

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.7
第40卷 第7期

目次

《大气污染防治行动计划》实施的环境健康效果评估	武卫玲, 薛文博, 王燕丽, 雷宇, 冯涛, 蔡泽林 (2961)
基于达标约束的南京市环境空气质量情景模拟	谢放尖, 史之浩, 李婧祎, 郑新梅, 胡建林, 刘春蕾, 杨峰 (2967)
郑州市 PM _{2.5} 中水溶性离子特征及来源分析	杨留明, 王申博, 郝祺, 韩士杰, 李晨, 赵庆炎, 燕启社, 张瑞芹 (2977)
能见度与 PM _{2.5} 浓度关系及其分布特征	王继康, 张恒德, 桂海林, 饶晓琴, 张碧辉 (2985)
基于扩散模式反演的橡胶轮胎制造行业 VOCs 排放特征	白红祥, 魏巍, 王雅婷, 任云婷, 臧佳欣, 程水源 (2994)
太原市环境空气中挥发性芳香烃碳同位素组成及来源	李颖慧, 闫雨龙, 李志生, 郝爱胜, 李如梅, 杨帆, 彭林 (3001)
办公楼聚集区空气中 PBDEs 谱分布与污染特征	王琳, 邓雅佳, 廖晓勇, 曹红英, 焦杏春 (3008)
南北水调东线中游枢纽湖泊有色可溶性有机物来源组成特征	张柳青, 彭凯, 周蕾, 石玉, 李元鹏, 周永强, 龚志军, 张运林, 杨艳 (3018)
黄土丘陵区小流域不同水体氢氧同位素特征	张荷惠子, 于坤霞, 李占斌, 李鹏, 赵宾华, 柯浩成, 蒋凯鑫 (3030)
基于碳氮同位素的澜沧江水库 TOC 来源差异性分析	王从锋, 胡子龙, 杨正健, 丹勇, 赵萍, 郝文超, 聂小芬, 聂睿, 徐刘得, 刘德富 (3039)
李家河水库污染物来源及水体分层对水质的影响	徐进, 黄廷林, 李凯, 杨尚业, 温成成, 林子深, 李衍庆, 刘雪晴 (3049)
水库淹没带土壤有机氯农药分布特征及风险评价	王霞, 张青琢, 赵高峰, 王晓燕 (3058)
银川市湿地表层水中多环芳烃的分布、来源及生态风险评价	田大年, 党丽慧, 丁润梅, 蔡倩, 张鹏举, 汪岭, 杨慧芳 (3068)
人类活动影响下的垂直气候带岩溶泉地球化学特征对比: 以重庆金佛山水房泉、碧潭泉为例	谢国文, 杨平恒, 盛婷, 邓书金, 洪爱花 (3078)
漓江冲洪积扇地下水化学特征及控制因素分析	唐金平, 张强, 胡漾, 张宇, 聂保伟 (3089)
三峡库区蓄水期和非蓄水期附石藻类群落变化及其影响因子分析	付君珂, 刘黎, 贺新宇, 张红波, 董聪聪, 杨燕君, 施军琼, 吴忠兴 (3099)
降雨对香溪河库湾主要藻种原位生长的影响	翁传松, 刘德富, 张佳磊, 龚川, 沈旭舟 (3108)
绿狐尾藻分解及其氮磷释放特征	童雄, 罗沛, 刘锋, 黄敏, 陈哲, 肖润林, 吴金水 (3118)
微藻固定化条件优化及其污水氨氮去除潜力分析	刘祥, 王婧瑶, 吴娟娟, 彭飞, 王凯军 (3126)
钛酸盐纳米管对水中氨氮的吸附特性	张政, 冯长生, 张晓瑞, 郑建奎, 蒋彩云, 李攀杰, 王玉萍 (3135)
基于缺陷重构的类芬顿光催化剂在降解染料废水中的应用	唐清文, 安晓强, 兰华春, 刘会娟, 李海翔 (3146)
N 原子杂化石墨烯高效活化过一硫酸盐降解 RBK5 染料废水	于永波, 黄湾, 董正玉, 吴丽颖, 张倩, 洪俊明 (3154)
Cu ²⁺ 对以 NO ₃ ⁻ 为电子受体反硝化过程的影响	买文可, 彭永臻, 吉建涛 (3162)
CANON 中试反应器启动及性能优化	孙庆花, 吴迪, 周家中, 郑志佳 (3169)
好氧段碳源浓度对同步去除和富集磷酸盐生物膜的影响	徐林建, 潘杨, 章豪, 冯鑫, 魏攀龙, 尤星怡 (3179)
有机物特性对 AAO 系统污泥沉降性能的影响	刘小博, 袁林江, 陈希, 薛欢婷 (3186)
不同污泥浓度下缺氧 FNA 对硝化菌活性的影响	吕心涛, 周桐, 田夏迪, 谷鹏超, 杨岸明, 王佳伟, 张树军 (3195)
ANAMMOX 菌铁自养反硝化工艺的稳定性	张文静, 黄勇, 毕贞, 胡羽婷, 董石语 (3201)
在线 NaClO 反洗对倒置 A ² O-MBR 系统微生物群落的影响	王旭东, 高森, 王莹莹, 杨永哲, 刚家斌, 符国力, 王磊 (3208)
基于有机物释放和经济性的污泥预处理方法评价	袁悦, 谭学军, 郑舍予 (3216)
北京市清水与再生水协同利用优化模型	张田媛, 谭倩, 王淑萍 (3223)
N-亚硝胺在不同处理工艺污水处理厂中的分布及其去除	柳王荣, 赵建亮, 杨愿愿, 姚理, 刘有胜, 应光国 (3233)
北京市生活污水中曲马多和芬太尼的赋存	周子雷, 杜鹏, 白雅, 韩胜, 黄红梅, 徐泽琼, 李喜青 (3242)
贵阳市污水处理厂中典型抗生素的污染水平及生态风险	杨钊, 李江, 张圣虎, 向福亮, 唐涛涛, 杨娅红 (3249)
紫色土丘陵区畜禽养殖场土壤中抗生素抗性基因分布特征	程建华, 唐翔宇, 刘琛 (3257)
四环素对污泥蚯蚓粪中微生物种群和抗性基因的影响	陈景阳, 夏慧, 黄魁, 吴颖 (3263)
热水解污泥厌氧消化过程中肠球菌抗生素抗性基因与毒力基因的转归	李慧莉, 裴媛玫, 李姗, 何芙蓉, 杨月婷, 魏源送, 佟娟 (3270)
鸡粪与中药渣共堆肥对抗生素抗性基因的影响	武晋萍, 陈建文, 刘勇, 张红, 李君剑 (3276)
宁武亚高山湖泊细菌群落的时空格局及驱动机制	王雪, 刘晋仙, 柴宝峰, 罗正明, 赵鹏宇, 暴家兵 (3285)
石家庄市春季景观水体 nirS 型反硝化细菌群落特征分析	张艺冉, 李再兴, 孙悦, 霍然, 孟文茹, 王凌霄, 申邵恒, 杨子程, 周石磊 (3295)
磷差异性调控水稻根际 nirK/nirS 型反硝化菌组成与丰度	湛钰, 高丹丹, 盛荣, 魏文学, 秦红灵, 张文钊, 侯海军, 汤亚芳 (3304)
会仙岩溶湿地、稻田与旱地土壤细菌群落结构特征比较	贾远航, 靳振江, 袁武, 程跃扬, 邱江梅, 梁锦桃, 潘复静, 刘德深 (3313)
湘中典型稻田系统 Cd 平衡分析	蒋凯, 邓潇, 周航, 龙坚, 李欣阳, 董霞, 王树兵, 刘文辉, 侯红波, 彭佩钦, 廖柏寒 (3324)
改良剂对根际土壤-水稻系统中镉运移的影响	李义纯, 王艳红, 唐明灯, 巫彬芳, 李林峰, 艾绍英, 凌志祥 (3331)
重金属固定植物促生细菌的筛选及其阻控小麦富集重金属效应	韩辉, 王晓宇, 蔡红, 姚伦广, 蔡倩迪, 王逸雪, 陈兆进 (3339)
不同品种辣椒镉亚细胞分布和化学形态特征差异	彭秋, 李桃, 徐卫红, 焦璐琛, 邓继宝 (3347)
添加磷对水稻-油菜轮作土壤 N ₂ O 排放影响	孙正, 苏荣琳, 徐鹏, 吴宏涛, 胡金丽, 赵劲松, 胡荣桂 (3355)
渭北旱原土地利用方式对土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响	刘杰, 马艳婷, 王宪玲, Sompouviset Thongsouk, 李利敏, 秦亚旭, 赵志远, 郑伟, 翟丙年 (3361)
不同土地利用类型的土壤中多环芳烃的纵向迁移特征	鲁垠涛, 向鑫鑫, 张士超, 刘明丽, 王静, 李爽, 姚宏, 孙绍斌 (3369)
西湖景区土壤中邻苯二甲酸酯污染水平、来源分析和空间分布特征	廖健, 邓超, 陈怡, 周文钊, 林春绵, 张辉 (3378)
生物炭对壤土土壤容重和团聚体的影响	李倩倩, 许晨阳, 耿增超, 张久成, 陈树兰, 王慧玲, 张妍, 负方悦, 杨林, 董胜虎 (3388)
《环境科学》征订启事 (3194)	《环境科学》征稿简则 (3222)
信息 (3256, 3284, 3323)	

