

沉水植物在富营养化浅水湖泊修复中的生态机理

杨凤娟^{1,2}, 蒋任飞^{1,2}, 饶伟民^{1,2}, 代晓炫^{1,2}, 肖许沐^{1,2}, 谢海旗^{1,2*}

(1. 中水珠江规划勘测设计有限公司, 广东广州 510610; 2. 水利部珠江水利委员会水生态工程中心, 广东广州 510610)

摘要 通过查阅近年来浅水湖泊沉水植物修复相关文献报道, 总结了沉水植物在富营养化湖泊治理中的生态机理, 分析了影响沉水植物恢复的主要因子(藻类影响、鱼类摄食及扰动等), 综合探讨了沉水植物在富营养化浅水湖泊修复中的重要作用, 为科学合理地开展富营养化浅水湖泊修复实践活动提供理论指导与经验借鉴。

关键词 沉水植物; 富营养化湖泊; 生态修复; 生态机理

中图分类号 S181.3 文献标识码 A 文章编号 0517-6611(2016)26-0058-04

Ecological Mechanisms of Submerged Macrophytes in the Restoration of Eutrophic Shallow Lakes

YANG Feng-juan^{1,2}, JIANG Ren-fei^{1,2}, RAO Wei-min^{1,2}, XIE Hai-qi^{1,2*} et al (1. China Water Resources Pearl River Planning Surveying & Designing Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510610; 2. Aquatic Ecological Engineering Center, Pearl River Water Resources Commission of the Ministry of Water Resources, Guangzhou, Guangdong 510610)

Abstract According to the application of submerged macrophytes in the restoration of eutrophic shallow lakes in recent years, ecological mechanisms of submerged macrophytes in control of eutrophic shallow lakes were summarized, and the main factors influencing the restoration of eutrophic shallow lakes by submerged macrophytes (such as algae, fish feeding, and disturbance) were analyzed. The important roles of submerged macrophytes in the restoration of eutrophic shallow lakes were discussed. The research can provide theoretical guidance and experience for the restoration of eutrophic shallow lakes.

Key words Submerged macrophytes; Eutrophic lakes; Ecological restoration; Ecological mechanisms

水体富营养化不仅影响水资源的利用、渔业的发展, 而且会刺激有害藻类的暴发, 使水域丧失生态功能和价值^[1]。同时, 水体富营养化还给人们的生活和经济带来极大的危害和损失^[2]。相关调查表明, 我国湖泊、水库富营养化的比例分别为 77.00%、30.80%^[3-4], 湖泊富营养化成为我国最严重的水环境问题之一。

沉水植物作为初级生产者, 在水生态系统中起着重要作用, 重建沉水植物群落结构被认为是修复富营养化水体的有效手段^[5-6]。我国富营养化浅水湖泊成功修复的案例以惠州西湖和太湖五里湖最为典型。通过恢复沉水植物群落结构, 惠州西湖子湖——南湖从以浮游植物为主导初级生产力的“藻型湖泊”转变为以沉水植物为主要初级生产力的“草型湖泊”, 形成了稳定的食物网结构, 透明度由 30 cm 提高至 150 cm, 水体总磷、总氮含量分别降低 54.50% 和 52.70%^[7]; 太湖五里湖水体从藻类占优势的浊水态向水生植物占优势的清水态转变, 透明度由 39 cm 提高至 70 cm, 水体总磷、总氮含量分别降低 23.80% 和 20.70%^[8]。同时, 沉水植物群落也受到诸多因素的影响, 如藻类遮光、风浪扰动、营养盐负荷及鱼类摄食和扰动。因此, 研究沉水植物在浅水湖泊修复过程中的生态机理及影响沉水植物群落结构重建的相关环境因子, 对富营养化浅水湖泊的治理有着重要的理论价值和实践指导意义。笔者综述了沉水植物在富营养化湖泊治理中的生态机理, 以期科学合理地开展富营养化浅水湖泊修复实践活动提供理论依据。

