

周丛生物群落特征及生态功能研究进展 *

张智珂^{1,2}, 石晴¹, 赵彬², 魏雨泉³, 张昊⁴, 蔡林颖⁴, 宋易南⁵, 陈伟胜^{1†}

(1. 华北水利水电大学生态环境学院, 郑州 450046; 2. 广东省科学院生态环境与土壤研究所, 广州 510650; 3. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193; 4. 生态环境部土壤与农业农村生态环境监管技术中心, 北京 100012; 5. 中国石油集团安全环保技术研究院有限公司, 北京 102206)

摘要: 周丛生物广泛分布于各类水生生态系统中, 是水-土-气多界面之间的重要载体, 在能量流动、物质循环和污染修复等方面发挥着重要的生态效应。本文对国内外周丛生物的最新研究成果进行总结归纳, 分析周丛生物的群落结构以及在不同时空环境背景条件下的群落分布特征, 剖析其在水生生态系统中的系统生态功能, 并揭示影响周丛生物生长与生态功能的关键环境条件和介质因子。最后评估了将周丛生物研究成果应用于环境治理、农业绿色发展、生态调控等的新型可持续生态工程的潜力。在此研究的基础上, 建议未来需对周丛生物在新污染物处理、反应器工程化应用等方面开展进一步深入系统性研究。研究结论可以为周丛生物群落结构特征认知、系统生态功能优化与实践、可持续生态修复等交叉学科基础研究和科技发展提供理论支撑与科学借鉴。

关键词: 周丛生物; 群落特征; 生态功能; 影响因子; 环境应用

中图分类号: X53

文献标志码: A

Study on the Community Characteristics and Ecological Functions of Periphyton

ZHANG Zhike^{1,2}, SHI Qing¹, ZHAO Bin², WEI Yuquan³, ZHANG Hao⁴, CAI Linying⁴, SONG Yinan⁵, CHEN Weisheng^{1†}

(1. School of Ecology and Environment, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China; 2. Institute of Eco-environmental and Soil Sciences, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China; 3. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 4. Technical Centre for Soil, Agriculture and Rural Ecology and Environment, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100012, China; 5. CNPC Research Institute of Safety & Environment Technology, Beijing 102206, China)

Abstract: Periphyton (PHT), widely distributed in aquatic ecosystems, function as critical multi-interface carriers across water-sediment-atmosphere boundaries, playing vital ecological roles in energy flow, element cycling, and pollutant remediation. This work reviews recent advancements in the fields of PHT research, both in domestic and international contexts, emphasizing on the analysis of community structures and the corresponding characteristics exhibited under varying environmental conditions. The ecological functions of PHT within aquatic ecosystems are explored, along with the identification of key environmental factors like environmental

* 国家自然科学基金项目 (42307021)、广东省基础与应用基础研究基金项目(2024A1515010733)和华北水利水电大学硕士创新能力提升工程(NCWUYC-202416076)共同资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 42307021), the Guangdong Basic and Applied Basic Research Foundation (No. 2024A1515010733) and Master's Innovation Ability Enhancement Project of North China University of Water Resources and Electric Power (No. NCWUYC-202416076)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: chenweisheng@ncwu.edu.cn

作者简介: 张智珂(2001—), 女, 河南开封人, 硕士研究生, 主要研究领域为土壤重金属污染修复与可持续性风险管控。E-mail: x20231060584@stu.ncwu.edu.cn

收稿日期: 2025-02-17; 收到修改稿日期: 2025-07-11; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2025-07-11

<http://pedologica.issas.ac.cn>

conditions and media that influence its growth and ecological functions. PHT plays a crucial role in nutrient cycling within aquatic ecosystems. As primary producers, they offer essential nutrients to the ecosystem and serve as effective bioindicators of water quality, with the ability to bioaccumulate heavy metals. Key environmental factors such as temperature, light availability, and pH regulate the growth of PHT, with dominant species in the community shifting in response to changing environmental conditions. Furthermore, anthropogenic activities, nutrient loading, and soil conditions significantly influence the composition, structure, and functional dynamics of PHT communities. Additionally, this work evaluates the potential of the application of PHT-based research to environmental management, sustainable agricultural practices, as well as ecological amendment, with an emphasis on innovative eco-engineering solutions. According to these findings, present study recommends that future work should undertake more in-depth and systematic investigations into the roles of PHT in the degradation and treatment of emerging contaminants, the integration with multidisciplinary approaches and advanced technologies, as well as their applications in other fields. This review aims to provide a theoretical framework and scientific guidance for interdisciplinary research and industrial development on identifying PHT community structures, enhancing ecological functions, and advancing sustainable ecological restoration practices.

Key words: Periphyton; Community characteristic; Ecological function; Influencing factor; Environmental implication

水生生态系统是由水体及其内部水生生物相互依存所组成的整体,周丛生物群落是水生生态系统中具有生物膜结构的亚系统^[1]。周丛生物(Periphyton)在稻田、河流、湖泊等水环境中广泛分布,是淹水环境中附着生长于固体基质表面的微生物聚集体及与其交织的非生物物质(如铁锰氧化物)的复合体^[2-6]。在水生生态系统中,周丛生物广泛分布于水-土-气三相界面,该界面作为物质转化、能量传递和信息交流的重要界面,是物质转移转化的关键媒介。水生生态系统的大多数化学过程首先都在周丛生物界面上进行,此界面的化学行为影响着污染物质的转化及进入物质循环系统的数量和速率^[7]。作为水生食物网的初级生产者,周丛生物是溶解性有机碳(Dissolved organic carbon, DOC)的主要来源,在水环境的能量供给和碳元素循环过程中起到关键作用^[8-9]。在 0~75 °C 的温度,周丛生物生长旺盛^[10],能够提高水体的初级生产力,为水生生物提供能量^[11]。当受到外部干扰时,生物群落可以通过抵抗、恢复和功能冗余三种机制维持或恢复其功能,同时也赋予周丛生物持续去除污染的特性^[12]。周丛生物也可以改变水-土/沉积物界面理化性质及微域环境,进而对该界面物质的迁移和形态转化产生影响^[13]。因此系统研究周丛生物在水生态系统中的群落结构、特征、生态功能及影响其生长的因素,对于生态恢复、污染治理、维持土壤肥力等方面至关重要。

基于已有的研究和文献报道,本文对周丛生物的群落结构组成与特征予以总结归纳,阐述周丛生物在生态系统中的各项功能,探讨影响其生物群落与生态功能的关键因素,同时对周丛生物未来潜在的研究方向进行了展望,以期进一步深化对周丛生物的系统认知。研究结果对基于周丛生物的生态调控、功能识别、机制解析与绿色生态技术研发具有重要意义。

1 周丛生物的群落结构与特征

1.1 周丛生物研究历程

20 世纪初,水生生物学家就开始关注周丛生物,率先开展了分类和方法学研究^[14]。1962 年,Sládečková^[15]总结了在自然基质和人工基上周丛生物的定性、定量采样方法。自此,周丛生物的科学研究的逐步趋于规范化。中国水生生物学家沈韞芬^[16]系统性地研究了武汉东湖周丛原生动物的特征和生态功能。20 世纪 70 年代,水生生物学家对湖泊中的浮游植物、周丛藻类以及高等水生植物三者的初级产量及其与富营养化的关系展开了研究^[17]。Rodgers 等^[18]提出用于测定周丛生物结构与功能的各类参数,以评价河流生态环境污染程度。章宗涉等^[19]在图们江上、中游进行了着生藻类调查和室内栅藻检测,以监测和评价水体的污染程度。此后,将周丛生物作为水质指示生物的方法在生态和环境科学研究领域中得到广泛应用。1982 年首届淡水生态学周丛生物国际专题讨论会围绕周丛生物群落的动力学、影响周丛生物生长的参数、周丛生物的生产力、周丛生物与基质之间的相互关系、周丛生物学和水污染、方法学等主题进行讨论,自此,周丛生物的相关研究逐步臻于完整化、系统化。自 20 世纪 60 年代至今,有关周丛生物“Periphyton”的研究论文

