控制实验

本研究基于两个实验来探究限制沉水植物生长的环境因子。实验一仅在阳柴湖围栏进行, 分

析圩垸完全移除后影响沉水植物生长的限制因子。实验期间, 将围栏内部的大型水生动物(如底栖鱼类等)转移至围栏外, 以保证围栏内部沉水植物的生长免受底栖鱼类等的干扰。围栏使用的围网材质为尼龙, 孔径为 0.5 cm, 内外水体可以充分交换, 但对大型水生动物具有阻隔作用。在阳柴湖围栏的内部和外部, 以塑料桶垂挂的方式分别种植 9 种植物。幼苗种植于塑料杯(顶部直径 9.0 cm, 底部直径 5.7 cm, 高度 9.6 cm)内, 每杯 1 株, 以从洪湖采集的底泥为底质。每个塑料桶(顶部直径 29.0 cm, 底部直径 19.0 cm, 高度 16.0 cm)内放入 3 个含有相同物种的塑料杯, 该实验共计 36 个塑料桶, 108 个塑料杯, 每处理 3 个重复。处理后的塑料桶挂在围栏上并沉于湖底, 以浮漂作为标记。在第 7 和 30 d 时测量株高、叶数以及生物量。

实验二的目的是对比不同退垸类型区域中影响沉水植物生长限制因子的差异, 实验分别在阳柴湖围栏和八卦洲围栏内外同时进行, 使用密刺苦草、黑藻以及光叶眼子菜等 3 种植物, 两个围栏分别使用 24 个塑料盆, 72 个塑料杯, 每个处理 3 个重复。植物材料的处理及生理指标的测量同实验一。

1.4 数据分析

本研究使用 R 4.0.4 软件对数据进行统计分析。所有数据均进行正态性检验; 对部分数据需进行 log 转化以满足其正态性。使用 *t* 检验(*t-test*)和双因素方差分析(Two-way ANOVA)探究实验一中围栏内外、生长时间和植物种类等因素对沉水植物生长的影响, 以及实验二中不同围栏之间的差异。使用双因素和三因素方差分析研究实验二中不同围栏(即不同退垸类型)、围栏内外、生长时间和植物种类等因素对沉水植物生长的影响, 并运用效应分析对环境因素的效应强度进行排序。效应分析所获参数 Cohen's *f* 值在 0.1 及以下表示弱效应, 0.25 及以上表示中效应, 0.4 及以上表示强效应^[38]。在 ANOVA 分析中, 不同围栏表示八卦洲围栏和阳柴湖围栏之间的比较; 围栏内外指的是围栏内部与外部的比较; 植物种类表示不同生长型的植物物种之间的比较。

2 结果与分析

2.1 实验一阳柴湖围栏内外沉水植物生长指标对比

实验一第 7、30 天时, 阳柴湖围栏内外沉水植物的生物量、株高和叶数如图 2 所示。结果显示, 植物种类和围栏内外差异均显著影响沉水植物的生物量、株高和叶数, 且两种因素有交互作用, 表明不同沉水植物在围栏内部和外部的生长状态存在显著差异(附表 1¹)。

对围栏内外单个物种的生长指标进行分析, 结果发现, 在第 7 天时, 光叶眼子菜、微齿眼子菜和竹叶眼子菜在围栏内部的总生物量(0.14、0.04、0.10 g)均显著高于围栏外部, 围栏外部的竹叶眼子菜在采样时已衰亡(图 2)。围栏内部的水蕴草、微齿眼子菜和竹叶眼子菜的叶数(110、15、2 片/每株)也均显著高于围栏外部。但莲座型植物的总生物量、株高和叶数在围栏内外没有显著差异, 苦草和刺苦草在第 7 天均已死亡, 但密刺苦草得以存活。

在第 30 天时, 除了密刺苦草, 其余植物在围栏内外差异显著。围栏内部的水蕴草、伊乐藻和微齿眼子菜的总生物量、叶数和株高均显著高于围栏外部, 此时围栏外部的微齿眼子菜和伊乐藻均已死亡。同时, 密刺苦草在围栏内的生物量显著高于围栏外部, 株高和叶数在围栏内比围栏外分别高出 45% 和 18%(图 2)。

2.2 实验二围栏内外沉水植物生长指标对比

实验二阳柴湖围栏与八卦洲围栏内外沉水植物的生物量、株高和叶数的三因素方差分析结果见(附表 2²)。第 7、30 天的分析结果均表明, 不同围栏、围栏内外和植物种类的差异均显著影响沉水植物的总生物量。此外, 3 种因素存在复杂的交互作用, 共同影响沉水植物的株高、叶数和生物量。

第 7 天时, 八卦洲围栏内部的黑藻总生物量显著高于阳柴湖围栏内部。光叶眼子菜和黑藻的叶数在两个围栏内部间均存在显著差异, 此时阳柴湖的光叶眼子菜已死亡, 而八卦洲的则存活; 阳柴湖围栏内部的黑藻叶数比八卦洲内部减少约 80%。在第 30 天时, 阳柴湖和八卦洲围栏的光叶