1 沉水植物对水质改善的作用机理

1.1 对氮、磷营养盐的控制

氮、磷是植物生长的必需营养元素。长势良好的水生植物可使水体中总氮、总磷含量明显降低^[9]。沉水植物除了通过根、叶吸收水体中的氮、磷及控制水体中营养盐浓度外^[10], 还可在光合作用过程中产生氧气扩散到根际并进入沉积物, 影响沉积物氮、磷的循环^[11-12]。相关研究表明, 沉水植物覆盖的区域中, 氧气可以渗透至沉积物表层 20 mm 处, 而在无沉水植物覆盖的区域, 氧气的渗透深度仅 4 mm^[13]; 沉积物中的 Fe^{2+} 在沉水植物根际氧化作用下形成 Fe^{3+} , 并与 $PO_4^{3-}-P$ 形成铁-磷复合体, 抑制磷从沉积物释放到水体中^[14]。同时, 沉水植物通过促进沉积物-水界面的反硝化作用, 还原硝酸盐, 释放出分子态氮(N_2)或一氧化二氮(N_2O), 减少水体中的氮营养盐。雷婷文等^[15]研究表明, 苦草(*Vallisneria* L.)、黑藻(*Hydrilla verticillata* L.)、金鱼藻(*Ceratophyllum demersum*)、伊乐藻(*Elo-dea nuttalli*)、狐尾藻(*Myriophyllum* L.)、菹草(*Potamogeton crispus* L.) 均能有效去除水体中的氮、磷等营养盐含量, 其中以苦草效果最好。

Gao 等^[16]研究发现, 金鱼藻、伊乐藻、眼子菜(*Potamogeton* L.)、狐尾藻、苦草等沉水植物通过叶片吸收等方式, 对水体中总磷具有较好的去除效果, 尤其在春季和秋季, 金鱼藻对水体中总磷的去除率高达 92.00%, 且对总溶解性磷的去除率也高达 90.93%。在太湖梅梁湾的生态修复工程区中, 沉水植物的根系吸收作用和化学反应促进作用使沉积物总氮、总磷营养盐分别由修复前(2003年)的 7 043、1 370 mg/kg 降低至 2 929、352 mg/kg。

1.2 提高水体透明度

沉积物再悬浮会直接影响水体的透明度, 而沉水植物可以减缓水流速度和风力, 并且通过根部固定沉积物, 抑制再悬浮。同时, 沉水植物还可作为悬浮物

基金项目 水利部公益性行业科研专项(201401013)。

作者简介 杨凤娟(1984-), 女, 山东鄞城人, 工程师, 硕士, 从事生态研究。* 通讯作者, 教授级高级工程师, 从事生态研究及环评工作。

收稿日期 2016-07-06

的捕获器,促进沉降,进而提高水体透明度^[10]。Horppila 等^[17]进行为期 83 d 的研究发现,在沉水植物金鱼藻和钝叶眼子菜(*Potamogeton obtusifolius*)生长的区域,表层沉积物再悬浮量为 793 g (DW)/m²,而在无沉水植物生长的区域,表层沉积物再悬浮量为 1 701 g (DW)/m²。De 等^[18]对 12 个已修复的富营养化城市人工湖进行了研究,发现沉水植物覆盖率大于 30% 的湖泊能够长期维持清水态,而沉水植物覆盖率小于 30% 的湖泊则再度发展为浊水态湖泊。Horppila 等^[17]研究发现,在沉水植物生长的区域,通过沉积物再悬浮带入水体中的磷元素含量为 11.8 mg/(m²·d),无沉水植物生长区域的磷元素含量为 24.5 mg/(m²·d)。由此可知,在缺乏沉水植物的富营养化湖泊中,沉积物再悬浮会导致水体磷营养盐浓度增加。

2 沉水植物对藻类的控制机理

2.1 营养盐竞争

沉水植物可以通过吸收氮、磷营养盐、无机碳等竞争限制藻类的生长。离子态氮(NO₃⁻、NH₄⁺)、磷(PO₄³⁻)是初级生产者直接吸收利用的营养形态。不论沉水植物是否存在,藻类的生物量与湖水中氮、磷的含量呈正相关^[19]。但藻类生命周期短,对水体中氮、磷营养盐固定能力弱^[14],而沉水植物具有过量吸收营养物质的特性,个体大,生活周期长,体内积累的氮、磷多,储存较藻类稳定,能有效降低氮、磷循环速度、控制藻类的暴发^[20]。

对于根系不发达的沉水植物如黑藻、伊乐藻、金鱼藻等,主要依靠自身叶片吸收水体中的营养盐,如 NO₃⁻、PO₄³⁻、CO₂ 和 HCO₃⁻^[21],进而与浮游植物形成竞争关系。研究表明,大量沉水植物可以导致水体中磷含量急剧下降,造成浮游植物缺乏营养盐而难以在夏天形成水华^[22]。对于根系发达的沉水植物如眼子菜、苦草、狐尾藻等,可通过根吸收和促进沉积物中化学反应等方式对内源污染进行控制,削减浮游植物营养盐来源。