已达到 3 900 篇，其中主要集中在生态环境、水资源保护、农业发展等领域。

1.2 群落结构

周丛生物是一个微生态系统，不同微生物群落之间的协同作用和竞争关系有助于其更好地适应环境。与单一微生物群落相比，周丛生物群落间的互作关系和生物非生物间特殊构造增强了其在整个生态系统中的稳定性^[20]。其内部微生物群落主要包括异养微生物（如异养细菌、真菌、原生动物等）和自养微生物（如绿藻、硅藻和蓝细菌等）^[21-22]。周丛生物的厚度范围通常在几十至几百微米之间，特殊情况下可薄至几微米或厚达几毫米，其生长厚度取决于微生物所处的生长阶段和周围环境条件^[20]。根据附着基质性质的不同，可以将周丛生物分为附植生物、附动生物、附木生物和附石生物等类型^[1]。结构上，周丛生物由微生物和周围的非生物物质组成，微生物细胞间隙被胞外聚合物（Extracellular polymeric substance, EPS）和化学物质（金属氧化物、有机质、矿物质等）填充（如图 1 所示）^[7, 20]。其中 EPS 作为由微生物分泌的胞外高分子聚合物，其主要成分包括蛋白质、多糖、核酸等生物聚合物^[23]；化学物质中的金属氧化物（如铁、锰和铝氧化物等）显著影响着固相吸附重金属的相对作用^[24]。

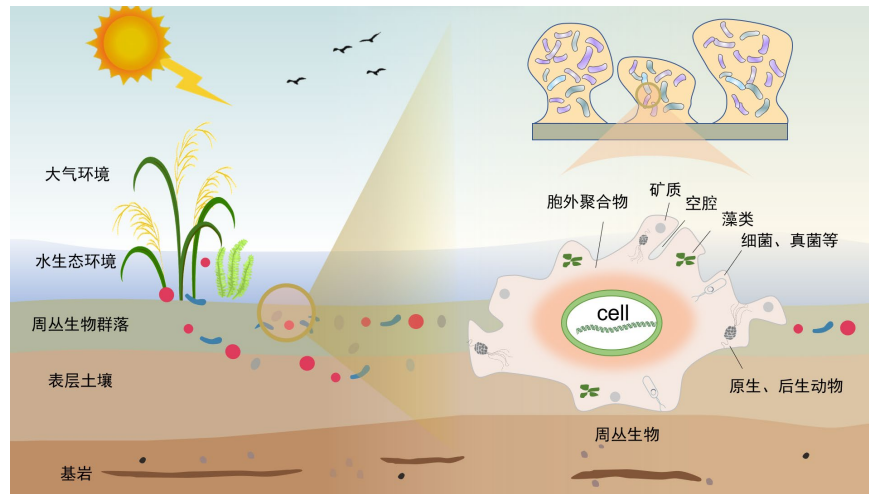


图 1 周丛生物生长环境及内部结构

Fig. 1 Schematic diagram of the growth conditions and internal structure of periphyton

1.3 不同环境条件下的群落特征

周丛生物群落的空间分布存在生态系统类型、地理区域和时间季节性的显著差异。稻田周丛生物以变形菌门（Proteobacteria）为原核优势类群，拟杆菌门（Bacteroidetes）和绿弯菌门（Chloroflexi）次之^[11]，而河流环境中轮虫门（Rotifera）、绿藻门（Chlorophyta）及纤毛虫门（Ciliophora）占主导，共占据样品的 60.6%，盐度是影响周丛生物群落变化的显著因素（ $P < 0.01$ ）^[25]。巴西 IAG 水库处于富营养化状态时，附生动物和附着松散的生物更易被牢固附着的生物所替代，水体中含磷量高促进蓝藻的生长，而磷含量低有利于绿藻存活^[26]。我国不同地区稻田周丛生物群落组成在属水平上差异显著（ $P < 0.05$ ），华南地区微生物以不动杆菌属（*Acinetobacter*）、簇虫属（*Gregarina*）为优势物种；长江中下游地区主要以芽孢杆菌属（*Bacillus*）、簇虫属（*Gregarina*）为主；在东北水稻种植区，黄色土源菌属（*Flavisolibacter*）、*Adriamonas* 则占据优势地位^[11]。时间维度上，周丛生物群落呈现季节性演替与生长阶段特异性。武汉市道观河水库藻类生物量在秋季达到峰值，而在冬季则降至低谷^[1]。日本大阪稻田表层土壤中小球藻在淹水期为优势物种，而晒田期则以栅藻为主^[27]。在水稻生长期，由于光照度较高且养分充足，稻田周丛生物量增加了 4 倍，其优势物种为蓝细菌；在水稻成熟期，周丛生物会在水-土界面形成一层致密的生物膜，此时群落的稳定性处于较高水平；水稻抽穗期后，周丛生物走向衰亡期，生物量由原来的 $693 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 降至 $200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ；水稻收获时，稻田土壤表面会形成一层主要由周丛生物组成的“结皮”^[28]。

2 水-土环境周丛生物生态功能

周丛生物群落组成决定着该群落的功能状态，影响营养循环和污染物去除成效^[11]。周丛生物在碳（C）、氮（N）、磷（P）等营养物质的固定方面发挥重要作用，例如，藻类作为初级生产者，对水生生态系统的

总初级生产贡献达到 16%^[29]；同时，凭借快速繁殖与短生命周期特性，可以作为指示生物反映环境的短期变化和干扰情况^[30]；此外，相较于表层沉积物，周丛生物能够更有效地富集重金属^[24]。

2.1 碳、氮、磷元素调控

周丛生物对碳、氮、磷的空间迁移和形态转化起关键调控作用，在一定程度上能够调节水体和土壤中碳、氮、磷元素的浓度^[13]。周丛生物通过介导二氧化碳（CO₂）的固定与排放，作为关键的生物转化媒介将 CO₂ 转化为甲烷（CH₄），对温室气体的排放产生重要影响^[6, 31]。周丛生物表面具有多孔结构，水体中的碳、氮、磷可以吸附或脱离生物膜表面的活性位点，使得营养物质能够自由输送至生物膜中，待周丛生物死亡后，营养物质又释放回生态系统中^[32-33]。在生长初期，周丛生物通过光合作用、固氮作用和吸附作用将外部环境中的碳、氮、磷转化为生物量，同时周丛生物能通过硝化、反硝化和氨挥发等途径，使部分氮元素排放至大气。在生长末期，碳、氮、磷元素随着周丛生物残体的腐化降解并释放，起到供应养分的作用（如图 2 所示）^[21, 32]。

