

## 4种水生植物腐解对人工湿地净化水西河的影响

马明海<sup>1</sup>, 罗毅<sup>1</sup>, 陈然<sup>1,2</sup>, 陶春军<sup>3</sup>, 徐圣友<sup>1</sup>, 钱丽萍<sup>1</sup>

(1. 黄山学院生命与环境科学学院, 安徽 黄山 245041;  
2. 河海大学环境学院, 江苏 南京 210024;  
3. 安徽省地质调查院, 安徽 合肥 230001)

**摘要:** 为探究水生植物腐解对人工湿地持续净化效率的影响, 通过56 d烧杯试验, 考察了水西湿地浮叶植物(睡莲)、挺水植物(芦苇、梭鱼草)和沉水植物(狐尾藻)残体对湿地净化微污染水西河的影响。结果表明: 空白对照组水质变化较小, 试验组4种水生植物的快速腐解发生在3 d左右, 9 d后缓慢趋于平稳; 56 d pH由(7.86±0.01)降至(7.00±0.05), 溶解氧(DO)降幅为(1.41±0.75) mg/L, 且降幅次序为浮叶植物>挺水植物>沉水植物。当腐解时间为3 d时, 水体高锰酸盐指数(COD<sub>Mn</sub>)、总氮(TN)和总磷(TP)浓度分别增加了(8.31±2.87)、(2.12±1.41)和(0.67±0.24) mg/L, 且睡莲>芦苇、梭鱼草>狐尾藻; 同时, pH和DO分别下降了(0.88±0.23)和(3.84±1.85) mg/L; 高生物量密度植物的腐解易加剧水质恶化( $p<0.05$ ), 且恢复水质所需时间较长。相比第56 d收割, 第3 d收割可使得水体COD<sub>Mn</sub>、TN和TP消减量最高分别提升(4.93±0.63)、(1.53±1.49)和(0.69±0.04) mg/L。

**关键词:** 湿地植物; 腐解; 微污染水西河; 新安江; 刈割

中图分类号: X522

文献标志码: A

DOI: 10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.2022020008

## Effects of four hydrophytes during their decomposition on purification of Shuixi River in constructed wetland

MA Minghai<sup>1</sup>, LUO Yi<sup>1</sup>, CHEN Ran<sup>1,2</sup>, TAO Chunjun<sup>3</sup>, XU Shengyou<sup>1</sup>, QIAN Liping<sup>1</sup>

(1. School of Life and Environmental Science, Huangshan University, Huangshan 245041, China; 2. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210024, China; 3. Geological Survey of Anhui Province, Hefei 230001, China)

**Abstract:** In order to explore the effect of the aquatic plant decomposition on the continuous purification efficiency of the constructed wetland, the effects of floating leaf plants (water lily), emergent plants (reed, barracuda grass) and submerged plants (foxtail algae) on the purification of the micro polluted Shuixi River in Shuixi wetland were investigated through 56 day Jar tests. The results showed that the water quality of the blank control group changed little, and the rapid decomposition of four aquatic plants in the test group occurred in ~3 days and gradually stabilized after 9 days. During 56 days, the pH value decreased from (7.86±0.01) to (7.00 ± 0.05), and the decline of DO was (1.41 ± 0.75) mg/L, and the order of decline was floating leaf plants > emergent plants > submerged plants. When the decomposition time was 3 days, the concentrations of TN, TP and COD<sub>Mn</sub> increased by (2.12 ± 1.41) mg/L, (0.67 ± 0.24) mg/L and (8.31 ± 2.87) mg/L respectively, and water lily > reed, barracuda > foxtail algae. In addition, pH and DO decreased by (0.88 ± 0.23) and (3.84 ± 1.85) mg/L respectively. The decomposition of plants with a high biomass density was easy to aggravate the deterioration of water quality ( $p < 0.05$ ) with a long time to restore the water quality. Compared with harvest on the 56th day, the maximum reduction of COD<sub>Mn</sub>, TN and TP could increase by (4.93 ± 0.63) mg/L, (1.53 ± 1.49) mg/L and (0.69 ± 0.04) mg/L respectively with the condition of harvest on the 3rd day.