2.2 化感作用

沉水植物分泌的化感物质可抑制水体中浮游植物的生长^[23-24],减弱浮游植物或附着藻的遮阴效应,促进自身生长。化感物质可使藻类细胞的生理作用产生变化,如影响抗氧化酶活性、碱性磷酸酶活性,促进丙二醛等有毒物质积累,从而引起藻类生物量的减少。通过化感物质抑制藻类生长的沉水植物至少有 37 种^[25],其中以狐尾藻、金鱼藻、伊乐藻、茨藻、轮藻等的化感作用较明显。

不同沉水植物分泌的化感物质对藻类的作用不同,从而影响浮游植物种类组成。Hilt 等^[26-27]研究发现,狐尾藻通过分泌化感物质抑制碱性磷酸酶活性,减少叶片表面磷的释放量,降低附着藻的磷元素来源,限制附着藻的生长;水蕴草 [*Elodea densa* (Planch.) Casp.] 和伊乐藻可以通过化感作用抑制附着蓝藻的生长,进而限制附着藻生物膜的形成,促进叶片表面对光照和营养盐的吸收^[28]。

2.3 其他作用

浮游植物不具有主动运动能力,通常需要借助风浪、水流等外力作用,而沉水植物可以减弱风浪对水体的扰动,使浮游植物失去漂浮的助力,加速其沉降。此外,沉水植物还可以影响浮游植物对光照的吸收,限制其群落的发展。

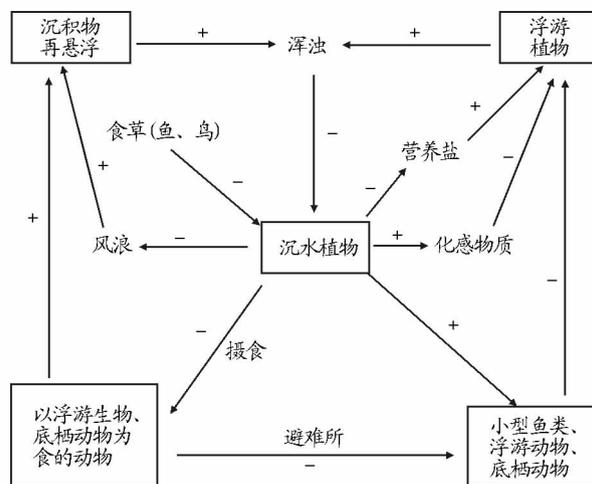
3 沉水植物对浮游动物的影响

沉水植物群落可为浮游动物提供主要的栖居地和避难场所^[29]。在浅水湖泊中,水平迁移(Diel Horizontal Migration, DHM)是浮游动物常见的行为。浮游动物迁移至沿岸带或沉水植物茂盛的水域中,躲避鱼类等的捕食,维持种群数量、群落结构稳定发展,加强对浮游植物个体、种群甚至群落结构的控制作用^[30-31]。

Canfield 等^[32]研究发现,水体中的浮游甲壳类动物生物量与沉水植物在水体中的占有体积(Plant Volume Inhabited, PVI)呈显著正相关($R=0.47$, $p=0.0001$)。当缺乏沉水植物时,浮游动物的种群密度处于较低水平(<1 ind/L),而浮游植物的密度则处于较高水平(38 mm³/L);当沉水植物的 PVI $>15\% \sim 20\%$ 时,浮游甲壳类动物生物量处于较高水平,且体型较大的个体居多^[33]。由此可见,沉水植物群落一定程度上可保证浮游动物的种群数量,实现对浮游植物的控制,有利于维持湖泊的清水状态。

4 沉水植物的生态效应机理

不同营养级的上行效应(Bottom-up Effect)和下行效应(Top-down Effect)相结合维持着生态系统群落结构的稳定。沉水植物对无机环境的影响以及与其他生物之间的相互作用(图 1)保证了生态系统中上行效应和下行效应及其他级联效应的正常发挥^[34-36]。



