

水体富营养化成因·现状及修复技术研究进展

王敏, 张晖, 曾惠娴, 宋晓, 周胜, 李永泉* (仲恺农业工程学院园艺园林学院, 广东广州 510225)

摘要 综述水体从寡营养状态逐渐演变成富营养状态的过程, 分析水体富营养化成因和危害, 进而对水体富营养的概念进行拓展, 并结合全球范围的最新实例数据阐明水体富营养化的现状, 针对目前常规性的水体富营养治理方案, 强调植物生态修复的优势, 尤其引入水生乡土木本植物进行综合治理的必要性。

关键词 富营养化; 修复技术; 木本植物; 成因

中图分类号 X52 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2022)06-0001-06

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2022.06.001

开放科学(资源服务)标识码(OSID): 

Research Progress on the Causes, Current Status and Remediation Technology of Water Eutrophication

WANG Min, ZHANG Hui, ZENG Hui-xian et al (College of Horticulture and Landscape Architecture, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou, Guangdong 510225)

Abstract Review over the succession of oligotrophic-eutrophic paradigm driven by anthropogenic activities, including a practical update on our knowledge of eutrophication on a global scale and lead to new discussions and efforts to deal with the threat of accelerated eutrophication, highlighting the efficiency for the phytoremediation, especially, future remedial scenarios focused specifically on aquatic native woody species.

Key words Eutrophication; Remediation technology; Woody species; Cause

随着全球供水需求的迅速增长, 水质的退化、生物多样性的丧失、过量的沉积等一系列由富营养化(eutrophication)引起的水生态问题已成为全球热点问题。人类活动的强烈干扰在加剧全球气候变化的同时也导致全球水资源面临急速的富营养化, 这已成为世界范围内水体生态亟待解决的难题。

人类活动造成水生态的急速恶化, 其中富营养化有关的环境问题多样, 潜在危害极严重, 造成富营养化的原因错综复杂, 不能简单分离成某方面的生态循环失调。水体富营养化是全球共同面临的挑战, 据不完全统计, 全球约 1/2 的水域正处于或曾经经历富营养污染, 而我国超 1/3 的水域为三类劣质水平。各个国家应对富营养化的措施多样, 但目前而言, 生物治理是对生态环境最友好的方法, 而水生木本植物作为一种新兴治理材料, 具有强大的应用前景。

基于此, 该研究综述水体富营养化的成因及危害、现状以及治理手段, 分析世界各地该现象的严重程度以及目前人类为控制或减轻其生物影响所做出的努力, 阐述在全球气候变化和人类活动强烈干扰下的全新的富营养化概念及相关研究。

1 富营养化的成因及危害

富营养化又称为优营养化^[1], 是由于湖泊、河流、水库等水体中氮、磷等营养物质含量过多所引起的水质污染现象。水体中氮、磷营养物质的富集会引起藻类及其他浮游生物的快速繁殖, 最终导致水体溶解氧含量下降, 造成水生动植物衰亡甚至灭绝。早在 1907 年, 德国沼泽学家 C.A. Weber 等学

者创建了泥炭沼泽土壤的营养水平的统一标准, 用富营养的(eutrophic)、中营养的(mesotrophic)和贫营养的(oligotrophic)3 个术语进行分级描述; 20 世纪 70 年代后, 生态界放弃过去认为的原因和后果指标, 换之以初级生产者的生物量和生产量为主要依据来进行水体营养类型的划分(表 1)^[2-4]。

严重的水体富营养化不仅会导致水体缺氧, 引起藻类水华, 产生毒素、有害气体和异味物质, 进而影响供水安全, 而且还会引起鱼类死亡, 导致食物网简化和生物多样性下降, 最终破坏水体生态系统, 降低景观效果和休憩价值^[5-7]。

水体富营养化的形成过程可以简单归纳为 5 个阶段(图 1a): 第一阶段: 随着人类活动干扰及自然变化, 过剩的营养物质汇集到最初处于健康状态的水体中。第二阶段: 水中的浮游植物依赖过剩的营养物质进行大量繁殖。第三阶段: 藻类随之发生大暴发, 阳光无法射入水中, 植物大量死亡。第四阶段: 微生物开始降解动植物残骸, 进一步消耗氧气。第五阶段: 最终水体中氧气被耗尽, 成为死区。

随着冲积物和水生生物残骸在水体底质的不断沉降淤积, 经过很长一段时间后, 水体会逐渐由贫营养状态向富营养状态演变, 而人类活动的强干扰则成为导致富营养污染的关键因素^[8]。目前, 富营养化的来源主要有大气沉降、底泥渗透、居民生活污水、工农业废水、浮游生物有机分解等^[9-10]。在多种因素的共同作用下, 水体由贫营养状态逐渐演化为富营养化状态, 伴随整个生态系统的演化(图 1b)。

2 国内外水体富营养化现状

水体富营养化是全球共同面临的挑战, 根据联合国环境规划署报告显示, 自 20 世纪 90 年代以来, 拉美、非洲和亚洲超过 50% 的河流出现病原菌(如粪大肠菌等)污染和有机污染加剧的现象, 有近 1/3 的河流出现盐度污染加剧的现象, 水体污染已达到严重程度^[11]。美国联邦环保局数据显示, 在美国超过 35% 的湖泊氮含量超标、超过 40% 的湖泊磷含量超标, 有 10% 的美国湖泊被划分为贫营养型、35% 为中营养

基金项目 2021 年度广东省林业局自然资源事务管理-生态林业建设专项资金(KH2101501); 广东省现代农业产业技术体系创新团队项目(2020KJ137); 广州市科技计划项目(201804010303)。

