

DOI: 10.11913/PSJ.2095-0837.24300

CSTR: 32231.14.PSJ.2095-0837.24300

高玉国, 夏云捷, 徐琳, 张秀丽, 孔维健, 张慧, 邢伟. 沉水植被的建构功能及其在我国富营养化湖泊中的退化原因和生态恢复策略[J]. 植物科学学报, 2025, 43 (3): 415-424

Gao YG, Xia YJ, Xu L, Zhang XL, Kong WJ, Zhang H, Xing W. Structural functions of submerged macrophytes and the cause of their degradation and ecological restoration strategies in eutrophic lakes of China[J]. *Plant Science Journal*, 2025, 43 (3): 415-424

沉水植被的建构功能及其在我国富营养化湖泊中的退化原因和生态恢复策略

高玉国^{1,2}, 夏云捷^{1,2}, 徐琳^{1,2}, 张秀丽^{1,2}, 孔维健^{1,2}, 张慧^{1,2}, 邢伟^{3,4*}

(1. 济宁市南四湖自然保护区服务中心, 山东济宁 272100; 2. 山东微山湖湿地生态系统定位观测研究站, 山东济宁 272100; 3. 中国科学院武汉植物园, 中国科学院水生植物与流域生态重点实验室, 武汉 430074; 4. 中国科学院武汉植物园水生植物研究中心, 武汉 430074)

摘要: 沉水植被是湖泊水生植物的重要组成部分, 它的有无和群落结构的差异能对浅水湖泊生态系统的生物和环境时空分异产生显著影响。沉水植被的建立是湖泊稳态转换的关键条件和基础, 也是控制湖泊生态系统物质流、能量流的有效手段。然而, 由于自然和人为等因素的影响, 我国大部分湖泊已进入富营养状态。沉水植被的退化是富营养化湖泊生态失衡的核心问题之一, 其恢复不仅对湖泊生态系统的健康和稳定具有重要意义, 也对实现区域经济与生态环境的协调发展具有深远影响。本文系统梳理分析了浅水湖泊沉水植物的建构功能及其在富营养化湖泊退化中的表现、成因及修复策略, 旨在为湖泊生态修复提供理论支持和实践参考, 助力我国浅水湖泊生态保护事业的可持续发展。

关键词: 富营养化湖泊; 沉水植被; 生态恢复; 物种多样性; 环境因素

中图分类号: X171.4

文献标识码: A

文章编号: 2095-0837 (2025) 03-0415-10

Structural functions of submerged macrophytes and the cause of their degradation and ecological restoration strategies in eutrophic lakes of China

Gao Yuguo^{1,2}, Xia Yunjie^{1,2}, Xu Lin^{1,2}, Zhang Xiuli^{1,2}, Kong Weijian^{1,2}, Zhang Hui^{1,2}, Xing Wei^{3,4*}

(1. *Jining Nansihu Nature Reserve Service Center*, Jining, Shandong 272100, China; 2. *Shandong Weishan Lake Wetland Ecosystem Observation Research Station*, Jining, Shandong 272100, China; 3. *CAS Key Laboratory of Aquatic Botany and Watershed Ecology*, Wuhan Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430074, China; 4. *Aquatic Plant Research Center*, Wuhan Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: Submerged macrophytes constitute a critical structural and functional component of lake ecosystems, exerting profound influence over the spatial and temporal dynamics of biotic communities and physico-chemical conditions, particularly in shallow lakes. Their establishment underpins stability by modulating nutrient cycling, light penetration, and trophic interactions, thereby serving as a regulatory nexus for ecosystem processes. In China, widespread eutrophication driven by both anthropogenic pressures and natural disturbances has led to the extensive degradation of submerged macrophytes, contributing to ecological imbalance. Restoration of submerged vegetation is crucial not only for the health and stability of lake ecosystems

收稿日期: 2024-12-16, 接受日期: 2025-01-20。

基金项目: 济宁市重点研发计划项目(软科学项目 2020JNZC017); 国家自然科学基金项目(32170375)。

作者简介: 高玉国(1978-), 男, 高级工程师, 研究方向为湿地与野生动植物资源保护与利用(E-mail: gyg2000@yeah.net)。

* 通信作者(Author for correspondence. E-mail: xingwei108@wbpcas.cn)。

but also for promoting coordinated development between regional economies and the ecological environment. This review systematically summarizes the degradation patterns, causal mechanisms, and restoration strategies of submerged macrophytes in eutrophic lakes of China, providing a theoretical foundation and practical guidance for large-scale ecological rehabilitation and long-term sustainability of shallow freshwater ecosystems.

Key words: Eutrophic lakes; Submerged macrophytes; Ecological restoration; Biodiversity; Environmental factors

湖泊作为地球生态系统的重要组成部分，不仅在维持生物多样性、调节区域气候以及提供水资源等方面发挥着重要作用，还为人类生产和生活提供了丰富的生态服务^[1]。然而，随着人类社会的发展和工业化进程的加快，湖泊生态系统面临着越来越严重的威胁，其中富营养化问题尤为突出^[2,3]。富营养化可导致湖泊水质恶化、生物多样性降低、生态功能退化，并引发一系列环境和社会问题。如何有效治理富营养化湖泊，恢复其生态平衡，已成为全球生态学与环境科学领域关注的核心议题^[3,4]。

在健康的浅水湖泊生态系统中，沉水植被是至关重要的生物组分，是湖泊健康运转的关键类群。沉水植被的建立是湖泊稳态转换的关键条件和基础，也是控制湖泊生态系统物质流、能量流的有效手段^[5]。然而，随着湖泊富营养化程度的加剧，沉水植被严重退化，表现为物种多样性下降、生物量减少、分布范围缩减甚至完全消失。这种退化不仅是湖泊生态恶化的结果，也是湖泊进一步富营养化的推动因素，形成了“富营养化-沉水植被退化-生态失衡”的恶性循环。

近年来，针对富营养化湖泊沉水植被退化问题，已开展了大量研究和治理工作，如国内的太湖、巢湖、滇池等以及日本的霞浦湖、英国的内伊湖、美国的麦迪逊湖等^[5-9]。然而，沉水植被的恢复难度较大，成效往往受到诸多因素的制约，如水体氮磷负荷过高、水体透明度低、底泥污染严重以及食物网结构失衡等^[6,7]。同时，湖泊生态系统的复杂性和区域差异性也使得沉水植被退化的成因机制和修复策略具有较强的地方性特征^[9]。尽管如此，沉水植被恢复仍是实现湖泊生态修复的关键环节，是推动湖泊从“浊水态”向“清水态”转变的重要手段^[9]。

