

水生植物分解过程及其对湖泊生态系统的影响研究进展

许佳乐^{1,2} 刘军武^{3,4} 方迎春^{3,4} 吴振斌² 刘子森^{2*} 张义^{2*}

(1. 中国地质大学, 武汉 430074; 2. 中国科学院水生生物研究所水产品种创制与高效养殖重点实验室(中国科学院), 武汉430072; 3. 湖南省重污染工业废水处理与资源化工程技术研究中心, 岳阳 414000; 4. 湖南江山春锦科技有限公司, 长沙 410000)

摘要: 水生植物在改善富营养化浅水湖泊水质方面发挥着重要作用, 以恢复水生植物为主的水生态修复技术已被广泛应用于富营养化浅水湖泊治理。然而, 过量繁殖的水生植物腐烂分解后会向湖泊生态系统释放大量营养物质, 加剧湖泊富营养化程度。因此, 对水生植物的分解进行研究对于探究湖泊生态系统的稳定性具有重要意义。文章总结了水生植物的分解机制, 包括水生植物的分解过程、水生植物分解过程中元素的迁移和转化, 以及不同类型水生植物分解的差异; 探讨了生物因素和非生物因素如何影响水生植物的分解程度和速度; 分析了水生植物分解对湖泊生态系统的影响, 包括对水质、沉积物特性、温室气体排放和水生生物群落结构的直接和间接影响。最后, 基于当前研究进展, 文章对水生植物残体分解的未来研究提出了建议和展望, 以期对湖泊生态修复和管理提供科学依据。

关键词: 水生植物; 分解过程; 生物因素; 非生物因素; 湖泊生态系统

中图分类号: Q178.1; X524 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3207(2025)07-072518-10



水生植物是湖泊生态系统的重要组成部分, 对淡水生态系统中污染物去除、水质净化等生态系统功能维持发挥重要作用^[1]。水生植物有助于减少养分、稳定沉积物、提高水体透明度、抑制浮游植物生长, 并为鱼类和浮游动物提供食物和栖息地, 提高湖泊生态系统的自我净化能力^[2]。

然而, 腐烂分解是大多数水生植物生命周期中一个必不可少的环节^[3], 通常发生在秋冬季节, 但也有些水生植物, 如菹草(*Potamogeton crispus*), 主要是在春末夏初进行腐烂分解^[4]。当水生植物死亡或衰败时, 湖泊生态系统中的凋落物分解向水中释放大量的碳(Carbon, C)、氮(Nitrogen, N)和磷(Phosphorus, P), 影响元素循环, 并可能导致湖泊富营养化, 造成二次污染^[5, 6]。此外, 水生植物分解快速消

耗了水中溶解氧(Dissolved Oxygen, DO), 导致氧浓度低, 进而影响氧化还原过程并改变细菌/真菌群落和结构^[7], 加速水体富营养化进程。水生植物分解是湖泊生态系统有机质积累和养分循环的重要生态过程, 对湖泊生态系统C、N、P生物地球化学循环起着关键作用^[8]。

基于Web of Science数据库检索, 使用关键词“Aquatic plant decomposition”“Submerged plant decomposition”“Emergent plant decomposition”“Floating plant decomposition”“plant decomposition”进行检索生成的词云图如图1所示, 检索格式为“Aquatic plant decomposition” or “Submerged plant decomposition” or “Emergent plant decomposition” or “Floating plant

收稿日期: 2024-12-02; 修订日期: 2025-01-21

基金项目: 国家自然科学基金(32201384); 湖南省重污染工业废水处理与资源化工程技术研究中心(KDKJ2024KFJJB01); 中国科学院青年创新促进会(2020335)资助 [Supported by the National Natural Science Foundation of China (32201384); Hunan Engineering and Technology Research Center of Heavy Pollution Industrial Wastewater Treatment and Recycling (KDKJ2024KFJJB01); Youth Innovation Promotion Association, Chinese Academy of Sciences (2020335)]

作者简介: 许佳乐(2000—), 男, 硕士研究生; 主要从事沉水植物分解对沉积物内源营养盐的影响研究。E-mail: xujiale@cug.edu.cn

通信作者: 刘子森(1991—), 女, 博士, 副研究员; 主要从事内源污染控制及水生态修复等相关研究。E-mail: liuzisen@ihb.ac.cn

张义(1985—), 男, 博士, 研究员; 主要从事水生态修复等相关研究。E-mail: zhangyi@ihb.ac.cn *共同通信作者

decomposition” or “Floating leaf plant decomposition” or “plant decomposition”。文献数量为199篇, 筛选原则为关键词出现的频次, 频次越高越能代表该领域的研究热点。由图1可知, 关于水生植物分解的研究重点集中在其对营养盐释放、水体富营养化、微生物群落多样性及全球变化等方面。该图直观地展示了水生植物分解相关的研究主题和热点, 反映了近年来学术界在该领域内的关注趋势和研究重点。通过分析词云中不同词汇量的大小和频率, 研究者能够更好地把握当前水生植物分解研究的主要方向及其复杂性, 从而为后续的研究提供参考和启示。

本文总结了水生植物分解过程及其对湖泊生态系统的影响研究进展, 综述了水生植物分解机制、水生植物分解的影响因素、水生植物分解规律, 为今后水生植物残体分解研究提供参考。

1 水生植物分解机制

1.1 水生植物分解过程

水生植物分解是一个非常复杂的过程, 其分解过程包含三个方面: 一是溶解性有机物快速浸出; 二是微生物对纤维素、木质素、半纤维素等难溶组分的分解代谢过程; 三是生物与非生物共同作用下的破碎过程^[9]。在水生植物残体的分解过程中, 主要以快速浸出和微生物降解为主, 这些过程的分解速率通常较高。在分解的初期阶段, 植物残体的分解速率较快, 但随着时间的推移, 分解速率会逐

渐降低。这一现象主要是初始阶段的快速淋溶作用所导致的^[10]。快速淋溶过程通常持续几天到几周的时间, 主要涉及大型水生植物体内那些易于分解的可溶性物质的迅速流失。这些可溶性物质包括糖类、蛋白质、易分解的有机物及某些无机盐类^[11]。