^{1,2}如需查阅附表内容请登录《植物科学学报》网站(<http://www.plantscience.cn>)查看本期文章。

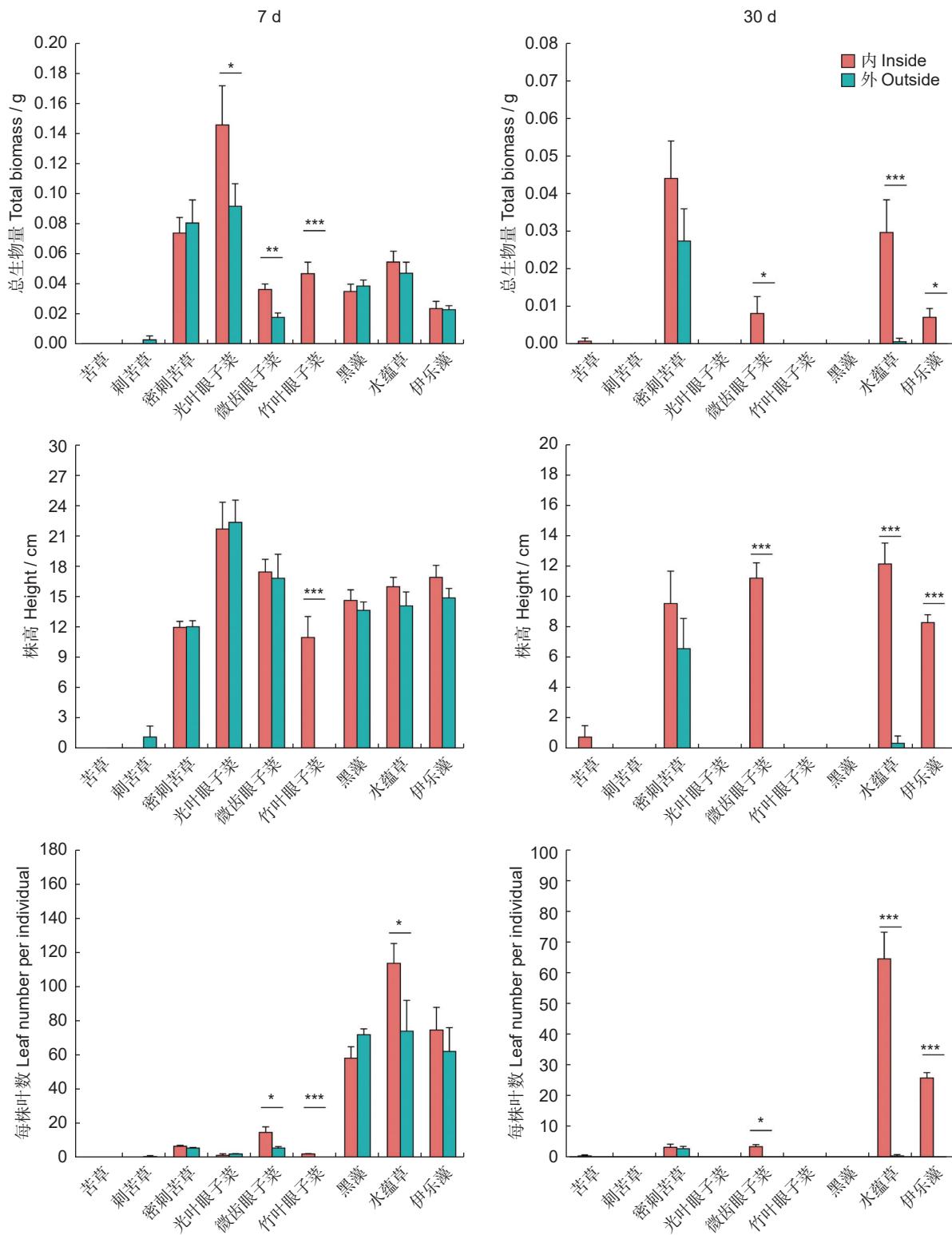


图2 实验一围栏内外不同沉水植物的总生物量、株高和每株叶数

Fig. 2 Total biomass, plant height, and leaf number per individual of different submerged macrophytes in Experiment I
 $* P < 0.05$; $** P < 0.01$; $*** P < 0.001$. Same below.