基于此，本文系统梳理了沉水植被退化后的表现与生态后果，深入分析了富营养化湖泊中沉

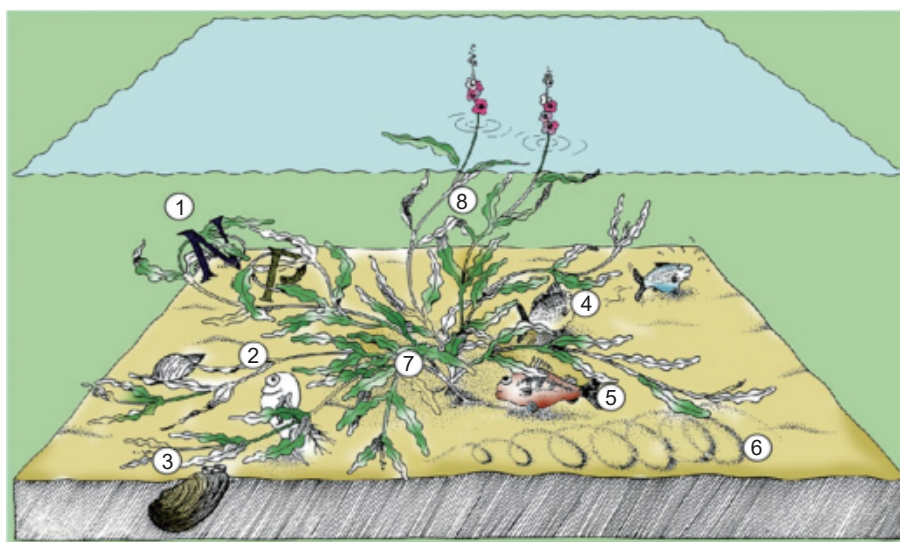
水植被的退化机制，并结合实践经验探讨了沉水植被生态恢复的有效策略，以期为我国富营养化浅水湖泊的生态修复工作提供科学依据和参考。

1 沉水植被在湖泊生态系统中的建构功能

沉水植被是湖泊水生植物的重要组成部分，主要指完全生长在水下、通过光合作用获取能量的植物类群，包括苦草（*Vallisneria spiralis* (Lour.) H. Hara）、金鱼藻（*Ceratophyllum demersum* L.）、黑藻（*Hydrilla verticillata* (L. f.) Royle）等物种。沉水植被在湖泊生态系统中发挥着重要功能，称之为建构功能（Structuring role）^[5]（图 1），即沉水植被的有无和群落结构的差异对浅水湖泊生态系统生物和环境时空分异的影响，主要包括：（1）水质净化：通过吸收水体中的氮、磷等营养物质，降低湖泊的富营养化程度；（2）抑制藻华：通过与藻类竞争营养物质（氮、磷等）和分泌化感物质（主要为长链脂肪酸、简单酚酸、酯、醇、醚、酮、萜及菲类化合物等^[10]），有效控制水华藻类的过度繁殖；（3）稳定底泥：沉水植被的根系能够稳定沉积物，减少悬浮颗粒和内源污染物的再次释放；（4）栖息地与食物来源：为鱼类、无脊椎动物和其他水生生物提供栖息地和食物来源，有助于维持湖泊生物多样性；（5）增强反硝化：根系分泌物和植物残体等可为反硝化细菌等微生物提供碳源，增强水体脱氮过程。

2 沉水植被退化的表现与生态后果

沉水植被是湖泊生态系统中关键的初级生产者和结构性组成部分，其健康状况直接影响湖泊的生态平衡^[5]。当湖泊进入富营养化阶段时，沉水植被往往会经历显著的退化过程，表现为物种多样性下降、生物量减少以及空间分布缩减等多个方面。这种退化不仅是湖泊生态系统失衡的表现，



①：去除生长所需的营养盐；②：浮游动物的庇护所；③：改善大型滤食动物的生存环境；④：偏好小型肉食性鱼类；⑤：小型鱼类庇护所；⑥：稳定沉积物，减少再悬浮；⑦：增强反硝化；⑧：化感作用。

①: Removal of growth-limiting nutrients; ②: Refuge for zooplankton; ③: Improvement of habitat conditions for macro filter-feeders; ④: Preference for small perch over small roaches; ⑤: Refuge for small perch and pikes; ⑥: Sediment stabilization and reduction of resuspension; ⑦: Enhancement of denitrification; ⑧: Potential allelopathic effects.

图1 湖泊沉水植被的建构功能（引自 Jeppesen 等^[5]）

Fig. 1 Structural functions of submerged macrophytes in lakes (cited from Jeppesen *et al.*^[5])

也是其进一步恶化的驱动因素。

2.1 沉水植被退化的主要表现

2.1.1 物种多样性下降

富营养化湖泊中，沉水植被的物种多样性显著降低，表现为敏感物种的消失和耐受性物种的单一化^[11]。一些对水质要求较高的沉水植物（如轮藻（*Chara vulgaris* L.）、海菜花（*Ottelia acuminata* (Gagnep.) Dandy）等）往往首先受到富营养化、浑浊度增加等环境压力的影响而逐渐消失，而少数耐受性较强的种类（如金鱼藻、穗状狐尾藻（*Myriophyllum spicatum* L.）、篦齿眼子菜（*Stuckenia pectinatus* (L.) Börner）等）逐渐占据主导地位，导致生态系统的植物群落趋于单一化。这种物种多样性的下降削弱了生态系统的稳定性和抗干扰能力^[12]。

2.1.2 生物量降低

沉水植被的生物量通常受光照、水体透明度及营养物质供给的综合影响^[13]。富营养化湖泊中，由于藻类水华的频繁暴发和悬浮颗粒浓度的增加，水体透明度显著降低，光合作用受阻，导致沉水植被的生物量减少^[14]。湖北洪湖沉水植被在2020年以后几乎消失殆尽，就是这个原因^[15]。而且，生物量降低后，沉水植被对湖泊底泥的稳定作用减