水生植物残体经过淋溶作用后, 随着植物残体中易分解物质的流失, 木质素、纤维素等难以降解的物质不断累积, 导致植物残体中难分解和难溶性物质所占比例逐渐增加, 植物残体分解速率从快速向缓慢转变, 此时微生物降解作用变得尤为重要, 开始在分解过程中占据主导地位^[12]。微生物作为主要的分解者, 在凋落物分解中起着重要的作用。细菌、真菌和放线菌会产生各种功能性酶来分解植物残体中复杂的有机质, 例如, 外生菌根真菌能产生参与有机物降解的酶^[13], 从而改变植物残体中有机质的组成和结构, 难以利用的有机质逐渐被转化为其他类型的有机物或无机盐, 释放到环境中^[14]。

植物残体破碎是指在生物和非生物活动作用下, 残体的形态和结构被破坏的过程, 这一过程通常与淋溶过程和微生物降解过程密切相关。破碎过程主要包括水生动物对植物残体的撕咬、啃食直接粉碎了植物残体及风化、冻融和干湿作用等非生物因素造成的破碎。其中, 由非生物因素引起的破碎过程并不明显, 而由大型无脊椎动物造成的破碎会对植物残体分解产生明显影响^[9]。

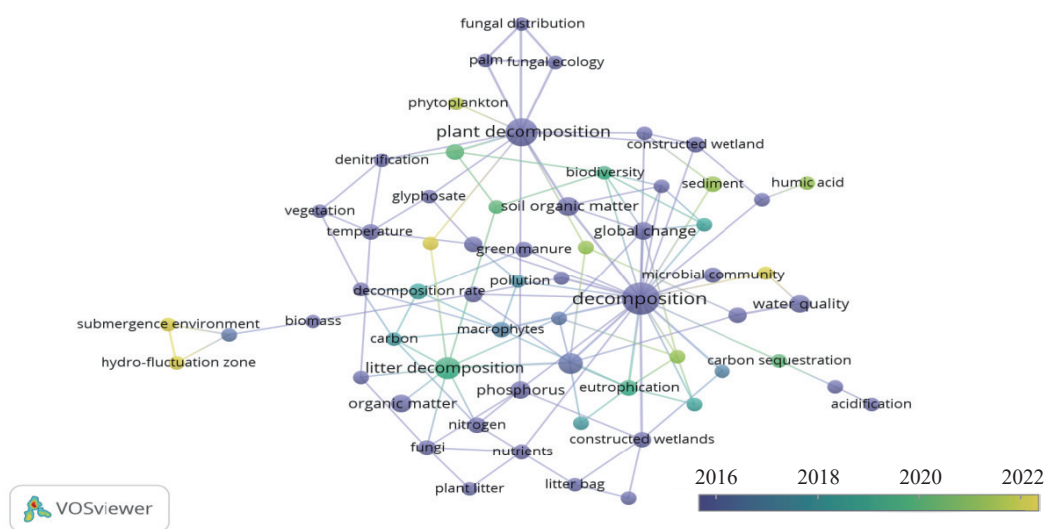


图1 基于Web of Science 数据库检索关键词“Aquatic plant decomposition” or “Submerged plant decomposition” or “Emergent plant decomposition” or “Floating plant decomposition” or “Floating leaf plant decomposition” or “plant decomposition”而来的词云图

Fig. 1 Bibliometric network map generated in VOSviewer using the search item “Aquatic plant decomposition” or “Submerged plant decomposition” or “Emergent plant decomposition” or “Floating plant decomposition” or “Floating leaf plant decomposition” or “plant decomposition” from the Web of Science database

1.2 水生植物分解过程中的元素迁移转化

水生植物残体经过淋溶、微生物降解、破碎后产生可溶性物质。在水生植物分解初始阶段, 溶解性有机碳的释放是迅速的, 从腐烂的水生植物中释放的有机物易被悬浮的细菌代谢, 具有快速的周转率。相比之下, 来自木质组织的腐殖物质在较长时间内具有缓慢的周转率, 并且可以抑制浮游植物的生产力^[15]。在水生植物分解过程中, 植物N、P先向水体释放, 以溶解性N、P和悬浮碎屑N、P为主。随后P在吸附、沉降作用下向沉积物中迁移, 而N则是在微生物的作用下通过硝化反硝化作用向沉积物中迁移^[16]。

1.3 水生植物的分解差异

从生活型上划分, 水生植物主要包括沉水植物、挺水植物、浮叶植物、漂浮植物等4种类型。由于浮叶植物和漂浮植物的生活型相近, 往往将它们归于浮水植物。这些不同生活型的水生植物在形态结构、理化性质和生活习性等方面具有显著差异, 因此它们的分解过程也表现出明显的物种差异性。在分解速率方面, 有研究表明浮水植物>沉水植物>挺水植物, 其中, 挺水植物平均分解速率大大低于沉水或浮水植物的平均分解速率^[17]。Wu等^[18]研究结果表明水生植物的分解速率与初始养分含量有明显的相关性, 挺水植物分解速率较低的原因可能是其较高的C含量、C/N和C/P及较低的N和P含量; 在生物量损失率方面, 也是浮水植物高于沉水植物和挺水植物。在水质影响方面, Wu等^[19]研究表明水生植物分解对水质(pH、DO、TOC)的影响程度均为浮水植物水葫芦(*Eichhornia crassipes*)>沉水植物黑藻(*Hydrilla verticillata*)>挺水植物香蒲(*Typha orientalis*)。

2 水生植物分解的影响因素

2.1 生物因素

水生植物理化性质 植物凋落物分解受到其自身特性的影响。不同类型水生植物凋落物具有不同的物理和化学性质, 表现出不同的分解速率。例如沉水植物穗花狐尾藻(*Myriophyllum spicatum*)比浮水植物菱(*Trapa bispinosa*)分解得更慢^[20]。植物凋落物的质量、C、N、P、木质素含量等都是影响水生植物凋落物分解的因素。凋落物质量由植物基因型、环境、气候和土壤特性决定^[21]。在相同环境中, 凋落物的质量与其分解速率紧密相关, 通常高质量的凋落物分解速度快, 反之, 低质量的凋落物往往更难于分解^[22]。

