

# 沉水植物对富营养化水体的净化作用及 修复技术研究进展

郭雅倩<sup>1a,1b</sup>, 薛建辉<sup>1a,2,①</sup>, 吴永波<sup>1a,1b</sup>, 周之栋<sup>2</sup>, 华建峰<sup>2</sup>

[1. 南京林业大学: a. 南方现代林业协同创新中心, b. 生物与环境学院, 江苏 南京 210037;

2. 江苏省中国科学院植物研究所(南京中山植物园), 江苏 南京 210014]

**摘要:** 基于对国内外众多相关文献的分析,就沉水植物对富营养化水体的净化作用、净化机制及修复技术进行了归纳和总结,并对沉水植物的今后研究方向进行了展望。经分析,沉水植物能够明显降低水体中的氮磷营养盐及有机物,改善水体溶解氧和透明度,抑制藻类生长;其对富营养化水体的净化机制主要有吸收同化氮磷营养盐、改善水体-植物-沉积物的理化环境、与微生物协同作用及抑制藻类生长。目前,应用较广泛的利用沉水植物修复富营养化水体的技术主要有原水位种植、生态沉床、联合固定化微生物和人工湿地。基于沉水植物修复富营养化水体的研究现状,建议在藻型-草型湖泊生态系统稳态转换机制、沉水植物退化机制、沉水植物与微生物协同作用过程及机制等方面加强研究力度。

**关键词:** 沉水植物; 富营养化水体; 净化作用; 净化机制; 修复技术

中图分类号: Q949.99; X52 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2020)03-0058-11

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2020.03.08

**Research progress on purification effects and restoration technologies of submerged macrophytes on eutrophic water** GUO Yaqian<sup>1a,1b</sup>, XUE Jianhui<sup>1a,2,①</sup>, WU Yongbo<sup>1a,1b</sup>, ZHOU Zhidong<sup>2</sup>, HUA Jianfeng<sup>2</sup> (1. Nanjing Forestry University: a. Co-Innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China, b. College of Biology and the Environment, Nanjing 210037, China; 2. Institute of Botany, Jiangsu Province and Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210014, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2020, 29(3): 58-68

**Abstract:** Based on analyses of many related domestic and foreign literatures, the purification effects, purification mechanisms, and restoration technologies of submerged macrophytes on eutrophic water were summarized and concluded, and the future research directions of submerged macrophytes were prospected. After analysis, submerged macrophytes can significantly reduce nitrogen and phosphorus nutrients and organic matters in water, improve water dissolved oxygen and transparency, and inhibit the growth of algae. Their purification mechanisms on eutrophic water mainly include absorbing and assimilating nitrogen and phosphorus nutrients, improving physicochemical environment of water-plant-sediment, synergistic effect with microorganisms, and inhibiting the growth of algae. At present, the widely used technologies of using submerged macrophytes to restore eutrophic water mainly include *in situ* planting, ecological sinking bed, combining with immobilized microorganisms, and manual wetland. Based on the research status of submerged macrophytes restoring eutrophic water, it is suggested to strengthen research on steady-state transformation mechanism of algae-grass lake ecosystem, degradation mechanism of submerged macrophytes, synergistic process and mechanism of submerged macrophytes with microorganisms, etc.

收稿日期: 2019-12-13

基金项目: 江苏省农业科技自主创新资金项目(CX(18)2026)

作者简介: 郭雅倩(1995—),女,安徽六安人,硕士研究生,主要从事水生态修复研究。

①通信作者 E-mail: jhxue@cnbg.net

**Key words:** submerged macrophytes; eutrophic water; purification effect; purification mechanism; restoration technology

随着中国工业化进程的不断加快以及化肥的持续过量使用,国内湖泊等水体的富营养化问题日益加剧<sup>[1-2]</sup>。富营养化水体中存在大量的氮和磷等营养物质,容易引起藻类过度繁殖,致使水体的透明度降低、溶解氧含量下降、生境急剧恶化,导致部分水生植物、浮游和底栖动物生长受到抑制,进而使水体的生物多样性下降、生态系统功能退化并面临严重威胁<sup>[3]</sup>。现阶段,水体富营养化的防治技术主要分为物理方法、化学方法和生态学方法<sup>[4]</sup>。物理或化学方法能够在短期内改善水体水质,但不利于维持生态系统的可持续性;生态学方法通过重建水生植物群落降低水体营养负荷、抑制藻类生长,从而提高水体的生物多样性,对修复水体生态系统具有重要意义<sup>[5]</sup>。

沉水植物为水生生态系统的重要组成部分,可通过与浮游植物竞争光照和营养物质来净化富营养化水体<sup>[6]</sup>,并为浮游动物、底栖动物、附生真菌和细菌等提供良好的生长环境,维持水生动物和微生物的多样性<sup>[7],[8]133-148</sup>,因此,恢复以沉水植物为主的水生植物群落是治理富营养化水体、重建水生生态系统的一项重要措施<sup>[9-10]</sup>。近年来,国内外学者就沉水植物对富营养化水体的净化作用、净化机制及修复技术开展了大量的研究工作,笔者对这些研究进行了归纳和总结,以期发现沉水植物修复富营养化水体研究存在的问题和不足,为沉水植物修复富营养化水体的深入研究提供研究方向,并为应用沉水植物修复富营养化湖泊提供参考。

## 1 沉水植物对富营养化水体的净化作用

重建沉水植物群落能够降低富营养化水体的营养负荷,促进悬浮物(SS)沉积,改善水体的化学需氧量(COD)和溶解氧(DO),抑制浮游植物生长,降低藻类爆发风险,提高水体透明度(SD)和水体观感<sup>[7,11-12]</sup>。然而,沉水植物对水体中富营养化成分的去具有选择性,不同种类沉水植物对各水质指标的净化效果存在差异<sup>[13]</sup>。

### 1.1 对氮磷营养盐的净化作用

在富营养化水体中重建沉水植物群落可显著降低水体中氮和磷的水平<sup>[7,12,14]</sup>,但不同种类沉水植物

对富营养化水体中氮和磷的去除效果却存在很大差异。以去除率(水体中氮和磷浓度下降百分率)为指标对部分研究结果<sup>[15-16],[17]20-24,[18]</sup>进行比较,发现轮叶黑藻(*Hydrilla verticillata* var. *rosburghii* Casp.)、金鱼藻(*Ceratophyllum demersum* Linn.)和苦草[*Vallisneria spiralis* (Lour.) Hara]对富营养化水体中氮磷营养盐的净化效果较好。研究表明:沉水植物组合群落对富营养化水体中氮磷营养盐的去除能力低于单一植物群落<sup>[19-21]</sup>。这是因为不同种类沉水植物间存在邻域效应,并且随着水体中养分的增加,邻域效应由促进作用转变为竞争作用,即在高营养水平下,不同种类沉水植物间产生强烈的负向邻域效应<sup>[20]</sup>;群落上层植物可能影响中下层植物受到的光照水平,从而抑制中下层植物对氮磷营养盐的吸收和利用<sup>[21]</sup>。丁玲等<sup>[19]</sup>发现,沉水植物对富营养化水体中氮磷营养盐的去除效果与水体的氮磷营养盐浓度存在一定相关性,但更主要取决于沉水植物的生物量。在一定范围内,沉水植物的生物量或覆盖度越高,对富营养化水体中氮磷营养盐的净化效果越好<sup>[22]</sup>。但是,当沉水植物的生物量或覆盖度达到一定水平后,继续增加生物量或覆盖度并不会提高其对富营养化水体中氮磷营养盐的净化效果<sup>[23-24]</sup>。相反,经过一段时间的生长,沉水植物植株陆续衰老、死亡,并在水体微生物的作用下逐渐腐烂,消耗水体中大量的溶解氧,并腐解产生大量的氮磷营养盐,导致水质恶化<sup>[25-26]</sup>。综上所述,在应用沉水植物修复富营养化水体时,应考虑植物间的竞争关系或生态位差异,合理搭配植物种类,并加强水域管理,适时收割治理水域内的沉水植物,确保沉水植物生物量维持在最佳净化效果水平,以达到水生生态系统长期稳定的目标。

