

贵州草海沉水植物种子库空间分布特征与恢复潜力

黄霞^{1,2,3}, 杨海全^{2,4}, 陈敬安^{2,4**}, 胡森华², 卢佳², 杜丽芬², 杨天姚², 徐小蓉^{1,2,3**}

(1:贵州师范大学生命科学学院, 贵阳 550025)
(2:中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081)
(3:西南喀斯特山地生物多样性保护国家林草局重点实验室, 贵阳 550025)
(4:红枫湖水库生态系统贵州省野外科学观测研究站, 贵阳 551499)

摘要: 湖泊底泥种子库能够反映过去水生植物的物种组成, 不仅为植物种群的维持和扩散提供了种质资源, 还在植物群落演替中起着重要作用。本研究以贵州草海为对象, 结合野外调查和室内种子萌发试验揭示了草海沉水植物底泥种子库空间分布特征, 并基于沉水植物群落结构、底泥种子库特征、底泥理化特性和水质指标构建了综合恢复潜力评价模型, 评估了草海不同湖区沉水植物种子库的恢复潜力。研究结果表明, 当前草海沉水植物底泥种子库保存较完好, 平均密度为 3650 ± 1159 粒/m² (0–15 cm), 耐污及适应性较强的普生轮藻 (*Chara vulgaris* L.) 为优势种, 对种子库贡献最大。底泥种子库具有明显的“表聚现象”和空间异质性, 南部和东北近岸湖区种子库密度显著高于湖心。基于生态恢复潜力综合评价, 将草海全湖分为“优先恢复区”、“重点恢复区”和“过渡区”, 提出在草海沉水植物种子萌发的关键时期实施低水位运行, 并分区开展生态恢复: 在种子库资源丰富且生态恢复潜力较高的“优先恢复区”, 采取消浪措施, 为种子萌发与幼苗定植创造良好环境, 促进自然恢复, 同时结合人工措施提升物种多样性及生态系统稳定性; 恢复潜力最低的“重点恢复区”需开展内源污染控制与水质净化措施, 为种子萌发和沉水植物生长创造可恢复生境, 人工补种本地先锋物种, 促进沉水植物群落恢复; 种子库资源相对匮乏且受风浪扰动最大的北岸“过渡区”可作为全湖沉水植物最后恢复区域, 待南湖和湖心区域完成沉水植物重建, 风浪扰动明显削减后, 开展种子库补植等措施, 逐步恢复沉水植物群落。研究结果可为正处于退化阶段的浅水湖泊水生植物生态恢复提供理论依据和支撑。

关键词: 沉水植物; 种子库; 空间分布特征; 恢复潜力; 草海

Spatial distribution characteristics and restoration potential of the submerged plant seed bank of the Lake Caohai in China

Huang Xia^{1,2,3}, Yang Haiquan^{2,4**}, Chen Jingan^{2,4**}, Hu Senhua², Lu Jia², Du Lifeng², Yang Tianyao², Xu Xiaorong^{1,2,3**}

(1: School of Life Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang 550025, P.R.China)
(2: State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, P.R.China)
(3: State Forestry and Land Administration Key Laboratory of Biodiversity Conservation in Southwest Karst Mountains, Guiyang 550025, P.R.China)
(4: Guizhou Province Field Scientific Observation and Research Station of Hongfeng Reservoir Ecosystem, Guiyang 551499, P.R.China)

Abstract: The sediment seed bank of submerged macrophytes in lakes has been shown to reflect the historical species composition of aquatic vegetation. This provides germplasm resources for population maintenance and dispersal, and it plays a crucial role in plant community restoration and succession (Jones et al., 2019). The present study concentrated on Lake Caohai, employing a combination of field surveys and laboratory germination experiments to elucidate the spatial distribution characteristics of submerged macrophyte seed banks in sediments. A comprehensive restoration potential assessment model was developed by integrating submerged vegetation, sediment seed banks, sediment properties, and water quality parameters. The present study investigates the status of the submerged macrophyte seed bank in Lake Caohai sediments, which has been found to be relatively intact with a high storage density (average 3650 ± 1159 seeds/m² in the 0–15 cm layer). The dominant species in this seed bank is *Chara vulgaris* L., a species which has been found to be pollution-tolerant and highly adaptable. The distribution of the seed bank was primarily in the surface sediment (0–15 cm), indicating an obvious "surface aggregation" phenomenon and spatial heterogeneity, with significantly higher densities in the southern and northeastern nearshore zones compared to the central lake area. Spatial aggregation analysis indicated that *Chara vulgaris* L., *Vallisneria spiralis* L., and *Potamogeton perfoliatus* L. exhibited aggregated distribution patterns. Following a thorough evaluation of the ecological restoration potential, the lake was designated as falling within one of three categories: priority restoration zones, key restoration zones and transition zones. It is imperative that, during the critical seed germination periods, low water level operations are implemented throughout the lake, with differentiated strategies. For priority restoration zones that possess abundant seed resources and high restoration potential, wave reduction measures should be adopted in order to create stable environments for seed germination and seedling establishment. This approach will promote natural recovery while enhancing species diversity and ecosystem stability through artificial regulation. The key restoration zones with the lowest restoration potential require internal pollution control and water quality purification measures to create

*2025-01-25 收稿; 2025-05-21 收修改稿。

国家自然科学基金项目 (42473022, 42263014) 和贵州省科技计划项目 (黔科合重大专项字[2024]009, 黔科合平台 YWZ[2023]006) 联合资助。

**通讯作者: E-mail: chenjingan@mail.gyig.ac.cn; xxr@gznu.edu.cn。

recoverable habitats before artificial replanting of native, pollution-tolerant pioneer species. The northern shore (transition zone), characterized by relatively scarce seed bank resources and the most severe wave disturbances, can be designated as the final restoration area for submerged macrophytes across the lake. Following the completion of submerged vegetation reconstruction in the southern and central lake areas, and with wave disturbances significantly reduced, measures such as seed bank supplementation and targeted planting should be implemented to gradually restore the submerged macrophyte communities in this region. The present study provides a theoretical foundation and practical guidance for the restoration of degraded aquatic plant ecosystems in shallow lakes.

Keywords: Submerged macrophytes; Seed bank; Spatial distribution characteristics; Restoration potential; Lake Caohai

底泥种子库作为植物种群更新的核心载体,在调控水生植物群落演替、维持生物多样性和生态系统稳定性方面发挥着重要作用^[1]。湿地种子库的研究已有 160 多年的历史,最早可追溯至达尔文 1859 年开展的池塘底泥种子萌发实验^[2]。淡水湿地种子库研究起步较晚,仅约 50 年历史^[3],且现有研究热点多集中于长江中下游富营养化湖泊^[4-7]及大型水库^[8]等区域,对处于草-藻型稳态转换期的湖泊关注不足,特别是高原富营养化湖泊沉水植物种子库的研究鲜有报道。因此,开展高原富营养化湖泊种子库的调查与研究,对湖泊生态恢复及生态多样性保护具有重要意义。

水生植物(特别是沉水植物)作为浅水湖泊的重要组成部分,其群落结构与分布特征(如物种丰富度、植被覆盖度等)是表征水体草-藻型稳态转换过程的核心指标^[9]。然而,在气候变化和人为干扰的双重影响下,全球湖泊水生植物呈现显著衰退趋势,超 65% 的区域水生植物正在消亡^[10-12],其中沉水植物衰退速率尤为突出,从 1980 年之前的 (13.5±16.9) %/年,增至 2000 年后的 (33.6±59.8) %/年^[10]。我国长江中下游浅水湖泊首当其冲^[13],如太湖^[14]、巢湖^[15]、鄱阳湖^[16]、洪湖^[17]等均出现沉水植物大面积消亡现象。在此背景下,底泥种子库技术逐渐成为湖泊水生植物生态恢复的关键突破口。深埋底泥的种子因长期保持萌发活力,其密度分布与萌发能力是水生植物群落自然更新的基础^[11]。因此,底泥种子库的物种组成、丰富度和萌发潜力被认为是决定湖泊水生植物生态系统恢复的关键因素^[18]。