眼子菜和黑藻以及阳柴湖围栏外部的密刺苦草均已死亡。密刺苦草的总生物量、株高及叶数在两围栏之间均存在显著差异，八卦洲围栏内部的生

物量和株高均比阳柴湖围栏内部高约 75%，但在叶数上，八卦洲内部比阳柴湖内部高约 30%（图3）。

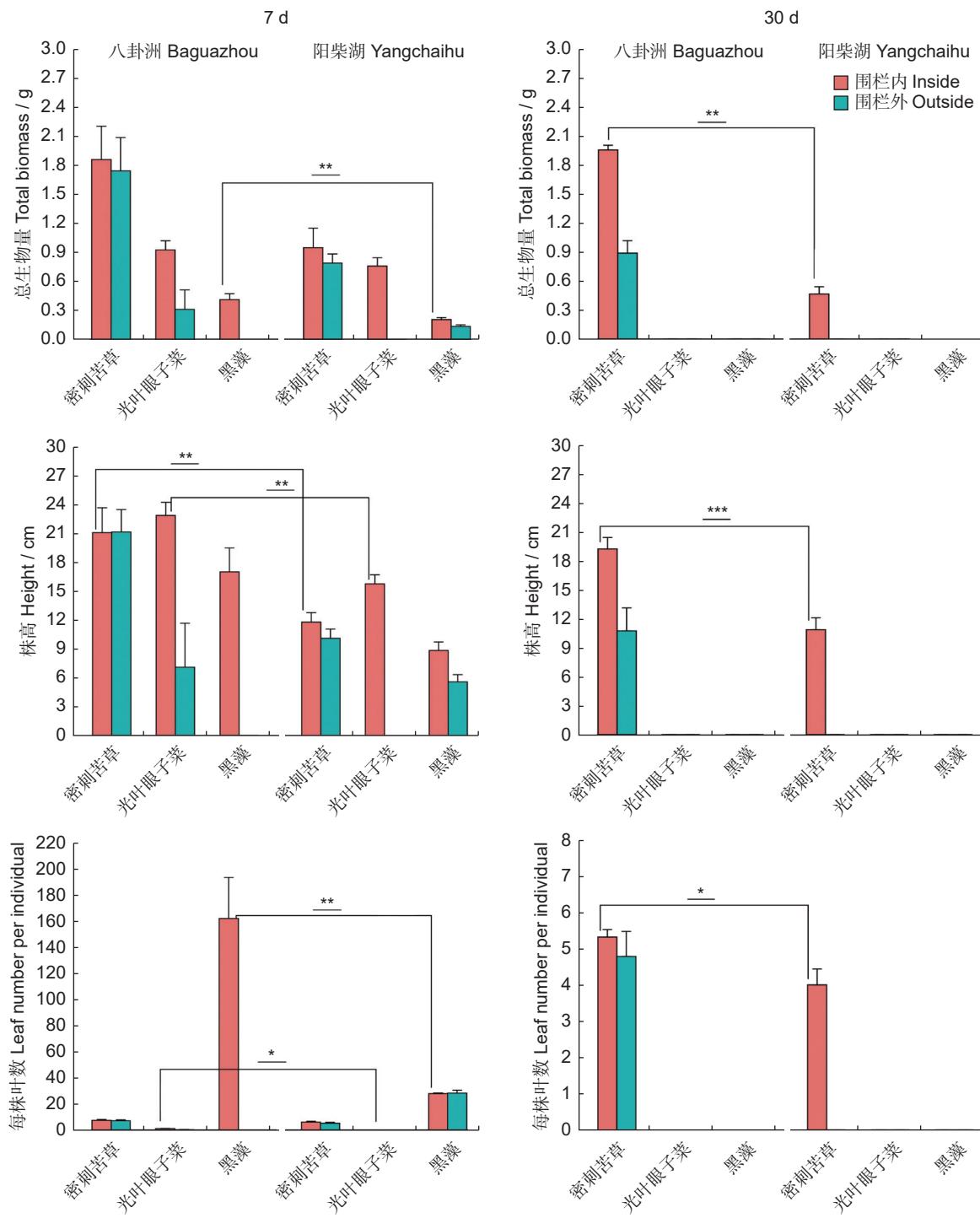


图 3 实验二不同沉水植物的总生物量、株高及每株叶数

Fig. 3 Total biomass, plant height, and leaf number per individual of different submerged macrophytes in Experiment II

2.3 沉水植物生长限制因子的效应强度分析

影响沉水植物生物量的环境因子的效应强度见表 2。实验一中环境因子的强弱程度依次为植物种类、生长时间和围栏内外，植物种类对沉水植物总生物量有较强的影响，其次为生长时间，围栏内外差异的影响较小。因此，在实验一中植物

种类和生长时间是影响植物生长的主要因素。

实验二中在单退垸的八卦洲围栏中，仅植物种类对植物总生物量的影响具有强效应，其他因素均为弱效应。在双退垸的阳柴湖围栏中，3 种限制因子对植物总生物量均有影响，其中围栏内外为中效应，其余为强效应。实验二中，植物种类

表2 两个实验沉水植物总生物量效应强度分析
Table 2 Effect intensity of total biomass of submerged macrophytes in two experiments

实验 Experiment	植物指标 Index	限制因子 Factors	Cohen's <i>f</i>	评价结果 Evaluation results
实验一 阳柴湖	总生物量	围栏内外	0.10	弱效应
		植物种类	0.76	强效应
		生长时间	0.53	强效应
实验二 八卦洲	总生物量	围栏内外	0.23	弱效应
		植物种类	1.33	强效应
		生长时间	0.25	弱效应
实验二 阳柴湖	总生物量	围栏内外	0.34	中效应
		植物种类	0.70	强效应
		生长时间	0.60	强效应