### 1.2 对有机物的净化作用

除了能够净化富营养化水体中的氮磷营养盐,沉水植物对富营养化水体中的多种有机物也有一定的净化作用。例如:Luo等<sup>[27]</sup>构建的5种小型沉水植被湿地系统对水体中COD的净化作用显著,对COD的去除率达53.44%~62.08%;吴振斌等<sup>[28]</sup>发现,在武汉东湖的大型实验围隔系统中,沉水植物围隔内水体的COD和生化需氧量(BOD)较对照围隔和大湖水体

低50%左右,并且,沉水植物围隔内水体中有机物的种类和数量低于对照围隔和大湖水体;Meng等<sup>[29]</sup>在模拟实验中发现,沉水植物菹草(*Potamogeton crispus* Linn.)对水体中有机物氮的净化作用显著。综合上述研究结果,在应用沉水植物修复富营养化水体前,建议对富营养化水体进行系统的监测和调研,以确定富营养化水体的主要有机物,从而选择净化作用强的沉水植物种类或组合修复富营养化水体。

### 1.3 对水体溶解氧和透明度的改善作用

光照和DO是水生生物生长繁殖必不可少的重要元素。沉水植物可通过降低水体中浮游植物含量<sup>[7]</sup>和SS浓度<sup>[30]</sup><sup>[37]</sup>等途径抑制水体中的生物性和非生物性悬浮物,提高SD和光照,从而促进沉水植物光合作用等生理代谢活动,提高水体的DO浓度,改善水质条件。相关研究结果表明:沉水植物区域水体的SS浓度明显低于开放水域<sup>[31]</sup>;在一定阈值内,高生物量对SS再悬浮的抑制能力较强<sup>[32]</sup>,但超过一定阈值后其对SS再悬浮的抑制作用却很小<sup>[33]</sup>。此外,沉水植物可显著提高水体的DO浓度<sup>[34]</sup>;不同种类沉水植物对水体DO浓度的提高能力存在明显差异<sup>[12]</sup>,<sup>[30]</sup><sup>[41]</sup>。沉水植物组合对水体中SS的去除能力及DO的增加能力均显著优于单一植物<sup>[35]</sup>。

### 1.4 对藻类生长的抑制作用

叶绿素是藻类的重要组成成分,水体叶绿素a(Chla)含量常用于表征水体中藻类的现存量,是水体富营养化评价的重要指标。Norlin等<sup>[36]</sup>调查发现,在加拿大阿尔伯塔省北部靠近Utikuma湖的24个湿地,当沉水植物覆盖率高于25%时,水体Chla含量较低。模拟试验结果表明:苦草、黑藻[*Hydrilla verticillata* (Linn. f.) Royle]、狐尾藻(*Myriophyllum verticillatum* Linn.)、金鱼藻、菹草和马来眼子菜(*Potamogeton wrightii* Morong)等沉水植物能有效降低水体Chla含量,但伊乐藻(*Elodea nuttallii* Linn.)的作用效果却较差<sup>[12]</sup>,<sup>[17]</sup><sup>[18]</sup>,<sup>[37]</sup>。很多研究结果显示:沉水植物能有效降低富营养化水体中藻类的生物量和密度,并改善藻类群落结构<sup>[38-42]</sup>。进一步研究结果表明:沉水植物对藻类生长的抑制作用受到生物因子和非生物因子的影响。高温、光照不足和营养失衡等均可降低沉水植物的生物量,从而使沉水植物对藻类的控制效率下降<sup>[43]</sup>;并且,在富营养化水体修复实践中,沉水植物组合较单一植物更能抵抗磷负荷导致的藻类入侵<sup>[44]</sup>。

## 2 沉水植物对富营养化水体的净化机制

### 2.1 吸收同化氮磷营养盐

沉水植物对富营养化水体的氮和磷循环具有多重作用。由于沉水植物的整个植株位于水面下,其根、茎、叶在生长过程中能够吸收水体中的营养物质<sup>[45-46]</sup>,并同化成生长所需的蛋白质和核酸等结构组成物质<sup>[47]</sup>。然而,不同种类沉水植物的生理生态学特性却存在显著差异,植株对养分的吸收效率也明显不同。大量研究以酶促反应动力学理论为基础,采用常规耗竭法对沉水植物的养分吸收动力学进行分析,结果表明:不同种类沉水植物对不同形态氮和磷的吸收特性存在差异<sup>[48-50]</sup>,同一植物不同器官对水体中氮和磷的吸收特性也存在明显差异<sup>[50-52]</sup>。徐昇等<sup>[53]</sup>采用稳定性同位素<sup>15</sup>N示踪技术研究苦草对氮的吸收和转运,发现苦草根系对 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 的吸收能力显著强于其对 $\text{NO}_3^--\text{N}$ 的吸收能力,并且,根系吸收的氮可向叶片转移。基于不同种类沉水植物各养分的吸收动力学特性研究结果,可筛选出适宜修复不同营养状况和不同修复阶段富营养化水体的沉水植物。实际上,沉水植物通过植株的吸收同化作用去除水体中氮和磷的能力较小,其主要通过协同作用去除水体中的氮和磷<sup>[54]</sup>。

### 2.2 改善水体-植物-沉积物的理化环境

沉水植物对水体-植物-沉积物理化环境的改善作用主要体现在以下2个方面。一方面,沉水植物在稳定沉积物和改善水体透明度方面具有重要作用<sup>[8]</sup><sup>[197-214]</sup>,<sup>[55-56]</sup>。相关研究结果表明:沉水植物对水体中的悬浮物起到阻挡和吸附作用,能够促进悬浮物的沉积,降低水体浊度<sup>[57]</sup><sup>[15]</sup>;沉水植物还可以减少水流、波浪和水生动物活动等引起的沉积物扰动,其根系对沉积物也有一定的固定作用,可有效抑制沉积物的再悬浮,减少沉积物中营养物质的释放,进而维持水体透明度<sup>[58]</sup>。由于不同沉水植物的形态结构和空间分布存在差异,其对水体水动力特性的影响也不同,因此,沉水植物对悬浮物沉积和沉积物再悬浮存在物种特异性差异<sup>[33]</sup>,<sup>[59]</sup>。另外,已有研究结果证实,茎干分枝及叶片呈轮生细碎状的沉水植物更有利于截留水体中的细颗粒物<sup>[60]</sup>;并且,在一定阈值(300 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ 左右)内,沉水植物的生物量越高,其抑制水体中沉积物再悬浮的有效性越强<sup>[32]</sup>。沉水植物茎叶

附着物的养分含量丰富,总有机碳(TOC)和总氮(TN)含量分别为75.29~106.99和2.43~7.01  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ <sup>[57]</sup><sup>[24]</sup>;沉水植物对水体中化学需氧量(COD)的去除率取决于悬浮物(SS)的物理沉积过程<sup>[27]</sup>。

另一方面,由于沉水植物的茎、叶和根系分别与水体和沉积物形成了特殊的微界面,植物可通过呼吸作用、光合作用、根系分泌等改善水体、沉积物和微界面的理化性质,进而影响水体中营养物质的含量和形态<sup>[61-62]</sup>。具体表现为:沉水植物通过茎和叶的光合作用释放 $\text{O}_2$ ,通过呼吸作用释放 $\text{CO}_2$ ,从而调节水体中溶解氧(DO)、pH值以及无机碳的形态和含量<sup>[3]</sup>;释放到水体中的 $\text{O}_2$ 可提高沉积物表层氧化还原电位(Eh),促进氨氮挥发,加速水体和沉积物中磷的沉淀,抑制结合态磷的释放<sup>[45,63]</sup>;同时,沉水植物根系分泌的 $\text{H}^+$ 或有机酸导致根际周边沉积物pH值降低,致使沉积物中吸附的磷被溶解,进而释放到上覆水中,促进沉水植物对营养盐的吸收和利用<sup>[61,64]</sup>。王立志等<sup>[65]</sup>的研究结果表明:沉水植物可通过提高上覆水中DO、Eh值和pH值及沉积物Eh值的方式影响磷在沉水植物和上覆水间的迁移和转化。上述研究表明:沉水植物是水体、植物、沉积物及微界面理化环境的重要调节者,可促进水生生态系统的生物地球化学循环过程。