水生植物的C、N、P含量是影响分解的重要

因素。一般而言, 初始N、P含量较高及C含量较低的植物体, 即初始C/N越低, 水生植物的分解速率越高; 而初始C含量较高的植物体, 即C/N、C/P比含量较高, 分解速率较低^[23]。植物N/P含量也可作为判断影响植物分解的一个重要指标。Wang等^[24]研究结果表明, 凋落物质量对植物分解和养分释放有显著影响。高质量凋落物(高初始氮磷含量, 低初始C/N、C/P和N/P)比低质量凋落物分解速度更快, 且初始C/N和C/P是衡量水生植物分解速度的有效指标。木质素是凋落物分解过程中最难分解的成分之一, 其对凋落物分解速率的影响比N、P含量对凋落物分解速率的影响更大。木质素含量与凋落物分解速率呈负相关关系, 即植物体中木质素含量越高, 植物分解的速率则越慢^[25]。

分解者群落和无脊椎动物 分解者(如细菌、真菌等微生物)是影响水生植物凋落物分解的主要生物因素, 其他因素对水生植物分解的影响往往也是通过影响这些生物因素而间接发挥作用。微生物的作用主要是分解有机物为无机化合物。在分解的早期阶段, 细菌通常占据主导地位。细菌能够分泌有效降解木质素的胞外酶, 帮助分解植物残体中的复杂有机物质。而水生丝胞菌类则是早期侵染的真菌中占优势的一类^[26]。真菌是凋落物分解的主要驱动因素, 可能是因为它们能够产生一系列对水生植物分解具有重要作用的酶, 如半纤维素酶、果胶酶和纤维素酶等^[27]。在水生植物凋落物的分解过程中, 无脊椎动物(如蚯蚓、虾类、蟹类)会通过撕咬、啃食等行为对这些植物残体进行物理破碎, 增加微生物与凋落物的接触面积, 使得微生物更容易附着在植物残体表面, 增强了它们对残体的降解能力。此外, 无脊椎动物还会摄食参与凋落分解过程的微生物, 在一定程度上调控了微生物的种群数量和结构^[28]。

2.2 非生物因素

温度 温度是影响水生植物腐烂分解过程的重要非生物因素之一^[29], 也是决定水生生态系统中植物体活动的关键因素^[30]。一般而言, 较高的温度会加快水生植物的分解速率。Shi等^[31]研究表明, 春季和夏季的水生植物分解速率高于冬季和秋季。司静等^[32]研究发现, 温度升高使穗花狐尾藻C、N、P的释放量增加。水体温度的变化与微生物的群落结构和活性存在正相关关系, 水温升高会促进微生物的代谢活动并加速凋落物的分解过程^[33], 提高植物叶片分解速率。水生植物残体分解对温度的敏感性为浮水植物>沉水植物>挺水植物。

光照 不同光照条件下的植物凋落物分解

效应不同^[34]。光照状态可通过以下途径控制分解过程。首先,光照强度通过影响水生植物群落的分布和多样性来影响凋落物的质量^[35];其次,光照在决定分解者的结构和功能方面发挥着关键作用,这些分解者活动的变化可能间接影响植物凋落物的分解^[36];光照条件的变化可调节凋落物分解发生的微环境(即温度、水),从而间接影响植物凋落物的分解;此外,由于凋落物化合物的光降解,光照可以直接影响凋落物的分解^[37]。然而,关于不同光照强度下调落物分解的信息很少,这限制了我们对光照在凋落物分解中重要作用的理解。Karlsson等^[38]发现光照是调节水生生态系统中营养成分的主要原因,植物残体分解受光照强度差异的影响显著。邹敏^[39]研究发现,随着光照强度增大,大型海藻碎屑[瓦氏马尾藻碎屑(*Sargassum vachellianum* Greville)]的剩余物质干重和分解速率变化显著升高。

营养物质浓度 水生植物所处环境中营养物质浓度会对其分解过程产生一定的影响。顾久君等^[40]发现,水体中营养物质浓度的改变可显著影响水生植物凋落物分解过程中N、P等营养物质的释放。植物凋落物分解也受水体富营养化程度的影响^[20],较高水平的养分供应会加速水生植物凋落物的分解,水体富营养化可能会提高凋落物的分解速率^[41]。然而,高度富营养化水体由于凋落物质量、微生物多样性和活性的差异,可能不会加快凋落物的分解速度^[42]。因此,富营养化影响凋落物分解状况的具体原因尚无定论。许多研究表明,环境中营养物质的可用性可能会显著影响凋落物的分解速率,特别是对于沉水和浮水植物。Li等^[43]研究发现,水体中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度和 $\text{NH}_4\text{-N}$ 浓度分别延缓了低污染场地(较少受到干扰或营养物污染的场地)和高污染场地(受到集约化农业活动和周边人口密集的场所)的水生植物碎屑质量损失。Song等^[44]研究发现浮水植物的降解速度随着水体TP含量的升高而明显降低,这可能是由于微生物分解菌数量减少所致。

溶解氧 水体溶解氧(DO)浓度也是影响水生植物分解过程的一个主要环境因素。水体DO浓度不仅能够影响植物的分解速率,还能通过影响水体的理化性质和微生物活动等因素,进而影响植物分解过程中物质的释放。Liu等^[45]研究表明,高DO浓度加速了碳、氮的释放,促进了凋落物的分解。且DO显著影响微生物群落结构,DO越高具有分解凋落物能力的微生物比例越高。

植物凋落物分解是一个耗氧过程,在分解初期迅速消耗 O_2 ,导致DO减少^[46]。此外,水生植物分解

过程中产生大量复杂的有机物质和溶解性颗粒,当大量水生植物死亡分解时会造成水体局部厌氧,影响水生植物分解。一般认为水生植物在溶解氧较高的情况下分解较快。Passerini等^[47]发现在好氧环境中水生植物分解速率大于厌氧环境。

3 水生植物分解对湖泊生态系统的影响

湖泊生态系统作为生态系统的重要组成部分,能够吸收和循环利用大量的碳、氮、磷等物质,一直是研究热点^[48]。水生植物在维持湖泊生态系统的结构、功能和生物多样性方面发挥着重要作用。水生植物作为主要初级生产者,可为湖泊中微生物和水生动物提供食物和栖息地^[49];水生植物还可以促进养分循环、吸附和固定悬浮沉积物,提高水体透明度和净化能力^[50],使以水生植物为主的浅水湖泊保持清澈、平衡的状态。

3.1 水生植物分解对水质的影响

水生植物在生长过程中,可以从水体和沉积物中积累营养盐。但当水生植物死亡和腐烂时,光合作用停止,其体内的有机物质和营养物质被释放回水生环境。分解腐烂植物材料的细菌和真菌反过来消耗DO用于呼吸。因此,水生植物分解会对湖泊生态系统中营养物质的长期循环产生重大影响^[51]。