当前湖泊湿地种子库研究已取得一定的进展。董彪等^[7]通过分析底泥种子库与地上植被的物种组成及其动态演变关系,发现人工促进植被更新是龙感湖底泥种子库促进植物群落多样性恢复的关键因素。徐超团队基于水下光照与种子库的耦合机制提出了沉水植物恢复区的划分方法^[19]。Lu 等^[20]整合底泥种子库与历史植被数据,提出了中国富营养化湖泊恢复标准。然而,现有研究多集中于长江中下游平原湖泊,高原湖泊种子库研究明显滞后。高原湖泊因其特殊的地理位置和气候特征,普遍存在生态系统稳定性差、自我恢复能力弱等特性^[21]。这种生态脆弱性凸显了高原湖泊利用种子库恢复并建立健康稳定的水生植物群落的重要性。贵州草海作为云贵高原浅水湖泊的典型代表,自 2020 年起部分湖区沉水植物开始出现明显衰退,2021 年大部分湖区沉水植物基本消失^[22]。现有研究多集中于水质和水生植物生物量监测,对草海底泥沉水植物种子库的物种组成、空间分布及其恢复潜力尚缺乏系统研究。本研究通过野外调查与室内萌发实验相结合的方法,旨在揭示草海底泥沉水植物种子库现状和空间分布特征,评估草海不同湖区底泥种子库恢复潜力,以期为该类型湖泊水生生态系统恢复提供理论依据和科学指导。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

草海 (26°44'37"–26°57'07"N, 104°03'22"–104°20'40"E) 位于贵州省威宁彝族回族苗族自治县城南侧,属高原喀斯特草型浅水湖泊,海拔 2171.7 m。受季节性降水影响,枯水期水面面积 19.8 km²,丰水期 26.0 km²,最大水深 5.3 m,平均水深 1.6 m^[23]。该区域年均气温 10.5℃,年均降雨量 951 mm。历史监测资料显示,草海曾拥有丰富的水生植物群落,沉水植物以金鱼藻 (*Ceratophyllum demersum*)、光叶眼子菜 (*Potamogeton lucens*)、穿叶眼子菜 (*Potamogeton perfoliatus* L.)、穗状狐尾藻 (*Myriophyllum spicatum*)、篦齿眼子菜 (*Stuckenia pectinata*)、海菜花 (*Ottelia acuminata*) 等为代表^[24]。近年来,受人类活动和水位波动的影响,草海湖区沉水植物出现大面积退化,物种多样性显著下降^[25]。2021 年监测结果显示,草海湖区已很难采集到沉水植物,生态系统呈现草型清水态向藻型浊水态转变的演替趋势^[26]。

1.2 沉水植物及底泥种子库调查

本研究于 2024 年 4 月(春季)和 7 月(夏季)在草海湖区开展沉水植物调查,共设置 15 个采样点(图 1)。所有采样点经纬度坐标通过 GIS 空间分层随机抽样法确定。在每个采样点附近选取 5 个 1m×1m 的样方,使用铁耙式采草器(长 0.2 m,宽 0.14 m)在每个样方内采集 5 次。采集的植物样品置于低温保温箱保存,运送至实验室后立即进行冲洗、分类及鲜重称量。沉水植物总生物量(g/m²)通过鲜重总质量与样方面积的比值计算,沉水植物的物种鉴定依据《中国植物志》^[27]进行。

底泥种子库调查于 4 月开展,样点布设位置与沉水植物调查点位相同。采用配备有机玻璃管(直径 5.9 cm,长 120 cm)的柱状采样器,在每个样点采集 3 根底泥柱芯,取样表面积为 82 cm²。每根柱芯按垂直深度划分为两个层段(0–15 cm、15–30 cm),同一采样点相同层位的底泥样品混合均匀后装入自封袋标记保存。鉴于 30 cm 以下深层底泥存在采样困难、沉积柱易断裂等瓶颈,为探索草海深层底泥(>30 cm)中

沉水植物种子库的存续状态及其活力，本研究利用分层后残留的深层底泥（30–60 cm 不等）进行萌发实验，定性评估其种子库组成及活性。同时采集对应点位的水样和表层沉积物样品用于后续理化指标分析。

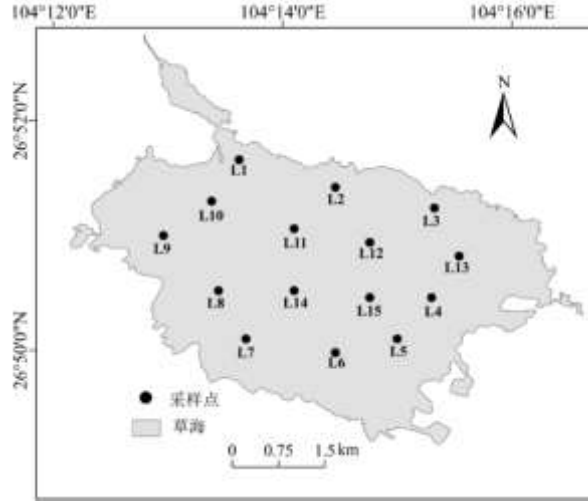


图1 草海沉水植物与底泥种子库调查样点分布图

Fig. 1 Distribution of sampling points for the survey of submerged plants and sediment seed bank in Lake Caohai.

1.3 种子库萌发实验

利用浓缩萌发法确定底泥种子库的密度、物种组成及多样性。将采集的底泥样品带回实验室后，小心剔除底泥中可见的块茎、根、根茎和凋落物，依次通过 3000 μm 、2000 μm 和 300 μm 标准筛进行梯度过滤（配合 100 目分样筛辅助水洗）。收集过筛剩余的泥团作为萌发基质。萌发实验在 1 L 塑料烧杯中进行，基质厚度约 3 cm，加水没过基质 3–5 cm。所有实验组置于人工气候箱（RGX-250），在 25℃、湿度 60%–90%、12 h 光照/12 h 黑暗条件下培养。培养期间每 3 天补水以维持水位，每周记录幼苗萌发数量并完成物种鉴定。幼苗鉴定计数后及时移除，暂不能鉴定的幼苗将其进行标记后移至塑料柱中继续生长直至成功鉴定。整个过程持续至烧杯中不再有幼苗长出，然后将底泥搅拌混合，继续观测，直至连续 3 周底泥中不再有种子萌发视为萌发结束。本研究种子萌发实验最长持续时间为 90 天。

1.4 水质及底泥理化性质分析

现场使用多参数水质分析仪（YSI-ProDSS）监测上覆水的水温（WT）、浊度、pH、溶解氧（DO）、电导率（SPC）及氧化还原电位（ORP）。水体透明度（SD）通过赛氏盘测定，水深（WD）通过测深杆获取，并计算透深比 T_s （ SD/WD ）。水体总磷（TP）依据钼酸铵分光光度法（GBT11893—1989）测定，总氮（TN）用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法（HJ636—2012）测定，氨氮采用纳氏试剂分光光度法（HJ535—2009）测定。沉积物总氮（STN）和总磷（STP）含量等的测定参考杨海全等^[28]的测定方法。

1.5 数据处理

为阐明草海底泥种子库的分布特征，本研究参考董彪^[7]等人的方法体系，定量评估草海底泥种子库密度（SBD）、地上沉水植被与底泥种子库的物种组成相似性（SC）及物种多样性。其中物种多样性采用 Margalef 丰富度指数（ R ）、辛普森指数（Simpson Index, D ）、香农指数（Shannon–Wiener Index, H' ）和 Pielou 均匀度指数（ E ）进行多维度评估，具体计算公式如下：

$$SBD = m / n \quad (1)$$

$$SC = 2w / (a + b) \quad (2)$$

$$D = 1 - \sum_{i=1}^s p_i^2 \quad (3)$$

$$R = (S - 1) / \ln N \quad (4)$$

$$H' = -\sum_{i=1}^s p_i \ln p_i \quad (5)$$

$$E = H' / \ln S \quad (6)$$

式中， m 为底泥萌发的幼苗数， n 为种子库的取样面积（ m^2 ）； w 为地上沉水植物与其对应的底泥种子库共有的植物种数， a 和 b 分别为底泥种子库和沉水植物的物种数； p_i 为第 i 个物种的种子数占种子库中种子总数的比值； S 为物种数， N 为所有物种的个体总数。

采用偏离指数 (V/m)、Lloyd 平均拥挤度 (m^*)、聚块性指数 (PAI) 和丛生指标 (I) 4 个指标来描述底泥种子库在相应样方的空间分布格局。以偏离指数的 t 检验法为主判定分布格局类型, 用其余 3 个指标分析集群分布的聚集强度^[29], 公式如下:

$$V = \sum_{i=1}^N (x_i - m)^2 / (N-1); m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (7)$$

$$m^* = m + (V / m - 1) \quad (8)$$

$$PAI = m^* / m \quad (9)$$

$$I = V / (m-1) \quad (10)$$

式中, N 为样方数; x_i 为每个样方中的幼苗萌发数。该值的显著性可用 t -检验: $t = \frac{V/m-1}{\sqrt{2(n-1)}}$, 比较 t 与