绿狐尾藻分解及其氮磷释放特征

童雄^{1,2}, 罗沛^{2*}, 刘锋², 黄敏^{1*}, 陈哲¹, 肖润林², 吴金水²

(1. 武汉理工大学资源与环境工程学院, 武汉 430070; 2. 中国科学院亚热带农业生态研究所, 亚热带农业生态过程重点实验室, 长沙 410125)

摘要: 湿地植物分解释放的有机物、氮和磷等会影响人工湿地对水体污染物的去除效率和出水水质。本研究采用尼龙分解袋法研究绿狐尾藻在水中的分解过程及氮磷释放特征。连续 60 d 的室内分解实验结果表明, 前期(0~4 d)绿狐尾藻干物质质量损失速率快, 占初始质量的 30%, 中后期(4~60 d)损失速率减慢, 占 31%。拟合的一级动力学分解速率常数为 0.014 2 d⁻¹, 降解 50% 的干物质需 48.8 d。水体 pH 值变化情况: 0~4 d 从 7.60 迅速下降到 5.63; 中期趋于稳定; 后期 pH 值回升到 7.03, 与空白对照值接近。绿狐尾藻分解实验系统中溶解氧浓度从 6.30 mg·L⁻¹ 在 1 d 内快速下降到 0.61 mg·L⁻¹, 表明该系统一直处于厌氧状态。水中总氮浓度 0~2 h 迅速增加达到 12.7 mg·L⁻¹, 2 h~32 d 逐渐降低到 5.80 mg·L⁻¹, 后期略有增加; 总磷浓度初期快速升高到 18.4 mg·L⁻¹, 中后期趋于稳定。有机氮(占总氮 65.7%~94.7%)和无机磷(占总磷 61%~89%)是主要的氮磷存在形态。绿狐尾藻体内总氮含量随分解时间逐渐增加, 从 24.3 mg·g⁻¹ 上升到 60.5 mg·g⁻¹; 而总磷含量从 6.09 mg·g⁻¹ 下降到 2.94 mg·g⁻¹ 后波动稳定, 这可能与附着微生物对氮的吸收和固定等因素有关。本研究证实绿狐尾藻分解过程释放的氮磷营养元素会引起水体二次污染, 为此采用合理的植物收割管理措施非常必要。

关键词: 人工湿地; 绿狐尾藻; 分解; 氮磷释放; 二次污染

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)07-3118-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201812050

Decomposition of *Myriophyllum aquaticum* and the Associated Release of Nitrogen and Phosphorus

TONG Xiong^{1,2}, LUO Pei^{2*}, LIU Feng², HUANG Min^{1*}, CHEN Zhe¹, XIAO Run-lin², WU Jin-shui²

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China)

Abstract: Decomposition of wetland plants could release pollutants, which may affect the removal efficiency and effluent quality of constructed wetlands. The experimental decomposition test of *Myriophyllum aquaticum* was carried out for 60 d using nylon bags, and release characteristics of nitrogen and phosphorus during the decomposition process were studied. The results showed that the decomposition rate of *M. aquaticum* was fastest during the first 0-4 d, with a weight loss of 30%, while the degradation rate slowed gradually during the period 4-60 d, with weight loss of 31%. The fitting first-order kinetic decomposition rate constant was 0.014 2 d⁻¹, and the calculated time to degrade 50% of dry matter was 48.8 d. The water pH decreased rapidly from 7.60 to 5.63 during 0-4 d, stabilized during 4-32 d, and finally increased to 7.03 (which was close to the control sample without *M. aquaticum*). The dissolved oxygen concentration decreased rapidly from 6.30 mg·L⁻¹ to 0.61 mg·L⁻¹ during 0-4 d, and remained in an anaerobic state. The total nitrogen concentration in the water increased rapidly to 12.7 mg·L⁻¹ within 2 h, gradually decreased to 5.80 mg·L⁻¹ during 2 h-32 d, and then finally increased slightly. The phosphorus concentration increased rapidly to 18.4 mg·L⁻¹ at the beginning of the experiment, and then gradually stabilized. The main forms of nitrogen and phosphorus released by *M. aquaticum* were organic nitrogen (accounting for 65.7%-94.7% of total nitrogen) and inorganic phosphorus (accounting for 61%-89% of total phosphorus), respectively. The total nitrogen content of *M. aquaticum* increased from 24.3 mg·g⁻¹ to 60.5 mg·g⁻¹ with increasing degradation time; the total phosphorus decreased initially from 6.09 mg·g⁻¹ to 2.94 mg·g⁻¹ and then remained constant. These trends may have been related to the fixation of nitrogen by attached microorganisms. Therefore, suitable harvesting and management strategies should be adopted for wetland plants to reduce secondary pollution.

Key words: constructed wetlands; *Myriophyllum aquaticum*; decomposition; nitrogen and phosphorus release; secondary pollution

人工湿地因其投资成本低、管理维护简单等优点, 广泛用于处理生活污水、农田排水等^[1~3]。植物是人工湿地的核心, 在吸收污水氮磷等营养物质的同时为湿地微生物提供附着场所, 维持湿地系统稳定^[1~5]。由于生长的周期性, 植物枯萎凋落后, 吸收到植物体内的营养物质通过物理、化学和微生物的作用下会被重新释放到水体^[4, 5]。

目前国内外学者对湿地植物的分解已有大量研

究, 植物腐烂分解向水体中释放氮、磷和有机物等, 在短期内易造成水体 pH 值和溶解氧(DO)浓度

收稿日期: 2018-12-05; 修订日期: 2019-02-22

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0800502, 2016YFE0101100, 2018YFD0800504); 中国科学院前沿科学重点研究项目(QYZDJ-SSW-DQC041); 长沙市重点科技计划项目(kq1801060)

作者简介: 童雄(1992~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤环境与农业生态, E-mail: 992733746@qq.com

* 通信作者, E-mail: luopei@isa.ac.cn; huangmin@whut.edu.cn

迅速下降, 影响人工湿地出水水质, 破坏人工湿地系统的稳定^[4~11]. 叶春等^[6]的研究发现黑藻 (*Hydrilla verticillata*) 经过 70 d 分解后植物 81.3% 的碳、81.6% 的氮和 85.9% 的磷会释放到水中; 而陈志刚等^[7]发现沉水植物菹草 (*Potamogeton crispus*) 100 d 的分解仅释放了 9.1% 的氮和 32.0% 的磷. Wu 等^[8]观测到水葫芦 (water hyacinth)、软水草 (hydrilla) 和香蒲 (cattail) 这 3 种湿地植物在分解初期 (0~2 d) 使水体 pH 值和 DO 浓度迅速降低. 植物分解受到植物自身化学性质和外界因素的影响. 潘慧云等^[9]发现秋冬季节低温条件下, 苦草 (*Vallisneria spiralis*) 和金鱼藻 (*Myriophyllum verticillatum* Linn) 分解速率较慢, 释放氮磷量较少, 天气回暖后植物体的腐烂分解速率加快. Overbeek 等^[10]认为植物分解速率初期主要受植物特征影响, 后期受植物特征和水环境条件的共同影响. 前期研究表明, 绿狐尾藻 (*Myriophyllum aquaticum*) 对水体污染物具有高效的吸收作用, 是净化水体较为理想的水生植物^[11, 12]. 易文利等^[13]认为绿狐尾藻凋落物分解释放有机质对绿狐尾藻有毒害作用. 因此, 狐尾藻分解过程氮磷的释放特征有必要进一步研究, 进而增强绿狐尾藻人工湿地的处理效果.