**Keywords:** wetland plants; decomposition; micro polluted Shuixi River; Xinan River; cutting

CLC number: X522

水生植物是人工湿地必需元素之一<sup>[1]</sup>, 兼具景观生态效果和净污功能, 可通过多种途径消减污染物<sup>[2]</sup>。随季节水文变化, 湿地水生植物呈现出“生

长-衰败-再生长”的周期性生长规律, 生长至一定阶段即进入衰败期<sup>[3-4]</sup>。此时, 植物会腐烂分解, 并向水中释放碳、氮和磷等物质, 从而引起水体“二次污

收稿日期: 2022-02-09

基金项目: 安徽省自然科学研究重点项目(KJ2020A0690, KJ2019ZD42); 黄山学院人才启动项目(2019xkj007, 2020xkj010)

作者简介: 马明海(1981-), 男, 博士、副教授。研究方向: 水环境治理与修复。E-mail: minghai-ma@163.com

引用格式: 马明海, 罗毅, 陈然, 等. 4种水生植物腐解对人工湿地净化水西河的影响[J]. 环境保护科学, 2022, 48(6): 116-120.

染”<sup>[5-6]</sup>。有研究<sup>[7]</sup>指出,植物种类是影响植物腐解过程水质的重要因素。而且,不同水生植物呈现出了不同的腐解规律。武闯等<sup>[8]</sup>通过实验发现,金鱼藻腐解时,总氮(TN)含量在4 h时就达到峰值。卢少勇等<sup>[9]</sup>采用静态浸泡试验表明,芦苇中化学需氧量(COD)、TN和总磷(TP)的快速释放发生在腐解最初的24 h内,换水有利于促进污染物的释放。赵媛媛等<sup>[10]</sup>研究指出,南荻腐解过程中,COD和TP浓度均在腐解第5 d时急速上升至最高值。

水西河流经东临溪镇部分农田、村庄和黄山学院后进入新安江3大支流之一的率水,担负着净化微污染水西河的最后—道责任<sup>[11]</sup>,确保其流入率水的出水水质达到《地表水环境质量标准》Ⅲ类标准,以满足水源地取水要求。随着新安江流域生态补偿机制的深入推进,对上游水生态环境质量提出了更高要求,如何精准控污、强化湿地管理,确保水质安全,显得尤为重要<sup>[12-14]</sup>。掌握湿地不同类型水生植物腐解规律是制定湿地精细化管理方案、确保出水水质达标的基础和前提。

本研究以水西湿地广布的浮叶植物(睡莲)、挺水植物(芦苇、梭鱼草)和沉水植物(狐尾藻)为研究对象,考察室内模拟条件下,不同类型及不同生物量水生植物腐解的差异性及其对水西湿地净化微污染水西河的影响,为人工湿地水生植物差异化、精细化管理,确保新安江二级支流(水西河)出水稳定达标提供基础数据和参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 水生植物的预处理

芦苇、梭鱼草、睡莲和狐尾藻均采集自水西湿地,用去离子水清洗掉茎叶表面杂质,将洗净后的4种水生植物放置于60℃烘箱中烘干至恒重,再将烘干后的植物残体剪为1 cm左右的碎片,混合均匀后置于密封袋中备用<sup>[15]</sup>。

### 1.2 实验方法

室温下,将一定质量水生植物残体分别置于4 L的烧杯中配置成0.1、0.2和0.4 g/L浓度梯度的试验组进行腐解试验,空白对照组不放置任何植物。试验用水取自水西河汇入湿地处,其水质pH、溶解氧(DO)、高锰酸盐指数(COD<sub>Mn</sub>)、TN和TP含量分别为(7.86±0.01)、(8.48±0.02)、(10.30±0.10)、(1.23±0.04)和(0.38±0.06) mg/L,除pH和

DO外,COD<sub>Mn</sub>、TN和TP浓度表明,水西河处于Ⅳ~Ⅴ类水。分别于第0、1、3、6、9、13、17、21、27、34、41、48和56 d进行水质指标监测,pH和DO分别采用PHB-4型酸度计、HQ30D型溶解氧仪测定;COD<sub>Mn</sub>、TN和TP的测定方法参考《水和废水分析方法》(第四版)。保持每次在同一位置取样,取样后及时补充去离子水以保证水位恒定,观察并记录各组内植物腐解状态。

### 1.3 数据分析

图表绘制采用Origin 9.1,采用SPSS 20.0进行相关性分析和差异显著性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 水生植物腐解对pH的影响