弱，进一步加剧了底泥扰动和水体浑浊的恶性循环。

2.1.3 空间分布缩减

沉水植被的分布范围通常与湖泊的水深、透明度和底质条件密切相关^[14-16]。在富营养化湖泊中，由于透明度下降，光照的有效深度显著缩小，沉水植被的分布范围往往从整个湖区逐渐缩减到沿岸浅水区，甚至完全消失^[17]。如，1961年，除湖心外，滇池大部分湖区都分布着沉水植物；到了1978年，只有沿岸分布有沉水植物；而到了2010年，仅部分沿岸有沉水植物的分布^[18]。此外，底泥污染和有机质的过量沉积会造成沉积物pH值、氧化还原电位等的改变^[19]，从而使沉水植被的分布受到限制。

2.2 沉水植被退化对湖泊生态系统的影响

沉水植被的退化不仅是富营养化湖泊的表面现象，还往往是湖泊生态系统功能全面失衡的根本原因^[9, 20]。沉水植被的退化对湖泊生态系统的影响主要有以下几个方面。

2.2.1 营养物质循环的失衡

沉水植被在湖泊营养物质循环中扮演着重要角色，其能够通过吸收固定水体中氮、磷等营养物质，有效降低湖泊的富营养化程度^[5]。此外，沉

水植物还可以通过根系泌氧、分泌有机酸以及残体碳等途径,增强湖泊沉积物中的反硝化和厌氧氨氧化等脱氮过程^[6,21]。然而,当沉水植被退化后,其对营养的调控功能随之减弱,大量氮、磷等营养物质得不到有效的吸收,进一步造成浮游藻类的过度繁殖^[9]。

2.2.2 水质恶化

通过稳定底泥、减缓水流、吸收污染物等多种途径,沉水植被能够直接改善水质^[5]。然而,当沉水植被退化后,其对底泥的稳固作用显著减弱,底泥中积累的大量有机物和营养物质容易被扰动并释放到水体中,导致水质的进一步恶化^[22]。此外,沉水植被的减少会使得悬浮颗粒和浮游藻类的浓度升高,增加水体的浑浊度,进一步影响光衰减和生态系统的稳定性^[13]。

2.2.3 藻类水华频发

沉水植被的退化会导致其与浮游藻类之间的竞争关系失衡。正常情况下,沉水植被通过吸收营养物质、遮挡光照,并分泌抑制藻类生长的化学物质^[23,24],对藻类水华起到控制作用。然而,沉水植被退化后,浮游藻类在富营养化环境中迅速占据优势,导致藻类水华的频繁发生^[9,23],进一步加剧湖泊的生态恶化,使湖泊成为重度富营养化水体。水华蓝藻的暴发会大量消耗水体中的溶解氧,不仅会使水生动物缺氧死亡,也会导致水体因缺氧而演变成黑臭水体。

2.2.4 生物多样性下降

沉水植被为湖泊生态系统中的许多生物(无脊椎动物、鱼类和其他水生植物等)提供了重要的栖息地和食物来源^[5]。沉水植被的退化会导致这些生物种群的栖息环境和食物供给减少,直接引发湖泊生态系统中食物网结构的崩塌^[25,26]。此外,由于沉水植被的退化,湖泊生态系统中一些依赖植被的敏感物种减少甚至消亡,如一些产黏性卵的鱼类^[27],最后导致整个生态系统生物多样性的显著下降。

2.2.5 湖泊生态系统稳定性下降

沉水植被的退化使湖泊生态系统的抗干扰能力和恢复能力显著下降^[28]。在健康的湖泊生态系统中,沉水植被能够通过多种生态过程维持水质和生态平衡;而在退化的湖泊中,生态系统更容易受到外部干扰(如暴雨、温度变化等)的影响,

表现为藻类水华频率增加、水质波动剧烈等^[29]。长期来看,这种不稳定性会导致湖泊生态系统逐渐从“草型清水态”向“藻型浊水态”转变^[9]。

3 富营养化湖泊沉水植被退化的成因分析

沉水植被退化是富营养化湖泊生态失衡的核心问题,其成因复杂,既涉及外部环境的变化,也与湖泊内部生态过程的失调密切相关^[9,30,31](图2)。具体来说,沉水植被退化是多种压力共同作用的结果,包括外源污染的输入、湖泊环境条件的恶化、生物生态因素的变化等。

3.1 外部环境压力

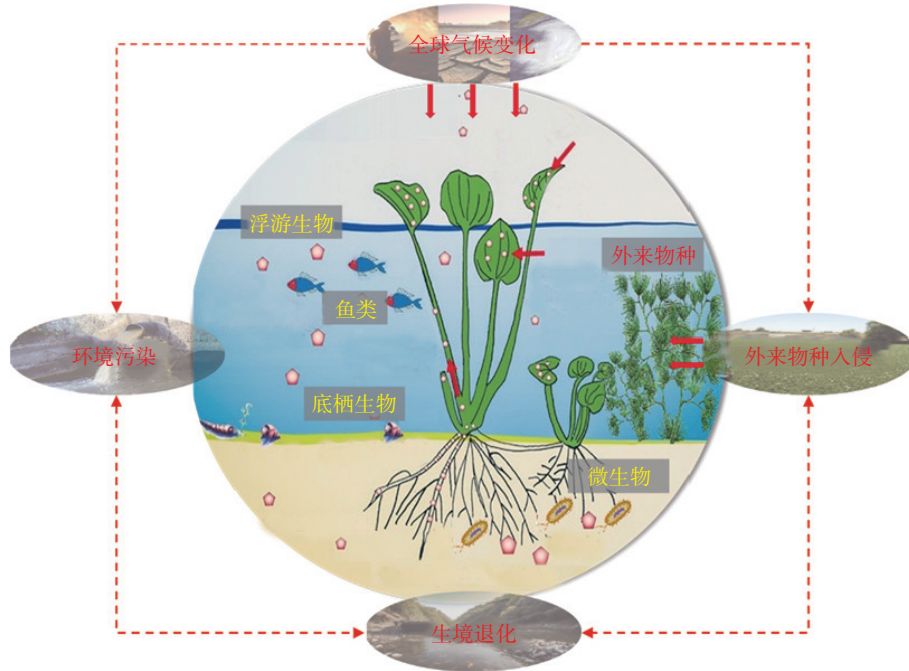
3.1.1 营养盐输入增加,水体透明度下降

湖泊富营养化的根本原因在于氮和磷等营养物质的过量输入^[3,31]。这些物质通过多种途径进入湖泊,包括农业面源污染、城市生活污水、工业废水以及大气沉降等。其中,农业面源污染是中国湖泊富营养化的主要来源,大量使用化肥和畜牧养殖废水的排放增加了氮、磷的流失^[31]。此外,流域土地利用方式的变化,如建设用地、种植和畜禽养殖等,也会显著影响湖泊的营养物质输入及水质状况^[32]。