本文以绿狐尾藻作为研究对象, 采用广泛应用于研究植物分解的尼龙分解袋法^[14, 15], 进行连续 60 d 的室内分解实验, 探讨分解过程氮磷释放特征, 评估对水质的影响, 以期降低绿狐尾藻残体造成的二次污染提供数据支撑.

1 材料与方法

1.1 实验材料

绿狐尾藻采集于湖南长沙一个人工湿地, 经蒸馏水洗净、烘干后剪成长 0.5~1 cm 混合均匀, 于干燥箱内保存待用. 为模拟自然水体环境并降低水体氮磷浓度的干扰, 绿狐尾藻分解用水采集于该人工湿地附近池塘, 其氨氮 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、硝氮 ($\text{NO}_3^-\text{-N}$)、总氮 (TN)、总磷 (TP) 和溶解性有机碳 (DOC) 浓度分别为 0.21、0.13、0.39、0.058 和 4.5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, pH 值为 7.60.

1.2 实验方法

称取 9.00 g 绿狐尾藻干样于 90 目尼龙网袋 (规格为 10 cm × 10 cm), 置于盛有 2 L 池塘水的玻璃瓶中. 选取不加植物仅加池塘水作为空白对照. 玻璃瓶用黑色塑料袋遮光处理, 防止藻类等生长对实验结果的干扰. 分别于 2 h 及 4、8、16、24、32、48 和 60 d 采集水样和植物样品, 每次采样设置 3 个平行组, 1 个空白对照组. 采集水样前用便携式多参数测定仪 SG-68 测定水样 pH 值和 DO 浓度.

采集植物样品的方法为: 将尼龙网袋取出, 用蒸馏水将表面冲洗几次后, 65℃ 烘干至恒重.

水样经过 0.45 μm 微孔滤膜过滤, 采用岛津 TOC 分析仪测定水样 DOC 浓度, 采用 AA3 流动分析仪测定水样氨氮、硝氮、总氮 (TN) 浓度, 采用钼锑抗比色法测定水样总磷和无机磷浓度^[16]. 水样有机氮浓度用总氮减去铵态氮和硝态氮浓度计算, 水样有机磷浓度采用总磷减去无机磷浓度计算. 烘干植株样品经过浓硫酸和过氧化氢消解后, 全氮含量采用 AA3 流动分析仪测定, 全磷含量用钼锑抗比色法测定^[17].

1.3 数据分析方法

绿狐尾藻分解速率 (v_i) 计算公式:

$$v_i = \frac{m_{i-1} - m_i}{t_i - t_{i-1}} \quad (1)$$

式中, v_i 为第 i 次采样的分解速率 ($\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$), m_i 为第 i 次采样时绿狐尾藻干重 (g), m_{i-1} 为第 $i-1$ 次采样时绿狐尾藻干重 (g), t_i 为第 i 次采样时间 (d), t_{i-1} 为第 $i-1$ 次采样时间 (d).

绿狐尾藻一级分解速率常数 (k , d^{-1}) 由公式 (2) 拟合:

$$\frac{m_1}{m_0} = e^{-kt} \quad (2)$$

式中, m_0 为绿狐尾藻残体初始干重 (g), m_1 为 t 时间后绿狐尾藻干重 (g), t 为分解时间 (d).

绿狐尾藻分解 50% 所需时间 ($t_{50\%}$) 采用公式 (3) 计算:

$$t_{50\%} = \frac{0.693}{k} \quad (3)$$

数据作图使用 Origin 2018, 统计分析使用 SPSS 22. 采用单因素方差分析 (one-way ANOVA) 和最小显著差异 (LSD) 法进行方差分析和差异显著性检验 ($\alpha=0.05$)

2 结果与分析

2.1 绿狐尾藻的分解速率

绿狐尾藻质量随时间变化如图 1 所示. 绿狐尾藻干物质在第 0~2 h 内从 9.00 g 下降到 7.02 g, 分解速率高达 23.8 $\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$; 淋溶作用下绿狐尾藻中大量的有机物和无机盐溶解到水中, 导致其质量快速降低. 第 2 h~8 d 的分解速率逐渐减缓, 在第 8 d 时分解速率仅为 0.029 $\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$, 干物质量为 6.15 g; 说明 8 d 内快速淋溶过程已经结束, 降解进入慢速分解期. 第 8~24 d 分解速率略有上升, 干物质量下降到 4.63 g; 可能是微生物参与了绿狐尾藻的分解. 第 24~60 d 分解速率逐渐下降到 0 $\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$,

干物质量下降到 3.50 g; 此时绿狐尾藻主要是纤维素和木质素等难分解组分。

采用一级动力学方程对绿狐尾藻分解过程进行

拟合, 拟合优度 $R^2 = 0.957$, 计算一级动力学分解速率常数 k 值为 0.0142 d^{-1} . 计算出绿狐尾藻干物质分解 50% 需要 48.8 d.

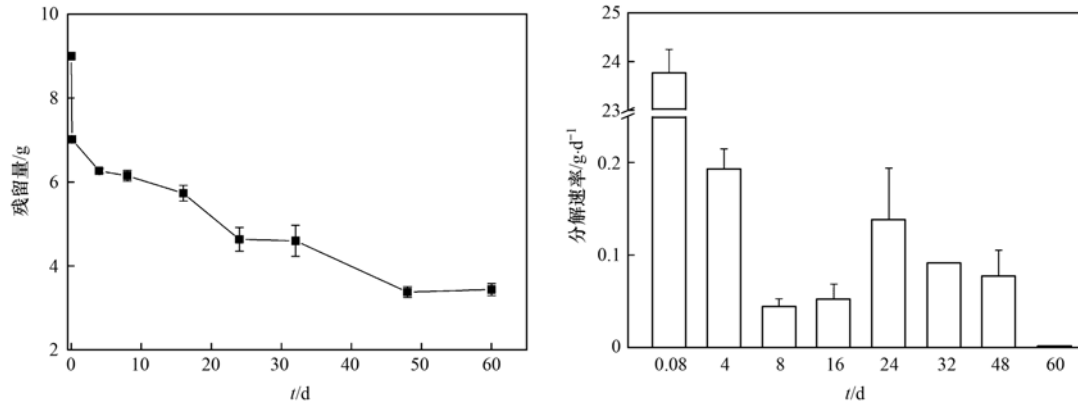


图1 绿狐尾藻剩余生物量和分解速率

Fig. 1 Residual biomass and decomposition rate of *Myriophyllum aquaticum*

2.2 水环境条件变化

如图2所示, 绿狐尾藻分解过程中水体 pH 值在第 0~4 d 从 7.60 快速下降到 5.63; 对第 4~32 d 的 pH 值进行统计检验, 显示 pH 值无显著性差异 ($P > 0.05$); 第 30 d 后 pH 值逐渐上升到 7.03, 与空白对照接近。绿狐尾藻分解初期释放的有机

酸使水体 pH 值快速降低, 后期随着有机酸的分解, 水体 pH 值逐渐恢复。水中 DO 浓度在第 0~4 d 快速下降, 从 $6.30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 下降到 $0.61 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 在第 8~60 d, DO 浓度接近零, 分解体系处于厌氧状态。说明绿狐尾藻分解过程会严重影响水环境。