水生植物凋落物分解会将体内大部分碳氮磷释放到水体中,在湖泊生态系统碳氮磷等营养元素的生物地球化学循环方面起着至关重要的作用,是物质循环和能量流动的关键环节^[52]。而且,这些营养物质可以促进水体中藻类生长,可能引发藻华,造成水质恶化和二次污染,加剧湖泊富营养化程度(图2)。

水生植物分解过程中释放的大量溶解性有机质(Dissolved organic matter, DOM)能够与水体中的有机污染物和金属元素相结合,进而影响水体中各类水生生物的生长代谢^[53]。当水体中DOM含量过高时,可能会导致DO浓度降低、水体透明度下降,并增加湖泊受污染程度,对水质造成潜在风险^[54]。王亚如等^[55]分析发现水生植物凋落物的生物量、种类及分解阶段均会影响DOM的特性和质量浓度,进而可能影响湖泊有机污染物的状况。Guo等^[56]研究发现水生植物分解所释放的DOM会对重金属的迁移和转化产生影响。与从沉积物中提取的DOM相比,从水生植物分解中提取的DOM具有更多的结合配体位点,进而提高DOM-Cu(II)复合物的化学稳定性。

3.2 水生植物分解对沉积物特性的影响

在分解过程中,水生植物的根系和茎干这些有

机物质会沉积到水底, 在沉积物中逐渐分解, 形成丰富的有机沉积物, 为底栖生物提供栖息地和食物来源^[57]。大量的有机物质沉积在水底, 有助于提高沉积物的稳定性, 防止沉积物的侵蚀和流失。难溶木质纤维素是植物的主要成分, 水生植物的缓慢分解可导致沉积物的增加、碳的固存、减少湖泊容积、破坏动物栖息地和加速浅水湖泊生态系统陆地化^[58, 59]。水生植物分解过程中释放的营养盐会影响沉积物的化学性质。随着营养盐浓度的变化, 沉积物的营养状况也会变化, 这可能会影响沉积物中微生物的活动^[60]。

3.3 水生植物分解对温室气体排放的影响

水生植物在浅水湖泊生态系统的碳储存和营养循环中发挥着关键作用, 凋落物分解是湖泊生态系统结构和功能的基本过程, 了解植物凋落物的分解对于评估湖泊中的碳排放和氮磷循环至关重要^[45]。在全球范围内, 水生植物作为“碳汇”, 在生长阶段吸收二氧化碳(CO_2), 储存碳元素, 然而, 植物的死亡和分解会将这些储存的碳释放回大气中。因此, 凋落物分解在调节生态系统碳固存和大气 CO_2 浓度方面发挥着重要作用^[61]。

在水生植物分解过程中, 特别是在缺氧环境下, 可能释放 CO_2 和 CH_4 等温室气体, 这是因为微生物在厌氧条件下分解有机物, 产生大量甲烷, 导致 CH_4 排放量增加, 从而对大气中的温室气体浓度产生直接影响, 引起气候变化^[62]。水生植物在分解过程中也会释放出氨和氮氧化物。这些氮的化合物虽然不完全是温室气体, 但会影响微生物的代谢过程, 间接影响温室气体的排放^[63]。

3.4 水生植物分解对水生生物群落结构的影响

水生植物分解是一个耗氧过程, 使得水中DO浓度下降, 尤其是在水体深处或植物分解较为集中区域, 缺氧现象更严重^[46]。这些区域对许多水生生物(鱼类和甲壳类)而言不适宜生存, 可能导致这些物种的数量减少或死亡。此外, 底栖生物(鱼类和甲壳类)对氧气依赖性较强, 缺氧环境会减少这些生物的多样性和数量^[64]。

在水生植物分解时, 会释放一些酸性物质, 导致水体pH降低, pH的变化对水生生物群落的影响较大, 过度酸化的水体会对水生生物的生长和繁殖产生负面影响^[65]。鱼卵孵化、浮游生物和底栖生物的存活都可能受到pH变化的抑制。酸化的水体可能使得某些耐酸物种占主导地位, 而对酸度不耐受的物种数量减少, 导致水生生物群落结构发生变化^[66]。水生植物的分解会影响微生物的群落结构。在分解过程中, 植物残体为分解微生物提供了丰富的有机碳源。随着有机质的不断分解, 微生物群落的结构也会发生变化, 可能导致某些特定类型的微生物(如厌氧微生物)数量增加^[67]。

不同水生植物分解对湖泊水质、沉积物特性、温室气体排放及水生生物群落结构的影响存在一定的差异(表1)。

4 结论

本文综述了国内外水生植物分解的研究现状, 指出不同水生植物在分解特征和环境影响上存在显著差异。水生植物分解通常会经历快速淋溶、难溶成分的微生物分解代谢及生物作用与非生物