氮磷的过量积累促进了浮游藻类的快速繁殖,导致水体透明度下降,光照条件恶化,从而严重限制了沉水植被的生长(图3)。此外,富营养化湖泊中,悬浮颗粒物(如泥沙、浮游藻类和有机质)的浓度显著增加,导致水体浑浊度升高,光衰减增强,从而限制了光的入射深度^[33]。沉水植被是光合作用驱动的植物,其生长对光照强度有着极高的要求。水体光照的减少直接抑制了沉水植被的光合作用效率,尤其是较深水域的植被更容易消失^[13,14,33]。

3.1.2 水位波动与水利工程的影响

湖泊水位波动和水利工程建设对沉水植被的生长环境影响显著^[34,35]。频繁的极端天气(暴雨、干旱等)和大量的闸坝建设可导致湖泊水位的剧烈变动^[36],使沉水植被难以适应旱涝急转或较大水位变动范围的胁迫。一方面,水位下降会导致沉水植被暴露在空气中,造成植物失水死亡;另一方面,水位突然上升会使光照条件恶化,限制植被的生长^[13,14,33]。长江中下游很多湖泊,如巢湖、洪湖等,都建有闸坝,使湖泊丧失了与长江的连

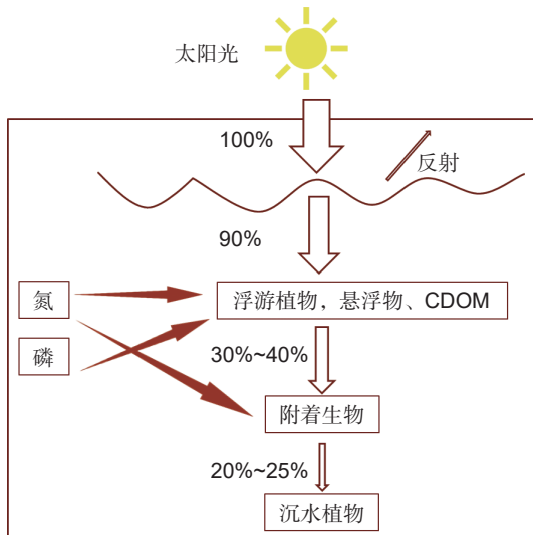


红线和箭头表示外界环境因素间的相互作用关系。

Red lines and arrows indicate interactions between external environmental factors.

图2 富营养化浅水湖泊沉水植被退化的外部环境因素

Fig. 2 External environmental factors contributing to the degradation of submerged macrophytes in shallow eutrophic lakes



波浪线代表水面；CDOM为有色溶解有机物。

Wavy line represents water surface. CDOM, colored dissolved organic matter.

图3 水下光衰减影响因素示意图 (改自 Michael Kemp 等^[33])
Fig. 3 Factors influencing underwater light attenuation (modified from Michael Kemp et al.^[33])

通，失去了自然的水文节律，导致水生植物物候与水位的严重不匹配，造成大量水生植物的死亡^[37]。此外，一些水利工程，如底泥疏浚、引水换水等

改变了湖泊的水动力条件，加速了底泥的扰动和悬浮颗粒的扩散，进一步恶化了沉水植被的生境^[38]。

3.1.3 入侵物种的竞争压力

外来入侵物种对本地沉水植被造成了严重的威胁^[39]。譬如，在中国一些湖泊中，凤眼莲 (*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms)、大藻 (*Pistia stratiotes* L.)和喜旱莲子草 (*Alternanthera philoxeroides* (Mart.) Griseb.)等水生植物因其生长迅速、竞争力强，往往占据了湖泊的表面空间，遮挡光照，抑制了本土沉水植被的生长^[40]。此外，入侵鱼类(如齐氏罗非鱼等)会扰动湖底，进一步加剧沉水植被的退化^[41]。随着全球气候变暖的影响，未来外来入侵物种的分布可能会更广泛，影响力可能更强，造成的经济损失等也会更加严重^[42, 43]。

3.2 内部生物生态因素

3.2.1 与浮游藻类的竞争

沉水植被与浮游藻类之间存在显著的资源竞争关系，如光照、营养等的竞争^[44, 45]，这也是富营养化湖泊中最为突出的物种间相互作用关系(图4)。在富营养化湖泊中，过量的氮、磷输入为浮游藻类的快速生长创造了条件，导致藻类在

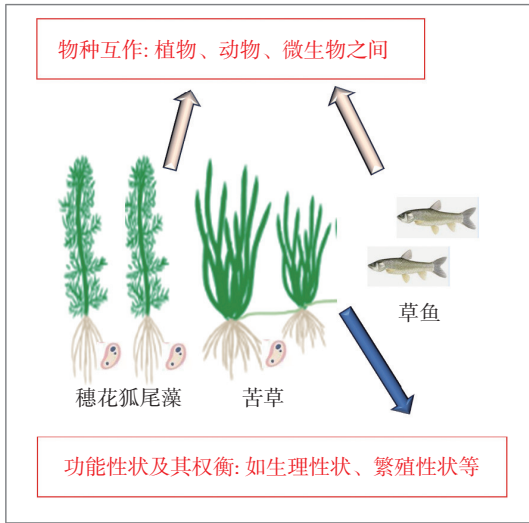


图 4 富营养化浅水湖泊沉水植被退化的内部生物生态因素
Fig. 4 Internal biological and ecological factors contributing to the degradation of submerged macrophytes in shallow eutrophic lakes

与沉水植被的竞争中占据优势。藻类水华暴发后, 不仅大量遮挡阳光, 限制沉水植被的光合作用, 还会增加水体中有机物的沉积, 导致底泥的氧化还原条件恶化^[19]。此外, 藻类死亡分解的过程中会消耗大量氧气, 形成底部缺氧环境^[46], 从而进一步抑制沉水植被的生长。