作者简介 王敏(1989—), 女, 湖北天门人, 副教授, 博士, 从事城市绿地土壤碳循环及生态修复等研究。* 通信作者, 教授, 博士, 从事植物资源开发与生态修复应用等研究。

收稿日期 2021-06-19; **修回日期** 2021-12-03

型、34%为富营养型、21%为超富营养型^[12],超过40%的河流小溪呈现富营养状态^[13]。基于 Robert Diaz 博士的文献检索汇编世界缺氧和贫营养化沿海地区地图(图2),由于该地图依赖于可用数据库,可依据数据可用性较高的地理区域(如美国)显示较多的问题。2013年,墨西哥湾死水区达到1.51万 km²,且受密西西比河养分的输入,墨西哥湾每年夏季

都会发生水体缺氧水生动物大量死亡的现象^[14]。研究数据显示了762个因富营养化而受影响的沿海地区水质状况,其中有479个地区正在遭受着缺氧、55个地区曾经遭受缺氧,此外还有228个沿海地区水体有富营养化的现象,并且出现了绿潮、物种丰富度降低和珊瑚礁群落减少的现象^[15-16]。

表1 水体营养程度分类

Table 1 Classification of nutrient levels in water bodies

营养程度 Nutrient level	定义 Definition	营养量 Amount of nutrition	生物需氧量 (BOD) Biological oxygen demand	透光度 Light transmittance	气味 Smell	是否成为 污染指标 Pollution indicator	藻类 Algae	水质 Water quality	水岸植物 Waterfront plants	沉积物 Sediment	藻类漂浮 情况 Algae floating	上层水 Upper water
贫营养化 Oligotrophic	较少营养物质、有有机物,拥有干净的水体	低氮、磷的富集,含氧量高	低	高	分解活动少,无味	否	无	冷、多氧、清澈、无色或透蓝色	松、桦木	少,水下24.384~27.432 m,沉积物量约3.048 m	无,水体通透	易倒塌的岩石表层
中营养化 Mesotrophic	较多营养物质和有机物,不太干净的水体	中等程度的氮、磷富集,含氧量低	中等	中等	分解活动较多,有些许气味	N/A	有	较暖、少氧、较模糊、浅绿色	落叶乔木	中等,水下18.288~27.432 m,沉积物量约9.144 m	晚夏有少量藻类	浅滩植物
富营养化 Eutrophic	高营养物质和绿色水体	氮、磷高度富集,缺乏氧	高	低	分解活动频繁导致有气味	是	有	热、模糊、大部分为绿色	草本植物	多,水下3.048~27.432 m,沉积物量约24.384 m	藻类漂浮严重,水体浅且模糊	岸线及上层水充满植物

注:N/A为无可参考数据

Note:N/A is no reference data

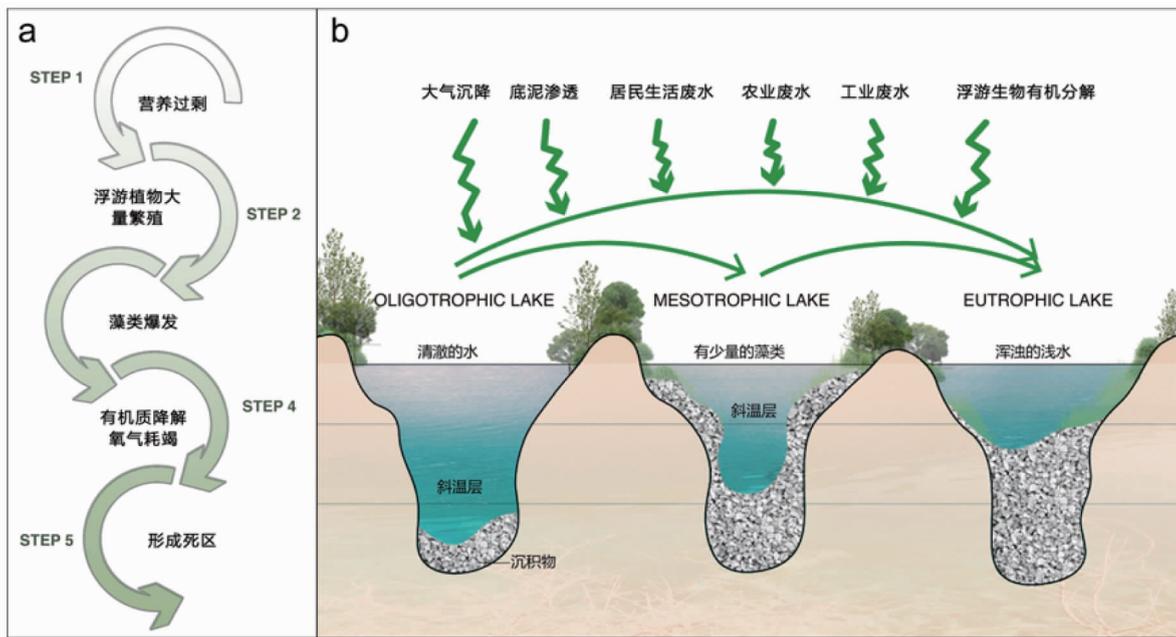


图1 富营养化的形成过程(a)及水体营养化状态渐变过程(b)

Fig.1 The process of eutrophication (a) and transition of water quality nutritive status (b)