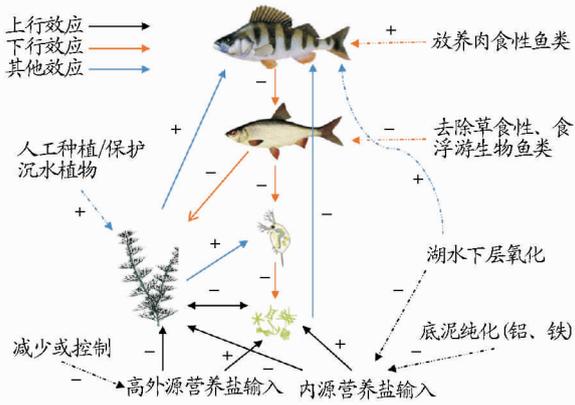
注：“+”表示正反馈；“-”表示负反馈。

Note: “+” and “-” stand for positive and negative feedback respectively.

图 1 浅水湖泊中沉水植物对湖泊水环境的影响

Fig. 1 Effects of submerged macrophytes on the water environment of shallow lakes

沉水植物对营养盐的吸收和钝化抑制上行效应对浮游植物的促进作用,降低水华暴发的可能性。另外,沉水植物群落结构促进肉食性鱼类生长,保证生态系统中下行效应的发挥,即肉食性鱼类捕食草食性鱼类、浮游生物鱼类,优化鱼类种群结构,降低沉水植物、浮游动物被大量捕食的压力,达到控制浮游植物的效果(图 2)^[37]。



注：“+”表示正反馈；“-”表示负反馈。

Note: “+” and “-” stand for positive and negative feedback respectively.

图2 湖泊生态系统上行效应(通过营养盐)-下行效应(通过摄食)和其他效应模式

Fig. 2 Conceptual models of bottom-up (via nutrients), top-down (via consumption) and other effects of lake ecosystem

5 影响沉水植物恢复的因子

5.1 藻类的限制 富营养化湖泊的初级生产力通常以浮游植物为主,呈现浊水态。藻类的遮阴效应、营养盐和无机盐的竞争作用会阻碍沉水植物的生长以及在水域中的空间分布^[38]。Sand-jensen等^[38]研究发现,在富营养湖泊(氮0.93 mg/L;磷0.33 mg/L),附着藻对沉水植物的遮阴达到86%。当水体中磷浓度大于0.05 mg/L时,藻类大量生长形成水华^[18];藻类释放的有色溶解有机颗粒物(Particulate Organic Matter, POM)增加光散射,导致光衰减(蓝光,波长476~495 nm)也随之增加,从而影响沉水植物的光吸收效率^[39],引起水体底层缺氧及植物根系腐烂等现象发生。水华暴发形成气泡浮渣也会增加光的衰减,对沉水植物造成影响。藻类形成的附着生物膜不仅影响沉水植物叶片表面的光吸收,还阻碍叶片对无机碳的吸收,影响碳酸盐在叶片表面的扩散^[40]。

针对藻类引起的不良影响,通常可以采用生物控制与物理通气、曝气等方法^[41-42]。物理通气等方法可破坏藻类的垂直分布^[41],增加水体CO₂,增大叶片与CO₂的接触面积,解除CO₂限制。浮游动物也可实现对藻类的控制^[43-44]。在发生藻类水华时,可投放、接种浮游甲壳类动物如长刺溞(*Daphnia longispiana*)、大型溞(*Daphnia magna*)和方形网纹溞(*Gerzoda daphnia gamaraura*)等进行控制^[45-46]。

5.2 鱼类的影响 草食性、杂食性鱼类及底层鱼类会对沉水植物造成影响^[47]。由于草食性鱼类食量大,每天摄食沉水植物的量甚至超过鱼自身的重量^[48],当摄食强度超过沉水植物的再生能力时,会导致沉水植物大规模减少甚至消失。而控制草食性鱼类的生长,会促进沉水植物的生长^[49-50]。Qiu等^[51]研究发现,去除武汉东湖草食性鱼类之后,微齿眼子菜(*Potamogeton maackianus*)自行恢复至6 000 g(WW)/m²的生物量。鱼类对底泥的扰动及排泄作用导致底泥中营养盐释放至水体中,刺激藻类生长,反过来抑制沉

水植物生长。Wright等^[52]对英国2个湖泊进行研究,发现当去除湖泊中的鱼类(396 kg/hm²),沉水植物覆盖度由1%上升到93%,生物量由1.0 g/m²上升到46.7 g/m²;当再度引进鱼类时,沉水植物生物量又由46.7 g/m²下降至4.8 g/m²。由此可见,鱼类是沉水植物生长的重要限制因子。