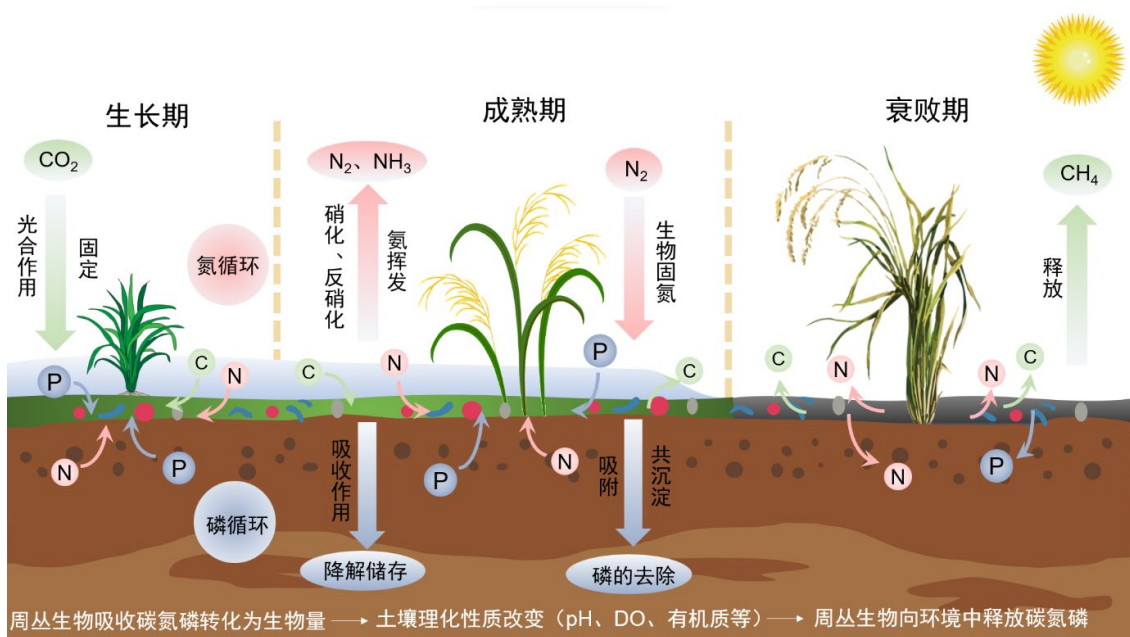


图 2 水-土界面周丛生物作用下的营养元素循环示意图^[21]

Fig. 2 The role of periphyton in nitrogen and phosphorus cycling at the water-soil interfaces^[21]

周丛生物的生长和衰亡过程可以通过改变非生物因素（pH 和氧化还原条件）和生物因素（如微生物组成和代谢），影响 CO₂ 的固定和 CH₄ 的排放^[34]。Wang 等^[31]研究发现，周丛生物在热带、亚热带和温带试验稻田中的 CO₂ 固定量分别为 79、211 和 118 kg·hm⁻²，占二氧化碳总固定量的 12.7%、12.5%和 7.2%；在热带、亚热带和温带稻田的一个水稻生长季中，周丛生物诱导的 CH₄ 排放总量分别为 4.8、101 和 4.3 kg·hm⁻²，这分别占实验稻田 CH₄ 排放总量的 7.1%、38.5%和 10.4%。氮素是周丛生物生长必需的大量元素，而通过吸收无机氮素，周丛生物尤其是藻类能够有效地原位截留氮^[28]。周丛生物通过微生物活动最多可积累 70 mg·g⁻¹ 干重，当生物体腐解时，氮被重新释放回土壤中^[35-36]。周丛生物还能利用巨大的比表面积和电位，吸收浅水系统中的氨氮，抑制 NH₃ 的挥发；然而当周丛生物释放氨氮时，会增加水体和土壤中的氨氮浓度，从而提高氨挥发速率^[28]。周丛生物可以吸收大量的营养物质，产生各种胞外酶，通过光合作用消耗 CO₂ 释放 O₂ 来改变水体的 pH 和氧化还原条件^[37]。因此，周丛生物可以通过增强对氮营养物质的吸收作用，减少河流、湖泊等大型水体的富营养化。纪荣平等^[38]利用人工介质富集微生物，形成的周丛生物对太湖梅梁湾水源中营养物质有良好的去除效果，当介质密度为 26.8%、水力停留时间为 5 d 时，对总氮、氨氮和亚硝态氮的去除率分别为 26.6%、43.2%和 79.4%。周丛生物对地表水体中的氮也有较高的去除效率，处理水力负荷为 200 m³·d⁻¹、运行周期为 12 h 的工业废水和生活污水时，总磷去除率为 81%，总氮去除率为 82%，硝态氮去除率为 79%，铵态氮去除率为 86%^[39]。周丛生物具有高效磷捕获和回收能力，其内部的 EPS 和藻类可以通过生物吸收、矿物吸附和共沉淀等机制进行磷固定；聚磷菌和微藻的磷摄取能力能够将磷以聚磷酸盐的形式储存，最终以生产为生物磷肥的形式实现磷元素的回收利用^[20, 28]。Wu 等^[4]在研究周丛生物对稻田土壤中磷生物有效性的影响时发现，与对照组相比，含有周丛生物的实验组施肥后土壤中磷元素的

含量明显增加, 稻田水中磷含量大幅降低, 且周丛生物对磷元素的吸收量达到了 $1.4 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。另有研究发现, 相比于以绿藻为主的生物群落, 以蓝藻为主的生物群落具有更好的除磷效果, 利用周丛生物去除污染水体中磷, 最高去除效率可达 $0.13 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ [40]。

2.2 初级生产者

周丛生物属于自养和异养微生物群落聚集体, 自养微生物能通过光合作用和化能作用固定大气中的 CO_2 , 为生态系统提供必要的营养物质[21]。稻田土壤的 CO_2 固定率是旱地和森林土壤的 4 倍, 光合原生生物对碳储量的贡献高达 21%。稻田体系中周丛生物自养微生物丰度和多样性较高, 这是由于专性自养生物较兼性自养生物具有更高的 CO_2 固定效率[41]。影响周丛生物初级生产力的主要因素包括时空、水深和群落等。马牧源等[42]发现白洋淀附着藻类初级生产力具有明显的时空分布规律, 夏季 6—8 月份处在高峰期, 4 月和 11 月最低, 空间分布呈自西向东递减的趋势。在冰岛 Thingvallavatn 湖泊, 深度为 0.4 m 时, 群落总生物量(叶绿素 a 含量)主要由丝状绿藻(占比 25%)和硅藻(占比 75%)产生; 深度为 2 m 时, 马尾藻、硅藻和蓝藻贡献的生物量占比分别为 15%、40%和 45% [43]。裴国凤和洪晓星[44]对比了武汉市东湖底栖藻类组成差异较大的 A 样点(硅藻为优势物种)和 C 样点(丝状绿藻占优势), 发现后者的日总生产量和现存量分别为前者的 2 倍。

2.3 指示生物

周丛生物可综合指示水环境质量, 当水体受到污染时, 周丛生物的群落结构、生物种类和数量就会发生变化(表 1)[1]。不同水体条件或污染程度不同, 周丛生物的群落变化和优势类群也不相同。小环藻属和费氏藻属等与盐度和总溶解性固体呈负相关, 与 pH 表现出明显的正相关关系[25]。刘园园等[45]在研究中发现三峡库区河流中周丛藻类生物完整性指数与水体综合污染指数具有极显著的负相关关系, 并且与水体中总氮、铅含量也有极显著的负相关关系, 这表明水环境质量越低, 周丛藻类的生物完整性越差。辽宁省浑河水系周丛藻类群落结构具有明显的空间异质性, 不同采样点位的藻类群落结构、物种丰度、密度和 Shannon 指数均存在明显差异, 经过两次典范对应分析表明驱动浑河着生藻类群落结构形成的水环境因子为 NH_4^+-N 和 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ [46]。Su 等[36]在研究氮、磷对稻田中周丛生物群落影响时发现, 微生物组成随着时间变化明显, 并且群落结构与水体的富营养化显著相关, 施肥会使得绿藻的相对丰度增加, 并逐渐成为优势物种。

表 1 水环境中周丛生物的指示作用
Table 1 The indicator effects of periphyton in aquatic environments