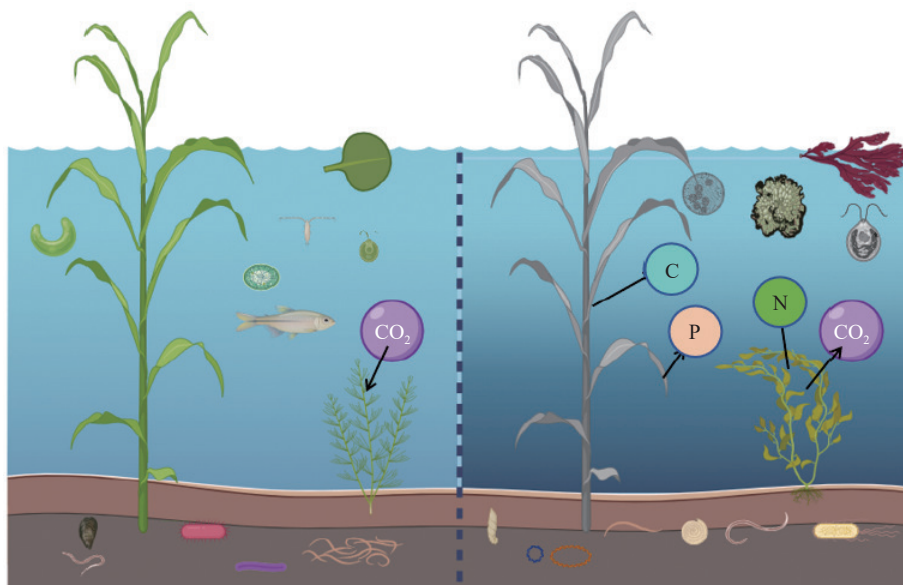


图2 水生植物分解对湖泊生态系统的影响

Fig. 2 Effects of aquatic plants decomposition on lake ecosystem

表 1 水生植物分解对湖泊生态系统的影响

Tab. 1 Effects of aquatic plant decomposition on lake ecosystem

指标 Index	水生植物分解 Aquatic plant decomposition	生态效应 Ecological effect	参考文献 Reference
水质 Water quality	挺水植物(香蒲) <i>Typha orientalis</i>	在香蒲分解过程中, TOC、TN在前6d分别快速增加至16.72和0.98 mg/L, 随后逐渐下降, 分解完后为6.52和0.32 mg/L, 均高于分解前	[19]
	浮水植物(荇菜) <i>Nymphoides peltata</i>	荇菜分解过程中, DO迅速下降, 10d后缓慢上升, 分解完成后基本恢复到分解前。COD、TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 均呈先上升后下降的变化趋势, 最后均低于分解前	[68]
	沉水植物(苦草) <i>Vallisneria natans</i>	苦草分解过程中, TN、TP均呈先上升后下降的变化趋势, TN在10d达到峰值9.48 mg/L, TP在8 d达到峰值1.38 mg/L	[69]
沉积物 Sediment	沉水植物(金鱼藻) <i>Ceratophyllum demersum</i>	金鱼藻分解65d后, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 为1.08 mg/kg, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为52.04 mg/kg, 均低于分解前, TN为0.86 mg/kg, TP为0.76 mg/kg, 均高于分解前	[70]
	沉水植物(黑藻) <i>Hydrilla verticillata</i>	沉水植物分解后, 沉积物中TP、IP、OP、NaOH-P和HCl-P含量比初始值分别上升了33.92、28.33、4.66、13.50和14.08 mg/kg	[71]
温室气体 Greenhouse gas	沉水植物(狐尾藻) <i>Myriophyllum verticillatum</i>	狐尾藻在0—45d分解期间, CH_4 和 N_2O 的排放通量比分解前高数倍至数千倍	[72]
	沉水植物(菹草) <i>Potamogeton crispus</i>	菹草的 CO_2 排放通量在14d之前显著增加, 达到峰值13587.90 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{h}$, 然后立即减少	[73]
水生生物群落 结构 Community structure of aquatic organisms	挺水植物(芦苇) <i>Phragmites australis</i>	芦苇分解30d后, 水体中微生物多样性减少, 由分解前的34门变为19门。分解过程中拟杆菌属(<i>Bacteroides</i>)、密螺旋体属(<i>Treponema</i>)、瘤胃微生物(<i>Ruminococcaceae</i>)等降解难降解有机质的微生物占主导地位	[74]
	沉水植物(马来眼子菜) <i>Potamogeton wrightii</i>	腐解前期参与马来眼子菜腐解的细菌以变形菌门(<i>Proteobacteria</i>)和拟杆菌门(<i>Bacteroidetes</i>)为主。腐解中后期主要为厚壁菌门(<i>Phylum Firmicutes</i>)和变形菌门(<i>Proteobacteria</i>)	[75]

作用的粉碎, 分解速率一般表现为浮水植物>沉水植物>挺水植物, 其中浮水植物表现出更高的生物量损失率。水生植物分解受多种因素的影响, 包括其理化性质(如C/N、C/P、木质素含量)及分解者群落的结构。环境因素, 如温度、光照、营养物质浓度和DO等, 也会显著加速分解过程。此外, 不同水生植物的分解对湖泊水质、沉积物特性、温室气体排放及水生生物群落结构的影响存在差异。

水生植物是湖泊生态系统的重要组成部分, 对富营养化浅水湖泊水质提升具有重要作用。然而, 过量繁殖的水生植物腐烂分解后会向湖泊生态系统中释放体内大量的营养物质, 产生二次污染。尽管现有研究探讨了水生植物分解影响因素及其分解速率变化, 但对多因素复合影响及外来水生植物分解的研究仍明显不足。未来的研究应重点关注外来水生植物的分解及其与本地植物的生态相互作用, 同时综合探讨多种因素对水生植物分解的影响。这将为湖泊生态治理提供科学依据, 促进生态的可持续发展。

(作者声明本文符合出版伦理要求)

参考文献:

- [1] Ge Y, Zhang K, Yang X. Long-term succession of aquatic plants reconstructed from palynological records in a shallow freshwater lake [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **643**(1): 312-323.
- [2] Yang C, Shen X, Wu J, et al. Driving forces and recovery potential of the macrophyte decline in East Taihu Lake [J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, **342**(15): 118154.
- [3] Guo Z B, Zhou X Y, Cao Y C. Research progress on ecological effects and influencing factors of decomposing submerged plants [J]. *Ecological Science*, 2024, **43**(3): 243-250. [郭质彬, 周昕彦, 曹玉成. 沉水植物腐解的生态学效应及影响因素研究进展 [J]. *生态科学*, 2024, **43**(3): 243-250.]
- [4] Li A S, Wu C, Zhu L, et al. Simulation of bacterioplankton community dynamics and their environmental driving factors in overlying water during *Potamogeton crispus* decomposition [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2024, **36**(2): 389-402. [李昂松, 武闯, 朱琳, 等. 菹草腐解期上覆水浮游细菌群落动态模拟及其环境驱动因子分析 [J]. *湖泊科学*, 2024, **36**(2): 389-402.]
- [5] Gu L, Wu J Y, Hua, Z L. Benthic prokaryotic microbial community assembly and biogeochemical potentials in *E. coli* - Stressed aquatic ecosystems during plant decomposition [J]. *Environmental Pollution*, 2021(275): 116643.
- [6] Chen H S, Wei W W, Ye C, et al. Effects of mixed decomposition of macrophytes on water quality at lake-river confluence area and suitable macrophytes biomass after harvest [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2021, **34**(3): 589-598. [陈洪森, 魏伟伟, 叶春, 等. 大型水生植物混合腐解对入湖河口水质的影响及适宜生物量研究 [J]. *环境科学研究*, 2021, **34**(3): 589-598.]
- [7] Longhi D, Bartoli M, Viaroli P. Decomposition of four macrophytes in wetland sediments: Organic matter and nutrient decay and associated benthic processes [J]. *Aquatic Botany*, 2008, **89**(3): 303-310.
- [8] Deng Y, Yan Y, Wu Y, et al. Response of aquatic plant