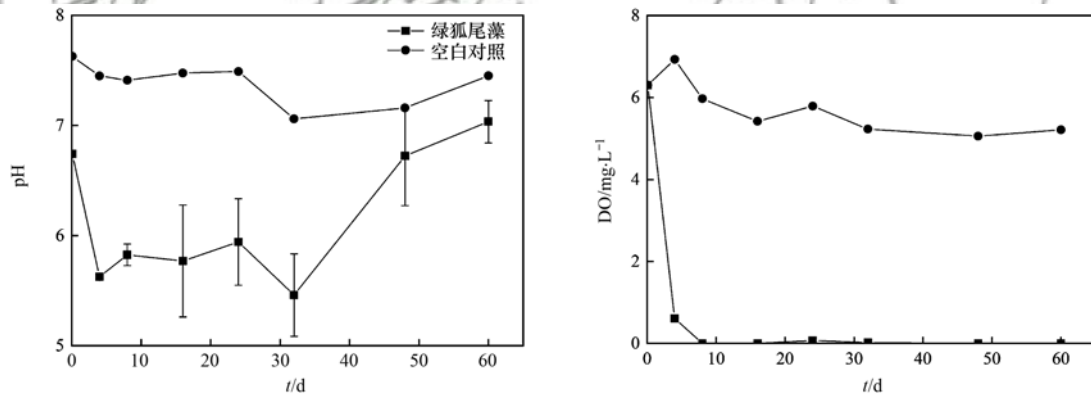


图2 水体环境指标

Fig. 2 Water environmental indicators

2.3 绿狐尾藻分解过程碳氮磷的释放特征

绿狐尾藻分解过程中水中 TN 和 TP 浓度如图3所示。在第 0~38 d 水中 TN 的浓度先迅速增加之后逐渐降低, 第 2 h 内快速增加到 $12.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 第 2 h~32 d 逐渐下降到 $5.80 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 第 32~60 d 又略有升高。水中 TP 的浓度第 0~4 d 增加较快, 在第 4 d 时水中 TP 的浓度就已经达到 $18.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。在第 4~32 d TP 的浓度有所波动, 第 32~60 d 逐渐趋于稳定。

如图4所示绿狐尾藻分解过程释放的氮以有机氮为主, 在第 2 h 时有机氮占总氮 94.7%, 氨氮和硝氮分别占总氮的 2.3% 和 3%。随着时间变化硝氮占总氮比例逐渐降低到 0.8%, 而氨氮占总氮比

例逐渐升高到 33.5%, 有机氮比例下降到 65.7%。绿狐尾藻分解释放磷以无机磷为主, 在第 2 h 时无机磷占总磷的 88%, 有机磷只占 12%; 而到第 4 d 时无机磷的比例下降到 66%, 有机磷上升到 34%; 第 8~16 d 时无机磷逐渐上升到 89%, 有机磷则降低到 11%; 第 24 d 时无机磷下降至 61%, 有机磷上升到 39%; 第 32~60 d 无机磷稳定在 21%。

如图5所示水中 DOC 浓度在第 0~8 d 快速上升到最大值 $264 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 而到第 8~16 d 快速下降, 第 16~60 d 缓慢降低, 在第 60 d 时 DOC 浓度为 $33.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。前期大量可溶性有机物淋溶造成 DOC 浓度的快速增加, 随后微生物利用水中易分解的有机物, DOC 的浓度逐渐降低。

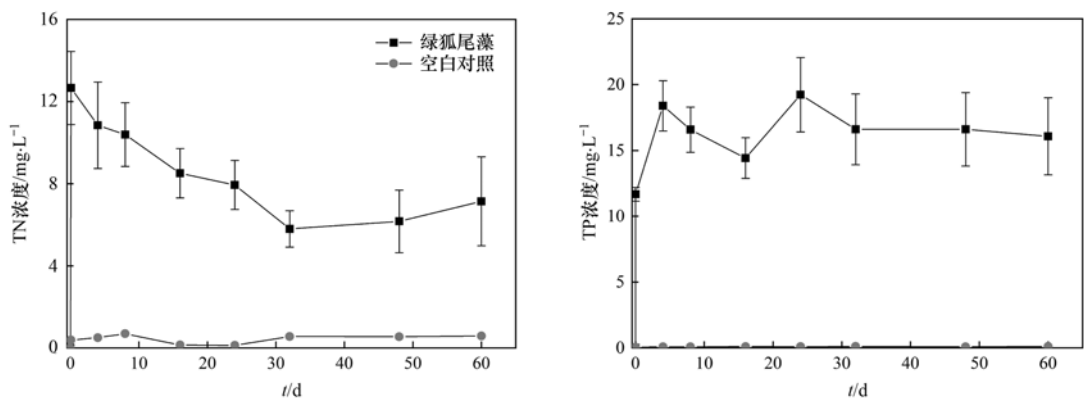


图3 绿狐尾藻分解过程水中 TN 和 TP 的浓度

Fig. 3 TN and TP concentrations in the water during the decomposition of *Myriophyllum aquaticum*

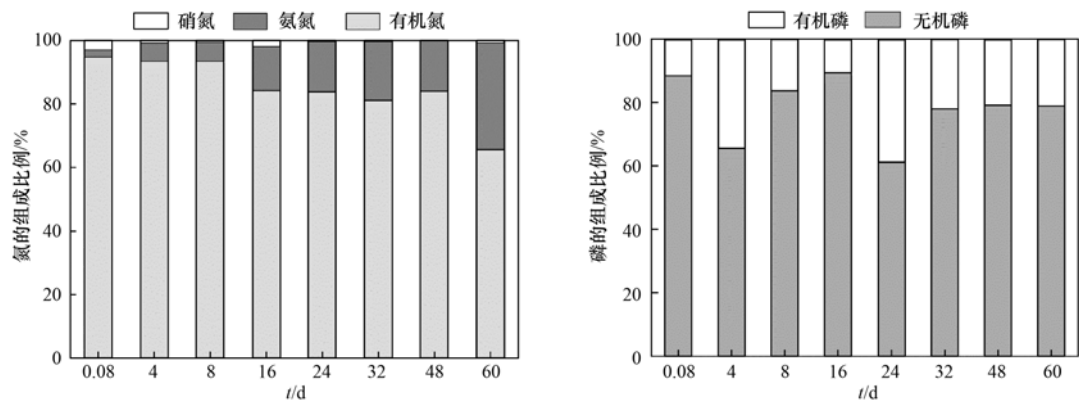


图4 各形态氮磷的组成比例

Fig. 4 Composition ratio of nitrogen and phosphorus in various forms

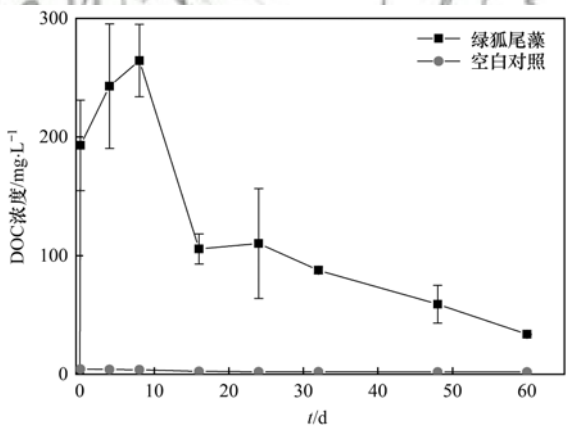


图5 绿狐尾藻分解过程中 DOC 浓度

Fig. 5 DOC concentration in the water during the decomposition process of *Myriophyllum aquaticum*

2.4 绿狐尾藻氮磷含量变化特征

如图6所示在第0~2 h 绿狐尾藻体内总氮含量从28.3 mg·g⁻¹下降到24.3 mg·g⁻¹；2 h~60 d 绿狐尾藻体内总氮含量逐渐上升，在60 d 达到60.5 mg·g⁻¹，绿狐尾藻体内氮累积释放量在第0~2 h 快速上升，从0 mg·g⁻¹上升到9.32 mg·g⁻¹；第2 h~32 d 逐渐降低，从9.32 mg·g⁻¹下降到5.12 mg·g⁻¹，而在第32~48 d 累积释放量逐渐上升，从5.12 mg·g⁻¹上升到6.83 mg·g⁻¹；第48~60 d