4种水生植物腐解过程中水体pH的变化情况,见图1。

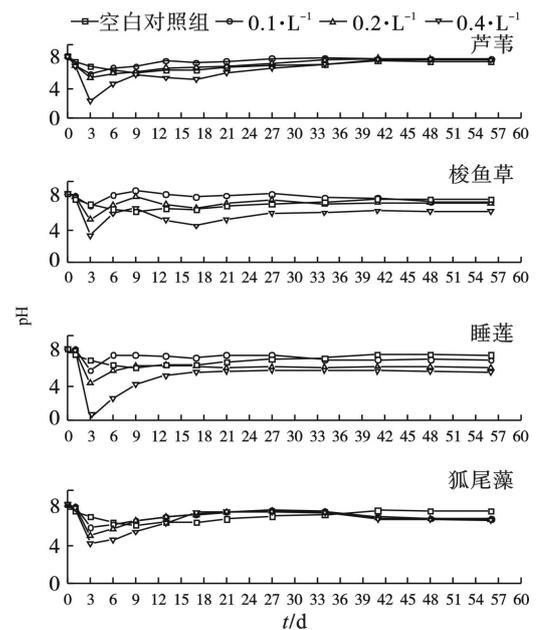


图1 水生植物腐解对pH的影响

试验组水体pH呈现“快速降低-缓慢上升-趋于平缓”的趋势,前3 d降幅大小为睡莲(1.10±0.31)>芦苇(0.88±0.19)>梭鱼草(0.79±0.16)>狐尾藻(0.74±0.17),56 d时pH由初始弱碱性(7.86±0.01)降至中性(7.00±0.05),均符合地表水6~9的pH标准。空白对照组的pH值在6.72~7.86之间,试验过程中无明显变化。试验初期pH降低可能存在以下2个因素,一是植物本身已经死亡导致其不能继续进行光合作用,进而使水中CO<sub>2</sub>含量增大;二是试验前期,4种植物腐解的

速率均较高,随着水中 DO 的降低,释放部分有机酸进入水体<sup>[9]</sup>。随后 pH 上升的原因可能是释放到水体的有机物逐渐减少,植物腐解速率也在不断下降,同时微生物进行反硝化反应会使水体的 pH 逐渐升高;此外,水体 pH 的变化还可能与水中碳酸、碳酸盐含量及藻类代谢活动有关。试验过程中,低密度植物的水体 pH 值始终高于高密度植物,其中,0.1 g/L 睡莲 pH 较 0.4 g/L 睡莲高(0.29±0.26),与武闯等<sup>[8]</sup>得出的金鱼藻腐解时 pH 值变化规律较一致。

## 2.2 水生植物腐解对 DO 的影响

4 种水生植物腐解过程中 DO 的变化情况,见图 2。

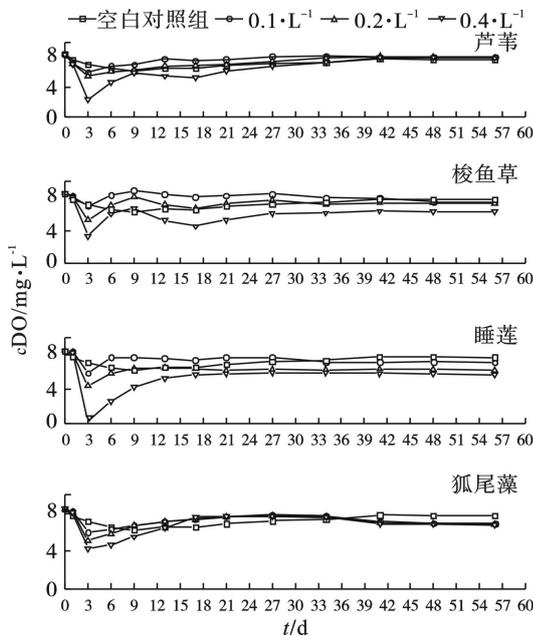


图 2 水生植物腐解对 DO 的影响

图 2 可知,试验组水体 DO 呈现出了 pH 类似的变化趋势,前 3 d 降幅为睡莲(4.93±2.88) mg/L>芦苇(3.80±1.99) mg/L>狐尾藻(3.32±0.87) mg/L>梭鱼草(3.29±1.81) mg/L。其中,0.4 g/L 睡莲腐解 3 d 时,水体 DO 最低为 0.33 mg/L。9 d 后,DO 缓慢趋于平稳,至 56 d 时,DO 降幅为睡莲(2.12±0.71) mg/L>狐尾藻(1.61±0.07) mg/L>梭鱼草(1.45±0.63) mg/L>芦苇(0.45±0.08) mg/L,但都满足地表水 II 类以上水质要求。空白对照组 DO 的低值出现相比试验组滞后 6 d,均在 6 mg/L 以上,这可能与微生物呼吸及水温变化有关<sup>[16]</sup>。在腐解前期,一方面破碎后的植物残体平铺在烧杯内水体表面,一定程度上阻碍大气向水中扩散充氧,且试