我国是水资源较为丰富的国家之一,流域面积超过50 km²的河流共45 203条,水面面积常年≥1 km²的湖泊共2 865个,总水域面积7.89万 km²,其中淡水湖1 594个、咸水湖945个、盐湖166个、其他类型160个(图3a)^[17]。2019年,国家生态环境部对我国110个重要湖泊(水库)的监测数据显示,水质低于Ⅲ类的湖泊(水库)占31.9%,其中劣V占

7.3%。对我国107个重要湖泊(水库)开展营养状态监测的数据显示,中营养状态占62.36%、轻度富营养状态占22.40%(图3b、图4a)^[18]。富营养化问题最突出的三大湖是滇池、巢湖和太湖^[19]。据我国生态环境部统计的《2020上半年全国地表水和环境空气质量状况》显示^[20],太湖为轻度污染、轻度富营养,总磷为其主要污染指标;巢湖为水质良好、轻度富

营养;滇池为重度污染、中度富营养,总磷、化学需氧量和高 锰酸盐指数为其主要污染指标。

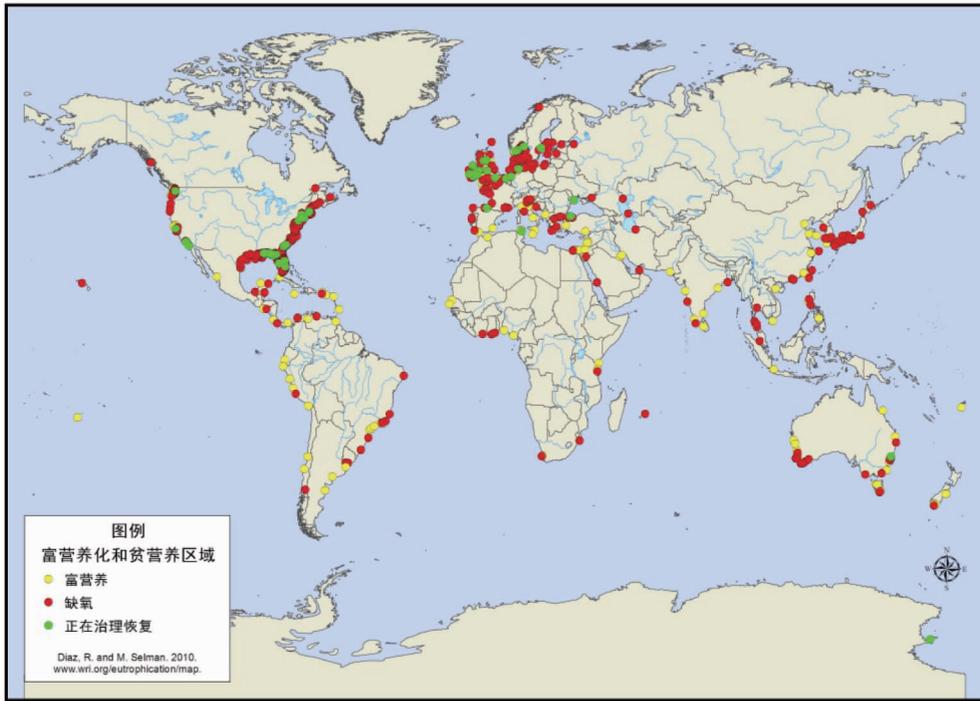
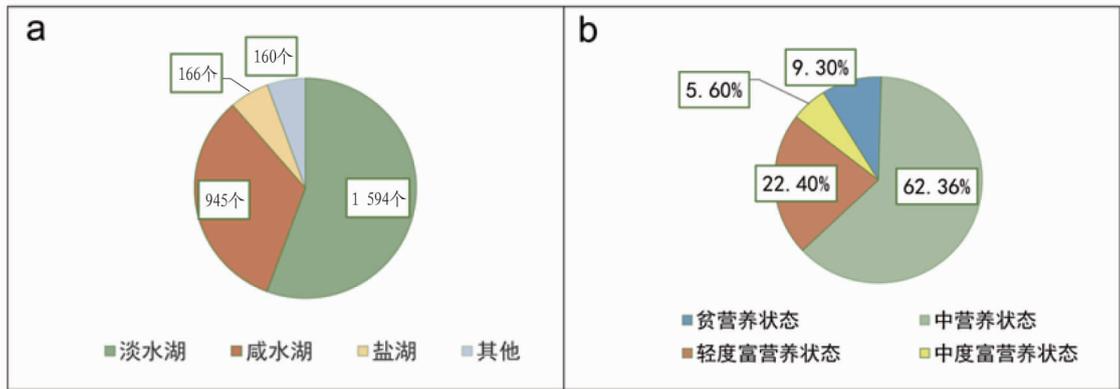


图 2 世界缺氧和富营养化沿海地区

Fig.2 The anoxic and eutrophic coastal areas of the world



注:数据来源于《第一次全国水利普查公报》和《2019 年中国生态环境公报》

Note: Data source *Communiqué of the First National Water Conservancy Census and China Ecological Environment Bulletin 2019*

图 3 我国常年水面面积 $\geq 1 \text{ km}^2$ 湖泊数量 (a) 及 2019 年我国 107 个重要湖泊 (水库) 富营养化状态 (b)

Fig.3 Numbers of lakes with a water surface area of $\geq 1 \text{ km}^2$ in China (a) and eutrophication status of 107 vital lakes in China in 2019 (b)

2019 年,我国夏季呈富营养化状态的海域面积共 $42\,710 \text{ km}^2$,其中重度富营养化海域面积达 $13\,080 \text{ km}^2$,主要集中在辽宁湾、长江口、杭州湾、珠江口等近岸海域(图 4b)。同年,我国海域共发生赤潮 38 次,累计面积 $1\,991 \text{ km}^2$ [21]。