### 2.3 与微生物协同作用

沉水植物与微生物的协同作用可促进湖泊生态系统中营养物质的循环,从而对富营养化水体起到净化作用<sup>[66-69]</sup>。研究发现,沉水植物能够为水体中的微生物提供附着基质和栖息场所,形成生物膜<sup>[70]</sup>;而植物-生物膜-水体交界面释放的植物代谢产生的 $\text{O}_2$ 和有机质等为微生物生长提供了适宜的微环境,间接促进了富营养化水体中碳、氮和磷的循环<sup>[71-72]</sup>。另外,沉水植物表面的微生物生物膜的丰度和活性均高于临近环境<sup>[73]</sup>,且沉水植物表面的微生物功能多样性和稳定性更高,利于沉水植物应对富营养化的水体环境<sup>[74]</sup>。沉水植物与微生物协同作用,可有效抑制富营养化水体中水华的形成<sup>[75-76]</sup>。

研究发现,生物膜中微生物的种类和活性受沉水植物表面氧含量变化影响较大,这是因为沉水植物日间释放 $\text{O}_2$ (可加强硝化菌的活性)、夜间消耗 $\text{O}_2$ ,直接导致微生物的好氧和厌氧代谢交替变换<sup>[73,77]</sup>。由于水流扰动可影响微生物的群落结构和多样性<sup>[78]</sup>,附着于沉水植物表面的微生物的多样性和丰度会随

着植物在水流中的摆动而升高<sup>[79-81]</sup>;并且,适当的水流扰动可防止微生物的生物膜厚度持续增加,避免沉水植物受到养分竞争和光照遮挡<sup>[82-83]</sup>。

沉水植物还可通过植株表面分泌的营养物质和特异性化感物质,或截留水体中漂浮颗粒物,塑造生物膜中特异的微生物群落结构<sup>[80-81,84-91]</sup>。与挺水植物相比,沉水植物根系和茎的分泌物中木质素/氮素比较低,可为反硝化细菌提供更易降解的代谢物质,有利于富营养化水体中氮的反硝化去除<sup>[92]</sup>。生物膜为水体中重要的微生物集合体,被定植于植物表面分泌的胞外多聚物(如多糖、蛋白质及其他大分子物质)中<sup>[93]</sup>;微生物分泌的群体感应信号分子在细胞间的传递可维系生物膜的形成和功能<sup>[94]</sup>。综合分析认为,水流扰动及植物种类等影响沉水植物生长代谢的因子可改变生物膜中微生物的种类和活性,从而影响沉水植物与微生物间的协同作用。

微生物在人工湿地底泥营养物质的循环转化过程中发挥重要作用。例如:人工湿地沉积物中有机氮的去除主要依靠氨化细菌的作用转化为 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ ,再通过硝化作用转化为 $\text{NO}_2^--\text{N}$ 和 $\text{NO}_3^--\text{N}$ ,最终通过反硝化作用转化为 $\text{N}_2$ ,排出水体<sup>[95-97]</sup>;芽孢杆菌属(*Bacillus*)、梭菌属(*Clostridium*)和假单胞菌属(*Pseudomonas*)的部分种类能够分泌碱性磷酸酶,可将有机磷和不溶解磷降解为无机的可溶性磷酸盐,供植物直接吸收利用<sup>[98]</sup>。为了加强微生物对水体中富营养化物质的去除效率,可在底泥中设置微生物电池反应器,促使阳极释放电子,阴极富集电子,同时沉水植物根系释放的 $\text{O}_2$ 可加速好氧微生物的好氧脱氮过程<sup>[99]</sup>。并且,湿地生态系统中植物凋落物的输入可对沉积物中微生物的多样性产生影响<sup>[100]</sup>。

### 2.4 抑制藻类生长

沉水植物对藻类的抑制作用包括直接抑制作用和间接抑制作用2个方面,直接抑制作用表现为沉水植物和藻类对光照、生长空间和营养物质的竞争,而间接抑制作用则表现为沉水植物导致水体理化环境变化,从而对藻类产生不利影响。

沉水植物的个体较大,生命周期较长,吸收和储存营养盐的能力较强,因此,沉水植物在与藻类竞争养分时占有绝对优势,从而降低藻类生物量,改变藻类群落结构<sup>[34]</sup>。化感作用是沉水植物抑制藻类生长的重要途径之一<sup>[101-102]</sup>。沉水植物可通过持续释放低剂量化感物质抑制藻类生长<sup>[103]</sup>,目前已从沉水植

物体及生长水体中鉴定出酚酸类、脂肪酸类、生物碱类、萜类和黄酮类等抑制藻类生长的化感物质<sup>[39,104-106]</sup>。不同种类沉水植物释放的化感物质对藻类生长的抑制作用存在差异<sup>[39,101,107]</sup>,如伊乐藻、轮叶黑藻和苦草均可释放酚酸类化感物质抑制铜绿微囊藻[*Microcystis aeruginosa* (Kutzing) Kutzing]生长,培养3 d后向水中释放的总酚类化合物(TPC)含量分别为0.8%、0.3%和1.0%<sup>[108]</sup>。部分化感物质联合使用对藻类生长的抑制作用明显加强<sup>[104-105,109]</sup>,这是因为不同种类化感物质(如多酚和脂肪酸)具有不同的化学性质,其对藻类生长的抑制模式也可能不同,因此,可利用复合沉水植物群落增强其对藻类生长的抑制作用<sup>[110]</sup>。沉水植物向水体中释放的化感物质很快被水稀释,并以水为媒介对靶标生物产生化感作用<sup>[111]</sup>;这些化感物质主要通过抑制藻类的光合作用和呼吸作用,对藻类细胞造成氧化损伤和DNA损伤或诱导藻细胞程序性死亡等途径抑制藻类生长繁殖<sup>[112-116]</sup>。但是,不同化感物质抑制藻类生长的机制尚不清楚,建议通过蛋白组学方法研究藻类酶和蛋白表达对化感物质的响应,通过比较差异蛋白探讨化感物质的抑藻机制<sup>[117]</sup>。同时,还可从植物化学生态学角度深入分析沉水植物与藻类的消长规律,为富营养化水体的生态修复技术研发提供理论依据。

Ferreira等<sup>[41]</sup>发现,巴西南部Mangueira湖泊无植物覆盖区的浮游植物生物量增加,特别是蓝藻(Cyanobacteria)生物量增加,与水体的营养盐浓度、pH值和 $\text{HCO}_3^-$ 含量的升高均有关;而沉水植物覆盖区水体的pH值、无机碳和氮磷浓度均较低,蓝藻的生物量也较低;Sheppard等<sup>[118]</sup>发现,水体的 $\text{CO}_2$ 浓度升高和pH值降低均不利于蓝藻生长;并且,富营养化湖泊表层蓝藻优势在富含 $\text{HCO}_3^-$ 的水体中更明显<sup>[119]</sup>。可见,除氮和磷浓度外,pH值和 $\text{HCO}_3^-$ 含量是影响藻型-草型湖泊稳态转换的重要因子。

此外,沉水植物通过提高沉水植被覆盖区内浮游动物的数量,使浮游植物受到更大的掠食压力,从而对浮游植物起到自上而下的控制作用<sup>[8]91-113, [120]</sup>。Zeng等<sup>[7]</sup>发现,在沉水植被恢复过程中,浮游动物密度与沉水植物的生物量逐年升高,且小型浮游动物种类逐渐被大型浮游动物种类取代。并且,大型浮游动物对浮游植物的捕食增加可能是水生生态系统发育过程中沉水植被恢复的重要机制,对促进亚热带浅水湖泊维持清水状态有重要作用<sup>[121]</sup>。