$t_{0.05} (n-1)$ 确定其差异显著性。

所有数据在 Excel 2021 中进行初步处理, 用 SPSS 27.0 单因素方差分析 (Oneway ANOVA) 和多重比较对底泥种子库密度、物种多样性进行差异显著分析, 用 Mann-Whitney U 检验比较不同底泥深度种子库密度的差异显著性。综合恢复潜力分析由 SPSS AU 完成, 统计分析和作图用 SPSS 27.0、ArcMap10.8 和 Origin 2021 完成。

2 结果与讨论

2.1 草海沉水植物底泥种子库物种组成及规模

草海 4 月底泥种子库中共萌发 9 种沉水植物, 包括穗状狐尾藻、大茨藻 (*Najas marina* L.)、微齿眼子菜 (*Potamogeton maackianus*)、篳齿眼子菜、穿叶眼子菜、小茨藻 (*Najas minor* All.)、轮叶黑藻 (*Hydrilla verticillata*)、苦草 (*Vallisneria spiralis*) 和普生轮藻 (图 2a), 隶属 5 科 7 属。眼子菜科物种数最多 (3 种), 茨藻科与水鳖科各 2 种, 其余 2 科各 1 种。普生轮藻为绝对优势种, 其种子库密度占种子库总量的 93%, 显著 ($p < 0.01$) 高于其他物种。

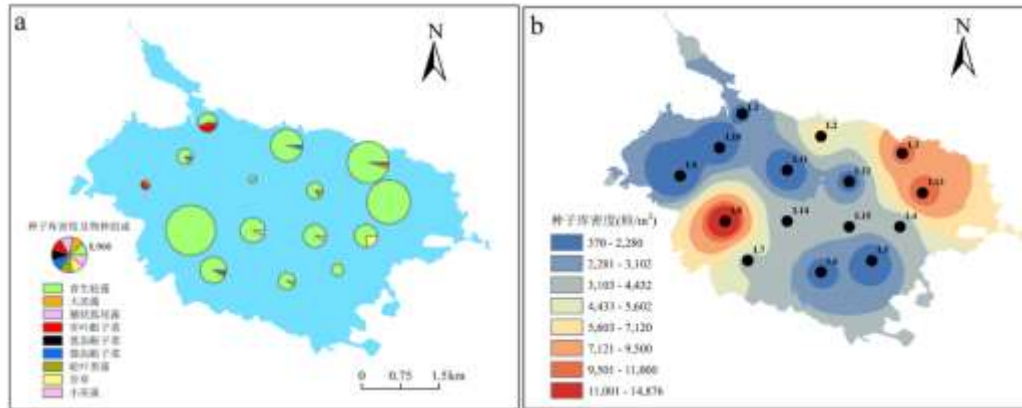


图 2 草海湖区不同物种的底泥种子库密度及总密度分布热图 (a: 不同物种的种子库密度; b: 总密度分布热图)

Fig. 2 Heatmaps of sediment seed bank density for different species and total density distribution in the Lake Caohai (a: sediment seed bank density of different species; b: total density distribution heatmap)

草海底泥种子库呈现明显的空间异质性 (图 2b)。西南部 (王家院子) 及东北部 (重污染区) 种子库密度较高; 东南部 (L5、L6) 湖心区 (L11、L12) 及西部湖区种子库密度较低。垂直剖面分析显示, 0–15 cm、15–30 cm 的底泥层均存在活性种子, 且 0–15 cm 层平均种子密度 (3650 ± 1159 粒/ m^2) 显著高于 15–30 cm 层 (691 ± 164 粒/ m^2) ($p < 0.05$) (图 3)。整体而言, 草海 84% 的底泥种子库集中于 0–15 cm 层, 16% 分布于深层, 具有明显的“表聚现象”, 与 Parker 等^[30]的研究结果一致。此外, 萌发实验发现草海 30 cm 以下底泥中仍存有大量活性种子, 这一结果不仅证实了深埋种子可以长期保持活力^[20], 同时为草海底泥疏浚深度阈值的设定提供了科学依据。不同生境类型的种子库密度通常介于 10^2 – 10^6 粒/ m^2 , 其中森林为 10^2 – 10^3 粒/ m^2 , 草地为 10^3 – 10^6 粒/ m^2 , 耕地地为 10^3 – 10^5 粒/ m^2 , 湿地为 0 – 10^4 粒/ m^2 ^[31–32], 沼泽湿地达 1.02×10^4 – 1.41×10^5 粒/ m^2 ^[6], 亚热带林地可达 3.2×10^5 粒/ m^2 ^[30]。与其它浅水湖泊相比, 草海种子库密度显著高于洪湖 (平均 1936 ± 328 粒/ m^2)^[33]与东太湖 (1446.67 粒/ m^2)^[4], 但低于茆海湖 (平均 7200 粒/ m^2)^[34]及鄱阳湖 (平均 17328 ± 1675 粒/ m^2)^[35]。这种区域差异主要受湖泊水文节律、营养盐水平、底泥理化特性及沉水植物群落结构等多因素调控^[36–38]。具体而言, 适度水文扰动有利于种子富集^[37], 高频水位波动区域的种子库物种丰富度与群落复杂度显著高于低频区^[38]。值得注意的是, 实验室萌发条件与自然生境的差异可能

对实验结果产生双重影响^[39-40]。一方面，室内恒定的温度、光照和湿度等理想化条件可能高估广适性种子的萌发率；另一方面，人工气候箱无法模拟自然环境中水体流动、温度波动、溶解氧变化等复杂理化因素，可能导致对环境要求严格的种子难以萌发，从而低估种子库密度和物种丰富度。

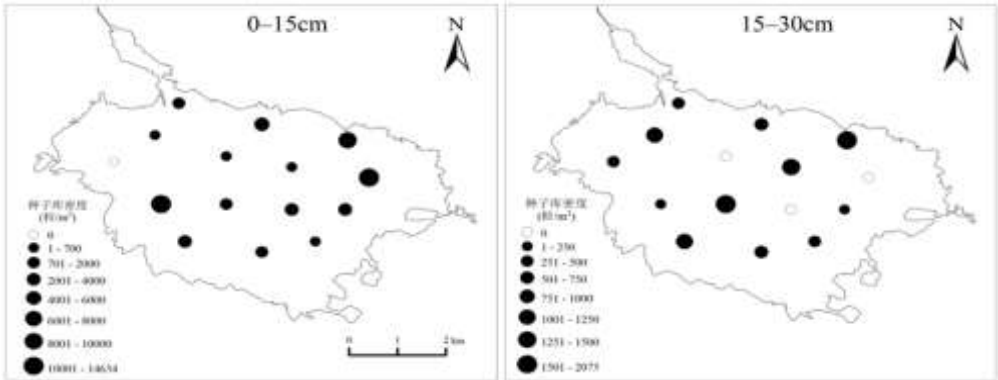


图3 草海不同底泥深度的种子库密度

Fig. 3 Seed bank densities at different sediment depths in the Lake Caohai

2.2 底泥种子库的空间分布特征

种群分布格局是种群与环境长期相互作用和选择适应的结果^[41]，空间分布包括水平和垂直两个维度，其中垂直分布影响种群建群，水平分布则决定种群的空间格局^[42]。水平尺度上，普生轮藻作为草海现存优势种，广泛分布于全湖 15 个样点，平均密度为 4057 ± 1157 粒/ m^2 （图 4）。单因素方差分析显示其种子库储量显著高于其他物种（ $p < 0.01$ ），表明该物种在当前草海生境下具有较强的适应能力。大茨藻分布于 6 个样点（平均密度 142 ± 20 粒/ m^2 ），穗状狐尾藻和穿叶眼子菜各见于 4 个样点（平均密度分别为 203 ± 23 粒/ m^2 和 488 ± 61 粒/ m^2 ），微齿眼子菜分布于 3 个样点，苦草、小茨藻及轮叶黑藻仅见于 2 个样点，篦齿眼子菜仅在 L7 点位被发现，平均密度（ 122 ± 8 粒/ m^2 ）。本研究剔除有效样方数 < 3 的物种（共 4 种），以避免小样本导致的指数偏差，最终对满足条件的物种进行空间格局分析。离散系数分析表明普生轮藻和穿叶眼子菜为聚集分布格局（ $V/m > 1$ ），大茨藻、穗状狐尾藻、微齿眼子菜为均匀分布格局（表 1）。从聚块性指数和从生指标来看，普生轮藻的种群聚集强度高于穿叶眼子菜。种群的聚集分布可能与其对资源（如光照、营养）的竞争策略有关，在资源分布不均或存在显著环境异质性的生境中，聚集分布使种群在某一斑块上形成优势，抵抗外来种的侵入和定居，从而维持种群的稳定和续存^[41]。值得注意的是，4 月底泥种子库中未发现历史上占主导地位的物种，如海菜花（*Ottelia acuminata*）、马来眼子菜（*Potamogeton malaianus*）、菹草（*Potamogeton crispus*）和金鱼藻（*Ceratophyllum demersum*）。这与 Lu^[20]等研究结果一致。这些物种的消失可能与植株退化（种子产量降低）、种子活性丧失及休眠等因素相关^[6,20]。此外，在 L4 和 L5 点位发现了草海历史上未记录的苦草，推测可能是近几年人类活动引入的结果。