类别 Categories	污染物 Pollutant	指示效应 Indicator effects	参考文献 References
营养元素 Nutrient	TN	浓度越高, 藻类群落结构的完整性越差; 总氮(TN)与叶绿素 a 浓度呈正相关	[45]
	TP	群落优势物种随着浓度的变化而改变, 在富营养化程度较高的区域以丝状绿藻为主; 总磷(TP)与叶绿素 a 浓度呈正相关	[46-47]
重金属 Heavy metal	Cu	蓝藻对 Cu 敏感性较高, 绿藻、硅藻群耐性较强; Cu 浓度 ($5 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) 较高的条件下优势物种由蓝藻转变为绿藻	[48-49]
	Cd	低 Cd 浓度下, 硅藻生物膜对基质的黏附更强; 高 Cd 浓度下, 生物膜呈薄片状	[50]
	Zn	群落优势物种随着 Zn 浓度的增加而变化, 低浓度以硅藻为主, 浓度较高时绿藻为优势物种	[49, 51]
有机物 Organic pollutant	阿特拉津 (除草剂)	改变藻类丰度和物种组成, 硅藻对其耐性最强, 绿藻对其浓度变化最为敏感	[48-49]
	异丙隆 (除草剂)	暴露于低浓度的异丙隆 34 d 后, 硅藻密度显著降低	[52]

作为周丛生物主要组成类群之一, 藻类能够反映土壤的物理性状。研究发现, 蓝绿藻在生长期可以向细胞外分泌可以沿着土壤颗粒边缘扩散的多糖和油脂等化合物, 胶结土壤颗粒形成微团聚体。这些微团聚体逐渐聚合, 最终形成更大且稳定的土壤团聚体^[54]。藻类的光合放氧作用会导致氧化还原电位 Eh 的升高, 随之改变土壤氧化层厚度。在生长前期, 藻类的光合作用较强, 土壤氧化层的厚度也随之增加; 随后, 由于水-土界面藻类的衰老分解氧气消耗, 氧化层厚度降低; 最后, 藻类死亡后覆盖在土壤表层, 成为 O₂ 进入土壤的物理屏障, 共同调控土壤界面的氧化还原动态平衡^[54]。

2.4 重金属络合作用与机制

周丛生物可以有效吸附、富集并去除铜 (Cu)、镉 (Cd)、铅 (Pb)、锰 (Mn) 等重金属离子, 并受到 pH、EPS 中阴离子基团等因素的影响^[33]。EPS 表面的多糖和蛋白质能够吸附无机金属离子, 络合作用和静电吸附成为主要吸附机制, 且酸性多糖对铅、铜、锌 (Zn) 具有非特异性吸附作用^[23, 55-56]。王逢武^[7]在研究中发现周丛生物吸附 Cu 的过程是自发物理吸附过程, 同时周丛生物群落可以通过改变优势物种, 快速适应不同 Cu 浓度环境。周丛生物对 Cu(II) 的吸附去除效率为 58%~73%, 主要优势藻种为蓝藻和丝状藻。蓝藻在生长过程中会分泌大量 EPS, EPS 富含的阴离子基团能够与 Cu 发生络合反应^[57-58]。周丛生物对砷 (As) 的去除效率会随着 As 浓度的增加而降低, 在第 7 天时达到峰值, As(III) 的去除效率高于 As(V)^[55]。Lu 等^[59]研究发现, 周丛生物不仅可以降低稻田上覆水中 Cd 的浓度, 并且通过调节稻田土壤 pH 和 Eh, 降低土壤中 Cd 的生物有效性, 显著降低了水稻中 Cd 的含量。锰盐能有效地促进周丛生物固定 Cd, 且随着 Mn 浓度的增加, 周丛生物对水体中 Cd 的去除效率也升高^[60]。周丛生物具有良好的 Mn 积累潜力, Sun 等^[61]发现酸性稻田土壤中周丛生物 Mn 的累积含量介于 176~797 mg·kg⁻¹ 之间, 较相应土壤高出 1.2 倍~4.5 倍。因此周丛生物能够作为天然屏障阻止土壤中 Mn 的迁移, EPS 蛋白质组分是介导周丛生物吸附富集 Mn 的主要机制。汞 (Hg) 的微生物在原位甲基化形成甲基汞并在食物网中进行生物累积, 周丛生物在光照与黑暗条件下均表现出较高的甲基汞产量, 但其甲基化率在黑暗条件下更高, 尤其以富营养化区域生长的周丛生物为甚^[47]。

此外, 不同的金属离子之间存在着竞争吸附, 结合能力较强的吸附质优先占据吸附点, 受竞争吸附质的影响相对较小, 并且该吸附质的结合能力越强, 在竞争中所受的影响就越小^[62]。宋旭等^[63]在研究中发现, 周丛生物对于 Pb 的富集能力远高于 Cd, 在多相体系中, 周丛生物对 Cd、Co、Pb、Ni 和 Cu 吸附时存在离子间相互干扰, 使生物膜对重金属的吸附量有所降低, 其中 Ni 和 Co 之间的相互作用最显著^[62]。

3 生物群落与生态功能的关键影响因素

周丛生物的形成和生长会受到流速、温度、光照等诸多因素的影响, 同时, 人为活动、营养水平和土壤条件等因素也会造成其群落组成、结构和功能的差异 (表 2)。

表 2 周丛生物群落生长的影响因素
Table 2 Factors affecting the growth of periphyton communities

环境因素 Environmental factor	影响因子 Influencing factor	影响机制 Mechanisms	参考文献 References
环境条件 Environmental condition	温度	适宜生长温度为 10~30 °C; 生物量随温度升高而增加; 群落优势物种随着温度的变化而改变	[5, 10, 24]
	光照	生物量、EPS 的含量与光照强度和光照时间成正比	[24, 64]
	pH	群落优势物种、物种多样性随 pH 变化而改变; 酸性条件叶绿素 a 浓度更高	[11, 65-66]
环境介质	SOC	土壤有机碳 (SOC) 含量与生物量、绿藻多样性呈显著正相关	[67-68]

Environmental media	初始物种	水草促进周丛生物的生长; 斜生栅藻能够提高 EPS 中的胞外蛋白含量和群落中绿藻的相对丰度	[13, 69]
	纳米颗粒	周丛生物的基本代谢功能在短期暴露 (2 h) 过程种遭到破坏; 长期暴露 (5 d) 使得微生物群落物种分布更加均匀	[12, 70]
	载体	周丛生物在不同载体的优势特征不同: 聚丙烯有利于积累生物量; 岩石适于微生物附着	[71-72]

3.1 环境条件

学者对增加河道流速和添加营养物质对溪流的周丛生物群落的影响展开研究, 发现流速增加会极大减少周丛生物群落的生物量, 影响群落的生态结构^[30]。周丛生物在流速较低的自然水体中易于形成复杂结构, 而高流速会使生物膜形成单层结构^[24]。

光照和温度是调控周丛生物群落结构、生物量及初级生产力的两个关键环境因子。光照强度升高使得生物量增加以及附石周丛生物群落的构成发生变化。在水库淡水系统中, 光照条件下的周丛生物生物量、生物膜厚度、叶绿素及其他组分含量均处于较高水平, 其中, 生物膜厚度是无光照条件下的 4 倍^[24]。Lorenz 等^[73]发现当 Erie 湖 (美国, 俄亥俄州) 的平均光照强度低于 $28 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时限制了刚毛藻定殖。此外, 周丛生物化学物质含量随着水深增加而逐渐减少, 说明光是影响周丛生物形成的关键因素^[24]。温度是影响周丛生物群落最重要的环境因子之一, 其可通过控制酶的反应速率来影响藻类的光合作用, Mantai^[74]测定了周丛绿藻的光合作用发现, 随着水温的上升, 光合速率也逐渐增加, 直至达到峰值。有研究表明硅藻在大约 $5 \sim 20^\circ\text{C}$ 时占优势, 绿藻和黄藻在 $15 \sim 30^\circ\text{C}$ 时占优势, 蓝藻在温度高于 30°C 时占优势^[10]。当水体温度低于 4°C 时, 周丛生物生长困难, 生物量会随着水体温度的升高而逐渐增加^[24]。