是八卦洲植物生长的主要影响因素；影响阳柴湖植物生长的主要因素是植物种类和生长时间，其次为围栏内外。

3 讨论

本研究在两种形式的退垸还湖区内进行，单退垸区域沉水植物的生长指标显著优于双退垸区，特别是单退垸的八卦洲围栏内植物的生长指标均显著高于双退垸的阳柴湖围栏内部。单退垸区域有部分围埂，可以起削浪的作用，残余围埂上的挺水植物可以顺利建群，并对深水处的沉水植物起天然屏障的保护作用；而双退垸区域四周空旷且水域面积广阔，风浪的吹程较长^[39]。洪湖地处湖北省中南部江汉平原，平均风速可达4 m/s^[40-42]。水体力学研究表明，在风速达到一定阈值（2.5 m/s）时，可以显著改变水柱流速分布，从而加剧底泥的再悬浮。在双退垸区，底泥的再悬浮更加频繁，极易导致沉水植物因底泥覆盖或水柱光衰减带来的遮蔽作用而衰亡^[43, 44]。因此，在洪湖退垸还湖区开展沉水植被修复时，应优先考虑受风浪干扰较小的单退垸区域。

前人研究表明，草（杂）食性鱼类可以通过连根拔起、机械损伤及牧食等直接作用影响沉水植物的生长^[45, 46]，如黑藻等适口性高的沉水植物极易被完全取食而消亡^[47]；底栖鱼类还可以通过对底泥的扰动等间接作用抑制植物的生长^[48-50]，如泥鳅对水体的搅动会引起沉积物的再悬浮，从而抑制沉水植物的生长^[51]。这与本研究实验一中围栏外第7天竹叶眼子菜以及实验二中第7天黑藻和光叶眼子菜的衰亡是一致。洪湖现有草（杂）食性

及底栖鱼类的数量和种类丰富^[52, 53]，随着“十年禁渔”政策的执行，预期还将逐渐增长。因此，在洪湖构建开放性的保护围栏，对退垸还湖区沉水植物多样性的恢复十分必要。另外，本研究还发现密刺苦草在围栏内外均能存活。基于多种沉水植物对比的受控实验结果表明，杂食性鱼类可以抑制其他沉水植物（如黑藻、轮藻、菹草（*P. crispus* L.））的生长，但对密刺苦草的影响不显著，可能是密刺苦草不符合一般草（杂）食性鱼类的取食偏好^[54-56]。因此，在湖泊修复初期，可以选择密刺苦草作为先锋物种，在退垸还湖水位较低处成功建群后，再补植其他沉水植物，以实现高效低成本的沉水植被建群。

本研究基于野外实验设置了植物种类、不同围栏（风浪差异）及围栏内外（鱼类差异）等处理，可以区分相关限制因子的单独效应，但分析结果表明这些因子之间也存在显著的交互作用。类似的，王韶华等^[57]的研究表明后海沉水植物的生长受到诸多因子的共同作用，秦伯强等^[58]报道太湖梅梁湾影响水生植物恢复的因素有风浪干扰、水体富营养化、水下光照、鱼类摄食等多种因素。同时，前人研究发现，随着水位的上升，水下光照强度削弱，在水位和光照的相互作用下，沉水植物的生长和生理指标发生改变^[59, 60]。本实验期间水体的透明度为30 cm左右，水柱真光层约为透明度的2~3倍^[61, 62]，可估算此时真光层范围为60~90 cm。而不同沉水植物的光补偿点存在显著差异，如黑藻比苦草至少要高50%^[63-65]。考虑到实验材料的株高在20 cm之内，在水深超过一定阈值时，围栏内的黑藻会因水下光照低于光补偿点

而死亡，但密刺苦草依然可以存活；而水位较浅时，围栏外的黑藻会因鱼类的取食偏好而比密刺苦草等植物先消亡，显示出物种与环境因子之间复杂的交互作用。因此，在自然湖泊开展沉水植物恢复时，需要厘清影响沉水植物生长的各个复杂因素。

4 结论

基于本研究结果，我们提出在洪湖沉水植物的恢复与后续管理中应注意以下事项：（1）在沉水植物恢复过程中，优先选择单退垸区域，以规避风浪干扰，提高沉水植物的定植成功率。（2）对于退垸还湖工程，应保留一部分拆除围堤的圩垸；对尚未开展拆围的圩垸，在去养殖功能化后，建议保留现有围堤。（3）强化物种选择，在恢复早期选择适应能力强、生长较快的沉水植物单一种植，以实现生物量的尽快累积，改变生境。