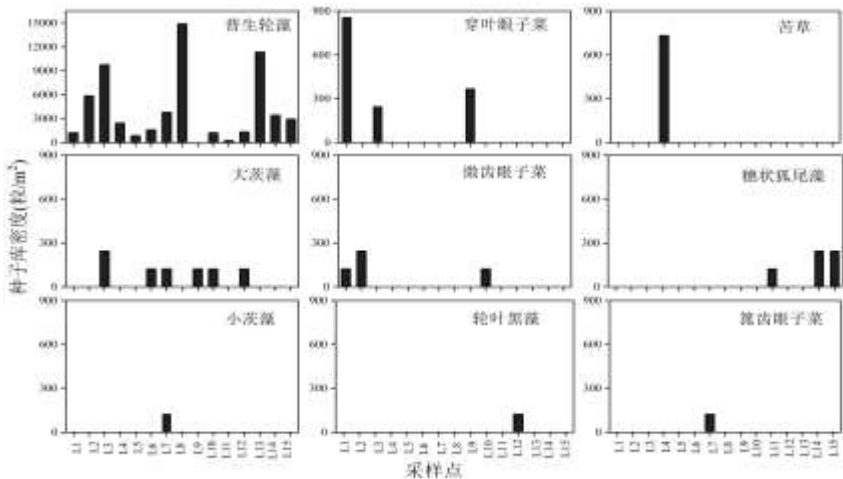


图4 草海9种沉水植物种子库密度的水平分布

Fig. 4 Horizontal distribution of seed bank densities of nine submerged plants in Lake Caohai

表 1 底泥种子库中不同物种的种群分布格局
Tab. 1 Population distribution patterns of different species in sediment seed banks

物种	偏离指数 (V/m)	Lloyd 平均拥挤度 (m*)	聚块性指数 (PAI)	丛生指标 (I)	结果
普生轮藻	40.58**	72.85	2.19	41.84	聚集分布
大茨藻	0.14	0.31	0.27	1.00	均匀分布
穗状狐尾藻	0.20	0.87	0.52	0.50	均匀分布
穿叶眼子菜	1.75	4.75	1.19	2.33	聚集分布
微齿眼子菜	0.25	0.58	0.44	1.00	均匀分布

*表示 $t < 0.05$, **表示 $t < 0.01$

底泥种子库的垂直分布呈现种间差异（图 5）。在 0–30 cm 的底泥深度内，86%的普生轮藻种子富集于 0–15 cm 底泥层，穗状狐尾藻和苦草种子也主要分布于该层；而轮叶黑藻、小茨藻和微齿眼子菜则主要分布在深层（>15 cm）。这种垂直分布差异可能由种子的沉降动力学特征与萌发策略共同决定。研究表明，种子质量与其沉降速度及水平扩散距离显著相关^[43]。低质量种子因沉降速率慢、水体滞留时间长，具有更远的扩散潜力；而高质量种子则因快速沉降易在母株周边形成局域富集，导致其垂直分布范围受限^[43]。萌发能力差异通过种子形态与底泥压实的互作效应进一步影响垂直分布格局。小粒径种子受深层底泥的萌发抑制效应（如光照衰减、氧气限制）及底泥压实作用影响，主要滞留于浅层；大粒径种子则凭借更强的萌发能力突破深层底泥的限制，从而拓展其垂直分布范围^[44]。此外，深埋环境诱导的休眠调控机制可能进一步加剧了不同物种的垂直分层现象^[44]。

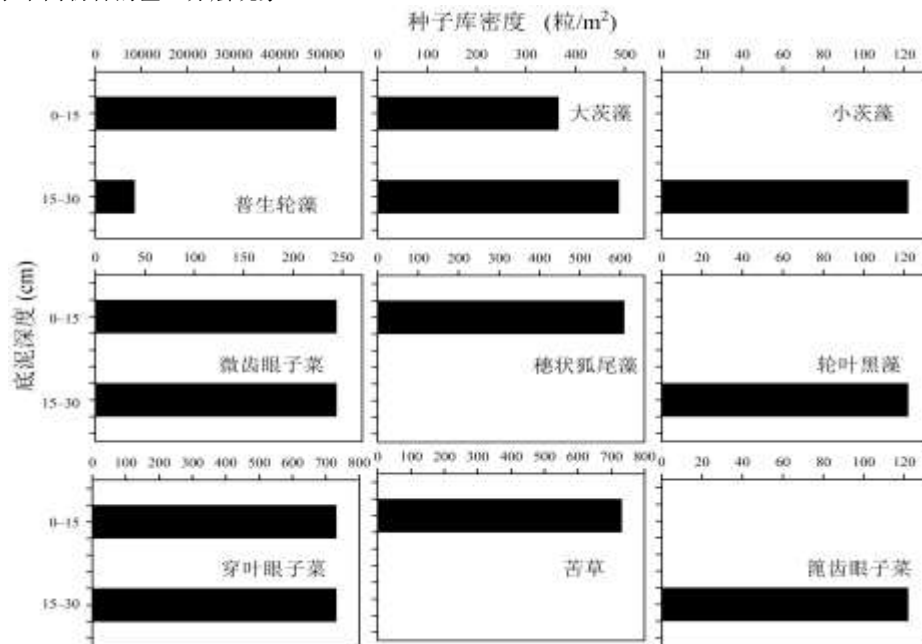


图 5 不同底泥深度内 9 种沉水植物种子库密度的垂直分布
Fig. 5 Vertical distribution of seed bank densities of nine submerged plants in different sediment depths

2.3 底泥种子库与地上沉水植被的关系

4 月调查共记录沉水植物 4 种，包括普生轮藻、穗状狐尾藻、大茨藻和篳齿眼子菜，总生物量介于 0–293.19 g/m²。7 月新增穿叶眼子菜（累计 5 种），总生物量扩展至 3.79–523.33 g/m²，优势种均为普生轮藻（表 2）。草海当前沉水植物生物量呈增加趋势，但与前人研究相比物种多样性显著降低^[26]。

草海底泥种子库的丰富度指数显著高于地上沉水植被，但其香农指数、辛普森指数和均匀度指数均低于地上沉水植被（图 6）。高丰富度指数表明种子库蕴藏较多潜在物种，在地上植被受到破坏或气候变化时，可作为未来植物群落恢复的储备库^[45]。低均匀度反映了少数优势物种在竞争中占据主导地位^[46]，导致物种分布不均衡。这种格局一方面通过优势种的强适应性维持基础生态功能，另一方面因系统过度依赖少数优势种而增加了生态脆弱性。当优势种受到干扰或破坏时，可能引发生态系统结构和功能的变化，从而降低生态系统的稳定性。

表 2 草海 4、7 月沉水植物生物量
Tab. 2 Submerged plant biomass in the Lake Caohai in April and July

采样点	4 月沉水植物生物量 (g/m ²)					7 月沉水植物生物量 (g/m ²)				
	普生 轮藻	穗状 狐尾 藻	大 茨 藻	篦齿 眼子 菜	总计	普生轮 藻	穗状 狐尾 藻	大茨 藻	篦齿 眼子 菜	穿叶眼子菜
L1	-	-	-	-	-	19.81	0	0	0	0
L2	6.12	4.91	0.27	0	11.3	223.71	0.70	0	0	0
L3	6.51	1.46	0	2.3	10.27	248.20	1.99	6.27	11.29	5.39
L4	15.82	10.12	0	0	25.94	63.75	5.16	5.51	8.94	0
L5	2.06	2.25	2.12	0	6.43	109.48		4.08	0.69	0
L6	21.23	0	0.86	0	22.09	127.09	0.62	4.09	0	0
L7	291.61	0.47	1.11	0	293.19	334.06	0	0	0	0
L8	180.88	0	0	0	180.88	326.24	0	0	0.60	0
L9	154.7	0	0.32	0	155.02	147.90	0	1.03	0.30	0
L10	105.78	0	0.36	0	106.14	523.33	0	0	0	0
L11	15.22	1.92	0	0	17.14	46.43	0	0	0	0
L12	3.14	0	0	1.57	4.71	0	3.79	0	0	0
L13	18.18	10.53	0	0	28.71	10.70	10.89	0.22	0	0
L14	61.88	0	0.1	0	61.98	17.84	0	0	0	0
L15	26.21	0	2.9	0	29.11	404.83	0.07	2.79	0	0