周丛群落优势物种会因酸碱度变化而有所不同。在软水湖中, 湖岸带深水区优势种类为丝状的和集群蓝藻; 而在硬水湖泊中, 丝状绿藻则成为优势物种^[65]。当对泥炭湿地进行酸化和中性化操作后, 藻类总丰度未出现显著差异, 但随着 pH 的降低, 叶绿素 a 的浓度和丝状绿藻的数量显著高于对照组^[66]。陆文苑等^[11]研究发现, 中国主要稻区周丛生物群落组成和结构差异明显, 尤其是土壤有机碳含量和田面水 pH 与群落多样性显著相关。Lauber 等^[75]在研究中发现, 酸性细菌和 α -变形菌的丰度受 pH 影响显著, 粪壳菌和伞菌的丰度与土壤 C/N 显著相关。孙瑞等^[32]分别使用延边、鹰潭和镇江的水稻土培育周丛生物, 结果显示, 鹰潭周丛生物厚壁菌门的相对丰度显著高于其他两组, 这可能与鹰潭稻田土壤的 pH(5.0) 远低于镇江(6.97) 和延边(7.31) 有关。

3.2 环境介质

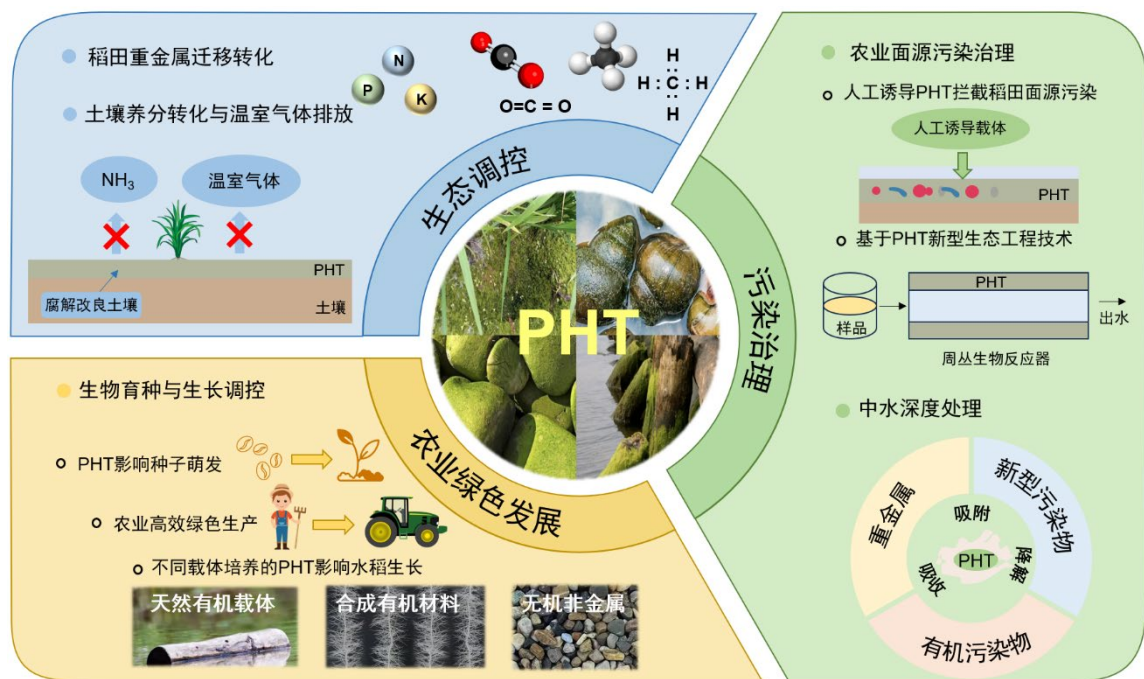
土壤基质会影响周丛生物的生长, 例如, 向水稻土中添加秸秆可使周丛生物的生物量增加, 而添加生物炭却会减少生物量^[76]。SOC 和 TN 是影响稻田水-土界微生物群落组成和物种多样性的关键因素, SOC 的增加会引起藻类生物多样性的变化, 与绿藻多样性呈显著正相关^[63]。周丛生物量会随 N、P 和 DOC 浓度增加而减少, 土壤中细菌和古菌的群落差异与土壤 pH 和 C/N 显著相关^[77]。

周丛生物是藻-菌共生体系, 藻类的细胞表面可以为细菌提供稳定的栖息地, 细菌将有机物分解成矿物质, 并分泌细胞外代谢物, 增强生物膜的形成能力^[78]。高孟宁等^[69]将斜生栅藻与周丛生物共同培养发现, 与原周丛生物相比, 藻类改变了周丛生物群落的结构和组成, 人工周丛生物明显提高了蓝细菌、 α -变形菌及绿藻的相对丰度。Yang 等^[13]在周丛生物、沉积物和水草三者共存的环境中发现水草增加了水环境的 pH、溶解氧和 Eh, 降低了上覆水的电导率。与对照组相比, 48 d 后周丛生物量增加 3 倍, 总磷去除率是原来的 5 倍, 表明水草有利于周丛生物的生长和富营养化湖泊生态恢复。周丛生物的功能冗余性使其具有持续去除污染物的功能, 其 EPS 显性蛋白产生能够与纳米颗粒进行结合降低纳米毒性^[12, 79]。Liu 等^[12]在研究中发现, 周丛生物暴露于纳米颗粒 ($\text{TiO}_2\text{-NPs}$) 5 天后, 微生物群落的物种组成发生了实质性变化。与对照相比, 接触 $\text{TiO}_2\text{-NPs}$ 后的周丛生物显著地将微生物群落的组成从少数优势微生物群转变为更均匀的物种分布。

4 环境应用与研究趋势

周丛生物具有独特的组成和多样化的群落结构,可以有效吸附水体中氮、磷等营养元素以及大量金属元素,还可以利用生物膜回收氮、磷资源和部分稀有重金属资源,促进资源循环利用和可持续发展^[20, 80]。因此基于周丛生物的新型生态工程技术可应用于污染治理、生态调控和农业绿色发展等领域(如图3所示)。

周丛生物作为具有高度异质性的微生态系统,其潜在生态功能及调控机制仍亟待系统解析。首先,周丛生物对复杂污染物耐受性强,可灵活适应多变的理化与生物环境,对新污染物的降解去除提供了一种创新环境友好途径。周丛生物能够富集包括滴滴涕、林丹在内的20种农药,自然状态下对聚丙烯(PP)、聚乙烯(PE)和聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)的降解率分别为9.52%、5.95%、13.24%,并且添加葡萄糖可显著增强周丛生物对微塑料的降解效果^[81-82]。其次,当前对周丛生物的研究主要在微生物培养和利用方面,亟需与多学科和技术进行交叉关联,探究周丛生物在农业管理和经济效益等方面的影响^[80, 83]。Huang等^[84]基于日本九州岛河流实地数据进行建模,在3种模型中最小二乘支持向量机(Least squares support vector machine, LS-SVM)模型优于人工神经网络(Artificial neural network, ANN)和多元线性回归(Multivariable linear regression, MLR)模型,LS-SVM明确了水温、光照强度、TN、TP、流量与叶绿素a的关系,为河流管理提供科学依据,优化水坝调度,减少流量受限河段中周丛生物的过度生长。未来可以收集更全面的数据进行建模,为生态系统的周丛生物的生物量管理建立更通用的模型。最后,周丛生物作为新型环境友好生物材料,适用于大尺度、大面积的应用,与反应器结合具有一定的应用前景。玄武岩纤维-周丛生物-序批式反应器能有效去除水中的氮磷,促进 NH_3 向 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的转化^[85]。由于序批式装置对污水的处理量较少,为贴合实际工程应用,施天宇等^[86]将玄武岩纤维-周丛生物与连续流反应器结合,经过该反应器处理后的污水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN和TP的去除率可达到79.88%、25.36%和94.83%。当前周丛生物反应器研究多基于模拟废水体系,其结论对真实污染场景的生态修复工程指导性不足。因此,突破反应器工程化放大瓶颈,建立适用于复杂面源污染特征的工艺优化体系,实现从实验室研究到工程应用的技术转化,是推进该技术规模化应用的关键方向。



注: PHT, 周丛生物; TSSs, 总悬浮颗粒物。Note: PHT, Periphyton; TSSs, Total suspended solids.