参考文献：

- [1] 陈家宽, 李博, 吴千红. 长江流域的生物多样性及其与经济协调发展的对策[J]. *生物多样性*, 1997, 5(3): 217-219.
Chen JK, Li B, Wu QH. Evolutionary principle and conservation strategies of biodiversity[J]. *Biodiversity Science*, 1997, 5 (3): 217-219.
- [2] De Kuijver A, Ning J, Liu Z, Jeppesen E, Gulati RD, Mid-delburg JJ. Macrophytes and periphyton carbon subsidies to bacterioplankton and zooplankton in a shallow eutrophic lake in tropical China[J]. *Limnol Oceanogr*, 2015, 60 (2): 375-385.
- [3] 魏显虎, 杜耘, 蔡述明, 张婷婷, 刘韬. 湖北省湖泊演变及治理对策[J]. *湖泊科学*, 2007, 19(5): 530-536.
Wei XH, Du Y, Cai SM, Zhang TT, Liu T. On the evolution of lakes in Hubei Province and countermeasures[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2007, 19 (5): 530-536.
- [4] 杨桂山, 马荣华, 张路, 姜加虎, 姚书春, 等. 中国湖泊现状及面临的重大问题与保护策略[J]. *湖泊科学*, 2010, 22(6): 799-810.
Yang GS, Ma RH, Zhang L, Jiang JH, Yao SC, et al. Lake status, major problems and protection strategy in China[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2010, 22 (6): 799-810.
- [5] Perrow MR, Jowitt AJD, Stansfield JH, Phillips GL. The practical importance of the interactions between fish, zooplankton and macrophytes in shallow lake restoration[J]. *Hydrobiologia*, 1999, 395-396: 199-210.
- [6] Han YQ, Zou XJ, Li QS, Zhang Y, Li KY. Responses of different submerged macrophytes to the application of Lanthanum-Modified Bentonite (LMB): a mesocosm study[J]. *Water*, 2022, 14 (11): 1783.
- [7] Mooij WM. Ecology of shallow lakes. By Marten Scheffer[J]. *Aquat Ecol*, 1998, 32 (3): 255-256.
- [8] Zhang L, Liu BY, Ge FJ, Liu Q, Zhang YY, et al. Interspecific competition for nutrients between submerged macrophytes (*Vallisneria natans*, *Ceratophyllum demersum*) and filamentous green algae (*Cladophora oligoclona*) in a co-culture system[J]. *Pol J Environ Stud*, 2019, 28 (3): 1483-1494.
- [9] 邱新天, 徐翠, 尹心安, 刘洪蕊, 杨兴盛. 水质水量调控对浅水湖泊草藻转换过程影响分析[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2020, 56(5): 683-692.
Qiu XT, Xu C, Yin XA, Liu HR, Yang XS. Effect of water quality and quantity regulation on regime shift between phytoplankton and macrophyte in shallow lakes[J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2020, 56 (5): 683-692.
- [10] 秦伯强. 近百年来亚洲中部内陆湖泊演变及其原因分析[J]. *湖泊科学*, 1999, 11(1): 11-19.
Qin BQ. A preliminary investigation of lake evolution in 20-century in inland mainland Asia with relation to the global warming[J]. *Journal of Lake Sciences*, 1999, 11 (1): 11-19.
- [11] 李伟. 富营养化湖泊水生植物群落恢复重建的理论与方法[J]. *水生态学杂志*, 2008, 1(1): 8-13.
Li W. Theory and methodology of aquatic plant community restoration in eutrophicated lakes[J]. *Journal of Hydroecology*, 2008, 1 (1): 8-13.
- [12] Li W. Environmental opportunities and constraints in the reproduction and dispersal of aquatic plants[J]. *Aquat Bot*, 2014, 118: 62-70.
- [13] Mooij WM, Janse JH, de Senerpont Domis L, Hülsmann S, Ibelings BW. Predicting the effect of climate change on temperate shallow lakes with the ecosystem model PCLake[J]. *Hydrobiologia*, 2007, 584 (1): 443-454.
- [14] Maredová N, Altman J, Kašťovský J. The effects of macrophytes on the growth of bloom-forming cyanobacteria: systematic review and experiment[J]. *Sci Total Environ*, 2021, 792: 148413.
- [15] Cao T, Xie P, Ni LY, Wu AP, Zhang M, et al. The role of NH_4^+ toxicity in the decline of the submersed macrophyte *Vallisneria natans* in lakes of the Yangtze River basin, China[J]. *Mar Freshwater Res*, 2007, 58 (6): 581-587.
- [16] Bakker ES, Sarneel JM, Gulati RD, Liu ZW, van Donk E. Restoring macrophyte diversity in shallow temperate lakes: biotic versus abiotic constraints[J]. *Hydrobiologia*, 2013, 710 (1): 23-37.
- [17] Sheng YP, Lick W. The transport and resuspension of sedi-