注：“-”表示无沉水植物。

本研究基于 Sorensen 相似性系数 (SC) 评估 4 月种子库对 7 月地上沉水植被恢复的潜在贡献。结果显示,草海各采样点现存沉水植物与底泥种子库的物种组成相似性呈现空间异质性(图 6),L6、L9 和 L15 样点的相似性最高 (SC=0.8),SC 均值为 0.56 ± 0.06 。沉水植物与底泥种子库的物种组成相似性是评估植物群落稳定性和预测生态系统演替的重要指标^[47]。李雪华等^[18]根据相似性系数将二者关系划分为高相似性 (0.50–1.00) 和低相似性 (0.00–0.50)。本研究草海 SC 均值为 0.56 ± 0.06 ,结果支持底泥种子库与沉水植被的物种组成具有较高相似性的观点,与湖泊湿地 (50.7 ± 3.8) 和沼泽湿地 (53.7 ± 3.4) 的结果较接近^[48]。底泥种子库与沉水植物的物种组成差异可能受多种因素的影响。如 (1) 采样时间:一些生长周期短的植物种子在采样前可能已经萌发成为沉水植物,而一些靠克隆繁殖的多年生植物因种子产量低,更多依赖营养体繁殖,导致其在种子库中的代表性不足^[49]。(2) 萌发条件限制:采样点的生境条件可能无法满足所有种子的萌发需求,导致部分植物种子无法在底泥中正常萌发^[50]。此外,室内萌发试验无法完全模拟野外的自然环境,导致部分种子无法在室内环境中发芽。温室中进行的萌发实验通常只能激发底泥种子库中约 60% 的种子萌发,而不能覆盖全部种子的萌发情况^[51]。

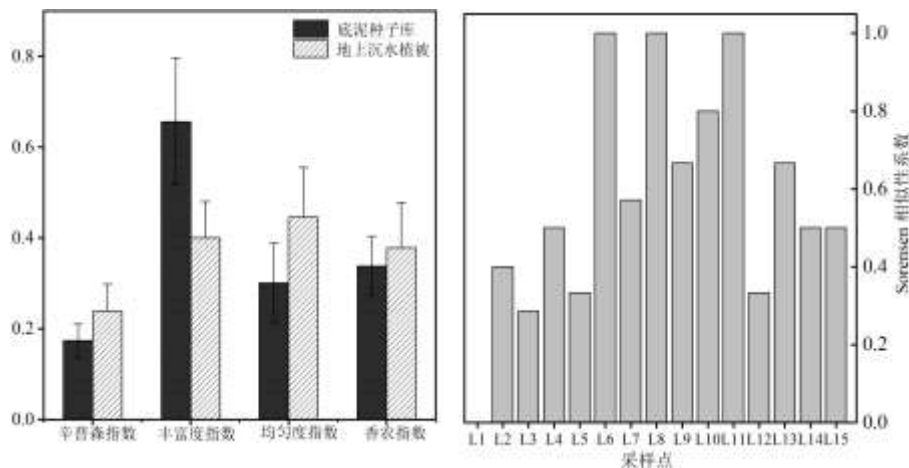


图 6 种子库与地表沉水植物的物种多样性及 Sorensen 相似性系数

Fig. 6 Species diversity and Sorensen similarity coefficients of seed banks and surface submerged vegetation

2.4 贵州草海沉水植物恢复潜力评估

2.4.1 生态恢复潜力评价体系构建 为评估草海湖区沉水植物恢复潜力,本研究遵循国际生态恢复潜力评

价框架^[52-53]，综合区域生境特征，从沉水植物群落结构、底泥种子库特征、底泥理化特性及水质特征四个层面选取指标，构建了以生态恢复潜力为目标层的评价体系，包含 4 个一级指标和 11 个二级指标（图 7）。

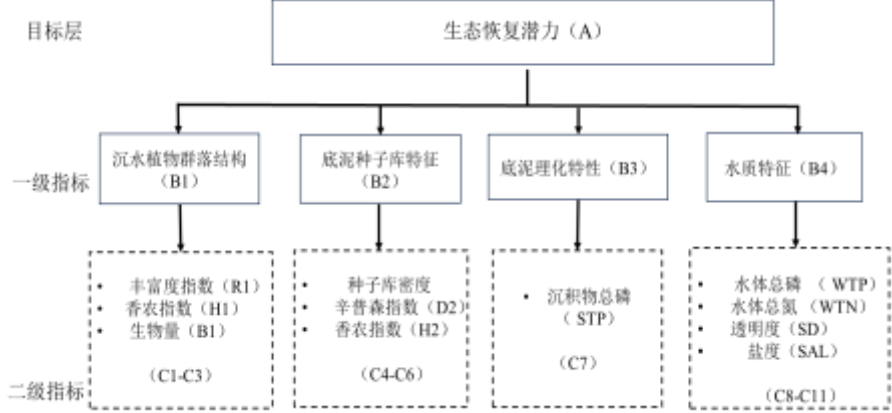


Fig. 7 Evaluation system for submerged macrophyte restoration potential in Lake Caohai

2.4.2 探索性因子分析 采用最大方差旋转后的主成分分析法确定评价指标权重。模型中 KMO 检验值为 0.62，Bartlett 球形检验显著性 p 值 <0.05 ，表明各变量间具有相关性，因子分析有效。通过特征根 >1 标准提取 4 个主成分，累积方差解释率为 82.32%（表 3）。碎石图显示第 4 主成分后特征根变化趋缓，证实成分提取数量的合理性，前 4 个主成分基本可以反映 11 个因子的信息。在成分 1 中，种子密度、D2、H2 的因子载荷系数较大，表征底泥种子库特征。成分 2 中 WTP、WTN、SD、SAL 的因子载荷系数较大，反映水质特征。成分 3 中 R1 载荷系数较大，但 H1 和 B1 存在跨因子载荷现象，结合实际情况及预期，将其界定为沉水植物群落结构特征。成分 4 中 STP 的因子载荷系数较大，表征底泥理化特性（表 3）。

表 3 指标层因子主成分载荷矩阵、特征值与方差贡献率

Tab. 3 Analysis of indicator layer factors: principal component loading matrix, eigenvalues, and variance contribution				
因子	成分			
	成分 1	成分 2	成分 3	成分 4
R1	-0.025	0.052	0.906	0.213
H1	0.33	-0.635	-0.627	0.094
B1	0.255	-0.746	-0.497	0.046
种子库密度	0.979	-0.103	-0.081	-0.036
D2	-0.924	0.133	0.145	-0.055
H2	0.972	-0.066	-0.018	-0.13
STP	-0.034	-0.088	0.17	0.921
WTP	0.404	0.643	0.137	0.022
WTN	-0.236	0.754	-0.052	0.433
SD	-0.02	-0.637	-0.066	0.21
SAL	-0.245	0.866	0.014	-0.021
特征根	3.213	3.14	1.544	1.158
方差解释率	29.206	28.549	14.035	10.525

2.4.3 指标权重的确定 权重表征特定指标在评价体系中的相对重要程度。本研究利用方差解释率计算一级指标权重，通过熵值法计算二级指标权重。综合权重为一级指标权重与对应二级指标权重相乘的值（表 4）。

2.4.4 生态恢复潜力比较及综合评价 为消除评价指标间单位和量级差异的影响，本研究采用极差归一法（min-max 标准化）对原始数据进行无量纲标准化处理，分值计算公式为 $S_i = e_i X_i$ ，其中 S_i 为第 i 个指标的分值， e_i 为第 i 个指标的权重， X_i 为第 i 个指标经过 min-max 标准化处理后的指标原始值。

表 4 生态恢复潜力综合评价指标及权重
Tab. 4 Comprehensive evaluation indicators and weights for ecological restoration potential