累积释放量又开始下降到5.20 mg·g⁻¹。在第32~48 d 绿狐尾藻体内氮的含量增高而累积释放量也增高，则表明虽然植物体内氮的含量增加，但是随着干物质被分解，一部分的含氮有机物也会随之释放到水中。如图6所示第0~2 h 绿狐尾藻体内磷含量快速下降，从6.09 mg·g⁻¹下降到2.94 mg·g⁻¹；而第2 h~60 d 绿狐尾藻体内磷含量无显著性差异($P>0.05$)，表明绿狐尾藻磷含量趋于不变。第2 h~60 d 绿狐尾藻释放磷量缓慢升高，从3.79 mg·g⁻¹上升到4.97 mg·g⁻¹。绿狐尾藻体内氮的含量增加，而累积释放量在减小，则说明绿狐尾藻在分解过程中植物向外界吸收了一部分的氮。

3 讨论

3.1 绿狐尾藻分解过程和体内氮磷含量的变化

绿狐尾藻前期(0~4 d)质量损失较快，干物质损失达到30%，中后期(4~60 d)损失速率减慢，损失量仅为31%。一般认为湿地植物在水体分解经历3个过程^[18~20]：前期植物体内糖类、有机酸、蛋白质和易溶性无机盐等水溶性物质的淋溶释放，植物质量损失速度最快；中期微生物对部分难溶但易

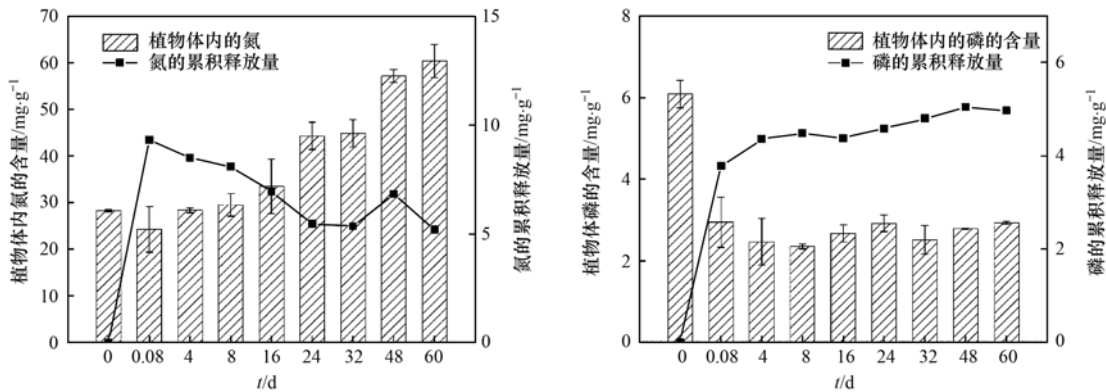


图6 绿狐尾藻体内N、P的含量

Fig. 6 Contents of N and P in *Myriophyllum aquaticum*

分解的有机物开始分解,植物质量损失速度变缓;后期植物体内木质素、纤维素等难分解物质的分解,分解速率较慢.本研究中绿狐尾藻实验初期水体中pH值迅速降低,是由于体内分解释放出大量的有机酸和氨基酸等酸性物质,同时这些易分解的有机物质分解消耗水体中的溶解氧,水体溶解氧浓度很快降到零.在实验中后期,植物腐解过程释放的有机酸类物质逐渐被分解,同时释放速率也逐渐减弱,pH值上升,消耗氧气量降低,但水体溶解氧并没有上升,表明绿狐尾藻分解是耗氧过程,会造成水体溶解氧持续降低. Wu等^[8]的研究水葫芦、软水草、香蒲3种湿地植物的分解在初期阶段会显著降低水体pH值和溶解氧含量,也发现随着分解时间的延长,水体pH值会逐渐恢复到初始状态,但水体溶解氧一直处于较低水平.说明湿地植物在分解过程中会对水环境造成较大影响.

本研究计算的绿狐尾藻在池塘水中的一级分解速率常数为 0.0142 d^{-1} ,低于绿狐尾藻在底泥-水系统的分解速率常数 0.0370 d^{-1} ^[21]和 0.0288 d^{-1} ^[22].底泥-水系统中初始微生物的种类和数量相对较多,可提高绿狐尾藻的分解速率.对比绿狐尾藻与其他植物的分解速率常数发现,绿狐尾藻的一级分解速率常数处于中间位置(表1).从表1可知,相同环境条件不同植物具有不同的分解速率常数,这与植物自身物理化学性质有关,如体内易分解与难分解物质的比例不同.相同的植物在不同环境中的分解速率也差异较大.比如, Luai等^[15]将穗花狐尾藻(*Myriophyllum spicatum*)和菱角(*Trapa natans*)放在相隔100 m的原生和非原生的两处湿地进行50 d分解实验,得出差异显著的分解速率,推测微生物种类等环境条件导致分解速率不同.杨继松等^[23]研究的植物分解速率常数较低,原因是微生物在低温($1.6\sim 1.9^{\circ}\text{C}$)环境下活性不高,导致分解速率相对较低. Gessner等^[24]研究的芦苇分解

速率常数明显比曹培培等^[22]的芦苇分解速率常数要低,主要是因为 Gessner 等的实验位于温度较低的地区.可见温度对植物分解有着重要的影响.此外,水流等作用也会对植物的分解速率有影响,陈志刚等^[7]得到的菹草分解速率常数 0.0280 d^{-1} 比曹培培等^[22]的分解速率常数 0.0245 d^{-1} 要高,因为前者将分解袋悬挂在湖泊中,湖泊的水流动性相对室内较大,对植物残体有一定的冲刷作用加快植物的分解速率.因此,植物种类、实验条件和微生物的种类等都会导致植物分解速率的差异性.

随着分解时间的增加,绿狐尾藻体内磷含量先迅速降低随后保持不变,而氮含量一直增加. Chimney等^[28]发现随着分解时间增加,香蒲、水葫芦、水生菜等湿地植物体内的总氮含量逐渐升高,磷快速降低趋于稳定,并猜测植物附着微生物对氮磷的吸收和合成.杨继松等^[23]也发现随分解时间增加植物枯落物中氮含量增加,并认为微生物摄入外界易利用的氮源来维持自身活性实现对氮的固定.目前植物分解过程体内的氮含量增加的原因有以下3种主要的猜测^[6, 23, 28]:一是植物体内非氮化合物比含氮化合物分解速率快;二是附着分解微生物迅速繁殖,生物量增加;三是微生物对氮素的固定化作用,如固氮作用.随着分解时间增加,绿狐尾藻干物质质量逐渐减少,氮的累积释放量并没有增加,说明绿狐尾藻体内氮含量增加主要的原因并不是非氮化合物比含氮化合物分解得快,而可能与微生物的作用有关.微生物作用过程和机制需要进一步地研究.

3.2 绿狐尾藻分解过程中氮磷的释放特征及其对水环境的影响

本研究绿狐尾藻分解过程水中总氮和总磷的浓度在初期迅速增加,主要原因是前期绿狐尾藻中的可溶性有机物和无机物在淋溶作用下快速溶解于水中,较短时间(0~8 d)向水中释放大量的有机氮和