- ments in a shallow lake[J]. *J Geophys Res: Oceans*, 1979, 84 (C4) : 1809–1826.
- [18] Bailey MC, Hamilton DP. Wind induced sediment resuspension: a lake-wide model[J]. *Ecol Model*, 1997, 99 (2-3) : 217–228.
- [19] Fan CX, Zhang L, Qu WC. Lake sediment resuspension and caused phosphate release-a simulation study[J]. *J Environ Sci*, 2001, 13 (4) : 406–410.
- [20] 秦伯强, 胡维平, 高光, 罗敏葱, 张金善. 太湖沉积物悬浮的动力机制及内源释放的概念性模式[J]. *科学通报*, 2004, 49 (1) : 54–64.
Qin BQ, Hu WP, Gao G, Luo LC, Zhang JS. Dynamics of sediment resuspension and the conceptual schema of nutrient release in the large shallow Lake Taihu, China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49 (1) : 54–64.
- [21] 罗激葱, 秦伯强, 胡维平, 张发兵. 不同水动力扰动下太湖沉积物的悬浮特征[J]. *湖泊科学*, 2004, 16(3) : 273–276.
Luo LC, Qin BQ, Hu WP, Zhang FB. Sediment re-suspension under different hydrodynamic disturbances in Lake Taihu[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2004, 16 (3) : 273–276.
- [22] 秦伯强, 高光, 胡维平, 吴庆龙, 胡春华, 等. 浅水湖泊生态系统恢复的理论与实践思考[J]. *湖泊科学*, 2005, 17(1) : 9–16.
Qin BQ, Gao G, Hu WP, Wu QL, Hu CH, et al. Reflections on the theory and practice of shallow lake ecosystem restoration[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2005, 17 (1) : 9–16.
- [23] 黎慧娟, 倪乐意, 曹特, 朱龙喜. 弱光照和富营养对苦草生长的影响[J]. *水生生物学报*, 2008, 32(2) : 225–230.
Li HJ, Ni LY, Cao T, Zhu XL. Responses of *Vallisneria natans* to reduced light availability and nutrient enrichment[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2008, 32 (2) : 225–230.
- [24] 吴晓东, 王国祥, 魏宏农, 李振国, 杭子清. 模拟水位上升对黑藻生长的影响[J]. *湖泊科学*, 2012, 24(3) : 384–390.
Wu XD, Wang GX, Wei HN, Li ZG, Hang ZQ. Growth Responses of *Hydrilla verticillata* to increasing water levels[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2012, 24 (3) : 384–390.
- [25] Zhang X. On the estimation of biomass of submerged vegetation using Landsat thematic mapper (TM) imagery: a case study of the Honghu Lake, PR China[J]. *Int J Remote Sens*, 1998, 19 (1) : 11–20.
- [26] 厉恩华, 杨超, 蔡晓斌, 王智, 王学雷. 洪湖湿地植物多样性与保护对策[J]. *长江流域资源与环境*, 2021, 30(3) : 623–635.
Li EH, Yang C, Cai XB, Wang Z, Wang XL. Plant diversity and protection measures in Honghu wetland[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2021, 30 (3) : 623–635.
- [27] 冯璐. 洪湖水资源与当地经济耦合的实证研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2011: 28–38.
- [28] 赵钰, 殷春雨, 高弋明, 陈新芳, 关保华, 李宽意. 沉水植物生态化学计量学特征的区域差异以及生态修复的影响[J]. *生态科学*, 2022, 41(4) : 16–24.
Zhao Y, Yin CY, Gao YM, Chen XF, Guan BH, Li KY. Regional differences and the effects of ecological restoration on stoichiometric characteristics of submerged macrophytes[J]. *Ecological Science*, 2022, 41 (4) : 16–24.
- [29] 马全, 姚瑶, 常达. 湖北省退垸(田、渔)还湖工作研究[J]. *水资源开发与管理*, 2019(5) : 60–63.
Ma Q, Yao Y, Chang D. Research on the work of reclaiming embankment (field, fishing) to lakes in Hubei Province[J]. *Water Resources Development and Management*, 2019 (5) : 60–63.
- [30] 郑景明, 王灵艳, 孙启祥, 周金星, 廖波, 张国湘. 洞庭湖集成垸退田还湖前后景观格局变化和生态安全格局[J]. *湿地科学与管理*, 2009, 5(1) : 40–43.
Zheng JM, Wang LY, Sun QX, Zhou JX, Liao B, Zhang GX. Change of landscape patterns before and after the land conversion for restoration in Dongting lake region and its ecological safety[J]. *Wetland Science & Management*, 2009, 5 (1) : 40–43.
- [31] 陈建, 李义天, 孙昭华, 鄢会彩. 洞庭湖区退垸还湖的防洪效应[J]. *水电能源科学*, 2004, 22(2) : 26–29.
Chen J, Li YT, Sun ZH, Gao HC. Flood preventing and controlling influence of recovering flood storages of Dongting lake[J]. *Water Resources and Power*, 2004, 22 (2) : 26–29.
- [32] 吴玉成. 鄱阳湖地区平垸行洪、退田还湖、移民建镇后防洪减灾态势[J]. *水利发展研究*, 2002, 2(12) : 29–32.
Wu YC. The situation of flood control in Poyanghu area after removing polder dykes for flood way and returning cropland to lake[J]. *Water Resources Development Research*, 2002, 2 (12) : 29–32.
- [33] 王学雷, 宁龙梅, 肖锐. 洪湖湿地恢复中的生态水位控制与江湖联系研究[J]. *湿地科学*, 2008, 6(2) : 316–320.
Wang XL, Ning LM, Xiao R. The ecological water level control and relationship between river and lakes for the restoration of Honghu Lake[J]. *Wetland Science*, 2008, 6 (2) : 316–320.
- [34] 李昆, 王玲, 李兆华, 王祥荣, 陈红兵, 等. 丰水期洪湖水质空间变异特征及驱动力分析[J]. *环境科学*, 2015, 36(4) : 1285–1292.
Li K, Wang L, Li ZH, Wang XR, Chen HB, et al. Spatial variability characteristics of water quality and its driving forces in Honghu Lake during high water-level Period[J]. *Environ-*