图3 周丛生物的环境应用

Fig. 3 Environmental applications of periphyton

5 结论与展望

周丛生物是以微生物和藻类为主的微生态系统,稻田、河流及水库环境中拥有复杂多变的群落结构和丰富的水生态功能。周丛生物对水质有一定的指示作用,能够去除水环境中的氮、磷,可以应用于河流、

湖泊的净化修复,还能够调控重金属的空间迁移与形态转化。群落中藻类可以改善土壤物理性状,同时通过光合作用参与水生食物网的能量流动。此外,光照、温度、酸碱度等环境条件以及外来生物因子均会影响周丛生物的群落结构和生态功能。同时,该领域未来研究需揭示周丛生物在降解微塑料、富集农药等新污染物以及面源污染治理等多方面的生态调控机制,融合多学科技术(如LS-SVM模型优化)提升复杂污染场景的工程可行性和适用性,探究并不断突破中大尺度反应器工程化应用中的技术工艺瓶颈。

参考文献 (References)

- [1] Liu D Q. Studies on the communities structure and potential fishery production capacity of periphyton in Daoguanhe Reservoir[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2001. [刘冬启. 观道河水库周丛生物群落结构和渔产潜力的研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2001.]
- [2] Jiangsu Provincial Administration for Market Regulation. DB32/T 4677-2024 Integrated survey and analytical testing protocol for periphyton[S]. 2024. [江苏省市场监督管理局. DB32/T 4677-2024 周丛生物综合调查与分析测试技术流程[S]. 2024.]
- [3] Wu Y H, Xia L Z, Yu Z Q, et al. In situ bioremediation of surface waters by periphytons[J]. Bioresource Technology, 2014, 151: 367-372.
- [4] Wu Y H, Liu J Z, Lu H Y, et al. Periphyton: An important regulator in optimizing soil phosphorus bioavailability in paddy fields[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23(21): 21377-21384.
- [5] Larned S T. A prospectus for periphyton: Recent and future ecological research[J]. Journal of the North American Benthological Society, 2010, 29(1): 182-206.
- [6] Wu Y H, Xu Y. Periphyton research methods[M]. Beijing: Science Press, 2024. [吴永红, 徐滢. 周丛生物研究方法[M]. 北京: 科学出版社, 2024.]
- [7] Wang F W. The copper removal mechanism in the presence of periphyton bio reactor under wastewater[D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2016. [王逢武. 周丛生物反应器对污水中Cu的去除及机制[D]. 南昌: 华东交通大学, 2016.]
- [8] Vadeboncoeur Y, Steinman A D. Periphyton function in lake ecosystems[J]. The Scientific World Journal, 2002, 2: 1449-1468.
- [9] Bichoff A, Osório N C, Dunck B, et al. Periphytic algae in a floodplain lake and river under low water conditions[J]. Biota Neotropica, 2016, 16(3): e20160159.
- [10] DeNicola D M. Periphyton responses to temperature at different ecological levels[M]//Algal ecology. Amsterdam: Elsevier, 1996: 149-181.
- [11] Lu W Y, Sun P F, Xu Y, et al. Composition structure and phosphorus entrapment capacity of periphytic biofilms of major paddy fields in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60(6): 1749-1763. [陆文苑, 孙鹏飞, 徐滢, 等. 中国主要稻区周丛生物群落组成结构及其磷捕获能力[J]. 土壤学报, 2023, 60(6): 1749-1763.]
- [12] Liu J Z, Tang J, Wan J J, et al. Functional sustainability of periphytic biofilms in organic matter and Cu^{2+} removal during prolonged exposure to TiO_2 nanoparticles[J]. Journal of Hazardous Materials, 2019, 370: 4-12.
- [13] Yang Y, Chen W, Yi Z Y, et al. The integrative effect of periphyton biofilm and tape grass (*Vallisneria spiralis*) on internal loading of shallow eutrophic lakes[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25(2): 1773-1783.
- [14] Liu J K. Advanced aquatic biology[M]. Beijing: Science Press, 1999. [刘建康. 高级水生生物学[M]. 北京: 科学出版社, 1999.]
- [15] Sládečková A. Limnological investigation methods for the periphyton ("aufwuchs") community[J]. The Botanical Review, 1962, 28(2): 286-350.
- [16] Shen Y F. Ecological studies on the periphytic protozoa in Lake Dong Hu, Wuhan[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 1980, 4(1): 18-40. [沈毓芬. 武汉东湖周丛原生动物生态[J]. 水生生物学集刊, 1980, 4(1): 18-40.]
- [17] Wetzel R G, Hough R A. Productivity and role of aquatic macrophytes in lakes: An assessment[R]. Michigan: Michigan State University, 1972.
- [18] Zhang Z S, Mo Z C, Rong K W, et al. Monitoring and evaluation of water pollution in Tumen River by means of algae[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 1983, 7(1): 97-104. [章宗涉, 莫珠成, 戎克文, 等. 用藻类监测和评价图们江的水污染[J]. 水生生物学集刊, 1983, 7(1): 97-104.]
- [19] Rodgers J H Jr, Dickson K L, Cairns J, et al. A review and analysis of some methods used to measure functional aspects of periphyton[M]//Methods and measurements of periphyton communities: A review. Pennsylvania: American Society for Testing and Materials, Special Technical Publications, 1979, 690.
- [20] Wu G P, Gao M N, Tang J, et al. Progress of researches on nitrogen and phosphorus removal by periphytic biofilm from non-point source wastewater[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2019, 35(7): 817-825. [吴国平, 高孟宁, 唐骏, 等. 自然生物膜对面源污水中氮磷去除的研究进展[J]. 生态与农村环境学报, 2019, 35(7): 817-825.]
- [21] Li T F, Zhou L, Wu Y H, et al. Role of periphyton in migration and transformation of carbon, nitrogen, and phosphorus elements at soil-water interface[J]. Journal of Hydroecology, 2024, 45(4): 28-39. [李庭芳, 周蕾, 吴永红, 等. 周丛生物在土水界面碳氮磷元素迁移转化中的作用[J]. 水生态学杂志, 2024, 45(4): 28-39.]
- [22] Bharti A, Velmourougan K, Prasanna R. Phototrophic biofilms: Diversity, ecology and applications[J]. Journal of Applied Phycology, 2017, 29(6): 2729-2744.
- [23] Flemming H C, Wingender J. The biofilm matrix[J]. Nature Reviews Microbiology, 2010, 8(9): 623-633.
- [24] Li Y, Dong D M, Liu L, et al. Aquatic biofilms and their roles in water environments[J]. Environmental Science Trends, 2004, 29(4): 16-19. [李鱼, 董德明, 刘亮, 等. 自然水体生物膜及其在水环境中的作用[J]. 环境科学动态, 2004, 29(4): 16-19.]
- [25] Feng M P, Qiu J C, Song Q J, et al. Succession of periphyton communities in the Shanghai Lingang coastal river in summer[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2023, 32(3): 597-608. [丰美萍, 邱继琛, 宋全健, 等. 上海临港滨海河道夏季周丛生物群落演替特征[J]. 上海海洋大学学报, 2023, 32(3): 597-608.]
- [26] Ferragut C, de Campos Bicudo D. Periphytic algal community adaptive strategies in N and P enriched experiments in a tropical oligotrophic reservoir[J]. Hydrobiologia, 2010, 646(1): 295-309.
- [27] Fujita Y, Nakahara H. Variations in the microalgal structure in paddy soil in Osaka, Japan: Comparison between surface and subsurface soils[J]. Limnology, 2006, 7(2): 83-91.
- [28] Wu Y H. Periphyton in paddy fields[M]. Beijing: Science Press, 2021. [吴永红. 稻田周丛生物[M]. 北京: 科学出版社, 2021.]
- [29] Vis C, Hudon C, Carignan R, et al. Spatial analysis of production by macrophytes, phytoplankton and epiphyton in a large river system under different water-level conditions[J]. Ecosystems, 2007, 10(2): 293-310.
- [30] Bondar-Kunze E, Maier S, Schöner D, et al. Antagonistic and synergistic effects on a stream periphyton community under the influence of pulsed flow velocity increase and nutrient enrichment[J]. Science of the Total Environment, 2016, 573: 594-602.
- [31] Wang S C, Sun P F, Zhang G B, et al. Contribution of periphytic biofilm of paddy soils to carbon dioxide fixation and methane emissions[J]. The Innovation, 2022, 3(1): 100192.
- [32] Sun R, Sun P F, Wu Y H. Effects of paddy periphyton biofilms on rice germination and seedling growth relative to paddy ecosystems[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59(1): 231-241. [孙瑞, 孙鹏飞, 吴永红. 不同稻田生态系统周丛生物对水稻种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 土壤学报, 2022, 59(1): 231-241.]
- [33] Lopez A R, Hesterberg D R, Funk D H, et al. Bioaccumulation dynamics of arsenate at the base of aquatic food webs[J]. Environmental Science & Technology, 2016, 50(12): 6556-6564.