目标层	一级指标层	权重	二级指标层	权重	综合权重
生态系统生态恢复潜力综合评价指数	沉水植物	35.48	R1	24.13	8.56
			H1	22.01	7.81
			B1	53.86	19.11
	底泥种子库	34.68	种子库密度	81.51	28.27
			D2	0.02	0.01
			H2	18.47	6.41
	沉积物特性	17.05	STP	100.00	17.05
			WTP	45.89	5.87
			WTN	13.62	1.74
	水质特征	12.79	SD	40.12	5.13
			SAL	0.38	0.05

表 5 各样点生态恢复潜力综合得分
Tab.5 Comprehensive score of the ecological restoration potential of sample sites

样点	沉水植物	底泥种子库	沉积物特性	水质特征	总计
L1	0.00	3.62	3.67	4.50	11.79
L2	8.20	9.50	10.28	6.01	33.99
L3	8.33	23.90	8.61	5.71	46.55
L4	6.40	4.34	7.97	7.53	26.24
L5	9.41	1.41	12.52	4.49	27.83
L6	5.71	1.66	11.57	4.68	23.62
L7	29.72	6.29	12.13	5.78	53.93
L8	18.62	22.32	0.00	6.24	47.18
L9	17.96	34.68	12.21	7.19	72.04
L10	13.78	1.12	14.03	4.36	33.29
L11	5.34	0.01	14.80	10.28	30.43
L12	5.78	1.97	6.66	9.71	24.12
L13	6.70	17.16	17.05	8.39	49.30
L14	9.61	5.02	7.98	3.98	26.58
L15	6.52	4.38	7.31	5.81	24.02

各样点生态恢复潜力综合得分呈现显著差异（表 5），其中 L9 综合得分最高（72.04），L1 综合得分最低（11.79），这主要归因于其特殊的地理位置与生态条件，该区域靠近岸边，易受风浪扰动的影响，导致水质及底泥条件较差，沉水植物大部分时间物种数不多，物种单一，生物量较低，最终造成其综合得分偏低。

根据生态恢复潜力综合得分，草海沉水植物生态恢复潜力可划分为 4 个等级（表 6）。结合各点位 11 项指标得分、综合得分及水质底泥状况，将草海全湖划分为三个恢复区域，“优先恢复区”、“重点恢复区”和“过渡区”（图 8）。“优先恢复区”包括三级与四级潜力区域（西南-南部-东北湖区），主成分分析（PCA）显示该区域受水体透明度、溶解氧、种子密度和沉水植物生物量等正向因子影响，表明该区域水体理化条件优良，生态系统具备较强自我调节能力，宜采取生态维持与适度保护策略，重点保障现有水质与生境稳定性。（2）“重点恢复区”包括一级潜力区域（东南-湖心区），主要受底泥有机质、沉积物总磷、水体总氮及沉积物总氮等营养盐因子影响，说明该区域氮磷负荷较高。同时该区域种子库密度和沉水植物生物量均最低，水体透明度低于 40 cm，严重制约沉水植物恢复。（3）“过渡区”包括一级（出水口 L1）和二级（西北-北部湖区）潜力区域，该区域位于下风向，常年风浪扰动强度大，水体浊度高，既不具备优先恢复区的良好水环境与种子库条件，也未达到重点恢复区的高污染胁迫水平，表现出显著的过渡性特征。

综合分析表明，草海水域生态恢复潜力呈现空间异质性，西南部与东北部湖区生态恢复潜力较高，而湖心大部分湖区及出水口近岸区恢复潜力较低。各区域主控环境因子存在差异，建议基于生态恢复潜力评估结果及区域环境特征，实施分区恢复策略：（1）“优先恢复区”环境条件较优且种质资源丰富，但开阔水域特征使其易受风浪扰动影响，不利于种子或幼苗的定植，因此，为进一步保护和巩固已有的恢复优势，建议在沉水植物种子萌发关键期（5-7 月）实施消浪设施，降低风浪对种子定植的影响，促进底泥种子库

的自然萌发过程。(2)“重点恢复区”内源污染严重且沉水植物种子密度最低,建议开展内源污染控制与水质净化措施,为种子萌发和植物生长创造可恢复生境,在此基础上人工补种耐污先锋物种,提高沉水植物群落恢复的成功率。(3)“过渡区”环境条件适中但种子库资源相对匮乏且常年受风浪扰动强度大,建议作为最后恢复区域。恢复顺序建议采用“优先恢复区-重点恢复区-过渡区”的递进式恢复顺序,前两个区域完成沉水植物重建后,其形成的植被群落可通过削弱风浪扰动、改善局部水质等机制有效缓解过渡区的生态恢复阻力,促进沉水植物群落的梯度扩张。为更好地发挥草海底泥种子库的恢复潜力,建议在未来的工作中开展定期监测与管理,跟踪种子库密度和植物群落的变化,评估恢复效果,并根据实际情况动态调整管理措施。

表 6 生态恢复潜力指数的等级划分
Tab. 6 Classification of ecological restoration potential index grades

样点	生态恢复潜力评价指数综合得分	生态恢复潜力等级
L1、 L4、 L5、 L6、 L12、 L14 、 L15	<30.00	一级 (低)
L2、 L10、 L11	[30.00–40.00)	二级 (较低)
L3、 L7、 L8、 L13	[40.00–60.00)	三级 (中等)
L9	≥60.00	四级 (高)

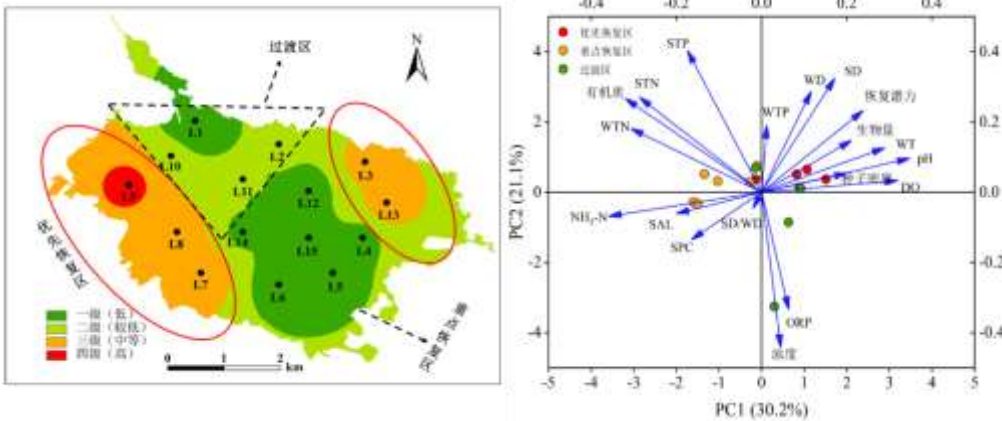


图 8 草海沉水植物恢复分区 (左) 与不同恢复分区环境因子的主成分分析 (右)

Fig. 8 Submerged macrophyte restoration zones in Lake Caohai (left) and principal component analysis (PCA) of environmental factors in different restoration zones (right)

3 结论与展望

当前草海底泥沉水植物种子库保存良好,且储量较高,耐污染及适应性强的普生轮藻为优势物种,对种子库贡献显著,其种子库密度占种子库总量的 93%,显著高于其他物种。草海西南部和东北部近岸湖区生态恢复潜力较高,而湖心大部分区域及出水口附近恢复潜力较低。基于生态恢复潜力综合评价,将草海划分为优先恢复区、重点恢复区和过渡区,应有序实施分区恢复策略:在优先恢复区,营造良好生境促进种子萌发,实现自我恢复,同步提升物种多样性与生态系统稳定性;重点恢复区需首先开展内源污染控制与水质净化,为种子萌发和植物生长创造适宜环境,在此基础上人工补种先锋物种;过渡区应作为最后恢复区域,待前两个区域完成沉水植物重建,风浪扰动明显削减后,开展种子库补植等措施,逐步恢复沉水植物群落。

本研究通过系统评估草海沉水植物种子库空间分布特征与恢复潜力,提出了分区恢复策略,但仍存在一定局限性。室内萌发实验虽能系统表征种子活性,但无法完全模拟野外复杂环境,可能导致种子萌发率被高估。此外,单次采样未能揭示种子库的季节动态与年际波动规律。未来研究建议开展种子库的长期监测,明晰其季节性波动与年际演替规律,为恢复策略的动态调整(如人工补种时机、水位调控阈值等)提供科学支撑。

4 参考文献

[1] Auffret AG, Ladouceur E, Haussmann NS et al. A Global Database of Soil Seed Bank Richness, Density, and Abundance. *Ecology*,