3 水体富营养化治理研究

防治水体富营养化是一个复杂的系统工程,涉及学科包括社会、经济、人文、地理、气象、环境、生物、物理和化学,是水体污染治理中最为棘手的问题 [22]。“控源截污、生态修复”已成为水体富营养化防治的主流观念 [23]。但是对于景观水体富营养化的治理,不仅要防止外源性污染物汇入水体,更要控制内源性污染物污染水体 [24-25]。在水体富营养化

的防治方面,氮、磷是主要的污染物,其作为水体富营养化的主导因子对水生态环境系统安全产生严重威胁,造成一系列的水环境问题,制约社会经济的可持续发展 [8,26-27]。氮、磷的污染源十分复杂,不仅包括从外部排进入水体的氮、磷(外源),还包含水体内部沉积物自身释放并再次进入水体的氮、磷(内源) [28-29]。物理净化技术、化学净化技术和生物净化技术是目前水体富营养化的主要防治技术,针对治理对象、适用范围和经济耗用不同可有不同的选择(表 2) [30]。

(1) 物理净化技术是采用物理的、机械的方法对富营养化水体进行人工净化,具有底泥疏浚法、换水稀释法、河道深层曝气、人工打捞、人工造流和引水等 [33-35] 方法。

物,通过与微生物的协调作用,加速富营养化元素的分解净化^[41]。植物修复水体的技术主要包括5个方向:植物提取、植物固定、植物挥发、根际过滤、植物转化^[42]。植物对水体污染的治理作用可从以下6个方面考虑:

4.1.1 物理作用。植物个体较大,在水环境中能有效避免水中风浪的过度扰动,有利于水中悬浮物质的沉淀去除以及避免已沉淀物质的再次悬浮。植物发达的根系在水环境中也会形成较好的过滤结构,有效吸附、截留水中的有机胶体、不溶性物质,在富营养化水体的净化工作中扮演着十分重要的角色^[42]。植物对浮游藻类还具有竞争抑制作用。在富营养化的水体中,藻类植物会快速生长,加剧水质的恶化。在水中种植植物之后,水生植物会和浮游藻类进行竞争,同时分泌抑制藻类生长的物质,破坏藻类的正常生理代谢,最终导致藻类死亡,从而减少藻类所产生毒素对水体的污染^[43]。

4.1.2 吸收作用。富营养化水体的产生是由于水环境中过量氮、磷等营养盐存在,而这些营养盐正是植物自身生长所必需的营养组分,植物可以通过根系吸收将这些营养物质固定在自身体内,以保证其正常生长和发育繁殖的需求^[44]。此外,植物不仅可以通过根部吸收营养物质,还可通过浸没在水体中的茎叶吸收营养物质^[45]。因此,植物吸收同化作用是富营养化水域中氮、磷等营养物质去除的重要途径。

4.1.3 富集作用。植物具有非常顽强的生命力,且有一定的耐污染能力。植物可以将污染水体中的各种有机物和重金属离子等污染物富集在茎叶中,从而降低污染水体的污染物浓度^[44]。植物根系是各类污染物进入植物体的重要途径之一,淹水环境条件下,许多湿地植物根系都可向根际环境释放氧气和氧化性物质,在根表和根际形成铁、锰氧化物膜的能力,而生长在植物根表的锰氧化物膜就是植物根系吸收养分和污染物的门户^[46]。

4.1.4 化感及竞争作用。化感物质是植物的次生代谢产物,能有效地阻止浮游藻类疯长,逐渐降低水中污染物的含量,减少浮游藻类的存在,实现水生生态系统的有效治理^[47]。

藻类的大量繁殖是导致水体污染的一个重要原因。藻类和水生维管束植物均以水体中的氮、磷、钾等营养物质作为养料,由此水生维管束植物与水下生长的藻类因争夺共同的营养物质而形成竞争关系。水生维管束植物具有较为完善、发达的机械组织,在竞争中占据优势,能够有效抑制藻类的生长,从而避免水体污染^[48]。

4.1.5 传输及释放氧气作用。水生植物通过光合作用产生的氧气主要通过枝条和发达的根系进行传输,一部分用于自身的生长,另一部分则传输到根区,进而扩散到水下相对缺氧的区域。水生植物的根部区域氧气充足,能为微生物的繁殖和生长提供良好的环境,同时好氧微生物就能够充分发挥作用,进而对污染水体进行净化。

4.1.6 协同降解作用。协同作用一方面指水生植物之间的协同性,其对水体的净化作用不仅与植物的种类、组织和生长季节有关,还与水体的污染程度有关。合理的植物搭配不仅满足了物种多样性、保持湖泊生态系统的长期稳定性,而

且水生植物之间的协同作用还可提高湖泊水体的修复效果和水体的观赏价值,形成更良好的生态循环^[43]。另一方面指水生植物与微生物的协同降解作用,水生植物利用光合作用提高水体中溶解氧的浓度,并依靠植物根部分泌氨基酸等有机物质,有效刺激根部微生物活性,促进植物根部微生物的代谢活动,加大富营养化水体中污染物的去除与转化程度。植物发达的根系不但能为微生物的附着、栖生和繁殖提供场所,而且还能分泌出一些有机物质促进微生物的新陈代谢作用。

植物根系微生物是指聚居在根际,以根际分泌物为主要营养的一群微生物,同时作用于周围环境产生根际效应。根际微生物不仅种类和数量远高于非根际微生物,其代谢活性也比非根际微生物高。高等水生植物能将氧气从上部输送至根部,在根区和远离根区的底泥中形成有氧和厌氧环境,从而促进底泥微生物中的硝化与反硝化作用^[49]。