3.2.2 食物网结构变化

湖泊富营养化常伴随着食物网结构的改变, 造成食物链长度变短, 食物网结构简单化、稳定性较差^[47, 48]。植食性鱼类(如草鱼、鲤鱼等)的过度繁殖是沉水植被退化的重要内部驱动因素, 这些鱼类直接以沉水植被为食, 使后者的生物量和覆盖率大幅下降^[49]。此外, 底栖动物(如螺类、摇蚊幼虫等)的过度活动会扰动湖底沉积物, 增加水体浊度^[50], 进一步抑制沉水植被的生长。譬如, 对新西兰 37 个湖泊的研究发现, 富营养化湖泊中食物链的长度和食物网的复杂性均呈下降趋势^[51], 也就是说更长的食物链和更复杂的食物网对富营养化的抵抗力和恢复力更强。

3.2.3 沉水植物自身功能性状的变化

在湖泊富营养化产生的综合胁迫环境下, 沉水植物自身的功能性状会产生变化, 如生长-繁殖性状间的权衡等^[52-54], 沉水植物可能会分配较多的资源到繁殖系统中, 以产生大量种子来保障自身物种的延续(图 4)。在低光环境下, 冠层型沉水植物, 如竹叶眼子菜(*Potamogeton wrightii*

Morong)、穗状狐尾藻等可通过快速延长其茎节, 让植物体长到水面接受更多的光照; 而莲座型沉水植物如苦草等, 则通过提高其自身光合效率来提升光合作用^[52, 54], 或通过根状茎分株等克隆生长到异质生境中进行风险分摊, 从而适应低光环境^[55]。

4 富营养化湖泊沉水植被生态恢复的策略分析

沉水植被的恢复是富营养化湖泊生态修复的核心目标之一。由于沉水植被退化的成因复杂, 其恢复需要采取多层次、多领域的综合治理策略, 包括外源污染控制、水体环境优化、生物措施应用以及综合治理与长期监测等^[56-59]。这些策略需要从流域到湖泊的整体视角出发, 结合生态学原理和工程技术手段, 逐步恢复沉水植被的生长环境和生态功能。

4.1 控制外源污染

外源性营养物质(主要是氮、磷)的大量输入是富营养化湖泊的根本驱动因素, 控制外源污染是恢复沉水植被的前提条件^[2, 4, 31, 58, 59]。加强面源和点源治理是控制外源污染的关键措施^[60]。如, 推广精准施肥技术, 减少化肥的使用量和流失, 降低农业生产过程中氮磷的排放; 建立农田缓冲带, 如构建植物过滤带或湿地, 从流域源头截留和吸附营养物质, 阻断农业面源污染进入湖泊^[61]。此外, 还应提升流域范围内的污水处理能力, 尤其是城镇生活污水的处理水平, 降低未经处理的污水排放量, 减少生活污水对湖泊的污染; 加强工业污染源监控, 确保工业废水达标排放, 防止工业废水对湖泊造成污染; 实施“河长制”“湖长制”等政策^[62], 明确责任主体, 统筹流域内污染治理。通过加强面源和点源治理, 可以有效控制外源污染, 为沉水植被的恢复创造良好的水环境条件。

4.2 水体环境优化

湖泊底泥是内源污染的主要来源, 含有大量累积的有机物和营养物质(如氮、磷等), 其释放会持续加剧湖泊的富营养化程度, 恶化水体环境^[19, 22]。因此, 底泥治理是优化水体环境、改善沉水植物生长条件的关键措施之一。清淤作为减少内源污染的有效手段, 通过去除底泥中富含的有机物和营养物, 可显著改善沉水植物的生长环境^[63, 64]。此外, 应用底泥磷钝化材料或磷捕捉剂技

术，可以固定沉积物中的活性磷，减少内源磷的释放^[65]，从而降低藻类竞争压力，进一步为沉水植被创造适宜的光照和生长条件。其次，微生物修复技术作为一种生态友好的手段，可通过刺激或引入功能性微生物群落，加速底泥中有机物的分解，减少硫化物等有害物质的积累，改善底质的理化环境，促进沉水植被的根系发育和生长稳定性^[66]。

水体环境的优化不仅局限于底泥治理，还需综合调控湖泊的水文条件和营养物质浓度。科学调控水位是维持沉水植被生态系统稳定的重要措施，通过避免水位的剧烈波动，可以降低底泥悬浮问题，减少水体浑浊度，保障沉水植被的光合作用需求^[67]。此外，引水和换水工程也是稀释水体中氮、磷浓度的重要手段，能够显著降低藻类水华的发生频率，改善湖泊的透明度，从而为沉水植被恢复创造更优的光环境和水质条件^[68]。这些优化措施的协同作用，不仅可为沉水植被的生长提供适宜的生态环境，也为湖泊生态系统的整体健康恢复奠定了基础。

4.3 生态修复措施的应用

以自然恢复为主的生态修复措施是恢复富营养化湖泊沉水植被的重要手段，是推动湖泊生态系统从“浊水态”向“清水态”转变的重要途径^[9]，包括人工撒播、移植、生物操纵等。人工撒播和移植是直接恢复沉水植被的核心方法，需根据湖泊环境条件（如水深、透明度、底质等）选择耐受性强的物种，如苦草、穗状狐尾藻和黑藻等。具体包括种子播撒和秧苗移植，前者通过在湖底播撒植物种子来促进自然繁育，后者则通过直接移植成熟秧苗来提高成活率与恢复速度^[69]（图5）。恢复过程中，采用“点状恢复-逐步扩散”的策略，在局部区域实现植被覆盖后，逐步扩大范围，形成连片分布。目前，太湖的贡湖湾、梅梁湾等就是采用这种由点到面的沉水植物恢复策略。此外，生物操纵通过调控湖泊生态系统结构促进沉水植被的恢复^[70]，譬如，使用滤食性鱼类（如鳙鱼、鲢鱼）控制藻类，改善水体透明度，同时捕捞底栖鱼类（如鲤鱼、鲫鱼）以减少其对植被的取食和对底泥的扰动，优化食物网结构。这种综合措施不仅能提升沉水植被的恢复效率，还能改善湖泊生态系统的多功能性和稳定性。

自然恢复



人工辅助



图5 富营养化湖泊沉水植被的自然恢复和人工辅助恢复策略

Fig. 5 Natural and artificial restoration strategies of submerged macrophytes in shallow eutrophic lakes