- decomposition to invasive algal organic matter mediated by the co-metabolism effect in eutrophic lakes [J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, **329**(1): 117037.
- [9] Xu C, Zhao W, Yu X B. Decomposition of wetland plant residue and its influencing factors: a review [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, **39**(11): 3865-3872. [许策, 赵玮, 于秀波. 湿地植物残体分解及其影响因素研究进展 [J]. 生态学杂志, 2020, **39**(11): 3865-3872.]
- [10] Jiang Y, Wang J, Muhammad S, *et al.* How do earthworms affect decomposition of residues with different quality apart from fragmentation and incorporation [J]? *Geoderma*, 2018, **326**(15): 68-75.
- [11] France R, Culbert H, Freeborough C, *et al.* Leaching and early mass loss of boreal leaves and wood in oligotrophic water [J]. *Hydrobiologia*, 1997(345): 209-214.
- [12] Bradford M A, Berg B, Maynard D S, *et al.* Understanding the dominant controls on litter decomposition [J]. *Journal of Ecology*, 2016, **104**(1): 229-238.
- [13] Yang X, Wang X, Xiao S, *et al.* Dominant plants affect litter decomposition mainly through modifications of the soil microbial community [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2021(161): 108399.
- [14] Trivedi P, Delgado-Baquerizo M, Trivedi C, *et al.* Keystone microbial taxa regulate the invasion of a fungal pathogen in agro-ecosystems [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017(111): 10-14.
- [15] Carpenter S R, Lodge D M. Effects of submersed macrophytes on ecosystem processes [J]. *Aquatic Botany*, 1986(26): 341-370.
- [16] Wang R X, Wen S F, Shan B Q, *et al.* Water quality effect of aquatic plants decomposition and dynamic balance of element destination in Baiyangdian Lake [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2022, **42**(10): 332-341. [王荣欣, 温胜芳, 单保庆, 等. 白洋淀水生植物腐解水质效应与元素去向动态平衡 [J]. 环境科学学报, 2022, **42**(10): 332-341.]
- [17] Li X, Cui B, Yang, Q, *et al.* Effects of plant species on macrophyte decomposition under three nutrient conditions in a eutrophic shallow lake, North China [J]. *Ecological Modelling*, 2013, **252**(10): 121-128.
- [18] Wu R, Wang H, Li W, *et al.* Temporal variations in dissolved organic matter properties in a eutrophic lake under water dilution and aquatic plant litter decomposition: a simulated microcosm study revealing the environmental and microbial driving factors [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2024(65): 105837.
- [19] Wu S, He S, Zhou W, *et al.* Decomposition characteristics of three different kinds of aquatic macrophytes and their potential application as carbon resource in constructed wetland [J]. *Environmental Pollution*, 2017, **231**(1): 1122-1133.
- [20] Luai V B, Ding S, Wang D. The effects of litter quality and living plants on the home-field advantage of aquatic macrophyte decomposition in a eutrophic urban lake, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **650**(1): 1529-1536.
- [21] Hoeber S, Fransson P, Weih M, *et al.* Leaf litter quality coupled to Salix variety drives litter decomposition more than stand diversity or climate [J]. *Plant and Soil*, 2020, **453**(1): 313-328.
- [22] Ciska Veen G F, Freschet G T, Ordonez A, *et al.* Litter quality and environmental controls of home-field advantage effects on litter decomposition [J]. *Oikos*, 2015, **124**(2): 187-195.
- [23] Lu Y, Cui S S, Li W Y, *et al.* Dynamic characteristics of litter decomposition and nutrient release of three common emergent plants [J]. *Plant Science Journal*, 2023, **41**(1): 17-25. [鲁昱, 崔莎莎, 李文洋, 等. 三种常见挺水植物凋落物的分解动态及养分释放规律 [J]. 植物科学学报, 2023, **41**(1): 17-25.]
- [24] Wang M, Hao T, Deng X, *et al.* Effects of sediment-borne nutrient and litter quality on macrophyte decomposition and nutrient release [J]. *Hydrobiologia*, 2017, **787**(1): 205-215.
- [25] Santonja M, Rodríguez-Pérez H, Le Bris N, *et al.* Leaf nutrients and macroinvertebrates control litter mixing effects on decomposition in temperate streams [J]. *Ecosystems*, 2020, **23**(2): 400-416.
- [26] Webster J R, Benfield E F. Vascular plant breakdown in freshwater ecosystems [J]. *Annual Review of Ecology Evolution and Systematics*, 1986(17): 567-594.
- [27] Benner R, Newell S Y, MacCubbin A E, *et al.* Relative contributions of bacteria and fungi to rates of degradation of lignocellulosic detritus in salt-marsh sediments [J]. *Applied and Environment Microbiology*, 1984, **48**(1): 36-40.
- [28] Barajas-Guzmán G, Alvarez-Sánchez J. The relationships between litter fauna and rates of litter decomposition in a tropical rain forest [J]. *Applied Soil Ecology*, 2003, **24**(1): 91-100.
- [29] Bornette G, Puijalon S. Response of aquatic plants to abiotic factors: a review [J]. *Aquatic Sciences*, 2011, **73**(1): 1-14.
- [30] Friberg N, Dybkjær J B, Olafsson J S, *et al.* Relationships between structure and function in streams contrasting in temperature [J]. *Freshwater Biology*, 2009, **54**(10): 2051-2068.
- [31] Shi P, Wang H, Feng M, *et al.* Bacterial metabolic potential in response to climate warming alters the decomposition process of aquatic plant litter-In shallow lake mesocosms [J]. *Microorganisms*, 2022, **10**(7): 1327.
- [32] Si J, Xing Y, Lu S Y, *et al.* Release rule research of submerged plants with temperature impact in contabescence [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, **25**(1): 217-223. [司静, 邢奕, 卢少勇, 等. 沉水植