### 3 沉水植物对富营养化水体的修复技术

重建沉水植被是控制富营养化水体氮磷营养盐负荷及修复水生生态系统的重要手段。近20年来,研究者不断研发富营养化水体植物修复技术,逐渐开发出原水位种植、生态沉床、联合固定化微生物和人工湿地等多种生物修复新技术,沉水植物被广泛用于富营养化水体修复实践,目前主要用于生态沟渠、复合生态池、净化塘和城市湖泊等水体修复。

#### 3.1 原水位种植技术

原水位种植技术操作简单、成本低,但在实际应用中沉水植物的成活率易受水深等环境条件的影响。在富营养化水体修复实践中,沉水植物的原水位种植一般适用于浅水区及富营养化程度较轻、水体浊度较低的水体,种植方式有直接种植、定植毯种植和网箱种植等。直接种植一般根据水体底质和水深采取不同的种植方式,如在浅水软泥区直接抛植或人工扦插,在深水区则需配重抛植或工具辅助扦插<sup>[122]</sup>。定植毯可使沉水植物生长不受河道或湖泊底泥硬度的影响,在植物种植于定植毯后,可用沙袋或配重块使定植毯沉于水底,以提高沉水植物的存活率,并实现沉水植物的模块化种植<sup>[123]</sup>。网箱种植是指将沉水植物种植于类似养鱼的网箱内,解决了沉水植物难种植、难固定等问题,可用于农业排水沟渠、废水塘等水体的修复<sup>[124]</sup>。

#### 3.2 生态沉床技术

在以藻类为主的富营养化水体中,光照不足是沉水植物生长的主要限制因子<sup>[125]</sup>,为解决这一问题,研究者们研发出渐沉式沉床和人工沉床等多种生态沉床技术。这些生态沉床技术是利用沉床载体和人工基质栽植沉水植物进行富营养化水体修复的技术,从沉水植物生长适应性出发,通过调节浮力实现沉床载体在水体中的深度,有效解决了应用沉水植物修复富营养化水体时的光抑制问题,利于沉水植物降低富营养化水体的营养盐含量<sup>[126-128]</sup>。

生态沉床技术的沉床装置包括沉床载体、浮力层和升降调节系统3个部分<sup>[126]</sup>。沉床载体是沉床装置的重要组成部分,利用人工基质为沉水植物根系生长提供支撑。为了防止二次污染并提高生态沉床技术对富营养化水体的净化效果,研究者已研发出多种新型生态基质,如植物纤维基质(利用棕毛和丝瓜络

等制成)、改性膨润土和新型多孔材料(如颗粒活性炭和火山岩等),这些生态基质通常具有多孔状的粗糙表面并富含多种矿质元素,可附着大量微生物,利于沉水植物生长,并与沉水植物根际微生物共同作用,促进难以被沉水植物吸收的有机磷转化为无机磷,从而被沉水植物吸收利用,最终达到改善水体和沉积物理化环境的目的<sup>[129-130]</sup>。而且,这些生态基质还可为沉水植物、浮游动物、浮游植物和微生物等提供良好的生长载体,利于这些水生生物生长<sup>[98,128]</sup>。可见,生态基质与沉水植物联合作用具有协同效应,且更具长效性和稳定性,对水生生态系统的可持续发展具有重要意义<sup>[98,131]</sup>。近年来,利用沉水植物和人工沉床联合修复富营养化水体的实践越来越多,尤其是对水体较深、透明度较低的富营养化水体的修复<sup>[127]</sup>,为加速富营养化水体植物重建及水生生态系统修复提供了新途径。

### 3.3 联合固定化微生物技术

联合固定化微生物技术利用沉水植物与特定菌群(如固定化氮循环菌、固定化聚磷菌、固定化光合细菌等)的联合作用修复富营养化水体<sup>[69]</sup>。沉水植物与固定化微生物联合作用对维持和提高富营养化水体的水质效果显著<sup>[132-133]</sup>。迄今为止,研究者已经发现多种具有特定功能的菌群,主要是对氮、磷及有机物等具有降解转化作用的菌群<sup>[134]</sup>;而且,利用沉水植物与固定化微生物联合修复富营养化水体的实践越来越多<sup>[135]</sup>。但在功能菌筛选以及沉水植物与固定化微生物的协同作用和联合方式上仍有很多方面值得探究。例如,固定化光合细菌具有降解多种有机物的能力<sup>[136]</sup>,白腐真菌可有效降解多环芳烃等有机物<sup>[137]</sup>,但尚未见二者与沉水植物联合作用修复富营养化水体方面的研究报道。再如,针对一些富营养化程度严重、成分复杂的水体,宜同时使用多种功能微生物与沉水植物构建修复系统,以克服单一功能微生物难以去除多种富营养成分的缺陷,这对成分复杂的富营养化水体修复具有重要意义。

### 3.4 人工湿地技术

人工湿地技术是利用基质、植物和微生物组成的半自然复合生态系统,通过三者间的一系列物理、化学和生物作用去除富营养化水体中的营养盐和有机物等成分<sup>[45,138-139]</sup>。近年来,人工湿地技术已广泛用于农业污水、养殖废水、城市地表径流、生活污水和工业废水等富营养化水体的修复实践,并取得了良好的

效果<sup>[138,140-141]</sup>。人工湿地中沉水植物的根际效应是去除富营养化水体中营养盐和有机物等成分的重要原因。研究表明:沉水植物通过根系释放 $O_2$ 并分泌有机物,利于人工湿地内基质和沉水植物表面形成微生物群落,但沉水植物对 $O_2$ 的输送和释放能力以及根系分泌物的量和组成均受沉水植物种类和生境因子的影响<sup>[142-143]</sup>。同时,人工湿地中微生物的旺盛生长可促进沉水植物生长,二者协同作用对维持人工湿地的长期稳定具有重要意义<sup>[144]</sup>。

根据水体在人工湿地中的流动形式,可将人工湿地分为水平流人工湿地(包括水平潜流人工湿地和水平表面流人工湿地)和垂直流人工湿地等类型<sup>[145]</sup>。水平流人工湿地和垂直流人工湿地可去除水体中90%以上的有机质、总氮和总磷,且垂直流人工湿地具有长期去除水体中磷的优势<sup>[146]</sup>。其中,水平潜流人工湿地是20世纪80至90年代城市污水处理最常见的人工湿地类型,可有效去除水体中的有机物和悬浮物<sup>[147]</sup>,修复能力具有长效性和稳定性<sup>[148]</sup>。混合人工湿地则是同时采用2种以上人工湿地类型修复富营养化水体,能够结合各类型人工湿地的优势,提高人工湿地对富营养化水体的净化效率<sup>[149]</sup>。在富营养化水体修复实践中,应根据水体特点,选择高效的人工湿地修复技术。若以去有机物和悬浮物为目标,建议采用水平潜流人工湿地;若以去除磷为目标,建议采用垂直流人工湿地;若修复复杂水体,则建议采用混合人工湿地。

## 4 研究展望

沉水植物在净化富营养化水体和修复退化生态系统功能中具有重要作用。目前关于沉水植物净化富营养化水体的研究主要集中于不同种类沉水植物对富营养化水体净化效果的比较分析,关于其净化机制和修复技术应用等研究也取得了一定的研究进展,但关于沉水植物退化机制等方面的研究却有待加强。随着水体富营养化程度的不断加剧,湖泊生态系统的结构和功能必然发生明显变化,致使沉水植物逐渐退化,浮游藻类逐渐占据优势,最终导致草型湖泊生态系统向藻型湖泊生态系统转变,因此,藻型-草型湖泊生态系统稳态转换机制是一个重要的研究方向。针对不同类型的湖泊,应通过野外长期定位实验或室内模拟实验,阐明沉水植物的退化或消亡机制,分析

影响藻型-草型湖泊生态系统转换的关键因子和驱动力,有助于依据湖泊所处阶段有针对性地采取消减污染源和种植沉水植物等相应治理措施,以期持久恢复草型湖泊生态系统的清水稳态。