6 建议

富营养化浅水湖泊修复过程中,控制营养盐和构建健康的生态系统是主要目标。了解沉水植物在富营养化浅水湖泊治理中的生态机理,恢复沉水植物群落是富营养化浅水湖泊修复的重要方向。但是作为维持湖泊清水态的关键因子,沉水植物受到诸多因素的影响。因此,现阶段通过改善基础环境恢复沉水植物是实现富营养化浅水湖泊生态恢复的有效途径。

在采用“恢复沉水植物群落”手段进行富营养化湖泊修复时,笔者提出了以下几点建议:①针对不同地区(如不同气候带等)的修复对象,结合客观实际,优先选用土著种、化感作用强、根际固定作用强的沉水植物用于控制藻类及沉积物内源污染;②在沉水植物群落构建初期,采取相应措施减少相关因素对沉水植物生长的影响,如通过添加絮凝剂等透明度提升工程、浮游动物控藻手段等,保证沉水植物在修复初期快速生长;③为促进沉水植物群落结构的快速形成,建议在初期去除水体中草食性鱼类和底层鱼类,以减少鱼类对沉水植物的摄食及对沉积物的扰动;④当系统趋于稳定时,适当放养肉食性鱼类(如鳊鱼等),结合生物操纵原理,进行水生生态系统构建,使生态系统中的上行效应和下行效应得以发挥,从而进一步加强系统的稳定性。

参考文献

- [1] SMITH V H, TILMAN G D, NEKOLA J C. Eutrophication: Impacts of excess nutrient inputs on freshwater, marine, and terrestrial ecosystems[J]. Environmental pollution, 1999, 100(1): 179-196.
- [2] GUO L. Doing battle with the green monster of Taihu Lake[J]. Science, 2007, 317(5842): 1166.
- [3] 金相灿,刘树坤,章宗涉. 中国湖泊环境[M]. 北京:海洋出版社,1995.
- [4] LE C, ZHA Y, LI Y, et al. Eutrophication of lake waters in China: Cost, causes, and control [J]. Environmental management, 2010, 45(4): 662-668.
- [5] 曹昀,胡红,时强,等. 沉水植物恢复的透明度条件研究[J]. 安徽农业科学,2012, 40(3): 1710-1711.
- [6] CHENG X, LI S, PU P. Ecological restoration of urban eutrophic lakes: A case study on the physical and ecological engineering in Lake Mochou, Nanjing[J]. Journal of lake sciences, 2006, 18(3): 218-224.
- [7] 刘从玉,刘平平,刘正文,等. 沉水植物在生态修复和水质改善中的作用[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(7): 2908-2910.
- [8] 陈开宁,包先明,史龙新,等. 太湖五里湖生态重建示范工程:大型围隔试验[J]. 湖泊科学,2006, 18(2): 139-149.
- [9] 马剑敏,严国安,任南,等. 东湖大型围隔及围栏内植物群落和水质的变化[J]. 植物资源与环境, 1996, 5(3):35-40.
- [10] BARKO J W, JAMES W F. Effects of submerged aquatic macrophytes on nutrient dynamics, sedimentation, and resuspension [M]//The structuring role of submerged macrophytes in lakes. New York:Springer, 1998: 197-214.
- [11] OREMLAND R S, TAYLOR B F. Diurnal fluctuations of O₂, N₂, and CH₄ in the rhizosphere of *Thalassia testudinum* [J]. Limnology and oceanography, 1977, 22(3): 566-570.
- [12] SMITH R D, DENNISON W C, ALBERTE R S. Role of seagrass photosynthesis in root aerobic processes [J]. Plant physiology, 1984, 74(4): 1055-1058.
- [13] WANG Y, LI Z, ZHOU L, et al. Effects of macrophyte-associated nitro-