表 1 分解速率常数统计¹⁾
Table 1 Decomposition rate constant statistics

名称	k/d^{-1}	$t_{50\%}/d$	实验条件	文献
绿狐尾藻(<i>Myriophyllum aquaticum</i>)	0.014 2	48. 8	室内	本研究
狐尾藻(<i>Myriophyllum verticillatum</i>)	0.037 0	18. 7	室内加入沉积物	[21]
狐尾藻(<i>Myriophyllum verticillatum</i>)	0.028 8	24. 1	室内加入沉积物	[22]
穗花狐尾藻(<i>Myriophyllum spicatum</i>)	0.051	13. 6	室外湿地	[15]
穗花狐尾藻(<i>Myriophyllum spicatum</i>)	0.081	8. 5	室外湿地	[15]
菹草(<i>Potamogeton crispus</i>)	0.028 0	24. 8	室外湖泊	[7]
菹草(<i>Potamogeton crispus</i>)	0.024 5	28. 3	室内加入沉积物	[22]
菹草(<i>Potamogeton crispus</i>)	0.064 5	10. 7	室内加入沉积物充氧	[25]
芦苇(<i>Phragmites australis</i>)	0.004 8	144. 4	室外空气中	[26]
芦苇(<i>Phragmites australis</i>)	0.011 2	61. 9	室内加入沉积物	[22]
芦苇(<i>Phragmites australis</i>)	0.005 3	130. 8	室外常年低温	[24]
互花米草(<i>Spartina alterniflora</i>)	0.004 0	173. 3	室外空气中	[26]
海三棱藨草(<i>Scirpus mariqueter</i>)	0.007 0	99. 0	室外空气中	[26]
茭草(<i>Zizania latifolia</i>)	0.030 5	22. 7	室内加入沉积物	[22]
莲(<i>Nelumbo nucifera</i>)	0.028 0	24. 8	室内加入沉积物	[22]
荇菜(<i>Nymphoides peltatum</i>)	0.044 6	15. 5	室内加入沉积物	[22]
篳齿眼子菜(<i>Potamogeton pectinatus</i>)	0.036 7	18. 9	室内加入沉积物充氧	[25]
水稻(<i>Oryza sativa</i>)	0.010 8	64. 2	室外水田	[27]
菖蒲(<i>Acorus calamus</i>)	0.009 8	70. 7	室外水田	[27]
菱角(<i>Trapa quadrispinosa</i>)	0.013 2	52. 5	室外水田	[27]
漂筏苔草(<i>Carex pseudocuraica</i>)	0.000 9	733	室外常年低温	[23]
毛果苔草(<i>Carex lasiocarpa</i>)	0.000 7	990	室外常年低温	[23]
黑藻(<i>Hydrilla verticillata</i>)	0.016 8	41. 3	室内加入沉积物	[6]

1) 文献[15]穗花狐尾藻为同一实验不同场地分解

无机磷. 有研究表明, 水生植物经自然腐烂分解后, 所含氮和磷的 70% 以上会在短期内被释放进入水体, 参与水体的营养再循环^[6]. 而在中后期氮磷出现不同的变化规律, 总氮逐渐降低而后略有增加, 总磷浓度波动逐渐稳定. 到中期(8 ~ 32 d)氮经微生物利用和硝化反硝化作用导致总氮浓度下降; 后期(32 ~ 60 d)绿狐尾藻植株进一步分解, 氮从植物体中释放到水中, 而体系一直处于厌氧状态, 水体中有机碳含量降低到较低水平, 厌氧微生物对氮转化的速率受到限制, 造成水中总氮浓度又开始上升. 这一变化趋势与唐金燕等^[29]关于水生植物腐烂分解对水质的影响中植物释放到水中氮的变化趋势相同. 水体中磷一般不会经过微生物过程变为气体从体系逃逸. 水中磷浓度的波动性可能与微生物生长时被利用及其死亡时又释放回水中有关^[30].

绿狐尾藻分解过程释放氮形态主要以有机氮为主. 水中氨氮的浓度则一直保持上升的趋势, 与张菊等^[31]研究菹草和金鱼藻在 10℃ 分解的趋势一致. 氨氮因为缺氧无法进行硝化作用, 而氨基酸的分解也会释放氨氮, 导致氨氮保持持续上升的趋势. 硝氮在水中的浓度慢慢降低最后稳定在较低的水平, 这一结果与张菊研究菹草和金鱼藻分解的趋

势相似. 硝氮在前期也是通过淋溶作用而释放到水中, 而在中后期缺氧的情况下硝化反应被抑制, 硝氮浓度一直处于较低水平^[32]. 绿狐尾藻分解过程释放总磷形态主要以无机磷为主, 占总磷的 61% ~ 88%, 而有机磷仅占总磷的 12% ~ 39%. 侯雪薇等^[25]认为前期磷的快速释放是因为植物组织中磷主要以易分解的磷酸根离子的形式存在. 在绿狐尾藻分解过程中无机磷的释放主要靠前期的淋溶作用, 而后期磷的释放量较少, 而无机磷的波动性变化主要是由于微生物作用, 微生物在生长代谢过程中会吸收一部分的磷用于合成自身结构, 从而将无机磷转化为有机磷. 而当微生物死亡有机磷又被分解成无机磷; 到后期微生物的种类和数量稳定后, 磷的形态也随之稳定^[33].

氮的累积释放量在中后期呈负增长的变化趋势, 这导致氮的污染集中在前期, 而中后期污染会慢慢减轻; 而磷的累积释放量逐渐增加趋于稳定, 说明磷对水体的污染是持续的. 由绿狐尾藻 60 d 的分解实验可知, 湿地植物在枯萎时期会向水体释放大量的碳、氮、磷等元素, 因此为了防止绿狐尾藻残体分解污染水体, 应在其枯萎前对其进行收割, 并及时移除其残体. 优化植物的收割管理措施可有效提高人工湿地对污水的处理效率, 维持人工湿地

的长期运行.

4 结论

(1)绿狐尾藻前期损失较快,到后期分解速率较慢.一级动力学分解速率常数为 0.0142 d^{-1} ,分解 50% 的干物质需 48.8 d.

(2)绿狐尾藻分解过程水体 pH 值在前期快速下降,后期有所回升.水中 DO 浓度前期快速下降,分解体系一直处于厌氧状态,绿狐尾藻分解过程中总氮浓度先升高再降低,总磷浓度则是前期迅速增加而后趋于稳定;水体氮磷分别以有机氮和无机磷形态为主.绿狐尾藻腐烂分解过程会严重影响水环境.

(3)应该及时收割并移除人工湿地的绿狐尾藻,降低其二次污染风险,提高人工湿地对污水的处理效率.

参考文献:

- [1] Kadlec R H, Wallace S D. Treatment wetlands (2nd ed.) [M]. Boca Raton, FL: CRC Press, 2008. 3-5.
- [2] Vymazal J. Removal of nutrients in various types of constructed wetlands[J]. Science of the Total Environment, 2007, **380**(1-3): 48-65.
- [3] 刘锋, 罗沛, 刘新亮, 等. 绿狐尾藻生态湿地处理污染水体的研究评述[J]. 农业现代化研究, 2018, **39**(6): 1020-1029.
- [4] Liu F, Luo P, Liu X L, et al. Research advances of *Myriophyllum* spp.-based wetland for wastewater treatment and resource utilization[J]. Research of Agricultural modernization, 2018, **39**(6): 1020-1029.
- [5] Serna A, Richards J H, Scinto L J. Plant decomposition in wetlands: effects of hydrologic variation in a re-created everglades [J]. Journal of Environmental Quality, 2013, **42**(2): 562-572.
- [6] Cheesman A W, Turner B L, Inglett P W, et al. Phosphorus transformations during decomposition of wetland macrophytes[J]. Environmental Science & Technology, 2010, **44**(24): 9265-9271.
- [7] 叶春, 王博, 李春华, 等. 沉水植物黑藻腐解过程中营养盐释放过程[J]. 中国环境科学, 2014, **34**(10): 2653-2659.
- [8] Ye C, Wang B, Li C H, et al. Nutrient release process during decomposition of submerged macrophytes (*Hydrilla verticillata* Royle) [J]. China Environmental Science, 2014, **34**(10): 2653-2659.
- [9] 潘慧云, 徐小花, 高士祥. 沉水植物衰亡过程中营养盐的释放过程及规律[J]. 环境科学研究, 2008, **21**(1): 64-68.
- [10] Pan H Y, Xu X H, Gao S X. Study on process of nutrition release during the decay of submerged macrophytes[J]. Research of Environmental Sciences, 2008, **21**(1): 64-68.
- [11] Overbeek C C, van der Geest H G, van Loon E E, et al. Decomposition of aquatic pioneer vegetation in newly constructed wetlands[J]. Ecological Engineering, 2018, **114**: 154-161.
- [12] Liu F, Zhang S N, Luo P, et al. Purification and reuse of non-point source wastewater via *Myriophyllum*-based integrative biotechnology: a review [J]. Bioresource Technology, 2018, **248**: 3-11.
- [13] Luo P, Liu F, Zhang S N, et al. Nitrogen removal and recovery from lagoon-pretreated swine wastewater by constructed wetlands under sustainable plant harvesting management[J]. Bioresource Technology, 2018, **258**: 247-254.
- [14] 易文利, 王圣瑞, 杨苏文, 等. 有机质腐解对穗花狐尾藻生长及磷积累的影响[J]. 生态环境学报, 2011, **20**(5): 940-945.
- [15] Yi W L, Wang S R, Yang S W, et al. Effects of organic matter decomposition on the growth and phosphorus accumulation of *Myriophyllum spicatum* [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2011, **20**(5): 940-945.
- [16] 武海涛, 吕宪国, 杨青. 分解袋法在湿地枯落物分解研究中存在的问题与对策[J]. 东北林业大学学报, 2007, **35**(2): 82-85.
- [17] Wu H T, Lü X G, Yang Q. Existing problems and countermeasures of litter bag technique applied to emergent macrophyte litter decomposition in wetland [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2007, **35**(2): 82-85.
- [18] Luai V B, Ding S B, 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**: 1529-1536.
- [19] 王迪, 李红芳, 刘锋, 等. 亚热带农区生态沟渠对农业径流中氮素迁移拦截效应研究[J]. 环境科学, 2016, **37**(5): 1717-1723.
- [20] Wang D, Li H F, Liu F, et al. Interception effect of ecological ditch on nitrogen transport in agricultural runoff in subtropical China[J]. Environmental Science, 2016, **37**(5): 1717-1723.
- [21] 张树楠, 肖润林, 刘锋, 等. 生态沟渠对氮、磷污染物的拦截效应[J]. 环境科学, 2015, **36**(12): 4516-4522.
- [22] Zhang S N, Xiao R L, Liu F, et al. Interception effect of vegetated drainage ditch on nitrogen and phosphorus from drainage ditches [J]. Environmental Science, 2015, **36**(12): 4516-4522.
- [23] Brodersen K E, Koren K, MoBhammer M, et al. Seagrass-mediated phosphorus and iron solubilization in tropical sediments [J]. Environmental Science & Technology, 2017, **51**(24): 14155-14163.
- [24] 武海涛, 吕宪国, 杨青, 等. 三江平原典型湿地枯落物早期分解过程及影响因素[J]. 生态学报, 2007, **27**(10): 4027-4035.
- [25] Wu H T, Lü X G, Yang Q, et al. The early-stage litter decomposition and its influencing factors in the wetland of the Sanjiang Plain, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, **27**(10): 4027-4035.
- [26] Shilla D, Asaeda T, Fujino T, et al. Decomposition of dominant submerged macrophytes: implications for nutrient release in Myall Lake, NSW, Australia[J]. Wetlands Ecology and Management, 2006, **14**(5): 427-433.