另外,在利用沉水植物治理污染湖泊的过程中,应从沉水植物退化机制出发,充分考虑富营养化水体的特点及沉水植物的生长适应性,并结合沉水植物的生长周期和生态位等特点,确定最佳种类组合及种植比例,因地制宜开展富营养化水体修复。同时,还应加强沉水植物与微生物协同作用过程及机制研究,进而揭示微生物对富营养化水体中营养物质的降解和转化机制,以期筛选出功能微生物并研发出具有高效净化作用的沉水植物与固定化微生物的联合方式。在富营养化水体修复实践中,为了实现同时净化多种有机物的目的,可将多种真菌和细菌等结合起来形成复合菌群,研发多功能复合水体修复系统,加速修复技术的广泛应用。总之,随着对沉水植物净化和修复富营养化水体的机制和技术的不断深入研究,有望广泛利用沉水植物群落重建和恢复修复富营养化水体生态系统。

#### 参考文献:

- [1] LE C, ZHA Y, LI Y, et al. Eutrophication of lake waters in China: cost, causes, and control[J]. *Environmental Management*, 2010, 45: 662-668.
- [2] JIN X C, XU Q J, HUANG C Z. Current status and future tendency of lake eutrophication in China[J]. *Science in China Series C: Life Sciences*, 2005, 48: 948-954.
- [3] DORGHAM M M. Effects of eutrophication[M]//ANSARI A A, GILL S S. *Eutrophication: Causes, Consequences and Control*. Dordrecht: Springer, 2014: 29-44.
- [4] HUANG T L, LI X, CHENG Y, et al. Methods of reservoir water pollution control and water quality improvement[M]//HUANG T. *Water Pollution and Water Quality Control of Selected Chinese Reservoir Basins*. Cham: Springer, 2016: 265-277.
- [5] 杨 旻, 吴小刚, 张维昊, 等. 富营养化水体生态修复中水生植物的应用研究[J]. *环境科学与技术*, 2007, 30(7): 98-102.
- [6] BAGOUSSE-PINGUET Y L, LIANCOURT P, GROSS N, et al. Indirect facilitation promotes macrophyte survival and growth in freshwater ecosystems threatened by eutrophication[J]. *Journal of Ecology*, 2012, 100: 530-538.
- [7] ZENG L, HE F, DAI Z G, et al. Effect of submerged macrophyte restoration on improving aquatic ecosystem in a subtropical, shallow lake[J]. *Ecological Engineering*, 2017, 106: 578-587.
- [8] JEPPESEN E, SØNDERGAARD M, SØNDERGAARD M, et al. The Structuring Role of Submerged Macrophytes in Lakes[M]. New York: Springer, 1998.
- [9] ŠPOLJAR M, ZHANG C, DRAŽINA T, et al. Development of submerged macrophyte and epiphyton in a flow-through system: assessment and modelling predictions in interconnected reservoirs[J]. *Ecological Indicators*, 2017, 75: 145-154.
- [10] 吴振斌, 邱东茹, 贺 锋, 等. 沉水植物重建对富营养化水体氮磷营养水平的影响[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(8): 1351-1353.
- [11] YE C, LI C H, YU H N, et al. Study on ecological restoration in near-shore zone of a eutrophic lake, Wuli Bay, Taihu Lake[J]. *Ecological Engineering*, 2011, 37: 1434-1437.
- [12] 田 琦, 王沛芳, 欧阳萍, 等. 5种沉水植物对富营养化水体的净化能力研究[J]. *水资源保护*, 2009, 25(1): 14-17.
- [13] WANG H, WANG X, WANG S M, et al. Purification efficiency of compound aquatic plants for the eutrophic water body[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 675/677: 430-433.
- [14] ZHANG Z H, LI W, ASHRAF M A. Allelopathic effects of various aquatic plants in eutrophic water areas[J]. *Journal of Coastal Research*, 2018, 82: 137-142.
- [15] 金树权, 周金波, 包薇红, 等. 5种沉水植物的氮、磷吸收和水质净化能力比较[J]. *环境科学*, 2017, 38(1): 156-161.
- [16] 黄子贤, 张饮江, 马海峰, 等. 4种沉水植物对富营养化水体氮磷的去除能力[J]. *生态科学*, 2011, 30(2): 102-106.
- [17] 李 威. 6种湖南常见沉水植物对富营养化废水净化效果研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学环境科学与工程学院, 2018.
- [18] 高镜清, 熊治廷, 张维昊, 等. 常见沉水植物对东湖重度富营养化水体磷的去除效果[J]. *长江流域资源与环境*, 2007, 16(6): 796-800.
- [19] 丁 玲, 李羚君, 李剑峰, 等. 沉水植物净化人工水源湖原水中氮磷和悬浮物的试验研究[J]. *生态环境学报*, 2018, 27(1): 122-129.
- [20] HAO B B, WU H P, LI W, et al. Periphytic algae mediate interactions between neighbor and target submerged macrophytes along a nutrient gradient[J]. *Ecological Indicators*, 2020, 110: 105898.
- [21] 闵奋力, 左进城, 刘碧云, 等. 穗状狐尾藻与不同生长期苦草种间竞争研究[J]. *植物科学学报*, 2016, 34(1): 47-55.
- [22] LIU L, GUAN Y T, QIN T J, et al. Effects of water regime on the growth of the submerged macrophyte *Ceratophyllum demersum* at different densities[J]. *Journal of Freshwater Ecology*, 2018, 33(1): 45-56.
- [23] DAI Y R, JIA C R, LIANG W, et al. Effects of the submerged macrophyte *Ceratophyllum demersum* L. on restoration of a eutrophic waterbody and its optimal coverage[J]. *Ecological Engineering*, 2012, 40: 113-116.
- [24] 陈 双, 王国祥, 许晓光, 等. 水生植物类型及生物量对污水处理厂尾水净化效果的影响[J]. *环境工程学报*, 2018, 12(5): 1424-1433.
- [25] 周林飞, 赵言稳, 关秀婷. 6种水生植物腐烂过程中水质理化指标的变化室内模拟研究[J]. *湿地科学*, 2016, 14(6):