- mental Science*, 2015, 36 (4) : 1285–1292.
- [35] 高昂. 基于风-波-流特征的浅水湖泊风应力系数研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2020: 63–80.
- [36] 付旭辉, 王硕, 唐定丹, 宋媛媛, 汪云悠, 等. 三峡库区典型河段近岸波浪特征研究——以巫山大宁河为例[J]. *人民珠江*, 2020, 41(6) : 32–38.
Fu XH, Wang S, Tang DD, Song YY, Wang YY, et al. Study on the characteristics of near-shore waves in the typical section of the three gorges reservoir area: a case study of Daning River[J]. *Pearl River*, 2020, 41 (6) : 32–38.
- [37] 李伟, 钟扬. 水生植被研究的理论与方法[M]. 武汉: 华中师范大学出版社, 1992: 72–79.
- [38] Kotrlík JW, Williams HA. The incorporation of effect size in information technology, learning, and performance research[J]. *Inf Technol Learn Perform J*, 2003, 21 (1) : 1–7.
- [39] Wüest A, Lorke A. Small-scale hydrodynamics in lakes[J]. *Annu Rev Fluid Mech*, 2003, 35: 373–412.
- [40] 刘昔, 厉恩华, 徐杰, 邓兆林, 黄小龙, 等. 洪湖湿地生态系统演变及稳态转换关键驱动因子阈值研究[J]. *湖泊科学*, 2023, 35(3) : 934–940.
Liu X, Li EH, Xu J, Deng ZL, Huang XL, et al. Evolution mechanism of Lake Honghu wetland ecosystem and regime shift crucial threshold[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2023, 35 (3) : 934–940.
- [41] 张鸿雁, 丁裕国, 刘敏, 杨宏青, 张兵. 湖北省风能资源分布的数值模拟[J]. *气象与环境科学*, 2008, 31(2) : 35–38.
Zhang HY, Ding YG, Liu M, Yang HQ, Zhang B. Numerical simulation of wind energy resources distribution in Hubei Province[J]. *Meteorological and Environmental Sciences*, 2008, 31 (2) : 35–38.
- [42] 杨宏青, 刘敏, 冯光柳, 周月华, 万君. 湖北省风能资源评估[J]. *华中农业大学学报*, 2006, 25(6) : 683–686.
Yang HQ, Liu M, Feng GL, Zhou YH, Wan J. Evaluation of wind energy resources in Hubei Province[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2006, 25 (6) : 683–686.
- [43] 谢贻发, 胡耀辉, 刘正文, 谢贵水. 沉积物再悬浮对沉水植物生长的影响研究[J]. *环境科学学报*, 2007, 27(1) : 18–22.
Xie YF, Hu YH, Liu ZW, Xie GS. Effects of sediment resuspension on the growth of submerged plants[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27 (1) : 18–22.
- [44] 王文林, 王国祥, 李强, 潘国权, 马婷. 水体浊度对菹草 (*Potamogeton crispus*) 幼苗生长发育的影响[J]. *生态学报*, 2006, 26(11) : 3586–3593.
Wang WL, Wang GX, Li Q, Pan GQ, Ma T. Influence of water turbidity on growth of the seedlings of *Potamogeton crispus*[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26 (11) : 3586–3593.
- [45] Chilton II EW, Muoneke MI. Biology and management of grass carp (*Ctenopharyngodon idella*, Cyprinidae) for vegetation control: a North American perspective[J]. *Rev Fish Biol Fisheries*, 1992, 2 (4) : 283–320.
- [46] Cai ZW, Curtis LR. Effects of diet on consumption, growth and fatty acid composition in young grass carp[J]. *Aquaculture*, 1989, 81 (1) : 47–60.
- [47] 魏小飞. 团头鲂对苦草与轮叶黑藻竞争格局的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2015: 39–44.
- [48] 孙健, 贺峰, 张义, 刘碧云, 周巧红, 吴振斌. 草鱼对不同种类沉水植物的摄食研究[J]. *水生生物学报*, 2015, 39 (5) : 997–1002.
Sun J, He F, Zhang Y, Liu BY, Zhou QH, Wu ZB. The feeding behavior of grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) on different types of submerged plants[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2015, 39 (5) : 997–1002.
- [49] Hamilton DP, Mitchell SF. An empirical model for sediment resuspension in shallow lakes[J]. *Hydrobiologia*, 1996, 317 (3) : 209–220.
- [50] Kristensen P, Søndergaard M, Jeppesen E. Resuspension in a shallow eutrophic lake[J]. *Hydrobiologia*, 1992, 228 (1) : 101–109.
- [51] Ren WJ, Wen ZH, Cao Y, Wang H, Yuan CB, et al. Cascading effects of benthic fish impede reinstatement of clear water conditions in lakes: a mesocosm study[J]. *J Environ Manage*, 2022, 301: 113898.
- [52] 孟建人. 洪湖围网养殖对水环境的影响研究[D]. 武汉: 湖北大学, 2019: 39–44.
- [53] 纪磊, 何平, 叶佳, 彭水秀. 近50年来洪湖鱼类群落分类学多样性变动[J]. *湖泊科学*, 2017, 29(4) : 932–941.
Ji L, He P, Ye J, Peng SX. The taxonomic distinctness diversity of fish community in Lake Honghu during the past 50 years[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2017, 29 (4) : 932–941.
- [54] Yu JL, Xia ML, Zhao YY, He H, Guan BH, et al. Consumer-driven nutrient release to the water by a small omnivorous fish enhanced ramet production but reduced the growth rate of the submerged macrophyte *Vallisneria densa* *serrata* (Makino) Makino[J]. *Hydrobiologia*, 2021, 848 (18) : 4335–4346.
- [55] Razlutskij V, Mei XY, Maisak N, Sysova E, Lukashanets D, et al. Omnivorous carp (*Carassius gibelio*) increase eutrophication in part by preventing development of large-bodied zooplankton and submerged macrophytes[J]. *Water*, 2021, 13 (11) : 1497.
- [56] 马路生, 夏曼莉, 于谨磊, 关保华, 陈非洲, 刘正文. 大鳍鱊对4种沉水植物的选择性摄食[J]. *水生态学杂志*, 2022, 43(3) : 113–120.
Ma LS, Xia ML, Yu JL, Guan BH, Chen FZ, Liu ZW. Fee-