- gen cycling bacteria on denitrification in the sediments of the eutrophic Gonghu Bay, Taihu Lake[J]. *Hydrobiologia*, 2013, 700(1): 329–341.
- [14] JAYNES M L, CARPENTER S R. Effects of vascular and nonvascular macrophytes on sediment redox and solute dynamics[J]. *Ecology*, 1986; 875–882.
- [15] 雷婷文, 魏小飞, 戴耀良, 等. 6 种常见沉水植物对水体的净化作用研究[J]. *安徽农业科学*, 2015, 43(36): 160–161, 196.
- [16] GAO Y X, ZHU G W, QIN B Q, et al. Effect of Ecological engineering on the nutrient content of surface sediments in Lake Taihu, China[J]. *Ecological engineering*, 2009, 35(11): 1624–1630.
- [17] HORPPILA J, NURMINEN L. Effects of submerged macrophytes on sediment resuspension and internal phosphorus loading in Lake Hiidenvesi (southern Finland)[J]. *Water research*, 2003, 37(18): 4468–4474.
- [18] DE BACKER S, TEISSIER S, TRIEST L. Stabilizing the clear-water state in eutrophic ponds after biomanipulation: Submerged vegetation versus fish recolonization[J]. *Hydrobiologia*, 2012, 689(1): 161–176.
- [19] 杨清心. 富营养水体中沉水植物与浮游藻类相互竞争的研究[J]. *湖泊科学*, 1996(8): 17–24.
- [20] JEPPESEN E, LAURIDSEN T L, KAIRESALO T, et al. Impact of submerged macrophytes on fish-zooplankton interactions in lakes[M]//The structuring role of submerged macrophytes in lakes. New York: Springer, 1998: 91–114.
- [21] VAN DEN BERG M S, SCHEFFER M, COOPS H, et al. The role of characean algae in the management of eutrophic shallow lakes[J]. *Journal of phycology*, 1998, 34(5): 750–756.
- [22] HILT S, HENSCHKE I, RÜCKER J, et al. Can submerged macrophytes influence turbidity and trophic state in deep lakes? Suggestions from a case study[J]. *Journal of environmental quality*, 2010, 39(2): 725–733.
- [23] KÖRNER S, NICKLISCH A. Allelopathic growth inhibition of selected phytoplankton species by submerged macrophytes I[J]. *Journal of phycology*, 2002, 38(5): 862–871.
- [24] MULDERIJ G, MOOIJ W M, DONK E. Allelopathic growth inhibition and colony formation of the green alga *Scenedesmus obliquus* by the aquatic macrophyte *Stratiotes aloides*[J]. *Aquatic ecology*, 2005, 39(1): 11–21.
- [25] MULDERIJ G, VAN NES E H, VAN DONK E. Macrophyte-phytoplankton interactions: The relative importance of allelopathy versus other factors[J]. *Ecological modelling*, 2007, 204(1): 85–92.
- [26] HILT S, GROSS E M. Can allelopathically active submerged macrophytes stabilise clear-water states in shallow lakes? [J]. *Basic and applied ecology*, 2008, 9(4): 422–432.
- [27] HILT S. Allelopathic inhibition of epiphytes by submerged macrophytes [J]. *Aquatic botany*, 2006, 85(3): 252–256.
- [28] ERHARD D, GROSS E M. Allelopathic activity of *Elodea canadensis* and *Elodea nuttallii* against epiphytes and phytoplankton[J]. *Aquatic botany*, 2006, 85(3): 203–211.
- [29] BURKS R L, LODGE D M, JEPPESEN E, et al. Diel horizontal migration of zooplankton: Costs and benefits of inhabiting the littoral [J]. *Freshwater biology*, 2002, 47(3): 343–365.
- [30] BRÖNMARK C, HANSSON L A. Chemical communication in aquatic systems: An introduction[J]. *Oikos*, 2000, 88(1): 103–109.
- [31] JEPPESEN E, SØNDERGAARD M, SØNDERGAARD M, et al. Cascading trophic interactions in the littoral zone: An enclosure experiment in shallow Lake Stigsholm, Denmark [J]. *Archiv für hydrobiologie*, 2002, 153(4): 533–555.
- [32] CANFIELD JR D E, SHIREMAN J V, COLLE D E, et al. Prediction of chlorophyll a concentrations in Florida lakes: Importance of aquatic macrophytes[J]. *Canadian journal of fisheries and aquatic sciences*, 1984, 41(3): 497–501.