- 832-839.
- [26] ZHANG L S, ZHANG S H, LV X Y, et al. Dissolved organic matter release in overlying water and bacterial community shifts in biofilm during the decomposition of *Myriophyllum verticillatum*[J]. Science of the Total Environment, 2018, 633: 929-937.
- [27] LUO Y Z, SUN S Q, ZHANG H. Effectiveness of various wetland vegetation species on mitigating water pollution from highway runoff [J]. Water Environment Research, 2019, 91(9): 906-917.
- [28] 吴振斌, 邱东茹, 贺 锋, 等. 水生植物对富营养水体水质净化作用研究[J]. 武汉植物学研究, 2001, 19(4): 299-303.
- [29] MENG F B, CHI J. Dissipation gradient of pyrene in the rhizosphere of *Potamogeton crispus* L.[J]. Ecological Engineering, 2017, 106: 10-16.
- [30] 杨皓然. 湖南省常见水生植物的耐污与去污能力比较研究 [D]. 长沙: 中南林业科技大学林学院, 2016.
- [31] HORPPILA J, NURMINEN L. Effects of different macrophyte growth forms on sediment and P resuspension in a shallow lake[J]. Hydrobiologia, 2005, 545: 167-175.
- [32] JAMES W F, BARKO J W, BUTLER M G. Shear stress and sediment resuspension in relation to submersed macrophyte biomass [J]. Hydrobiologia, 2004, 515: 181-191.
- [33] LI E H, LI W, LIU G H, et al. The effect of different submerged macrophyte species and biomass on sediment resuspension in a shallow freshwater lake[J]. Aquatic Botany, 2008, 88: 121-126.
- [34] ZHOU Y W, ZHOU X H, HAN R M, et al. Reproduction capacity of *Potamogeton crispus* fragments and its role in water purification and algae inhibition in eutrophic lakes[J]. Science of the Total Environment, 2017, 580: 1421-1428.
- [35] ZHANG Q, LIU Y P, LUO F L, et al. Does species richness affect the growth and water quality of submerged macrophyte assemblages? [J]. Aquatic Botany, 2019, 153: 51-57.
- [36] NORLIN J I, BAYLEY S E, ROSS L C M. Submerged macrophytes, zooplankton and the predominance of low-over high-chlorophyll states in western boreal, shallow-water wetlands [J]. Freshwater Biology, 2005, 50: 868-881.
- [37] 鲜啟鸣, 陈海东, 邹惠仙, 等. 四种沉水植物的克藻效应[J]. 湖泊科学, 2005, 17(1): 75-80.
- [38] 姚 远, 贺 峰, 胡胜华, 等. 沉水植物化感作用对西湖湿地浮游植物群落的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(4): 971-978.
- [39] ZUO S P, WANG H M, GAN L D, et al. Allelopathy appraisal of worm metabolites in the synergistic effect between *Limnodrilus hoffmeisteri* and *Potamogeton malaianus* on algal suppression [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019, 182: 109482.
- [40] 董淮晋, 何连生, 黄彩红, 等. 利用轮藻和金鱼藻组合治理白洋淀富营养化水体研究 [J]. 湿地科学, 2013, 11(4): 505-509.
- [41] FERREIRA T F, CROSSETTI L O, MARQUES D M L M, et al. The structuring role of submerged macrophytes in a large subtropical shallow lake: clear effects on water chemistry and phytoplankton structure community along a vegetated-pelagic gradient [J]. Limnologia, 2018, 69: 142-154.
- [42] 黄小龙, 郭艳敏, 万 斌, 等. 沉水植物恢复对城市富营养化湖泊生态环境影响[J]. 环境工程, 2018, 36(7): 17-21.
- [43] HAN H J, CHEN Y G, JØRGENSEN S E, et al. A system-dynamic model on the competitive growth between *Potamogeton malaianus* Miq. and *Spirogyra* sp. [J]. Ecological Modelling, 2009, 220: 2206-2217.
- [44] SETO M, TAKAMURA N, IWASA Y. Individual and combined suppressive effects of submerged and floating-leaved macrophytes on algal blooms [J]. Journal of Theoretical Biology, 2013, 319: 122-133.
- [45] DIERBERG F E, DEBUSK T A, JACKSON S D, et al. Submerged aquatic vegetation-based treatment wetlands for removing phosphorus from agricultural runoff: response to hydraulic and nutrient loading [J]. Water Research, 2002, 36(6): 1409-1422.
- [46] 吴爱平, 吴世凯, 倪乐意. 长江中浅水湖泊水生植物氮磷含量与水柱营养的关系 [J]. 水生生物学报, 2005, 29(4): 406-412.
- [47] GRANÉLI W, SOLANDER D. Influence of aquatic macrophytes on phosphorus cycling in lakes [J]. Hydrobiologia, 1988, 170: 245-266.
- [48] 常会庆, 李 娜, 徐晓峰. 三种水生植物对不同形态氮素吸收动力学研究[J]. 生态环境, 2008, 17(2): 511-514.
- [49] 陈少毅, 许 超, 姚 瑶, 等. 黑藻和苦草对氨氮、硝态氮和磷吸收动力学研究 [J]. 环境科学与技术, 2012, 35(8): 34-36, 50.
- [50] LI J H, YANG X Y, WANG Z F, et al. Comparison of four aquatic plant treatment systems for nutrient removal from eutrophied water [J]. Bioresource Technology, 2015, 179: 1-7.
- [51] 张 松, 何绪刚, 谢从新, 等. 苦草对  $\text{NH}_4^+$  的吸收动力学 [J]. 水生态学杂志, 2011, 32(6): 46-51.
- [52] 王圣瑞, 金相灿, 赵海超, 等. 沉水植物黑藻对上覆水中各形态磷浓度的影响 [J]. 地球化学, 2006, 35(2): 179-186.
- [53] 徐 昇, 李 欣, 钟 萍, 等. 苦草根系对硝氮和氨氮的吸收 [J]. 生态科学, 2012, 31(3): 312-317.
- [54] 李 琳, 岳春雷, 张 华, 等. 不同沉水植物净水能力与植株体细菌群落组成相关性 [J]. 环境科学, 2019, 40(11): 4962-4970.
- [55] MADSEN J D, CHAMBERS P A, JAMES W F, et al. The interaction between water movement, sediment dynamics and submersed macrophytes [J]. Hydrobiologia, 2001, 444: 71-84.
- [56] KUFEL L, KUFEL I. *Chara* beds acting as nutrient sinks in shallow lakes: a review [J]. Aquatic Botany, 2002, 72: 249-260.
- [57] 董 彬. 典型沉水植物茎叶微界面特性及其生态效应 [D]. 南京: 南京师范大学地理科学学院, 2015.
- [58] 周裔文, 许晓光, 韩睿明, 等. 水体氮磷营养负荷对苦草净化能力和光合荧光特性的影响 [J]. 环境科学, 2018, 39(3): 1180-1187.
- [59] VERMAAT J E, SANTAMARIA L, ROOS P J. Water flow across and sediment trapping in submerged macrophyte beds of contrasting