4.4 综合治理与长期监测

沉水植被的恢复需要综合治理与长期监测，以确保修复效果的持续性。根据湖泊的具体条件，集成不同的修复措施^[71]，如对于重度富营养化的湖泊，采取“外源控制+清淤+生物操纵”的综合措施；对于中轻度富营养化的湖泊，可以重点采用“控藻移植+生物操纵”的方式恢复沉水植被。建立评估指标，如水体透明度、沉水植被覆盖率、生物多样性指数等，用于量化评估修复效果。同时，借助遥感技术、水质监测和生物指标分析，实时跟踪湖泊修复进程，并及时调整修复措施^[72]。通过综合治理与长期监测，才能确保沉水植被恢复的长期效果，实现湖泊生态系统的可持续发展。

5 结论

沉水植被退化是富营养化湖泊生态失衡的核心表现之一，主要由外源性营养物质大量输入、水体浑浊度增加、底泥污染、藻类竞争和食物网结构失衡等因素共同驱动。综合治理措施在改善沉水植被生存环境、推动局部区域沉水植被恢复方面具有显著成效。外源污染的长期控制、水体条件的持续改善、生态系统的整体调控（如食物网优化）是沉水植被恢复的基础。

参考文献:

- [1] 郭娅, 薛滨, 沈吉. 地球系统科学时代的湖泊科学 [J]. *第四纪研究*, 2020, 40 (1): 18-27.
Guo Y, Xue B, Shen J. Progress of lake science in the age of Earth System Science (ESS) [J]. *Quaternary Sciences*, 2020, 40 (1): 18-27.
- [2] Conley DJ, Paerl HW, Howarth RW, Boesch DF, Seitzinger SP, *et al.* Controlling eutrophication: nitrogen and phosphorus[J]. *Science*, 2009, 323 (5917): 1014-1015.
- [3] 秦伯强, 高光, 朱广伟, 张运林, 宋玉芝, 等. 湖泊富营养化及其生态系统响应 [J]. *科学通报*, 2013, 58 (10): 855-864.
Qin BQ, Gao G, Zhu GW, Zhang YL, Song YZ, *et al.* Lake eutrophication and its ecosystem response[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58 (9): 961-970.
- [4] 王国祥, 成小英, 濮培民. 湖泊藻型富营养化控制——技术、理论及应用 [J]. *湖泊科学*, 2002, 14 (3): 273-282.
Wang GX, Cheng XY, Pu PM. Lake eutrophication control in technology, theory and application[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2002, 14 (3): 273-282.
- [5] Jeppesen E, Søndergaard M, Søndergaard M, Christoffersen K. The Structuring Role of Submerged Macrophytes in Lakes[M]. New York: Springer, 1998.
- [6] 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.
- [7] Rybak M, Rosińska J, Wejnerowski Ł, Rodrigo MA, Joniak T. Submerged macrophyte self-recovery potential behind restoration treatments: sources of failure[J]. *Front Plant Sci*, 2024, 15: 1421448.
- [8] 杨柳燕, 胡志新, 何连生, 席北斗. 中国湖泊水生生态系统区域差异性 [M]. 北京: 科学出版社, 2013: 1-250.
- [9] Scheffer M, Jeppesen E. Regime shifts in shallow lakes[J]. *Ecosystems*, 2007, 10 (1): 1-3.
- [10] 洪喻, 胡洪营. 水生植物化感抑藻作用研究与应用 [J]. *科学通报*, 2009, 54 (3): 287-293.
Hong Y, Hu HY. Research and application of inhibitory allelopathy from aquatic plants on algae[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54 (3): 287-293.
- [11] Salgado J, Sayer CD, Brooks SJ, Davidson TA, Goldsmith B, *et al.* Eutrophication homogenizes shallow lake macrophyte assemblages over space and time[J]. *Ecosphere*, 2018, 9 (9): e02406.
- [12] Hooper DU, Chapin III FS, Ewel JJ, Hector A, Inchausti P, *et al.* Effects of biodiversity on ecosystem functioning: a consensus of current knowledge[J]. *Ecol Monogr*, 2005, 75 (1): 3-35.
- [13] Liu H, Zhou W, Li XW, Chu QS, Tang N, *et al.* How many submerged macrophyte species are needed to improve water clarity and quality in Yangtze floodplain lakes?[J]. *Sci Total Environ*, 2020, 724: 138267.
- [14] Dong BL, Zhou YQ, Jeppesen E, Shi K, Qin BQ. Response of community composition and biomass of submerged macrophytes to variation in underwater light, wind and trophic status in a large eutrophic shallow lake[J]. *J Environ Sci*, 2021, 103: 298-310.
- [15] 宋辛辛, 蔡晓斌, 王智, 厉恩华, 王学雷. 1950s 以来洪湖主要优势沉水植物群落变化 [J]. *湖泊科学*, 2016, 28 (4): 859-867.
Song XX, Cai XB, Wang Z, Li EH, Wang XL. Community change of dominant submerged macrophyte in Lake Honghu since 1950s[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2016, 28 (4): 859-867.
- [16] Dar NA, Pandit AK, Ganai BA. Factors affecting the distribution patterns of aquatic macrophytes[J]. *Limnol Rev*, 2014, 14 (2): 75-81.
- [17] Kirk JTO. Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems[M]. 3rd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2011: 453-538.
- [18] Lu J, Wang HB, Pan M, Xia J, Xing W, Liu GH. Using sediment seed banks and historical vegetation change data to develop restoration criteria for a eutrophic lake in China[J]. *Ecol Eng*, 2012, 39: 95-103.
- [19] Barko JW, Smart RM. Effects of organic matter additions to sediment on the growth of aquatic plants[J]. *J Ecol*, 1983, 71 (1): 161-175.
- [20] Murphy F, Schmieder K, Baastrup-Spohr L, Pedersen O, Sand-Jensen K. Five decades of dramatic changes in submerged vegetation in Lake Constance[J]. *Aquat Bot*, 2018, 144: 31-37.
- [21] Wu HP, Hao BB, Cai YP, Liu GH, Xing W. Effects of submerged vegetation on sediment nitrogen-cycling bacterial communities in Honghu Lake (China) [J]. *Sci Total Environ*, 2021, 755: 142541.
- [22] Wei Z, Yu YX, Yi YJ. Spatial distribution of nutrient loads and thresholds in large shallow lakes: the case of Chaohu Lake, China[J]. *J Hydrol*, 2022, 613: 128466.
- [23] 汤鹏, 于鲁冀, 彭赵旭, 范鹏宇, 李廷梅, 任昆阳. 水生植物化感作用抑藻研究进展 [J]. *生物学杂志*, 2021, 38 (4): 104-108.
Tang P, Yu LJ, Peng ZX, Fan PY, Li TM, Ren KY. Research progresses on algae inhibition by allelopathy of aquatic plants[J]. *Journal of Biology*, 2021, 38 (4): 104-108.
- [24] Li BH, Yin YJ, Kang LF, Feng L, Liu YZ, *et al.* A review: application of allelochemicals in water ecological restoration—algal inhibition[J]. *Chemosphere*, 2021, 267: 128869.
- [25] He YH, Zhao KS, Zhang H, He L, Niu Y, *et al.* Linking macrophyte community structure with food chain length: a case study in the largest freshwater lake in China and eco-