- 物衰亡过程中氮磷释放规律及温度影响的研究 [J]. 中国农学通报, 2009, **25**(1): 217-223.]
- [33] Feng X, Simpson M J. Temperature and substrate controls on microbial phospholipid fatty acid composition during incubation of grassland soils contrasting in organic matter quality [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, **41**(4): 804-812.
- [34] King J Y, Brandt L A, Adair E C. Shedding light on plant litter decomposition: advances, implications and new directions in understanding the role of photodegradation [J]. *Biogeochemistry*, 2012, **111**(1): 57-81.
- [35] Franken R J M, Waluto B, Peeters E T H M, *et al.* Growth of shredders on leaf litter biofilms: the effect of light intensity [J]. *Freshwater Biology*, 2005, **50**(3): 459-466.
- [36] Pancotto V A, Sala O E, Cabello M, *et al.* Solar UV-B decreases decomposition in herbaceous plant litter in Tierra del Fuego, Argentina: potential role of an altered decomposer community [J]. *Global Change Biology*, 2003, **9**(10): 1465-1474.
- [37] Austin A T, Vivanco L. Plant litter decomposition in a semi-arid ecosystem controlled by photodegradation [J]. *Nature*, 2006, **442**(7102): 555-558.
- [38] Karlsson J, Byström P, Ask J, *et al.* Light limitation of nutrient-poor lake ecosystems [J]. *Nature*, 2009, **460**(7254): 506-509.
- [39] Zou M. Study on Decomposition of macroalgae debris under the influence of different environmental factors [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2017: 1-83. [邹敏, 不同环境要素影响下大型海藻碎屑分解研究 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2017: 1-83.]
- [40] Gu J J, Jin Z H, Liu Z Y. Experimental studies on decomposition process of submerged macrophytes from Wuliangsu Lake [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2008, **22**(4): 181-184. [顾久君, 金朝晖, 刘振英. 乌梁素海沉水植物腐烂分解试验研究 [J]. 干旱区资源与环境, 2008, **22**(4): 181-184.]
- [41] -J Emsens W, Aggenbach C J S, Grootjans A P, *et al.* Eutrophication triggers contrasting multilevel feedbacks on litter accumulation and decomposition in fens [J]. *Ecology*, 2016, **97**(10): 2680-2690.
- [42] Pascoal C, Cássio F. Contribution of fungi and bacteria to leaf litter decomposition in a polluted river [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2004, **70**(9): 5266-5273.
- [43] Li X, Cui B S, Yang Q C, *et al.* Detritus quality controls macrophyte decomposition under different nutrient concentrations in a eutrophic shallow lake, North China [J]. *PLoS One*, 2012, **7**(7): e42042.
- [44] Song Y B, Zhou M Y, Qin Y L, *et al.* Nutrient effects on aquatic litter decomposition of free-floating plants are species dependent [J]. *Global Ecology and Conservation*, 2021(30): e01748.
- [45] Liu S, He G, Fang H, *et al.* Effects of dissolved oxygen on the decomposers and decomposition of plant litter in lake ecosystem [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, **372**(20): 133837.
- [46] Reddy K R, Patrick W H. Effect of alternate aerobic and anaerobic conditions on redox potential, organic matter decomposition and nitrogen loss in a flooded soil [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1975, **7**(2): 87-94.
- [47] Passerini M D, Cunha-Santino M B, Bianchini I. Oxygen availability and temperature as driving forces for decomposition of aquatic macrophytes [J]. *Aquatic Botany*, 2016(130): 1-10.
- [48] Qin B, Zhou J, Elser J J, *et al.* Water depth underpins the relative roles and fates of nitrogen and phosphorus in lakes [J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, **54**(6): 3191-3198.
- [49] Yuan G, Sun L, Guo P, *et al.* How eutrophication promotes exotic aquatic plant invasion in the lake littoral zone [J]? *Environmental Science & Technology*, 2023, **57**(21): 8002-8014.
- [50] Huang F, Huang Y, Jia J, *et al.* Research and engineering application of bypass combined artificial wetlands system to improve river water quality [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2022(48): 102905.
- [51] Wang Q, Zhang H, Yan Z, *et al.* Decomposition of exotic versus native aquatic plant litter in a lake littoral zone: Stoichiometry and life form analyses [J]. *Science of the Total Environment*, 2024, **927**(1): 172271.
- [52] Cao P P, Liu M S, Tang J Y, *et al.* A comparative study on the decomposition processes among some aquatic plants [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, **34**(14): 3848-3858. [曹培培, 刘茂松, 唐金艳, 等. 几种水生植物腐解过程的比较研究 [J]. 生态学报, 2014, **34**(14): 3848-3858.]
- [53] Zhang G Z, Zhao M, Li Y, *et al.* Release characteristics of dissolved organic matter during decomposition of aquatic plants [J]. *China Water & Wastewater*, 2022, **38**(19): 93-101. [张国正, 赵敏, 李勇, 等. 水生植物腐解过程中溶解性有机质的释放特征 [J]. 中国给水排水, 2022, **38**(19): 93-101.]
- [54] Yuan D H, Guo X J, Wen L, *et al.* Detection of Copper (II) and Cadmium (II) binding to dissolved organic matter from macrophyte decomposition by fluorescence excitation-emission matrix spectra combined with parallel factor analysis [J]. *Environmental Pollution*, 2015(204): 152-160.
- [55] Wang Y R, Zhang P Y, Zhang G M, *et al.* Release characteristics of dissolved organic matter during decomposition of different aquatic plants [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2023, **17**(12): 4017-4027. [王亚如, 张盼月, 张光明, 等. 不同种类水生植物分解过程中溶解性有机物的释放特征 [J]. 环境工程学报, 2023, **17**(12): 4017-4027.]
- [56] Guo X, Tian Y, Yuan D, *et al.* Effects of hydrophyte