- [33] SCHRIVER P E R, BØGSTRAND J, JEPPESEN E, et al. Impact of submerged macrophytes on fish-zooplankton phytoplankton interactions: Large-scale enclosure experiments in a shallow eutrophic lake[J]. *Freshwater biology*, 1995, 33(2): 255–270.
- [34] JEPPESEN E, JENSEN J P, SØNDERGAARD M, et al. Top-down control in freshwater lakes: The role of nutrient state, submerged macrophytes and water depth[M]//Shallow Lakes' 95. Netherlands: Springer, 1997: 151–164.
- [35] PERROW M R, JOWITT A J D, STANSFIELD J H, et al. The practical importance of the interactions between fish, zooplankton and macrophytes in shallow lake restoration[J]. *Hydrobiologia*, 1999, 395: 199–210.
- [36] GULATI R D, VAN DONK E. Lakes in the Netherlands, their origin, eutrophication and restoration: State-of-the-art review[M]//Ecological restoration of aquatic and semi-aquatic ecosystems in the Netherlands (NW Europe). Netherlands: Springer, 2002: 73–106.
- [37] JEPPESEN E, SØNDERGAARD M, LAURIDSEN T L, et al. Biomanipulation as a restoration tool to combat eutrophication: Recent advances and future challenges[J]. *Advances in ecological research*, 2012, 47: 411–488.
- [38] SAND-JENSEN K, SØNDERGAARD M. Phytoplankton and epiphyte development and their shading effect on submerged macrophytes in lakes of different nutrient status[J]. *Internationale Revue der gesamten Hydrobiologie und Hydrographie*, 1981, 66(4): 529–552.
- [39] KALFF J. *Limnology: Inland water ecosystems*[M]. New Jersey: Prentice Hall, 2002.
- [40] SAND-JENSEN K A J. Effect of epiphytes on eelgrass photosynthesis[J]. *Aquatic botany*, 1977, 3: 55–63.
- [41] 郭匿春. 浮游动物与藻类水华的控制[D]. 武汉: 中国科学院研究生院(水生生物研究所), 2007.
- [42] 张丽彬, 王金鑫, 王启山, 等. 浮游动物在生物操纵法除藻中的作用研究[J]. *生态环境*, 2007, 16(6): 1648–1653.
- [43] CARPENTER S R, KITCHELL J F. Consumer control of lake productivity [J]. *Bio Science*, 1988, 38: 764–769.
- [44] JAROMIR S, JAN K. Long-term biomanipulation of Rimov Reservoir (Czech Republic)[J]. *Hydrobiologia*, 1997, 345: 95–108.
- [45] POGOZHEV P I, GERASIMOVA T N. The effect of zooplankton on microalgae blooming and water eutrophication[J]. *Water resources*, 2001, 7/8: 420–427.
- [46] 张喜勤, 徐锐贤, 许金玉. 水藻净化富营养化湖水试验研究[J]. *水资源保护*, 1998, 24(4): 32–35.
- [47] VAN DONK E, OTTE A. Effects of grazing by fish and waterfowl on the biomass and species composition of submerged macrophytes[M]//Management and ecology of freshwater plants. Netherlands: Springer, 1996: 285–290.
- [48] VENKATESH B, SHETTY H P C. Studies on the growth rate of the grass carp *Ctenopharyngodon delta* (Valenciennes) fed on two aquatic weeds and a terrestrial grass[J]. *Aquaculture*, 1978, 13(1): 45–53.
- [49] 陈洪达. 杭州西湖水生植被恢复的途径与水质净化问题[J]. *水生生物学集刊*, 1984, 8(2): 237–244.
- [50] 陈洪达. 养鱼对武汉东湖生态系统的影响[J]. *水生生物学报*, 1989, 13(4): 359–368.
- [51] QIU D, WU Z, LIU B, et al. The restoration of aquatic macrophytes for improving water quality in a hypertrophic shallow lake in Hubei Province, China[J]. *Ecological engineering*, 2001, 18(2): 147–156.
- [52] WRIGHT R M, PHILLIPS V E. Changes in the aquatic vegetation of two gravel pit lakes after reducing the fish population density[J]. *Aquatic botany*, 1992, 43(1): 43–49.

(上接第 57 页)

域自然生态优越,生态系统承载力高,生态功能稳定,自我调节能力强。

参考文献

[1] 环境保护部环境监测司, 中国环境监测总站. 国家重点生态功能区县

域生态环境质量监测评价与考核技术指南[M]. 北京: 中国环境出版社, 2014.

- [2] 赵英时. 遥感应用分析原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [3] 李旭文, 牛志春, 姜晟, 等. Landsat 8 卫星 OLI 遥感影像在生态环境监测中的应用研究[J]. *环境监控与预警*, 2013, 5(6): 1–5.
- [4] 金焰, 张咏, 牛志春, 等. 环境一号卫星 CCD 数据在生态环境监测和评价工作中的应用价值研究[J]. *环境监控与预警*, 2010, 2(4): 29–35.