- logical restoration implications[J]. *Ecol Indic*, 2021, 123: 107363.
- [26] Karus K, Zagars M, Agasild H, Tuvikene A, Zingle P, et al. The influence of macrophyte ecological groups on food web components of temperate freshwater lakes[J]. *Aquat Bot*, 2022, 183: 103571.
- [27] Mandal RN, Bera P. Macrophytes used as multifaceted benefits including feeding, bioremediation, and symbiosis in freshwater aquaculture: a review[J]. *Rev Aquacult*, 2025, 17 (1): e12983.
- [28] Carpenter SR, Cottingham KL. Resilience and restoration of lakes[J]. *Conserv Ecol*, 1997, 1 (1): 2.
- [29] Wang LG, Han YQ, Yu HH, Fan SF, Liu CH. Submerged vegetation and water quality degeneration from serious flooding in Liangzi Lake, China[J]. *Front Plant Sci*, 2019, 10: 1504.
- [30] Zhang XK, Zhang JW, Li ZF, Wang GJ, Liu Y, et al. Optimal submerged macrophyte coverage for improving water quality in a temperate lake in China[J]. *Ecol Eng*, 2021, 162: 106177.
- [31] 吴锋, 战金艳, 邓祥征, 林英志. 中国湖泊富营养化影响因素研究——基于中国 22 个湖泊实证分析 [J]. 生态环境学报, 2012, 21 (1): 94-100.
- Wu F, Zhan JY, Deng XZ, Lin YZ. Influencing factors of lake eutrophication in China: a case study in 22 lakes in China[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 21 (1): 94-100.
- [32] 胡建, 刘茂松, 周文, 徐驰, 杨雪姣, 等. 太湖流域水质状况与土地利用格局的相关性 [J]. 生态学杂志, 2011, 30 (6): 1190-1197.
- Hu J, Liu MS, Zhou W, Xu C, Yang XJ, et al. Correlations between water quality and land use pattern in Taihu Lake basin[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30 (6): 1190-1197.
- [33] Michael Kemp W, Battleson R, Bergstrom P, Carter V, Gallegos CL, et al. Habitat requirements for submerged aquatic vegetation in Chesapeake Bay: water quality, light regime, and physical-chemical factors[J]. *Estuaries*, 2004, 27 (3): 363-377
- [34] 吴东浩, 陈芳斐, 孟晓辰, 吴浩云, 吴亚男, 陈红. 基于沉水植物的太湖适宜生态水位研究 [J]. 中国环境科学, 2023, 43 (4): 1834-1843.
- Wu DH, Chen FF, Meng XC, Wu HY, Wu YN, Chen H. Suitable ecological water level of Lake Taihu[J]. *China Environmental Science*, 2023, 43 (4): 1834-1843.
- [35] Leira M, Cantonati M. Effects of water-level fluctuations on lakes: an annotated bibliography[J]. *Hydrobiologia*, 2008, 613 (1): 171-184.
- [36] Liang J, Yi YR, Li XD, Yuan YJ, Yang SH, et al. Detecting changes in water level caused by climate, land cover and dam construction in interconnected river-lake systems[J]. *Sci Total Environ*, 2021, 788: 147692.
- [37] Zhang XK, Liu XQ, Wang HZ. Developing water level regulation strategies for macrophytes restoration of a large river-disconnected lake, China[J]. *Ecol Eng*, 2014, 68: 25-31.
- [38] Wang C, Zheng SS, Wang PF, Hou J. Interactions between vegetation, water flow and sediment transport: a review[J]. *J Hydrodyn*, 2015, 27 (1): 24-37.
- [39] Gallardo B, Clavero M, Sánchez MI, Vilà M. Global ecological impacts of invasive species in aquatic ecosystems[J]. *Global Change Biol*, 2016, 22 (1): 151-163.
- [40] Wang H, Wang Q, Bowler PA, Xiong W. Invasive aquatic plants in China[J]. *Aquat Invasions*, 2016, 11 (1): 1-9.
- [41] Chen JF, Liu ZG, Xiao SFS, Chen RZ, Luo CQ, et al. Effects of benthivorous fish disturbance on chlorophyll a contents in water and the growth of two submersed macrophytes with different growth forms under two light regimes[J]. *Sci Total Environ*, 2020, 704: 135269.
- [42] Brainard AS, Luzadis VA, Schulz KL. Drivers of species richness, biomass, and dominance of invasive macrophytes in temperate lakes[J]. *Biol Invasions*, 2021, 23 (4): 1069-1085.
- [43] Feng ZX, Zhang L, Tang N, Li XW, Xing W. Ensemble modeling of aquatic plant invasions and economic cost analysis in China under climate change scenarios[J]. *Sci Total Environ*, 2024, 957: 177444.
- [44] Kosten S, Jeppesen E, Huszar VLM, Mazzeo N, van Nes EH, et al. Ambiguous climate impacts on competition between submerged macrophytes and phytoplankton in shallow lakes[J]. *Freshwater Biol*, 2011, 56 (8): 1540-1553.
- [45] Zhao Y, Wang R, Jeppesen E, Zhang EL. Submerged macrophytes can counterbalance the negative effects of rising temperature and eutrophication by inhibiting the photosynthetic activity of cyanobacteria and adjusting their morphology and physiology[J]. *Freshwater Biol*, 2024, 69 (12): 1842-1856.
- [46] Paerl HW, Fulton RS, Moisander PH, Dyble J. Harmful freshwater algal blooms, with an emphasis on cyanobacteria[J]. *Sci World J*, 2001, 1: 76-113.
- [47] 王少鹏. 食物网结构与功能: 理论进展与展望 [J]. 生物多样性, 2020, 28 (11): 1391-1404.
- Wang SP. Food web structure and functioning: theoretical advances and outlook[J]. *Biodiversity Science*, 2020, 28 (11): 1391-1404.
- [48] Calderini ML, Kahilainen KK, Estlander S, Peltomaa E, Piro AJ, et al. Eutrophication effect on production and transfer of omega-3 fatty acids in boreal lake food webs[J]. *Sci Total Environ*, 2023, 903: 166674.
- [49] Dibble ED, Kovalenko K. Ecological impact of grass carp: a review of the available data[J]. *J Aquat Plant Manage*, 2009, 47: 1-15.