植物-微生物系统对氮的去除是以细菌为主的,包括浮游细菌和根际细菌。氮循环过程包括生物固氮、氨化、硝化、反硝化及同化等作用,其中生物固氮、氨化、硝化及反硝化是微生物的特有过程。氮的去除途径主要是硝化、反硝化作用,而不是靠植物的吸收^[50]。

此外,植物根系及其根际微生物通过释放出酶和有机酸等物质,对污染物进行溶解、螯合、吸收或降解,从而达到净化污染水体的作用。近年来,植物修复成为富营养化水体治理工作中的热点话题,有研究表明,植物吸收同化作用只能去除富营养化水体中较少部分的氮磷等营养物质,微生物作用才是富营养化水体治理工作中的主导因素^[51]。

4.2 木本植物生态修复特点及优势

4.2.1 木本植物生态修复特点。木本植物是指植物的茎内木质部发达,质地坚硬的植物,一般直立、寿命长,能多年生长,相比草本植物,木本植物生长较为缓慢,因此多年生的树木可作为监测植物,反映该植物种植地区的污染历史。由于木本植物根系庞大,不仅能通过根系吸收和利用污水中的氮、磷等物质,而且还能为微生物提供较大的附着面积,并通过根际释放氧气形成湿地床、植物根系及周围的微环境依次呈现出好氧、缺氧及厌氧状态,促进污水中有机物的有氧分解和氮的去除,且根系对介质的穿透能有效提高介质的孔隙度,加强和维持介质的水力传输,在污水的净化中发挥重要作用^[52]。

研究还发现,木本植物比草本植物具有更多的优点,如根系更深、输氧能力和新陈代谢更强,生长期更长,可减少和降低收获物的“二次污染”及收获成本,增加立体空间的生物多样性等^[53]。

4.2.2 草本和木本植物生态修复差异。通过对木本植物和草本植物的净化能力进行综合对比发现,虽然草本植物的去污能力高于木本植物,但是到了冬季,多数草本植物的地上部分必须进行刈割,而经过污水处理的草不宜用作饲料也不宜烧毁,为防止其对大气和土壤造成二次污染而达不到防治污染的最终目的^[52]。草本植物在修复生态系统中的后期管

理运行过程中需要持续投入人力成本,否则会出现秋季草本植物产生茎叶枯萎腐烂、无人管理的状态,最终导致草本植物吸收到的氮、磷等元素重新回到水体环境系统。例如,关于黄菖蒲和再力花固定西湖底泥中重金属 Cd 和 Pb 能力的研究中,湿地景观设计中配置一定比例的黄菖蒲和再力花,并于每年秋季种子成熟期收割黄菖蒲和再力花地上部分及挖除部分地下根茎进行适当处理,次年重复该过程,能够起到净化水体和底泥重金属 Cd 和 Pb 污染的作用^[54]。而木本植物则具有生长周期长、生物量大、根系大、耐修剪等多种优点。

筛选出净化水体效果较好的木本植物,木本植物也可产生一定的经济效益。对生态修复系统内的木本植物进行周期性的采伐,使木本植物所吸收到的氮、磷等元素及时转出系统外,与草本植物相比,木本植物更容易清理和后期维护,如果选取的木本植物也可产生经济效益,则可以弥补部分湿地运行成本的消耗。

通过了解木本植物的生态特性和功能特点,将其在湿地中进行合理的配置应用,构建层次分明的植物群落,不仅能免去后期繁琐的草本刈割工作、减少湿地的管理成本,还能保证湿地景观的持久性,弥补草本植物季节性枯萎造成的生态位空缺、景观效果缺失的现象,符合低养护持久景观的植物群落构建理念,值得在湿地植物配置中大力推广^[55]。

在选择净化水质的植物种类时,不仅要考虑植物的净化效果,还要充分考虑植物的生长分布、抗逆性和美观价值等综合因素,此外还要加强后期的维护和管理,使得植物的水体净化功能得到最大化发挥。

5 展望

该研究对国内外水体富营养化的成因、危害和现状进行了系统分析,揭示了全球水体富营养化所面临的威胁和挑战,同时对水体修复技术进行了总结和归纳,阐明植物修复技术的优势,并进一步提出乡土木本植物在水体富营养化修复方面的潜力。因此,今后的研究中应该更多地聚焦木本植物生态修复的机理及其效应,为水体富营养化的治理提供更多元的方法和更合适的技术。

参考文献

[1] BARICA J. Hypereutrophy—The ultimate stage of eutrophication [J]. *Water Qual Bull*, 1981, 6: 95–98.

[2] LEMBI C A. Limnology, lake and river ecosystems [J]. *Journal of phycology*, 2001, 37(6): 1146–1147.

[3] SCHINDLER D W. Recent advances in the understanding and management of eutrophication [J]. *Limnology & oceanography*, 2006, 51: 356–363.

[4] 陈旭君, 全为民, 严力蛟. 湖泊富营养化研究综述 [J]. *农业科技译丛*, 2000(1): 32–39.

[5] ANSARI A A, GILL S S, LANZA G R, et al. Eutrophication: Causes, consequences and control [M]. Dordrecht, Netherlands: Springer, 2014.

[6] 王云波, 谭万春. 水源蓝藻暴发的原因分析及水质安全保障措施 [J]. *中国农村水利水电*, 2008(5): 37–40.