- growth form [J]. *Archiv fur Hydrobiologie*, 2000, 148 (4): 549-562.
- [60] ROVIRA A, ALCARAZ C, TROBAJO R. Effects of plant architecture and water velocity on sediment retention by submerged macrophytes[J]. *Freshwater Biology*, 2016, 61: 758-768.
- [61] 李振国, 王国祥, 张佳, 等. 苦草 (*Vallisneria natans*) 根系对沉积物中各形态磷的影响[J]. *环境科学*, 2014, 35 (4): 1304-1310.
- [62] 马久远, 王国祥, 李振国, 等. 太湖两种水生植物群落对沉积物中氮素的影响[J]. *环境科学*, 2013, 34(11): 4240-4250.
- [63] DODDS W K. The role of periphyton in phosphorus retention in shallow freshwater aquatic systems [J]. *Journal of Phycology*, 2003, 39(5): 840-849.
- [64] 李王菲, 褚淑祎, 崔灵周, 等. 沉水植物生长和降解对富营养化水体氮磷的影响机制研究进展[J]. *生态科学*, 2018, 37 (4): 225-230.
- [65] 王立志, 王国祥, 俞振飞, 等. 沉水植物生长期对沉积物和上覆水之间磷迁移的影响[J]. *环境科学*, 2012, 33 (2): 385-392.
- [66] WU Q L, ZWART G, WU J F, et al. Submersed macrophytes play a key role in structuring bacterioplankton community composition in the large, shallow, subtropical Taihu Lake, China [J]. *Environmental Microbiology*, 2007, 9(11): 2765-2774.
- [67] 李琳琳, 汤祥明, 高光, 等. 沉水植物生态修复对西湖细菌多样性及群落结构的影响[J]. *湖泊科学*, 2013, 25 (2): 188-198.
- [68] ZHANG L L, ZHANG Y P, LIU L Z. Effect of submerged macrophytes *Vallisneria spiralis* L. on restoring the sediment contaminated by enrofloxacin in aquaculture ponds[J]. *Ecological Engineering*, 2019, 140: 105596.
- [69] 韩永和, 李敏. 植物-微生物联合修复技术治理水体富营养化[J]. *水处理技术*, 2012, 38(3): 1-6, 11.
- [70] ZHANG H, LUO X, LI Q, et al. Response of the submerged macrophytes *Vallisneria natans* to snails at different densities[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, 194: 110373.
- [71] LI Q, GU P, ZHANG H, et al. Response of submerged macrophytes and leaf biofilms to the decline phase of *Microcystis aeruginosa*: antioxidant response, ultrastructure, microbial properties, and potential mechanism [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 699: 134325.
- [72] JIANG M Q, ZHOU Y P, WANG N, et al. Allelopathic effects of harmful algal extracts and exudates on biofilms on leaves of *Vallisneria natans* [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 655: 823-830.
- [73] ERIKSSON P G. Interaction effects of flow velocity and oxygen metabolism on nitrification and denitrification in biofilms on submersed macrophytes[J]. *Biogeochemistry*, 2001, 55: 29-44.
- [74] TORRESI E, FOWLER J S, POLESEL F, et al. Biofilm thickness influences biodiversity in nitrifying MBBRs: implications on micropollutant removal [J]. *Environmental Science and Technology*, 2016, 50(17): 9279-9288.
- [75] ZHU J Y, LIU B Y, WANG J, et al. Study on the mechanism of allelopathic influence on cyanobacteria and chlorophytes by submerged macrophyte (*Myriophyllum spicatum*) and its secretion [J]. *Aquatic Toxicology*, 2010, 98: 196-203.
- [76] SETO M, TAKAMURA N, IWASA Y. Individual and combined suppressive effects of submerged and floating-leaved macrophytes on algal blooms [J]. *Journal of Theoretical Biology*, 2013, 319: 122-133.
- [77] ERIKSSON P G, WEISNER S E B. An experimental study on effects of submersed macrophytes on nitrification and denitrification in ammonium-rich aquatic systems [J]. *Limnology and Oceanography*, 1999, 44(8): 1993-1999.
- [78] LIU H Q, HU Z, ZHANG J, et al. Optimizations on supply and distribution of dissolved oxygen in constructed wetlands: a review [J]. *Bioresource Technology*, 2016, 214: 797-805.
- [79] BATTIN T J, BESEMER K, BENGTTSSON M M, et al. The ecology and biogeochemistry of stream biofilms[J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2016, 14: 251-263.
- [80] LI H M, LI Q, LUO X, et al. Responses of the submerged macrophyte *Vallisneria natans* to a water depth gradient [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 701: 134944.
- [81] HAN B, ZHANG S H, WANG P F, et al. Effects of water flow on submerged macrophyte-biofilm systems in constructed wetlands[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 2650.
- [82] SONG Y Z, WANG J Q, GAO Y X, et al. The physiological responses of *Vallisneria natans* to epiphytic algae with the increase of N and P concentrations in water bodies [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22(11): 8480-8487.
- [83] ZHANG Y L, LIU X H, QIN B Q, et al. Aquatic vegetation in response to increased eutrophication and degraded light climate in Eastern Lake Taihu: implications for lake ecological restoration [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 23867.
- [84] BAIS H P, WEIR T L, PERRY L G, et al. The role of root exudates in rhizosphere interactions with plants and other organisms [J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2006, 57: 233-266.
- [85] 孔祥龙, 叶春, 李春华, 等. 苦草对水-底泥-沉水植物系统中氮素迁移转化的影响[J]. *中国环境科学*, 2015, 35 (2): 539-549.
- [86] 陈登, 蔡启佳, 田翠翠. 3种沉水植物根际对沉积物中典型氮循环微生物功能基因丰度的影响[J]. *云南农业大学学报 (自然科学)*, 2018, 33(2): 314-323.
- [87] ZHAO Z H, QIN Z R, XIA L L, et al. Dissipation characteristics of pyrene and ecological contribution of submerged macrophytes and their biofilms-leaves in constructed wetland [J]. *Bioresource Technology*, 2018, 267: 158-166.
- [88] YANG Y, CHEN W, YI Z Y, et al. The integrative effect of periphyton biofilm and tape grass (*Vallisneria natans*) on internal loading of shallow eutrophic lakes[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(2): 1773-1783.

- [89] YIN X J, LU J, WANG Y C, et al. The abundance of *nirS*-type denitrifiers and anammox bacteria in rhizospheres was affected by the organic acids secreted from roots of submerged macrophytes[J]. *Chemosphere*, 2020, 240: 124903.
- [90] 李倩, 田翠翠, 肖邦定. 黑藻根际对沉积物中氨氧化细菌和古菌的影响[J]. *环境工程学报*, 2014, 8(10): 4209-4214.
- [91] ZHAO D Y, LUO J, ZENG J, et al. Effects of submerged macrophytes on the abundance and community composition of ammonia-oxidizing prokaryotes in a eutrophic lake [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, 21(1): 389-398.
- [92] BASTVIKEN S K, ERIKSSON P G, EKSTRÖM A, et al. Seasonal denitrification potential in wetland sediments with organic matter from different plant species[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2007, 183: 25-35.
- [93] FLEMMING H C, WINGENDER J. The biofilm matrix[J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2010, 8: 623-633.
- [94] SHROUT J D, NERENBERG R. Monitoring bacterial twitter: does quorum sensing determine the behavior of water and wastewater treatment biofilms? [J]. *Environmental Science and Technology*, 2012, 46(4): 1995-2005.
- [95] ZENG J, ZHAO D Y, HUANG R, et al. Abundance and community composition of ammonia-oxidizing archaea and bacteria in two different zones of Lake Taihu [J]. *Canadian Journal of Microbiology*, 2012, 58: 1018-1026.
- [96] 李辉, 徐新阳, 李培军, 等. 人工湿地中氨化细菌去除有机氮的效果[J]. *环境工程学报*, 2008, 2(8): 1044-1047.
- [97] REDDY K R, PATRICK W H, Jr, LINDAU C W. Nitrification-denitrification at the plant root-sediment interface in wetlands[J]. *Limnology and Oceanography*, 1989, 34(6): 1004-1013.
- [98] ZHANG Y, WANG C, HE F, et al. *In-situ* adsorption-biological combined technology treating sediment phosphorus in all fractions [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 29725.
- [99] XU P, XIAO E R, WU J M, et al. Enhanced nitrate reduction in water by a combined bio-electrochemical system of microbial fuel cells and submerged aquatic plant *Ceratophyllum demersum* [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2019, 78: 338-351.
- [100] PING Y M, PAN X, LI W, et al. The soil bacterial and fungal diversity were determined by the stoichiometric ratios of litter inputs: evidence from a constructed wetland [J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 13813.
- [101] HILT S, GROSS E M. Can allelopathically active submerged macrophytes stabilise clear-water states in shallow lakes? [J]. *Basic and Applied Ecology*, 2008, 9: 422-432.
- [102] HILT S. Allelopathic inhibition of epiphytes by submerged macrophytes[J]. *Aquatic Botany*, 2006, 85: 252-256.
- [103] GAO Y N, GE F J, ZHANG L P, et al. Enhanced toxicity to the cyanobacterium *Microcystis aeruginosa* by low-dosage repeated exposure to the allelochemical N-phenyl-1-naphthylamine [J]. *Chemosphere*, 2017, 174: 732-738.
- [104] NAKAI S, YAMADA S, HOSOMI M. Anti-cyanobacterial fatty acids released from *Myriophyllum spicatum* [J]. *Hydrobiologia*, 2005, 543: 71-78.
- [105] NAKAI S, INOUE Y, HOSOMI M, et al. *Myriophyllum spicatum*-released allelopathic polyphenols inhibiting growth of blue-green algae *Microcystis aeruginosa* [J]. *Water Research*, 2000, 34(11): 3026-3032.
- [106] 高云霓, 董静, 何燕, 等. 基于化感物质释放特性的沉水植物抑藻作用模式研究进展[J]. *水生生物学报*, 2016, 40(6): 1287-1294.
- [107] 吴晓辉. 常见眼子菜科沉水植物对浮游藻类的化感作用研究[D]. 武汉: 中国科学院水生生物研究所, 2005: 42-65.
- [108] 高云霓, 刘碧云, 王静, 等. 苦草 (*Vallisneria spiralis*) 释放的酚酸类物质对铜绿微囊藻 (*Microcystis aeruginosa*) 的化感作用[J]. *湖泊科学*, 2011, 23(5): 761-766.
- [109] WANG H Q, CHENG S P, ZHANG S H, et al. Chemical composition in aqueous extracts of *Potamogeton malaianus* and *Potamogeton maackianus* and their allelopathic effects on *Microcystis aeruginosa* [J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2010, 19(1): 213-218.
- [110] ROJO C, SEGURA M, RODRIGO M A. The allelopathic capacity of submerged macrophytes shapes the microalgal assemblages from a recently restored coastal wetland [J]. *Ecological Engineering*, 2013, 58: 149-155.
- [111] GROSS E M. Allelopathy of aquatic autotrophs [J]. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2003, 22(3/4): 313-339.
- [112] WANG J, ZHU J Y, LIU S P, et al. Generation of reactive oxygen species in cyanobacteria and green algae induced by allelochemicals of submerged macrophytes [J]. *Chemosphere*, 2011, 85: 977-982.
- [113] KÖRNER S, NICKLISCH A. Allelopathic growth inhibition of selected phytoplankton species by submerged macrophytes [J]. *Journal of Phycology*, 2002, 38(5): 862-871.
- [114] HE Y, ZHOU Q H, LIU B Y, et al. Programmed cell death in the cyanobacterium *Microcystis aeruginosa* induced by allelopathic effect of submerged macrophyte *Myriophyllum spicatum* in co-culture system [J]. *Journal of Applied Phycology*, 2016, 28: 2805-2814.
- [115] 王立新, 张玲, 张余霞, 等. 黑藻 (*Hydrilla verticillata*) 养殖水对铜绿微囊藻 (*Microcystis aeruginosa*) 的抑制效应及其机制[J]. *植物生理与分子生物学学报*, 2006, 32(6): 672-678.
- [116] HE Y, CHENG L, TIAN Y, et al. Effects of submerged macrophyte *Ceratophyllum demersum* on ROS generation and cell damage in *Microcystis aeruginosa* [J]. *Allelopathy Journal*, 2016, 38: 229-238.
- [117] 钱燕萍, 赵楚, 田如男. 水生植物对藻类的化感作用研究进展[J]. *生物学杂志*, 2018, 35(6): 95-97.
- [118] SHEPPARD J N, WHITFIELD A K, COWLEY P D, et al. Effects of altered estuarine submerged macrophyte bed cover on the omnivorous Cape stumpnose *Rhabdosargus holubi* [J]. *Journal*