- [34] Battin T J, Lauerwald R, Bernhardt E S, et al. River ecosystem metabolism and carbon biogeochemistry in a changing world[J]. *Nature*, 2023, 613(7944): 449-459.
- [35] Liu J Z, Danneels B, Vanormelingen P, et al. Nutrient removal from horticultural wastewater by benthic filamentous algae *Klebsormidium* sp., *Stigeoclonium* spp. and their communities: From laboratory flask to outdoor Algal Turf Scrubber (ATS)[J]. *Water Research*, 2016, 92: 61-68.
- [36] Su J, Kang D, Xiang W, et al. Periphyton biofilm development and its role in nutrient cycling in paddy microcosms[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2017, 17(3): 810-819.
- [37] Wu Y H, Liu J Z, Rene E R. Periphytic biofilms: A promising nutrient utilization regulator in wetlands[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 248: 44-48.
- [38] Ji R P, Lü X W, Li X N. Performance of artificial medium for removing nutrients in eutrophic water[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2007, 19(1): 39-45. [纪荣平, 吕锡武, 李先宁. 人工介质对富营养化水体中氮磷营养物质去除特性研究[J]. *湖泊科学*, 2007, 19(1): 39-45.]
- [39] Wu Y H, Hu Z Y, Yang L Z, et al. The removal of nutrients from non-point source wastewater by a hybrid bioreactor[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(3): 2419-2426.
- [40] Liu J Z, Wu Y H, Wu C X, et al. Advanced nutrient removal from surface water by a consortium of attached microalgae and bacteria: A review[J]. *Bioresource Technology*, 2017, 241: 1127-1137.
- [41] Liao H, Hao X L, Qin F, et al. Microbial autotrophy explains large-scale soil CO₂ fixation[J]. *Global Change Biology*, 2023, 29(1): 231-242.
- [42] Ma M Y, Cui L J, Zhang M Y, et al. Primary production of periphyton and their relationship to water quality in Baiyangdian Lake, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(2): 443-456. [马牧源, 崔丽娟, 张曼胤, 等. 白洋淀附着藻类的初级生产力及其与水质的关系[J]. *生态学报*, 2018, 38(2): 443-456.]
- [43] St Jónsson G. Photosynthesis and production of epilithic algal communities in Thingvallavatn[J]. *Oikos*, 1992, 64: 222-240.
- [44] Pei G F, Hong X X. Primary productivity of benthic algae community in the Donghu Lake[J]. *Journal of South-Central University for Nationalities: Natural Science Edition*, 2010, 29(4): 27-31. [裴国凤, 洪晓星. 东湖底栖藻类群落的初级生产力[J]. *中南民族大学学报: 自然科学版*, 2010, 29(4): 27-31.]
- [45] Liu Y Y, Ayi Q L, Zhang S R, et al. Comparative study on the suitability of periphytic algae and phytoplankton in river health assessment[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(11): 3833-3843. [刘园园, 阿依巧丽, 张森瑞, 等. 着生藻类和浮游藻类在三峡库区河流健康评价中的适宜性比较研究[J]. *生态学报*, 2020, 40(11): 3833-3843.]
- [46] Yin X W, Zhang Y, Qu X D, et al. Community structure and biological integrity of periphyton in Hunhe River water system of Liaoning Province, Northeast China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(10): 2732-2740. [殷旭旺, 张远, 渠晓东, 等. 浑河水系着生藻类的群落结构与生物完整性[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(10): 2732-2740.]
- [47] Cleckner L B, Gilmour C C, Hurley J P, et al. Mercury methylation in periphyton of the *Florida everglades*[J]. *Limnology and Oceanography*, 1999, 44(7): 1815-1825.
- [48] Navarro E, Guasch H, Sabater S. Use of microbenthic algal communities in ecotoxicological tests for the assessment of water quality: The Ter river case study[J]. *Journal of Applied Phycology*, 2002, 14(1): 41-48.
- [49] Takamura N, Kasai F, Watanabe M M. Effects of Cu, Cd and Zn on photosynthesis of freshwater benthic algae[J]. *Journal of Applied Phycology*, 1989, 1(1): 39-52.
- [50] Gold C, Feurtet-Mazel A, Coste M, et al. Effects of cadmium stress on periphytic diatom communities in indoor artificial streams[J]. *Freshwater Biology*, 2003, 48(2): 316-328.
- [51] Genter R B, Cherry D S, Smith E P, et al. Algal-periphyton population and community changes from zinc stress in stream mesocosms[J]. *Hydrobiologia*, 1987, 153(3): 261-275.
- [52] Pérès F, Florin D, Grollier T, et al. Effects of the phenylurea herbicide isoproturon on periphytic diatom communities in freshwater indoor microcosms[J]. *Environmental Pollution*, 1996, 94(2): 141-152.
- [53] Lewis M A. Periphyton photosynthesis as an indicator of effluent toxicity: Relationship to effects on animal test species[J]. *Aquatic Toxicology*, 1992, 23(3/4): 279-288.
- [54] Zhang Q M, Tie W X, Yin B, et al. Algae function in paddy field ecosystem and its effect on reducing ammonia volatilization from paddy fields[J]. *Soils*, 2006, 38(6): 814-819. [张启明, 铁文霞, 尹斌, 等. 藻类在稻田生态系统中的作用及其对氨挥发损失的影响[J]. *土壤*, 2006, 38(6): 814-819.]
- [55] Guo T. The migration and transformation of arsenic influenced by the periphyton biofilm in paddy soil: rules and mechanisms[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021. [郭婷. 周丛生物膜对稻田土壤中砷迁移转化的影响及作用机制[D]. 浙江: 杭州大学, 2021.]
- [56] Salehizadeh H, Shojasadati S A. Removal of metal ions from aqueous solution by polysaccharide produced from *Bacillus firmus*[J]. *Water Research*, 2003, 37(17): 4231-4235.
- [57] Sun C M, Shao J H, Kuang X L. Effects of dissolved organic matter on the adsorption characteristics of Cu(II) by periphyton[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(3): 648-655. [孙晨敏, 邵继海, 匡晓琳. 牛粪中溶解性有机质对周丛生物吸附 Cu(II)特性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39(3): 648-655.]
- [58] Liu J Z, Wang F W, Wu W T, et al. Biosorption of high-concentration Cu (II) by periphytic biofilms and the development of a fiber periphyton bioreactor (FPBR)[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 248: 127-134.
- [59] Lu H Y, Dong Y, Feng Y Y, et al. Paddy periphyton reduced cadmium accumulation in rice (*Oryza sativa*) by removing and immobilizing cadmium from the water-soil interface[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 261: 114103.
- [60] Peng L, Deng X Z, Song H J, et al. Manganese enhances the immobilization of trace cadmium from irrigation water in biological soil crust[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 168: 369-377.
- [61] Sun P F, Gao M N, Sun R, et al. Periphytic biofilms accumulate manganese, intercepting its emigration from paddy soil[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 411: 125172.
- [62] Zheng N, Hua X Y, Dong D M, et al. Competitive adsorption of metal cations on to natural surface coatings[J]. *Journal of Jilin University: Science Edition*, 2005, 43(3): 388-393. [郑娜, 花修艺, 董德明, 等. 重金属在自然水体生物膜上的竞争吸附[J]. *吉林大学学报: 理学版*, 2005, 43(3): 388-393.]
- [63] Song X, Lin T, Xia P H, et al. Algae composition and accumulation characteristics of heavy metals in epiphytic biofilms of submerged macrophytes[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2019, 31(5): 1268-1278. [宋旭, 林陶, 夏品华, 等. 沉水植物附着生物膜藻类组成及重金属累积特征[J]. *湖泊科学*, 2019, 31(5): 1268-1278.]
- [64] Sun P F, Liu Y Y, Sun R, et al. Geographic imprint and ecological functions of the abiotic component of periphytic biofilms[J]. *iMeta*, 2022, 1(4): e60.
- [65] Li H J, Zhang N, Li W. Research progress about effect of environmental factors on periphyton[J]. *Journal of Xinyang Normal University: Natural Science Edition*, 2013, 26(2): 245-249. [李红敬, 张娜, 李伟. 环境因子对周丛生物的影响研究进展[J]. *信阳师范学院学报: 自然科学版*, 2013, 26(2): 245-249.]
- [66] Greenwood J L, Lowe R L. The effects of pH on a periphyton community in an acidic wetland, USA[J]. *Hydrobiologia*, 2006, 561(1): 71-82.
- [67] Liu J Z, Sun P F, Sun R, et al. Carbon-nutrient stoichiometry drives phosphorus immobilization in phototrophic biofilms at the soil-water interface in paddy fields[J]. *Water Research*, 2019, 167: 115129.
- [68] Liu J Z, Zhou Y M, Sun P F, et al. Soil organic carbon enrichment triggers in situ nitrogen interception by phototrophic biofilms at the soil-water