[7] CONLEY D J, PAERL H W, HOWARTH R W, et al. Controlling eutrophication: Nitrogen and phosphorus [J]. *Science*, 2009, 323(5917): 1014–1015.

[8] SCHINDLER D W, CARPENTER S R, CHAPRA S C, et al. Reducing phosphorus to curb lake eutrophication is a success [J]. *Environmental science & technology*, 2016, 50(17): 8923–8929.

[9] 王海英. 水生植物提高富营养化水质研究 [D]. 石家庄: 河北科技大学, 2014.

[10] PAERL H W, OTTEN T G. Harmful cyanobacterial blooms: Causes, consequences, and controls [J]. *Microbial ecology*, 2013, 65(4): 995–1010.

[11] GORDON C, MENSAH A. A snapshot of the world's water quality: Towards a global assessment [M]//ALCAMO J, BORCHARDT D. *Water pollution in river basins*; River Basin 3-Volta. Nairobi, Kenya: United Nations Environment Programme, 2016.

[12] USEPA. National Lakes Assessment 2012: A Collaborative Survey of Lakes in the United States [R]. 2016.

[13] The U.S. Environmental Protection Agency Office of Research and Development. *The National Rivers and Streams. Assessment 2008/2009* [R]. 2012.

[14] SELMAN M, GREENHALGH S, DIAZ R, et al. Eutrophication and hypoxia in coastal areas: A global assessment of the state of knowledge [M]. Washington, DC: World Resources Institute, 2008.

[15] DODDS W K, BOUSKA W W, EITZMANN J L, et al. Eutrophication of U.S. freshwaters: Analysis of potential economic damages [J]. *Environmental science & technology*, 2009, 43(1): 12–19.

[16] DIAZ R, SELMAN M, CHIQUÉ C. Global Eutrophic and Hypoxic Coastal Systems. *Eutrophication and Hypoxia: Nutrient Pollution in Coastal Waters* [R]. 2010.

[17] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查公报 [R]. 2013.

[18] 中华人民共和国生态环境部. 2019 中国生态环境公报 [R]. 2019.

[19] XIA R, ZHANG Y, CRITTO A, et al. The potential impacts of climate change factors on freshwater eutrophication: Implications for research and countermeasures of water management in China [J]. *Sustainability*, 2016, 8(3): 1–17.

[20] 中华人民共和国生态环境部. 2020 上半年全国地表水和环境空气质量状况 [R]. 2020.

[21] 中华人民共和国生态环境部. 2019 年中国海洋生态环境状况公报 [R]. 2019.

[22] 郑剑锋. 临江河回水区富营养化预测及生态浮床治理技术研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2010.

[23] QIN B Q, GAO G, ZHU G W, et al. Lake eutrophication and its ecosystem response [J]. *Chinese science bulletin*, 2013, 58(9): 961–970.

[24] DUDGEON D, ARTHINGTON A H, GESSNER M O, et al. Freshwater Biodiversity: Importance, threats, status and conservation challenges [J]. *Biological reviews*, 2006, 81: 163–182.

[25] 苏相毅, 陈非洲. 富营养化水库生态治理关键技术研究进展 [J]. *广西水利水电*, 2018(3): 80–85, 93.

[26] RABALAIS N N. Nitrogen in aquatic ecosystems [J]. *Ambio*, 2002, 31(2): 102–112.

[27] LEWIS W M JR, WURTSBAUGH W A, PAERL H W. Rationale for control of anthropogenic nitrogen and phosphorus to reduce eutrophication of inland waters [J]. *Environmental science & technology*, 2011, 45(24): 10300–10305.

[28] 孙喆. 黄河河口部水库富营养化进程研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.

[29] 刘德永. 湖泊水库富营养化问题探讨及防治措施 [J]. *资源节约与环保*, 2019(4): 14.

[30] 方雨博, 王趁义, 汤唯唯, 等. 除藻技术的优缺点比较、应用现状与新技术进展 [J]. *工业水处理*, 2020, 40(9): 1–6.

[31] 卫向东, 郭晋春, 丁瑞睿, 等. 巢湖双桥河底泥疏浚过程中轮虫群落结构研究 [J]. *环境科学与技术*, 2020, 43(9): 190–197.

[32] 陈忠林, 范洁, 马军, 等. 高锰酸钾与粉末活性炭联用去除和控制受污染饮用水源中的致突变物质 [J]. *中国给水排水*, 1998, 14(4): 1–3, 6.

[33] 曾冠军, 马满英. 景观水体富营养化处理方法的研究进展 [J]. *广州化工*, 2017, 45(16): 20–22, 65.

[34] 陈水勇, 吴振明, 俞伟波, 等. 水体富营养化的形成、危害和防治 [J]. *环境科学与技术*, 1999, 22(2): 11–15.

[35] 王国祥, 濮培民. 若干人工调空措施对富营养化湖泊藻类种群的影响 [J]. *环境科学*, 1999, 20(2): 71–74.

[36] 王庆元, 曹振华. 人工湿地处理初期雨水技术的探讨 [J]. *中国资源综合利用*, 2017, 35(3): 44–47.

[37] 王寿兵, 屈云芳, 徐紫然. 基于生物操纵的富营养化湖库蓝藻控制实践 [J]. *水资源保护*, 2016, 32(5): 1–4, 23.

[38] 丁吉震. CBS 水体修复技术 [J]. *洁净煤技术*, 2000, 6(4): 36–38.

[39] WITHERS P J A, NEAL C, JARVIE H P, et al. Agriculture and eutrophication: Where do we go from here? [J]. *Sustainability*, 2014, 6(9): 5853–5875.