- of Fish Biology, 2012, 80: 705-712.
- [119] KLEMAR A R, KONOPKA A E. Causes and consequences of blue-green algal (Cyanobacterial) blooms [J]. Lake and Reservoir Management, 1989, 5(1): 9-19.
- [120] BEKLIÖGÜ M, MOSS B. Mesocosm experiments on the interaction of sediment influence, fish predation and aquatic plants with the structure of phytoplankton and zooplankton communities[J]. Freshwater Biology, 1996, 36: 315-325.
- [121] ZENG L, HE F, ZHANG Y, et al. Size-dependent responses of zooplankton to submerged macrophyte restoration in a subtropical shallow lake[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2018, 36(2): 376-384.
- [122] 程花, 韩翠敏, 张宏胜, 等. 一种城市湖泊生态修复的方法; 中国, CN110902833A[P]. 2020-03-24.
- [123] 楼春华, 战楠, 夏妍, 等. 一种模块式沉水植物定植毯及其安装方法; 中国, CN110668577A[P]. 2020-01-10.
- [124] 谢田, 陈桂芳, 熊娅, 等. 网箱养草净化地表水现场扩大实验结果初报[J]. 贵州环保科技, 2001, 7(1): 12-16.
- [125] SONG X X, WANG Z, XIAO B D, et al. Growth of *Potamogeton crispus* L. from turions in darkness: implications for restoring submerged plants in eutrophic lakes[J]. Ecological Engineering, 2017, 101: 255-260.
- [126] 沈应时, 张云霄, 张翠英, 等. 5种植物沉床系统对富营养化水体修复效果研究[J]. 环境保护科学, 2017, 43(1): 71-76.
- [127] 李金中, 李学菊, 刘学功, 等. 人工沉床技术在城市景观河道中的应用及其对总磷去除效果研究[J]. 环境科学, 2011, 32(5): 1279-1284.
- [128] 李金中, 李学菊. 人工沉床技术在水环境改善中的应用研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(增刊): 825-830.
- [129] 刘子森, 张义, 王川, 等. 改性膨润土和沉水植物联合作用处理沉积物磷[J]. 中国环境科学, 2018, 38(2): 665-674.
- [130] SU H J, CHEN J, WU Y, et al. Morphological traits of submerged macrophytes reveal specific positive feedbacks to water clarity in freshwater ecosystems [J]. Science of the Total Environment, 2019, 684: 578-586.
- [131] 汤鑫, 曹特, 倪乐意, 等. 改性粘土辅助沉水植物修复技术维持清水稳态的原位研究[J]. 湖泊科学, 2013, 25(1): 16-22.
- [132] 常会庆, 丁学峰, 蔡景波. 伊乐藻和固定化细菌对富营养化水体中氮循环菌的影响[J]. 河南农业科学, 2008(2): 52-56.
- [133] CHEN D Q, HE H, CHEN Y Q. Purification of nitrogen and phosphorus in lightly polluted landscape river by effective microorganisms combined with submerged plants [J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 316/317: 430-434.
- [134] 黄小兰, 陈建耀. 微生物应用于污水污泥处理的研究[J]. 亚热带资源与环境学报, 2010, 5(1): 48-55.
- [135] 陈祈春, 李正魁, 王易超, 等. 沉水植物床-固定化微生物技术在水源地修复中的应用研究[J]. 环境科学, 2012, 33(1): 83-87.
- [136] 樊胜兰. 固定化光合细菌消减水体污染物的室内模拟研究[D]. 绵阳: 西南科技大学环境与资源学院, 2016: 27-66.
- [137] 余欣欣, 李建洲, 陈立秀, 等. 微生物和酶在降解环境有机污染物中的应用[J]. 环境工程, 2012, 30(S2): 97-100.
- [138] LIANG Y X, ZHU H, BAÑUELOS G, et al. Constructed wetlands for saline wastewater treatment: a review[J]. Ecological Engineering, 2017, 98: 275-285.
- [139] VYMAZAL J, KRÖPFELOVÁ L. Removal of organics in constructed wetlands with horizontal sub-surface flow: a review of the field experience[J]. Science of the Total Environment, 2009, 407: 3911-3922.
- [140] GUARDO M, FINK L, FONTAINE T D, et al. Large-scale constructed wetlands for nutrient removal from stormwater runoff: an everglades restoration project[J]. Environmental Management, 1995, 19: 879-889.
- [141] PAVLINERI N, SKOULIKIDIS N T, TSIHRINTZIS V A. Constructed floating wetlands: a review of research, design, operation and management aspects, and data meta-analysis [J]. Chemical Engineering Journal, 2017, 308: 1120-1132.
- [142] CHEN Z J, TIAN Y H, ZHANG Y, et al. Effects of root organic exudates on rhizosphere microbes and nutrient removal in the constructed wetlands [J]. Ecological Engineering, 2016, 92: 243-250.
- [143] 裘湛. 人工湿地植物根际效应对根部微生物影响的研究进展[J]. 净水技术, 2018, 37(7): 26-30.
- [144] HUSSIAN Z, ARSLAN M, MALIK M H, et al. Integrated perspectives on the use of bacterial endophytes in horizontal flow constructed wetlands for the treatment of liquid textile effluent: phytoremediation advances in the field [J]. Journal of Environmental Management, 2018, 224: 387-395.
- [145] STOTTMEISTER U, WIEBNER A, KUSCHK P, et al. Effects of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment[J]. Biotechnology Advances, 2003, 22: 93-117.
- [146] LUEDERITZ V, ECKERT E, LANGE-WEBER M, et al. Nutrient removal efficiency and resource economics of vertical flow and horizontal flow constructed wetlands [J]. Ecological Engineering, 2001, 18: 157-171.
- [147] VYMAZAL J. Long-term performance of constructed wetlands with horizontal sub-surface flow: ten case studies from the Czech Republic[J]. Ecological Engineering, 2011, 37: 54-63.
- [148] VYMAZAL J. Is removal of organics and suspended solids in horizontal sub-surface flow constructed wetlands sustainable for twenty and more years? [J]. Chemical Engineering Journal, 2019, 378: 122117.
- [149] VYMAZAL J. The use of hybrid constructed wetlands for wastewater treatment with special attention to nitrogen removal: a review of a recent development[J]. Water Research, 2013, 47(14): 4795-4811.

(责任编辑: 佟金凤)