- 2024, 105(11): e4438. DOI: 10.1002/ecy.4438.
- [2] Li W, Liu GH, Zhou J et al. Studies on the Seed Bank of Freshwater Wetland: A review. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22 (3) : 395-402. [李伟, 刘贵华, 周进. 淡水湿地种子库研究综述. 生态学报, 2002, 22(3):395-402.]
- [3] van der Valk AG, Davis CB. The seed banks of prairie glacial marshes. *Canadian Journal of Botany*, 1976, 54(15):1832-1838. DOI: 10.1139/b76-197.
- [4] Ye C, Liu J, Yu HC et al. General seed banks and seedling banks of 3 dominant submerged macrophyte communities in east Taihu Lake. *Ecology and Environmental Science*, 2008, (3):1091-1095. [叶春, 刘杰, 于海婵等. 东太湖3种沉水植物群落区底泥种子库与幼苗库. 生态环境, 2008, (3) : 1091-1095.]
- [5] Hou ZY, Chen XS, Xie YH et al. Characteristics of soil seed bank and its relationship with aboveground vegetation in Lake Dongting. *Journal of Lake Sciences*, 2012, 24(2): 287-293. DOI: 10.18307/20120218. [侯志勇, 陈心胜, 谢永宏等. 洞庭湖湿地土壤种子库特征及其与地表植被的相关性. 湖泊科学, 2012, 24(2) : 287-293.]
- [6] 王慧, 高欣, 李国爽. 湿地种子库及其植被恢复研究进展. 中国农业文摘-农业工程, 2018, 30(1): 22-23+60.
- [7] Dong B, Yuan LY, Ren AT. Study on the relationship between soil seed bank and aquatic vegetation in Longgan Lake National Nature Reserve from 2004 to 2019. *Journal of Hydroecology*, 2024, 1-11. DOI:10.15928/j.1674-3075.202404300168. [董彪, 袁龙义, 任爱天. 龙感湖国家级自然保护区2004-2019年土壤种子库与水生植被关系研究. 水生生态学杂志, 2024, 1-11.]
- [8] Chen ZL, Feng Y, Zhu ZH et al. Review of research hotspots on plant ecology of the water level fluctuation zones of reservoirs: A case study of the Three Gorges Reservoir. *Pratacultural Science*, 2024, 41 (08): 1909-1923. [陈忠礼, 冯源, 朱姿涵等. 水库消落带植物生态学研究热点——以三峡水库为例. 草业科学, 2024, 41 (08): 1909-1923.]
- [9] 范秀磊, 石上, 戚玉浩等. 沉水植物对水体的净化及工程实践. 江苏水利, 2024, (8): 54-57.
- [10] Zhang Y, Jeppesen E, Liu X et al. Global loss of aquatic vegetation in lakes. *Earth-Science Reviews*, 2017, 173: 259-265. DOI:10.1016/j.earscirev.2017.08.013.
- [11] Botrel M, Maranger R. Global historical trends and drivers of submerged aquatic vegetation quantities in lakes. *Global Change Biology*, 2023, 29(9): 2493-2509. DOI:10.1111/gcb.16619.
- [12] Luo J, Duan H, Xu Y et al. Global trends and regime state shifts of lacustrine aquatic vegetation. *The Innovation*, 2025(6)3:100784. DOI:10.1016/j.xinn.2024.100784.
- [13] Wu ZG, Xiong W, Hou HW. Diversity pattern and protection of aquatic plants in the Yangtze River Basin. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2019, 43(S1):27-41. DOI: 10.7541/2019.164. [吴志刚, 熊文, 侯宏伟. 长江流域水生植物多样性格局与保护. 水生生物学报, 2019, 43(S1):27-41. DOI: 10.7541/2019.164.]
- [14] Yang C, Shen X, Wu J et al. Driving forces and recovery potential of the macrophyte decline in East Taihu Lake. *Journal of Environmental Management*, 2023,342:118154. DOI:10.1016/j.jenvman.2023.118154.
- [15] 陶花, 潘继征, 沈耀良等. 漏湖沉水植物概况及退化原因分析. 环境科技, 2010, 23(5):64-68.
- [16] Qi HY, Yu DK, Xu ZW et al. Current Status of and Conservation Strategy for Typical Wetland Plants in Poyang Lake. *Wetland Science and Management*, 2022, 18(1):60-63. [祁红艳, 余定坤, 徐志文等. 鄱阳湖典型湿地植物现状与保护策略. 湿地科学与管理, 2022, 18(1):60-63.]
- [17] Song XX, Cai XB, Wang Z et al. Community change of dominant submerged macrophyte in Lake Honghu since the 1950s. *Journal of Lake Sciences*, 2016, 28(4):859-867. [宋辛辛, 蔡晓斌, 王智等. 1950s以来洪湖主要优势沉水植物群落变化. 湖泊科学, 2016, 28(4):859-867.]
- [18] Li XH, Ji FL, Liu ZM et al. Relationship between soil seed bank and vegetation: Role of seeds in ecosystem restoration. *Chinese Journal of Ecology*, 2024, 43(7): 1966-1972. DOI:10.13292/j.1000-4890.202407.035. [李雪华, 季飞龙, 刘志民等. 土壤种子库与植被的关系: 种子在生态系统恢复中的作用. 生态学杂志, 2024, 43(7): 1966-1972.]
- [19] Xu C, Li EH, Yang J et al. Identifying Submerged Plant Restoration Areas Based on Underwater Light Conditions and Seed Bank Distribution: A Case Study of Jinhu. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2020, 44(5): 1111-1118. DOI:10.7541/2020.129. [徐超, 厉恩华, 杨娇等. 基于水下光照条件和种子库分布指示沉水植物恢复区:以金湖为例. 水生生物学报, 2020,44(5): 1111-1118.]
- [20] Lu J, Wang HB, Pan M et al. Using sediment seed banks and historical vegetation change data to develop restoration criteria for a eutrophic lake in China. *Ecological Engineering*, 2012, 39: 95-103. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2011.11.006.
- [21] Li GB, Li L, Pan M et al. The degradation cause and pattern characteristics of the Lake Dianchi ecosystem and new restoration strategy for the ecoregion and step-by-step implementation. *Journal of Lake Sciences*, 2014, 26(04):485-496. [李根保, 李林, 潘珉等. 滇池生态系统退化成因、格局特征与分区分步恢复策略. 湖泊科学, 2014, 26(04):485-496.]
- [22] Li AY, Huang XF, Tian YB et al. Chlorophyll a variation and its driving factors during phase shift from macrophyte-to phytoplankton-dominated states in Caohai Lake, Guizhou, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2023,47(08):1171-1181. DOI: 10.17521/cjpe.2022.0181. [李安艳, 黄先飞, 田源斌等. 贵州草海草-藻型稳态转换过程中叶绿素a的变化及其影响因子. 植物生态学报, 2023, 47(08):1171-1181.]
- [23] Yu W, Yang HQ, Chen JA et al. Organic Phosphorus Mineralization Dominates the Release of Internal Phosphorus in a Macrophyte-Dominated Eutrophication Lake. *Frontiers in Environmental Science*, 2022, 9: 1-12. DOI: 10.3389/fenvs.2021.812834.
- [24] Dai LL, Chen X, Li LZ et al. Diversity and Community Succession of Aquatic Plants in Caohai, Guizhou. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2020, 44(4): 869-876. DOI:10.7541/2020.104. [代亮亮, 陈翔, 李莉杰等. 贵州草海水生植物多样性及群落演替. 水生生物学报, 2020, 44(4): 869-876.]
- [25] Chao F, Jiang X, Wang X et al. Water Level Fluctuation Rather than Eutrophication Induced the Extinction of Submerged Plants in Guizhou's Caohai Lake: Implications for Lake Management. *Water*, 2024, 16(5):772. DOI:10.3390/w16050772.
- [26] Li BN, Ma SY, Liu Y et al. Investigation and Analysis of Influencing Factors of Submerged Plants in Caohai, Guizhou. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2024, 48(12): 2042-2054. DOI: 10.7541/2024.2024.0161. [李贝宁, 马思怡, 刘懿等. 贵州草海沉水植物现状调查与影响因素分析. 水生生物学报, 2024, 48(12): 2042-2054.]
- [27] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志. 北京: 科学出版社, 1998.
- [28] Yang HQ, Chen JA, Liu W et al. Distribution Characteristics and Controlling Factors of Nutrient Elements in Caohai Sediments. *Earth and Environment*, 2016, 44(3): 297-303. DOI:10.14050 / j.cnki.1672-9250.2016.03.003 [杨海全, 陈敬安, 刘文等. 草海沉积物营养元素分布特征与控制因素. 地球与环境, 2016, 44(3): 297-303.]