- [50] Adámek Z, Maršálek B. Bioturbation of sediments by benthic macroinvertebrates and fish and its implication for pond ecosystems: a review[J]. *Aquacult Int*, 2013, 21 (1): 1–17.
- [51] Kelly DJ, Schallenberg M. Assessing food web structure in relation to nutrient enrichment, macrophyte collapse and lake resilience in shallow lowland lakes[J]. *New Zeal J Mar Fresh*, 2019, 53 (4): 603–619.
- [52] Liu H, Liu GH, Xing W. Functional traits of submerged macrophytes in eutrophic shallow lakes affect their ecological functions[J]. *Sci Total Environ*, 2021, 760: 143332.
- [53] Cheng CY, Chen J, Su HJ, Chen JF, Rao QY, et al. Eutrophication decreases ecological resilience by reducing species diversity and altering functional traits of submerged macrophytes[J]. *Global Change Biol*, 2023, 29 (17): 5000–5013.
- [54] Gao XY, Liu H, Liu GH, Huang WM, Xing W. How functional traits of submerged macrophytes response to underwater light quality?[J]. *Hydrobiologia*, 2024, 851 (21): 5043–5058.
- [55] 董鸣. 异质性生境中的植物克隆生长: 风险分摊[J]. 植物生态学报, 1996, 20 (6): 543–548.
Dong M. Plant clonal growth in heterogeneous habitats: risk-spreading[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 1996, 20 (6): 543–548.
- [56] Hu SH, Chen XF, Huang XL, Wu CX. Submerged macrophyte restoration in enclosure: a proper way for ecological remediation of shallow lakes?[J]. *Water*, 2023, 15 (7): 1317.
- [57] Yu YX, Li Y, Wang HJ, Wu XD, Zhang M, et al. Submersed macrophyte restoration with artificial light-emitting diodes: a mesocosm experiment[J]. *Ecotox Environ Safe*, 2021, 228: 113044.
- [58] 秦伯强, 张运林, 高光, 朱广伟, 龚志军, 董百丽. 湖泊生态恢复的关键因子分析[J]. *地理科学进展*, 2014, 33 (7): 918–924.
Qin BQ, Zhang YL, Gao G, Zhu GW, Gong ZJ, Dong BL. Key factors affecting lake ecological restoration[J]. *Progress in Geography*, 2014, 33 (7): 918–924.
- [59] Poikane S, Kelly MG, Free G, Carvalho L, Hamilton DP, et al. A global assessment of lake restoration in practice: new insights and future perspectives[J]. *Ecol Indic*, 2024, 158: 111330.
- [60] Xue LH, Hou PF, Zhang ZY, Shen MX, Liu FX, Yang LZ. Application of systematic strategy for agricultural non-point source pollution control in Yangtze River basin, China[J]. *Agric Ecosyst Environ*, 2020, 304: 107148.
- [61] Li CH, Wang YK, Ye C, Wei WW, Zheng BH, Xu B. A proposed delineation method for lake buffer zones in watersheds dominated by non-point source pollution[J]. *Sci Total Environ*, 2019, 660: 32–39.
- [62] 徐杨, 王宇翔, 汪维维, 兰峰. 长江流域全面强化河湖长制的推进与探索研究[J]. *水利发展研究*, 2024, 24 (4): 43–50.
Xu Y, Wang YX, Wang WW, Lan F. A study on the promotion and exploration of fully strengthening the river and lake chief system in the Yangtze River Basin[J]. *Water Resources Development Research*, 2024, 24 (4): 43–50.
- [63] Manap N, Voulvoulis N. Data analysis for environmental impact of dredging[J]. *J Clean Prod*, 2016, 137: 394–404.
- [64] Wang XY, Feng J. Assessment of the effectiveness of environmental dredging in South Lake, China[J]. *Environ Manage*, 2007, 40 (2): 314–322.
- [65] 马鑫雨, 杨盼, 张曼, 杨春晖, 尹洪斌. 湖泊沉积物磷钝化材料的研究进展[J]. *湖泊科学*, 2022, 34 (1): 1–17.
Ma XY, Yang P, Zhang M, Yang CH, Yin HB. Advances in researches on phosphorous inactivation materials in lake sediment[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2022, 34 (1): 1–17.
- [66] Alhamama MZ, Tandyrak R. Lakes restoration approaches[J]. *Limnol Rev*, 2021, 21 (2): 105–118.
- [67] Xiang ML, Ji FF, Xu N, Huang YM, Zhang TY, et al. Ecological water level regulation based on aquatic plant restoration in large reservoirs: a case study of Wangying Reservoir[J]. *Ecohydrol Hydrobiol*, 2024. doi:10.1016/j.ecohyd.2024.07.002.
- [68] Fu L, Shen YM, Zhang HX, Wang X. Effects of water diversion projects on water environment in Chaohu Lake[J]. *Limnologia*, 2022, 97: 126026.
- [69] Rosińska J, Rybak M, Goldyn R. Patterns of macrophyte community recovery as a result of the restoration of a shallow urban lake[J]. *Aquat Bot*, 2017, 138: 45–52.
- [70] Mehner T, Benndorf J, Kasprzak P, Koschel R. Biomanipulation of lake ecosystems: successful applications and expanding complexity in the underlying science[J]. *Freshwater Biol*, 2002, 47 (12): 2453–2465.
- [71] Dunalska JA. How the integrated engineering solutions can support the lakes restoration?[J]. *Ecohydrol Hydrobiol*, 2021, 21 (1): 36–45.
- [72] Dörnhöfer K, Oppelt N. Remote sensing for lake research and monitoring—recent advances[J]. *Ecol Indic*, 2016, 64: 105–122.

(责任编辑: 李惠英)