- [21] 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.
- [22] 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.
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.
- [23] 杨继松, 刘景双, 于君宝, 等. 三江平原沼泽地枯落物分解及其营养动态[J]. *生态学报*, 2006, **26**(5): 1297-1302.
Yang J S, Liu J S, Yu J B, *et al.* Decomposition and nutrient dynamics of marsh litter in the Sanjiang Plain, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, **26**(5): 1297-1302.
- [24] Gessner M O. Breakdown and nutrient dynamics of submerged *Phragmites* shoots in the littoral zone of a temperate hardwater lake [J]. *Aquatic Botany*, 2000, **66**(1): 9-20.
- [25] 侯雪薇, 张桂斋, 李静, 等. 两种沉水植物分解过程及温度影响的模拟研究[J]. *山东大学学报(理学版)*, 2015, **50**(11): 23-31.
Hou X W, Zhang G Z, Li J, *et al.* Decomposition processes and simulation of two species of submerged plants under different temperatures [J]. *Journal of Shandong University (Natural Science)*, 2015, **50**(11): 23-31.
- [26] 邵学新, 梁新强, 吴明, 等. 杭州湾潮滩湿地植物不同分解过程及其磷素动态[J]. *环境科学*, 2014, **35**(9): 3381-3388.
Shao X X, Liang X Q, Wu M, *et al.* Decomposition and phosphorus dynamics of the litters in standing and litterbag of the Hangzhou Bay coastal wetland [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(9): 3381-3388.
- [27] 黄耀, 沈雨, 周密, 等. 木质素和氮含量对植物残体分解的影响[J]. *植物生态学报*, 2003, **27**(2): 183-188.
Huang Y, Shen Y, Zhou M, *et al.* Decomposition of plant residue as influenced by its lignin and n itrogen [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2003, **27**(2): 183-188.
- [28] Chimney M J, Pietro K C. Decomposition of macrophyte litter in a subtropical constructed wetland in south Florida (USA) [J]. *Ecological Engineering*, 2006, **27**(4): 301-321.
- [29] 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.
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.
- [30] Duan H, Wang L, Zhang Y N, *et al.* Variable decomposition of two plant litters and their effects on the carbon sequestration ability of wetland soil in the Yangtze River estuary [J]. *Geoderma*, 2018, **319**: 230-238.
- [31] 张菊, 邓焕广, 王东启, 等. 徒骇河沉水植物腐烂对上覆水体中营养盐形态变化影响[J]. *环境科学与技术*, 2011, **34**(5): 14-19.
Zhang J, Deng H G, Wang D Q, *et al.* Impact of decomposition of submerged macrophytes on nutrient speciation concentration in overlying water of Tuhai River [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **34**(5): 14-19.
- [32] 谢宝东, 方升佐, 蔡山丁, 等. 四种生物覆盖植物的自然分解及养分释放动态[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2009, **33**(5): 12-16.
Xie B D, Fang S Z, Qi S D, *et al.* Decomposition and nutrient release of four mulching plants in the upland area of Guizhou Province [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition)*, 2009, **33**(5): 12-16.
- [33] 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.
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.