- decomposition on the binding mechanism between fluorescent DOM and copper [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021(214): 112064.
- [57] Huettel M, Berg P, Kostka J E. Benthic exchange and biogeochemical cycling in permeable sediments [J]. *Annual Review of Marine Science*, 2014(6): 23-51.
- [58] Du S T, Shentu J L, Luo B F, *et al.* Facilitation of phosphorus adsorption onto sediment by aquatic plant debris [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, **191**(1/2/3): 212-218.
- [59] Song N, Jiang H L. Coordinated photodegradation and biodegradation of organic matter from macrophyte litter in shallow lake water: Dual role of solar irradiation [J]. *Water Research*, 2020(172): 115516.
- [60] Higgins E, Parr T B, Vaughn C C. Freshwater mussels promote functional redundancy in sediment microbial communities under different nutrient regimes [J]. *Functional Ecology*, 2023, **37**(11): 2940-2952.
- [61] Li K, Ma M, Xiang X, *et al.* Carbon reduction in commercial building operations: a provincial retrospection in China [J]. *Applied Energy*, 2022(306): 118098.
- [62] Velthuis M, Kosten S, Aben R, *et al.* Warming enhances sedimentation and decomposition of organic carbon in shallow macrophyte-dominated systems with zero net effect on carbon burial [J]. *Global Change Biology*, 2018, **24**(11): 5231-5242.
- [63] Wang X, Bai J H, Xie T, *et al.* Effects of biological nitrification inhibitors on nitrogen use efficiency and greenhouse gas emissions in agricultural soils: a review [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, **220**(1): 112338.
- [64] Pietsch C, Bottjer D J. The importance of oxygen for the disparate recovery patterns of the benthic macrofauna in the Early Triassic [J]. *Earth-Science Reviews*, 2014(137): 65-84.
- [65] Lacoul P, Freedman B, Clair T. Effects of acidification on aquatic biota in Atlantic Canada [J]. *Environmental Reviews*, 2011(19): 429-460.
- [66] Petruželová J, Bojková J, Sychra J, *et al.* Accelerated recovery of lake macroinvertebrates in the third decade since the reversal of acidification [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, **892**(20): 164533.
- [67] Jessen G L, Lichtschlag A, Ramette A, *et al.* Hypoxia causes preservation of labile organic matter and changes seafloor microbial community composition (Black Sea) [J]. *Science Advances*, 2017, **3**(2): e1601897.
- [68] Tang J Y, Cao P P, Xu C, *et al.* Effects of aquatic plants during their decay and decomposition on water quality [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, **24**(1): 83-89. [唐金艳, 曹培培, 徐驰, 等. 水生植物腐烂分解对水质的影响 [J]. *应用生态学报*, 2013, **24**(1): 83-89.]
- [69] Li X, Cui K P, Tang H Y, *et al.* Effect of decomposition of submerged plants (*Vallisneria spiralis*) on water quality [J]. *China Water & Wastewater*, 2020, **36**(7): 60-67. [李旭, 崔康平, 汤海燕, 等. 沉水植物苦草腐解对水体水质的影响 [J]. *中国给水排水*, 2020, **36**(7): 60-67.]
- [70] Liu X. Study on environmental effects of Ceratophyllum demersum litter decay and alternate growth of Ceratophyllum demersum and *Potamogeton crispus* on overlying water and litter-sediment interface [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2022: 1-100. [刘鑫. 金鱼藻枯落物腐烂及金鱼藻-菹草交替生长对上覆水及枯落物-沉积物界面的环境效应研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2022: 1-100.]
- [71] Wang L Z, Wang G X. Influence of submerged macrophytes on phosphorus transference between sediment and overlying water in decomposition period [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, **33**(17): 5426-5437. [王立志, 王国祥. 衰亡期沉水植物对水和沉积物磷迁移的影响 [J]. *生态学报*, 2013, **33**(17): 5426-5437.]
- [72] Luo P, Tong X, Liu F, *et al.* Nutrients release and greenhouse gas emission during decomposition of *Myriophyllum aquaticum* in a sediment-water system [J]. *Environmental Pollution*, 2020(260): 114015.
- [73] Xie J, Gao Y, Xu X, *et al.* Effects of decomposition of submerged aquatic plants on CO₂ and CH₄ release in river sediment-water environment [J]. *Water*, 2023, **15**(16): 2863.
- [74] Liu X, Liu H, Jiang H L, *et al.* Analysis of the production process of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) and the change of microbial community in the decomposition process of different aquatic plants [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2020, **29**(5): 1140-1149. [刘新, 刘浩, 江和龙, 等. 不同水生植物腐解过程中有色可溶有机物(CDOM)的产生过程及微生物群落变化分析 [J]. *长江流域资源与环境*, 2020, **29**(5): 1140-1149.]
- [75] Yang F, Yao J, Zhang Y M, *et al.* Research on the dissolved organic matter and microbial community diversity of submerged macrophytes decomposed under different temperature [J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(10): 3904-3913. [杨飞, 姚佳, 张毅敏, 等. 温度对沉水植物腐解释放DOM及微生物群落多样性的影响 [J]. *中国环境科学*, 2018, **38**(10): 3904-3913.]

RESEARCH PROGRESS ON DECOMPOSITION PROCESS OF AQUATIC PLANTS AND THEIR EFFECTS ON LAKE ECOSYSTEMS

XU Jia-Le^{1,2}, LIU Jun-Wu^{3,4}, FANG Ying-Chun^{3,4}, WU Zhen-Bin², LIU Zi-Sen² and ZHANG Yi²

(1. *China University of Geosciences, Wuhan 430074, China*; 2. *Key Laboratory of Breeding Biotechnology and Sustainable Aquaculture (CAS), Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China*; 3. *Engineering and Technology Research Center of Heavy Pollution Industrial Wastewater Treatment and Recycling of Hunan Province, Yueyang 414000, China*; 4. *Hunan Jascukin Technology Co., LTD., Changsha 410000, China*)

Abstract: Aquatic plants play an important role in improving the water quality of eutrophic shallow lakes. Ecological restoration technologies based on the restoration of aquatic plants have been widely used in the treatment of eutrophic shallow water bodies. However, excessive reproduction of aquatic plants can release a lot of nutrients to the lake ecosystem after decomposition, which will aggravate the degree of eutrophication. Therefore, it is of great significance to study the decomposition of aquatic plants for the stability of lake ecosystem. This paper summarizes the decomposition mechanism of aquatic plants, including the decomposition process, the migration and transformation of elements in the decomposition, and the differences of decomposition of different types of aquatic plants. The effects of biological and abiotic factors on the degree and rate of aquatic plant decomposition were discussed. The effects of aquatic plant decomposition on lake ecosystems were analyzed, including direct and indirect effects on water quality, sediment characteristics, greenhouse gas emissions, and aquatic community structure. Finally, based on the current research progress, this paper puts forward suggestions and prospects for future research on the decomposition of aquatic plant residues, in order to provide scientific basis for the restoration and management of lake ecology.

Key words: Aquatic plants; Decomposition process; Biological factors; Abiotic factors; Lake ecosystem