- soybean, is down-regulated by light in a phytochrome-dependent manner [J]. *Plant Mol Biol*, 2001, 47(3): 367-378.
- [22] TZAFRIR I, PENA-MURALLA R, DICKERMAN A, et al. Identification of genes required for embryo development in *Arabidopsis* [J]. *Plant Physiol*, 2004, 135(3): 1206-1220.
- [23] LI C B, ZHOU A L, SANG T. Rice domestication by reducing shattering [J]. *Science*, 2006, 311(5769): 1936-1939.
- [24] LIN Z W, GRIFFITH M E, LI X R, et al. Origin of seed shattering in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Planta*, 2007, 226(1): 11-20.
- [25] WIN T K, YAMAGATA Y, DOI K, et al. A single base change explains the independent origin and selection for the nonshattering gene in African rice domestication [J]. *New Phytol*, 2017, 213(4): 1925-1935.
- [26] GAO M J, LI X, LUI H, et al. ASIL1 is required for proper timing of seed filling in *Arabidopsis* [J]. *Plant Signal Behav*, 2011, 6(12): 1886-1888.
- [27] WILLMANN M R, MEHALICK A J, PACKER R L, et al. MicroRNAs regulate the timing of embryo maturation in *Arabidopsis* [J]. *Plant Physiol*, 2011, 155(4): 1871-1884.
- [28] BARR M S, WILLMANN M R, JENIK P D. Is there a role for trihelix transcription factors in embryo maturation? [J]. *Plant Signal Behav*, 2012, 7(2): 205-209.
- [29] QUON T, LAMPUGNANI E R, SMYTH D R. PETAL LOSS and ROXY1 interact to limit growth within and between sepals but to promote petal initiation in *Arabidopsis thaliana* [J]. *Front Plant Sci*, 2017, 8(152): 1-37.
- [30] YANG L L, QI S L, TOUQUEER A, et al. SGT11 controls floral organ patterning and floral determinacy in tomato [J]. *BMC Plant Biol*, 2020, 20(1): 1-14.
- [31] BREUER C, MOROHASHI K, KAWAMURA A, et al. Transcriptional repression of the APC/C activator CCS52A1 promotes active termination of cell growth [J]. *EMBO J*, 2012, 31(24): 4488-4501.
- [32] SHIBATA M, BREUER C, KAWAMURA A, et al. GTL1 and DF1 regulate root hair growth through transcriptional repression of *ROOT HAIR DEFECTIVE 6-LIKE 4* in *Arabidopsis* [J]. *Development*, 2018, 145(3): 1-11.
- [33] WENG H, YOO C Y, GOSNEY M J, et al. Poplar GTL1 is a Ca²⁺/calmodulin-binding transcription factor that functions in plant water use efficiency and drought tolerance [J]. *PLoS One*, 2012, 7(3): 1-10.
- [34] YOO C Y, MANO N, FINKLER A, et al. A Ca²⁺/CaM-regulated transcriptional switch modulates stomatal development in response to water deficit [J]. *Sci Rep*, 2019, 9: 1-15.
- [35] KUROMORI T, WADA T, KAMIYA A, et al. A trial of phenome analysis using 4000 Ds-insertional mutants in gene-coding regions of *Arabidopsis* [J]. *Plant J*, 2006, 47(4): 640-651.
- [36] WAN C M, LI C M, MA X Z, et al. GRY79 encoding a putative metallo-β-lactamase-trihelix chimera is involved in chloroplast development at early seedling stage of rice [J]. *Plant Cell Rep*, 2015, 34(8): 1353-1363.
- [37] 宋露露. 番茄逆境响应基因 *ShGT-1* 的功能鉴定及调控机制解析 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2017.
- [38] PARK H C, KIM M L, KANG Y H, et al. Pathogen- and NaCl-induced expression of the SCaM-4 promoter is mediated in part by a GT-1 box that interacts with a GT-1-like transcription factor [J]. *Plant Physiol*, 2004, 135(4): 2150-2161.
- [39] 佚名. 转录因子基因 *TuGTγ-3* 参与乌拉尔图小麦对条锈病的抗性 [J]. *遗传*, 2016, 38(12): 1090-1101.
- [40] VÖLZ R, KIM S K, MI J N, et al. The Trihelix transcription factor GT2-like 1 (GTL1) promotes salicylic acid metabolism, and regulates bacterial-triggered immunity [J]. *PLoS Genet*, 2018, 14(10): 1-22.
- [41] GARCÍA-CANO E, MAGORI S, SUN Q, et al. Interaction of *Arabidopsis* trihelix-domain transcription factors VFP3 and VFP5 with *Agrobacterium* virulence protein VirF [J]. *PLoS One*, 2015, 10(11): 1-23.
- [42] TRIPTI, KUMAR A, USMANI Z, et al. Biochar and flyash inoculated with plant growth promoting rhizobacteria act as potential biofertilizer for luxuriant growth and yield of tomato plant [J]. *J Environ Manage*, 2016, 190: 20-27.
- [43] LI J R, CHEN X Z, ZHOU X X, et al. Identification of trihelix transcription factors in *Pogostemon cablin* reveals PatGT-1 negatively regulates patchoulol biosynthesis [J]. *J.OL*. *Ind Crops Prod*, 2021, 161[2021-01-17]. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.113182>.
- [44] WANG X H, LI Q T, CHEN H W, et al. Trihelix transcription factor GT-4 mediates salt tolerance via interaction with TEM2 in *Arabidopsis* [J]. *BMC Plant Biol*, 2014, 14(1): 1-14.
- [45] WANG L W, HE M W, GUO S R, et al. NaCl stress induces CsSAMs gene expression in *Cucumis sativus* by mediating the binding of CsGT-3b to the GT-1 element within the CsSAMs promoter [J]. *Planta*, 2017, 245(5): 889-908.
- [46] YU C Y, SONG L L, SONG J W, et al. ShCIGT, a Trihelix family gene, mediates cold and drought tolerance by interacting with SnRK1 in tomato [J]. *Plant Sci*, 2018, 270: 140-149.
- [47] FENG C, SONG X, TANG H R. Molecular cloning and expression analysis of *GT-2-like* genes in strawberry [J]. *J.3 Biotech*, 2019, 9(3): 1-10.
- [48] XIE Z M, ZOU H F, LEI G, et al. Soybean Trihelix transcription factors GmGT-2A and GmGT-2B improve plant tolerance to abiotic stresses in transgenic *Arabidopsis* [J]. *PLoS One*, 2009, 4(9): 1-14.
- [49] YOO C Y, PENCE H E, JIN J B, et al. The *Arabidopsis* GTL1 transcription factor regulates water use efficiency and drought tolerance by modulating stomatal density via transrepression of SDD1 [J]. *Plant Cell*, 2010, 22(12): 4128-4141.
- [50] ZHENG X, LIU H P, JI H T, et al. The wheat GT factor *TaGT2L1D* negatively regulates drought tolerance and plant development [J]. *Sci Rep*, 2016, 6: 1-14.
- [51] LIU X S, WU D C, SHAN T F, et al. The trihelix transcription factor OsGTγ-2 is involved adaption to salt stress in rice [J]. *Plant Mol Biol*, 2020, 103(4/5): 545-560.
- [52] LUO J L, TANG S H, MEI F L, et al. *BnSIP1-1*, a trihelix family gene, mediates abiotic stress tolerance and ABA signaling in *Brassica napus* [J]. *Front Plant Sci*, 2017, 8: 1-14.
- [53] XU H Y, SHI X X, HE L, et al. *Arabidopsis thaliana* trihelix transcription factor AGT1 mediates salt and osmotic stress tolerance by binding to a novel AGAG-box and some GT motifs [J]. *Plant Cell Physiol*, 2018, 59(5): 946-965.
- [54] 卢惠君, 李子义, 贺子航, 等. 植物 Trihelix 转录因子响应非生物胁迫的研究进展 [J]. *分子植物育种*, 2019, 17(10): 3241-3246.
- [55] 李月. 棉花逆境胁迫应答 Trihelix 转录因子的鉴定及功能分析 [D]. 石河子: 石河子大学, 2013.
- [56] 李纷芬. Trihelix 转录因子 SIPTL 调控番茄生长发育和非生物胁迫的功能鉴定 [D]. 重庆: 重庆大学, 2018.