CONTENTS

Health Benefit Evaluation for Air Pollution Prevention and Control Action Plan in China	WU Wei-ling, XUE Wen-bo, WANG Yan-li, <i>et al.</i> (2961)
Scenario Simulation Study Constrained by the Ambient Air Quality Standards in Nanjing	XIE Fang-jian, SHI Zhi-hao, LI Jing-yi, <i>et al.</i> (2967)
Characteristics and Source Analysis of Water-Soluble Ions in PM _{2.5} in Zhengzhou	YANG Liu-ming, WANG Shen-bo, HAO Qi, <i>et al.</i> (2977)
Relationship Between Atmospheric Visibility and PM _{2.5} Concentrations and Distributions	WANG Ji-kang, ZHANG Heng-de, GUI Hai-lin, <i>et al.</i> (2985)
Characteristics of VOCs Emitted from the Rubber Tire Manufacturing Industry Based on the Inverse-Dispersion Calculation Method	BAI Hong-xiang, WEI Wei, WANG Ya-ting, <i>et al.</i> (2994)
Stable Carbon Isotope Compositions and Source Apportionments of Volatile Aromatic Compounds in the Urban Atmosphere of Taiyuan, China	LI Ying-hui, YAN Yu-long, LI Zhi-sheng, <i>et al.</i> (3001)
Spectral Distribution and Pollution Characteristics of Polybrominated Diphenyl Ethers in the Air of an Office Building Clustered Area	WANG Lin, DENG Ya-jia, LIAO Xiao-yong, <i>et al.</i> (3008)
Characterizing Chromophoric Dissolved Organic Matter in Key Lakes in the Middle Reaches of the East Route of the South-North Water Diversion Project	ZHANG Liu-qing, PENG Kai, ZHOU Lei, <i>et al.</i> (3018)
Characteristics of Hydrogen and Oxygen Isotopes in Different Water Bodies in Hilly and Gully Regions of the Loess Plateau	ZHANG He-hui-zi, YU Kun-xia, LI Zhan-bin, <i>et al.</i> (3030)
Analysis of Total Organic Carbon Source Differences Between New and Old Cascade Reservoirs using Carbon and Nitrogen Isotopes	WANG Cong-feng, HU Zi-long, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (3039)
Pollution Sources and the Stratification Effects on Water Quality in Lijiahe Reservoir	XU Jin, HUANG Ting-lin, LI Kai, <i>et al.</i> (3049)
Distribution and Potential Risk of Organochlorine Pesticides in the Soil of a Submerged Area Around Miyun Reservoir	WANG Xia, ZHANG Qing-zhuo, ZHAO Gao-feng, <i>et al.</i> (3058)
Distribution, Sources, and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Waters of the Yinchuan Wetlands	TIAN Da-nian, DANG Li-hui, DING Run-mei, <i>et al.</i> (3068)
Comparison of the Geochemical Characteristics of Karst Springs of a Vertically Zoned Climate Region under Human Activity: A Case of Shuifang Spring and Bitan Spring in the Jinfo Mountain Area, Chongqing	XIE Guo-wen, YANG Ping-heng, SHENG Ting, <i>et al.</i> (3078)
Groundwater Chemical Characteristics and Analysis of Their Controlling Factors in an Alluvial Fan of Jianjiang River	TANG Jin-ping, ZHANG Qiang, HU Yang, <i>et al.</i> (3089)
Dynamics of Epilithic Algae Communities and Their Relationship with Environmental Factors During Storage and Non-storage Periods in the Three Gorges Reservoir	FU Jun-ke, LIU Li, HE Xin-yu, <i>et al.</i> (3099)
Influence of Rainfall on the <i>in situ</i> Growth of Dominant Algae Species in Xiangxi River	WENG Chuan-song, LIU De-fu, ZHANG Jia-lei, <i>et al.</i> (3108)
Decomposition of <i>Myriophyllum aquaticum</i> and the Associated Release of Nitrogen and Phosphorus	TONG Xiong, LUO Pei, LIU Feng, <i>et al.</i> (3118)
Optimization of the Parameters for Microalgae Immobilization and Analysis of Its Recovery Potential for Ammonia Nitrogen in Wastewater	LIU Xiang, WANG Jing-yao, WU Juan-juan, <i>et al.</i> (3126)
Ammonium Adsorption Characteristics in Aqueous Solution by Titanate Nanotubes	ZHANG Zheng, FENG Chang-sheng, ZHANG Xiao-nui, <i>et al.</i> (3135)
Application of Fenton-like Photocatalysts Based on Defect Reconstruction in Degradation of Dye Wastewater	TANG Qing-wen, AN Xiao-qiang, LAN Hua-chun, <i>et al.</i> (3146)
Degradation of RBK5 with Peroxymonosulfate Efficiently Activated by N-Doped Graphene	YU Yong-bo, HUANG Wan, DONG Zheng-yu, <i>et al.</i> (3154)
Effect of Cu ²⁺ on Denitrification Using NO ₂ ⁻ as an Electron Acceptor	MAI Wen-ke, PENG Yong-zhen, JI Jian-tao (3162)
Start-up and Performance Optimization of a CANON Pilot Reactor	SUN Qing-hua, WU Di, ZHOU Jia-zhong, <i>et al.</i> (3169)
Effects of Aerobic Carbon Sources on Biofilm with Simultaneous Phosphate Removal and Enrichment	XU Lin-jian, PAN Yang, ZHANG Hao, <i>et al.</i> (3179)
Effect of Organic Characteristics on Sludge Settability in an AAO System	LIU Xiao-bo, YUAN Lin-jiang, CHEN Xi, <i>et al.</i> (3186)
Effect of Free Nitrous Acid on the Activity of Nitrifying Bacteria in Different Sludge Concentrations Under Anoxic Conditions	LÜ Xin-tao, ZHOU Tong, TIAN Xia-di, <i>et al.</i> (3195)
Stability of ZVI-dependent Autotrophic Denitrification by ANAMMOX Bacteria	ZHANG Wen-jing, HUANG Yong, BI Zhen, <i>et al.</i> (3201)
Effect of On-line NaClO Backwashing on Microbial Communities in an Inverted A ² O-MBR System	WANG Xu-dong, GAO Miao, WANG Ying-ying, <i>et al.</i> (3208)
Evaluation of Organic Matter Release and Economy for Various Pretreatments of Sewage Sludge	YUAN Yue, TAN Xue-jun, ZHENG She-yu (3216)
Model-based Optimization for the Coordinated Supply of Clear and Reclaimed Water in the Central Districts of Beijing, China	ZHANG Tian-yuan, TAN Qian, WANG Shu-ping (3223)
Occurrence and Removal of N-nitrosamines in the Wastewater Treatment Plants Using Different Treatment Processes	LIU Wang-rong, ZHAO Jiang-liang, YANG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (3233)
Occurrence of Tramadol and Fentanyl Use in Domestic Wastewater in Beijing	ZHOU Zi-lei, DU Peng, BAI Ya, <i>et al.</i> (3242)
Pollution Level and Ecological Risk of Typical Antibiotics in Guiyang Wastewater Treatment Plants	YANG Zhao, LI Jiang, ZHANG Sheng-hu, <i>et al.</i> (3249)
Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Various Livestock Feedlot Soils of the Hilly Purple Soil Region	CHENG Jian-hua, TANG Xiang-yu, LIU Chen (3257)
Effects of Tetracycline on Microbial Communities and Antibiotic Resistance Genes of Vermicompost from Dewatered Sludge	CHEN Jing-yang, XIA Hui, HUANG Kui, <i>et al.</i> (3263)
Fate of Antibiotic Resistance Genes and Virulence Genes in Enterococci During Anaerobic Digestion Process of Thermal Hydrolyzed Sludge	LI Hui-li, PEI Yuan-mei, LI Shan, <i>et al.</i> (3270)
Effect of Co-composting of Chicken Manure with Chinese Medicinal Herbal Residues on Antibiotic Resistance Genes	WU Jin-ping, CHEN Jian-wen, LIU Yong, <i>et al.</i> (3276)
Spatio-temporal Patterns of Microbial Communities and Their Driving Mechanisms in Subalpine Lakes, Ningwu, Shanxi	WANG Xue, LIU Jin-xian, CHAI Bao-feng, <i>et al.</i> (3285)
Community Structure Characteristics of <i>nirS</i> Denitrifying Bacteria of Spring Typical Parkland Waterbodies in Shijiazhuang City	ZHANG Yi-ran, LI Zai-xing, SUN Yue, <i>et al.</i> (3295)
Differential Responses of Rhizospheric <i>nirK</i> - and <i>nirS</i> -type Denitrifier Communities to Different Phosphorus Levels in Paddy Soil	ZHAN Yu, GAO Dan-dan, SHENG Rong, <i>et al.</i> (3304)
Comparison of Soil Bacterial Community Structure Between Paddy Fields and Dry Land in the Huixian Karst Wetland, China	JIA Yuan-hang, JIN Zhen-jiang, YUAN Wu, <i>et al.</i> (3313)
Cd Balance Analysis of a Typical Rice Paddy System in Central Hunan	JIANG Kai, DENG Xiao, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (3324)
Effects of an Amendment on Cadmium Transportation in the Rhizosphere Soil-Rice System	LI Yi-chun, WANG Yan-hong, TANG Ming-deng, <i>et al.</i> (3331)
Isolation of Heavy Metal Immobilizing and Plant Growth-Promoting Bacteria and Its Effects on Reducing Heavy Metal Accumulation in Wheat	HAN Hui, WANG Xiao-yu, CAI Hong, <i>et al.</i> (3339)
Differences in the Cadmium-Enrichment Capacity and Subcellular Distribution and Chemical Form of Cadmium in Different Varieties of Pepper	PENG Qiu, LI Tao, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (3347)
Effect of Phosphorus Addition on N ₂ O Emissions from Rice-Rapeseed Rotation Soils	SUN Zheng, SU Rong-lin, XU Peng, <i>et al.</i> (3355)
Impact of Land Use Type on the Stability and Organic Carbon Content of Soil Aggregates in the Weibei Dryland	LIU Jie, MA Yan-ting, WANG Xian-ling, <i>et al.</i> (3361)
Vertical Distribution Characteristics of PAHs in Soils with Different Land Use Types During Rapid Urbanization	LU Yin-tao, XIANG Xin-xin, ZHANG Shi-chao, <i>et al.</i> (3369)
Pollution Levels, Sources, and Spatial Distribution of Phthalate Esters in Soils of the West Lake Scenic Area	LIAO Jian, DENG Chao, CHEN Yi, <i>et al.</i> (3378)
Impact of Biochar on Soil Bulk Density and Aggregates of Lou Soil	LI Qian-qian, XU Chen-yang, GENG Zeng-chao, <i>et al.</i> (3388)