- [29] Wang X, Zhao W. Spatial distribution patterns of *Themeda japonica* populations and relationships with soil factors a regional scale. *Pratacultural Science*, 2019, 36(2): 335-345. DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2018-0290. [王馨, 赵威. 区域尺度下黄背草种群空间分布格局及其与土壤因子的关系. 草业科学, 2019, 36(2): 335-345.]
- [30] Parker VT, Kelly VR. Seed banks in California chaparral and other Mediterranean climate shrublands. *Ecology of Soil Seed Banks*, 1989: 231-255. DOI:10.1016/B978-0-12-440405-2.50016-6.
- [31] Zhang ZQ, Shu WS, Lan CY et al. Uptake and Translocation of Heavy Metals in Dominant Plants of Soil Seed Banks Introduced to a Lead/Zinc Mine Pond. *Acta phytocologica Sinica*, 2000, 25(3): 306-311. DOI:10.1016/B978-0-323-91675-2.00018-4.
- [32] Li HY, Mo XQ, Hao C. Review and Prospects of Soil Seed Bank Research in the Past 30 Years. *Ecology and Environmental Science*, 2009, 18(2): 731-737. DOI:10.16258/j.cnki.1674-5906.2009.02.037. [李洪远, 莫训强, 郝翠. 近30年来土壤种子库研究的回顾与展望. 生态环境学报, 2009, 18(2): 731-737.]
- [33] Chan X, Liu G. The relationship of seed banks to historical dynamics and reestablishment of standing vegetation in an aquaculture lake. *Aquatic Botany*, 2013, 108:48-54. DOI:10.1016/j.aquabot.2013.03.004.
- [34] Xu LX, Cheng Y, Liu F et al. Seed Banks of a Lakeshore Wetland, Gahai Lake. *Plant Science Journal*, 2011, 29(05):589-598. [徐凌翔, 程玉, 刘帆等. 尕海湖滨湿地种子库初探. 植物科学学报, 2011, 29(05):589-598.]
- [35] Liu Y, Liao N, Jia C et al. Non-Additive Effects of Inundation Duration and Soil Depth on Seed Banks in a Shoreline Meadow of Poyang Lake in China. *Diversity*, 2024, 16(1):3. DOI:10.3390/d16010003.
- [36] Yan SW, Pan M, Li Y et al. Spatiotemporal characteristics and restoration potentiality of seed banks of aquatic plants in Dabokou wetland in Lake Dianchi, southwest China. *Journal of Lake Sciences*, 2021, 33(2): 529-538. DOI:10. 18307 /2021. 0217. [严拾伟, 潘珉, 李杨等. 滇池大泊口水域水生植物种子库时空特征与恢复潜力. 湖泊科学, 2021, 33(2): 529-538.]
- [37] Cherry JA, Gough L. Temporary floating island formation maintains wetland plant species richness: The role of the seed bank. *Aquatic Botany*, 2006, 85(1): 29-36. DOI: 10.1016/j.aquabot.2006.01.010.
- [38] Capon SJ. Effects of flooding on seedling emergence from the soil seed bank of a large desert floodplain. *Wetlands*, 2007, 27(4): 904-914. DOI: 10.1672/0277-5212(2007)27[904:EOFOSE]2.0.CO;2.
- [39] Kildisheva OA, Dixon KW, Silveira FA et al. Dormancy and germination: making every seed count in restoration. *Restoration Ecology*, 2020, 28(S3): S256-S265. DOI: 10.1111/rec.13140.
- [40] Liu RX, Zhan J, Shi ZH et al. The relationship between the soil seed bank in the drawdown zone of the Danjiangkou Reservoir and the aboveground vegetation and environment. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(3): 801-808. DOI:10.13287/j.1001-9332.2013.0237. [刘瑞雪, 詹娟, 史志华等. 丹江口水库消落带土壤种子库与地上植被和环境的关系. 应用生态学报, 2013, 24(3): 801-808.]
- [41] Zhang J, Zhao H. Spatial patterns of main species of the grassland community in the recovering succession in Horqin sandy land. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, (2):1-6. [张继义, 赵哈林. 科尔沁沙地草地植被恢复演替进程中群落优势种群空间分布格局研究. 生态学杂志, 2004, (2):1-6.]
- [42] Cui NX, Wu J, Cheng SP et al. Research progress of seed bank for the restoration of wetland vegetation. *Journal of Lake Sciences*, 2013, 25 (01): 1-8. [崔娜欣, 吴娟, 成水平等. 湿地种子库及其植被恢复研究进展. 湖泊科学, 2013, 25 (01): 1-8.]
- [43] Zhang JF, Ge SS, Li YT et al. Dispersal and germination of nine maple (*Acer spp*) trees in the Changbai Mountain area. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(04):1441-1449. [张金峰, 葛树森, 李玉堂等. 长白山9种槭树的翅果扩散及种子萌发研究. 生态学报, 2022, 42(04):1441-1449.]
- [44] Benvenuti S, Mazzoncini M. Soil Physics Involvement in the Germination Ecology of Buried Weed Seeds. *Plants*. 2019; 8(1):7. DOI:10.3390/plants8010007.
- [45] Vandvik V, Klanderud K, Meineri E et al. Seed banks are biodiversity reservoirs: species–area relationships above versus below ground. *Oikos*, 2016, 125(2): 425-436. DOI:10.1111/oik.02022.
- [46] Luo J, Chen J, Guo X et al. The Characteristics of Soil Seed Bank in Karst Area under Different Soil Thickness Niches. *Journal of Southwest University Natural Science Edition*, 2022, 44(9): 2-10. DOI:10.13718/j.cnki.xdzk.2022.09.001. [罗杰, 陈金艺, 郭旭曼等. 喀斯特不同土壤厚度小生境下土壤种子库特征. 西南大学学报(自然科学版), 2022, 44(09):2-10.]
- [47] Tan R, Du F, Li W et al. Characteristics of Soil Seed Bank in Napahai Lake Wetland under Different Disturbances. *Journal of West China Forestry Science*, 2013, 42(6): 45-50. DOI: 10.16473/j.cnki.xblykx1972.2013.06.003. [谭芮, 杜凡, 李伟等. 不同干扰条件下纳帕海湿地土壤种子库的特征研究. 西部林业科学, 2013, 42(6): 45-50.]
- [48] Liu QY, Jiang M, Lu XG et al. A review of similarity between soil seed bank and aboveground vegetation in wetlands. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(24) : 7465-7474. DOI: 10.5846 /stxb201303120403. [刘庆艳, 姜明, 吕宪国等. 湿地土壤种子库与地上植被相似性关系研究评述. 生态学报, 2014, 34(24) : 7465-7474.]
- [49] Li YJ, Bao WK, Wu FZ. Soil seed bank and natural regeneration potential of shrubland in dry valleys of Minjiang River. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(2): 399-407. [李彦娇, 包维楷, 吴福忠. 岷江干旱河谷灌丛土壤种子库及其自然更新潜力评估. 生态学报, 2010, 30(02):399-407.]
- [50] Kildisheva OA, Dixon KW, Silveira FA et al. Dormancy and germination: making every seed count in restoration. *Restoration Ecology*, 2020, 28(S3): S256-S265. DOI: 10.1111/rec.13140.
- [51] Liu RX, Zhan J, Shi ZH et al. Soil seed bank and its correlations with aboveground vegetation and environmental factors in water level fluctuating zone, Danjiangkou Reservoir, Central China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(3): 801-808. DOI:10.13287/j.1001-9332.2013.0237. [刘瑞雪, 詹娟, 史志华等. 丹江口水库消落带土壤种子库与地上植被和环境的关系. 应用生态学报, 2013, 24(3): 801-808.]
- [52] 张怡. 深圳市干湿两季土壤种子库调查及其生态恢复潜力研究[学位论文]. 广东:仲恺农业工程学院, 2023.
- [53] Tang YY, Xie YG, Yu GG et al. Assessment of Restoration Potential of Degraded Karst Vegetation in North-western Guizhou, SW China. *Mountain Research*, 2012, 30(5): 528-534. DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.2012.05.006. [唐樱殷, 谢永贵, 余刚国等. 黔西北喀斯特退化植被恢复潜力评价. 山地学报, 2012, 30(5): 528-534.]