- interface: From regional scale to microscale[J]. Environmental Science & Technology, 2021, 55(18): 12704-12713.
- [69] Gao M N, Xu Y, Wu Y H. Design of highly phosphorus-enriched periphytic biofilm and its characteristics[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2021, 40(9): 1982-1989. [高孟宁, 徐滢, 吴永红. 高效富集磷的周丛生物构建及其特征分析[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(9): 1982-1989.]
- [70] Gil-Allué C, Schirmer K, Tlili A, et al. Silver nanoparticle effects on stream periphyton during short-term exposures[J]. Environmental Science & Technology, 2015, 49(2): 1165-1172.
- [71] Wu L Y, Wu C X, Kang D. Study on the effect of substrate on biomass and community of periphyton[J]. Environmental Science & Technology, 2019, 42(1): 50-57. [伍良雨, 吴辰熙, 康杜. 载体对周丛生物生物量和群落的影响研究[J]. 环境科学与技术, 2019, 42(1): 50-57.]
- [72] Li H J, Fu X B, Zhang N, et al. The study research progress in the influence of matrix on periphyton[J]. Journal of Xinyang Normal University: Natural Science Edition, 2013, 26(3): 382-385. [李红敬, 付香斌, 张娜, 等. 基质对周丛生物的影响研究进展[J]. 信阳师范学院学报: 自然科学版, 2013, 26(3): 382-385.]
- [73] Lorenz R C, Monaco M E, Herdendorf C E. Minimum light requirements for substrate colonization by *Cladophora glomerata*[J]. Journal of Great Lakes Research, 1991, 17(4): 536-542.
- [74] Mantai K E. Some aspects of photosynthesis in *Cladophora glomerata*[J]. Journal of Phycology, 1974, 10(3): 288-291.
- [75] Lauber C L, Strickland M S, Bradford M A, et al. The influence of soil properties on the structure of bacterial and fungal communities across land-use types[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2008, 40(9): 2407-2415.
- [76] Lu H Y, Feng Y F, Shao H B, et al. Periphyton-induced changes in the phosphorus sorption characteristics of a paddy soil from coastal mudflat reclamation[J]. Land Degradation & Development, 2018, 29(11): 4209-4218.
- [77] Nielsen U N, Osler G H R, Campbell C D, et al. The influence of vegetation type, soil properties and precipitation on the composition of soil mite and microbial communities at the landscape scale[J]. Journal of Biogeography, 2010, 37(7): 1317-1328.
- [78] Xiong J Q, Kurade M B, Jeon B H. Can microalgae remove pharmaceutical contaminants from water?[J]. Trends in Biotechnology, 2018, 36(1): 30-44.
- [79] You G X, Wang P F, Hou J, et al. Insights into the short-term effects of CeO₂ nanoparticles on sludge dewatering and related mechanism[J]. Water Research, 2017, 118: 93-103.
- [80] Luo H Y. Performance and mechanism of non-point source pollution interception by artificial inducing periphytic biofilms in paddy field[D]. Yichang, Hubei: China Three Gorges University, 2023. [罗华溢. 人工诱导周丛生物拦截稻田面源污染的效果和机理研究[D]. 湖北宜昌: 三峡大学, 2023.]
- [81] Shabbir S, Faheem M, Ali N, et al. Periphytic biofilm: An innovative approach for biodegradation of microplastics[J]. Science of the Total Environment, 2020, 717: 137064.
- [82] Rooney R C, Davy C, Gilbert J, et al. Periphyton bioconcentrates pesticides downstream of catchment dominated by agricultural land use[J]. Science of the Total Environment, 2020, 702: 134472.
- [83] Xia Y Q, Wang S Q, Sun P F, et al. Ammonia emission patterns of typical planting systems in the middle and lower reaches of the Yangtze River and key technologies for ammonia emission reduction[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(12): 1981-1989. [夏永秋, 王慎强, 孙鹏飞, 等. 长江中下游典型种植业氨排放特征与减排关键技术[J]. 中国生态农业学报, 2021, 29(12): 1981-1989.]
- [84] Huang W, Wu L X, Wang Z W, et al. Modeling periphyton biomass in a flow-reduced river based on a least squares support vector machines model: Implications for managing the risk of nuisance periphyton[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 286: 124884.
- [85] Zhao Y, Zhang R, Jing L D, et al. Performance of basalt fiber-periphyton in deep-level nutrient removal: A study concerned periphyton cultivation, characterization and application[J]. Chemosphere, 2022, 291: 133044.
- [86] Shi T Y, Zhao Y, Zhang R, et al. Performance of basalt fiber-periphyton-continuous flow reactor for deep purification of sewage[J]. Journal of Southwest Minzu University: Natural Science Edition, 2023, 49(6): 637-644. [施天宇, 赵玥, 张润, 等. 玄武岩纤维-周丛生物膜-连续流反应器的污水深度净化性能研究[J]. 西南民族大学学报: 自然科学版, 2023, 49(6): 637-644.]

(责任编辑: 卢萍)