- ding preferences of *Acheilognathus macropterus* on four submerged macrophytes[J]. *Journal of Hydroecology*, 2022, 43 (3) : 113–120.
- [57] 王韶华, 赵德锋, 廖日红. 关于北京后海水体光照强度及沉水植物光补偿深度的研究[J]. *水处理技术*, 2006, 32 (6) : 31–33.
Wang SH, Zhao DF, Liao RH. Research on water body illuminance and compensation depth of submerged macrophyte in lake[J]. *Technology of Water Treatment*, 2006, 32 (6) : 31–33.
- [58] 秦伯强, 胡维平, 刘正文, 高光, 谷孝鸿, 等. 太湖梅梁湾水源地通过生态修复净化水质的试验[J]. *中国水利*, 2006 (17) : 23–29.
Qin BQ, Hu WP, Liu ZW, Gao G, Gu XH, et al. Experiment on water purification by ecological measures in water sources of Meiliangwan of Taihu Basin[J]. *China Water Resources*, 2006 (17) : 23–29.
- [59] Voesenek LACJ, Colmer TD, Pierik R, Millenaar FF, Peeters AJM. How plants cope with complete submergence[J]. *New Phytol*, 2006, 170 (2) : 213–226.
- [60] 高汾, 张毅敏, 杨飞, 马梦洁, 高月香, 等. 水位抬升对4种沉水植物生长及光合特性的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2017, 33(4) : 341–348.
- Gao F, Zhang YM, Yang F, Ma MJ, Gao YX, et al. Growth and photosynthetic fluorescence characteristics responses of four submersed macrophytes to rising water level[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2017, 33 (4) : 341–348.
- [61] Kratzer S, Håkansson B, Sahlin C. Assessing secchi and photic zone depth in the Baltic sea from satellite data[J]. *AMBIO: J Hum Environ*, 2003, 32 (8) : 577–585.
- [62] Holmes RW. The secchi disk in turbid coastal waters[J]. *Limnol Oceanogr*, 1970, 15 (5) : 688–694.
- [63] Van TK, Haller WT, Bowes G. Comparison of the photosynthetic characteristics of three submersed aquatic plants[J]. *Plant Physiol*, 1976, 58 (6) : 761–768.
- [64] Van TK, Wheeler GS, Center TD. Competition between *Hydrilla verticillata* and *Vallisneria americana* as influenced by soil fertility[J]. *Aquat Bot*, 1999, 62 (4) : 225–233.
- [65] 王华, 逢勇, 刘申宝, 马璇. 沉水植物生长影响因子研究进展[J]. *生态学报*, 2008, 28(8) : 3958–3968.
Wang H, Pang Y, Liu SB, Ma X. Research progress on influencing of environmental factors on the growth of submersed macrophytes[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28 (8) : 3958–3968.

(责任编辑: 李惠英)