(上接第 6 页)

- [40] O' HARE M T, BAATTRUP-PEDERSEN A, BAUMGARTE I, et al. Responses of aquatic plants to eutrophication in rivers: A revised conceptual model [J]. *Frontiers in plant science*, 2018, 9: 1-13.
- [41] 秦登, 唐旭栋, 钟晴, 等. 5 种木本植物对富营养化水体的净化效果 [J]. *浙江农业科学*, 2016, 57(9): 1429-1431.
- [42] 周淑贤. 水生植物及其生物质炭对富营养化水体的净化研究 [D]. 广州: 广东工业大学, 2020.
- [43] 唐静杰. 水生植物—根际微生物系统净化水质的效应和机理及其应用研究 [D]. 无锡: 江南大学, 2009.
- [44] 张玉华, 高新红. 水生植物在水污染治理中的净化机理及应用 [J]. *中国资源综合利用*, 2020, 38(11): 199-201.
- [45] 李善升. 水体污染治理中水生植物应用探讨 [J]. *资源节约与环保*, 2019(6): 79.
- [46] 刘春英. 鄱阳湖湿地植物对重金属的转运机制研究 [M]. 北京: 新华出版社, 2017.
- [47] ERVIN G N, WETZEL R G. An ecological perspective of allelochemical interference in land-water interface communities [J]. *Plant and soil*, 2003, 256(1): 13-28.
- [48] 孙金霆. 水污染治理中应用水生植物的作用和机理分析 [J]. *决策探索 (中)*, 2018(12): 88.
- [49] 常会庆, 丁学峰, 蔡景波. 水生植物分泌物对微生物影响的研究 [J]. *水土保持研究*, 2007, 14(4): 57-60.
- [50] 刘弋璐, 何宗健. 水生植物净化富营养化水质的机理探讨和研究进展 [J]. *江西化工*, 2006(1): 27-30.
- [51] 王宝贞, 王琳. 水污染治理新技术: 新工艺、新概念、新理论 [M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [52] 高楠. 几种城市绿化植物水体中污染物去除效果研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2009.
- [53] 陈永华, 吴晓芙, 郝君, 等. 4 种木本植物在潜流人工湿地环境下的适应性及去污效果 [J]. *生态学报*, 2014, 34(4): 916-924.
- [54] 张海珍, 唐宇力, 周虹, 等. 关于黄菖蒲和再力花固定西湖底泥中重金属 Cd 和 Pb 能力的研究 [J]. *中国园林*, 2019, 35(12): 135-138.
- [55] 王晓雯, 许铭宇, 黄丽, 等. 湿地木本植物资源应用的综合评价 [J]. *湿地科学与管理*, 2018, 14(2): 61-64.