验用水由水西河现场转移至室内烧杯后,水体流动性急剧降低,导致水体自我复氧能力减弱;另一方面,4 种植物腐解前期释放出的碳、氮等水溶性物质,增强了微生物的呼吸代谢作用,促进了氧的消耗。到了腐解后期,植物残体不断向杯底沉降,此时残体腐解速率也减缓,水体复氧能力不断恢复,水中 DO 浓度逐渐升高。因此,需合理管控湿地中植物残体量,避免因植物腐解造成水体缺氧而导致水质进一步恶化。

## 2.3 水生植物腐解对 COD<sub>Mn</sub> 的影响

4 种水生植物腐解过程中水体 COD<sub>Mn</sub> 的变化情况,见图 3。

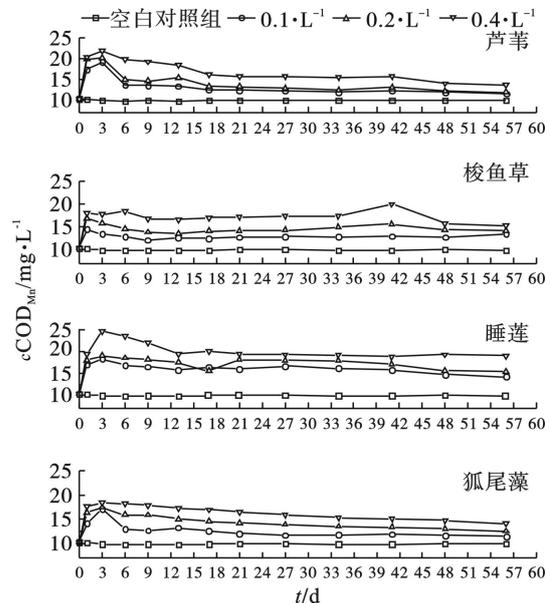


图 3 水生植物腐解对 COD<sub>Mn</sub> 的影响

图 3 可知,试验组水体 COD<sub>Mn</sub> 呈现先快速升高后缓慢降低并趋于平稳的特征,第 3 d 时 COD<sub>Mn</sub> 浓度最高,其顺序为睡莲(20.75±3.53) mg/L>芦苇(20.37±1.36) mg/L>狐尾藻(17.66±0.70) mg/L>梭鱼草(15.66±2.16) mg/L。高溶解氧水平下,微生物呼吸使得空白对照组 COD<sub>Mn</sub> 浓度由(10.30±0.10) mg/L 降为(9.91±0.12) mg/L,在无新碳源输入的情况下,原水中微生物的呼吸作用亦受阻,使得水体 COD<sub>Mn</sub> 整体降幅较小。朱辉翔等<sup>[17]</sup>研究发现,狐尾藻的碳释放速率快于梭鱼草。同时,随着生物量密度提高至 4 倍,睡莲中碳的释放量增幅最大为 6.63 mg/L。生物量密度越大,对水质的影响越大,影响时间越久<sup>[4]</sup>。

试验中植株已经死亡,系统主要发生溶解释放作用,吸附沉淀络合作用及原水中微生物呼吸作用

不可忽略。试验前期以淋溶过程为主,可溶性的有机组分和无机成分则通过无降水和浸水损失<sup>[18]</sup>。该过程持续时间短,一般为几天到几周。刘白贵等<sup>[19]</sup>研究发现,分解至第6天时,植物残体内的无机物质通过淋溶作用几乎全部进入水体。此外,试验初期较高的DO浓度可增强好氧菌活力,促进碳、氮的释放<sup>[20]</sup>。试验后期水体中的有机物部分被微生物吸收分解,使得 $COD_{Mn}$ 缓慢下降。

## 2.4 水生植物腐解对TN的影响

4种水生植物腐解过程中水体TN的变化情况,见图4。

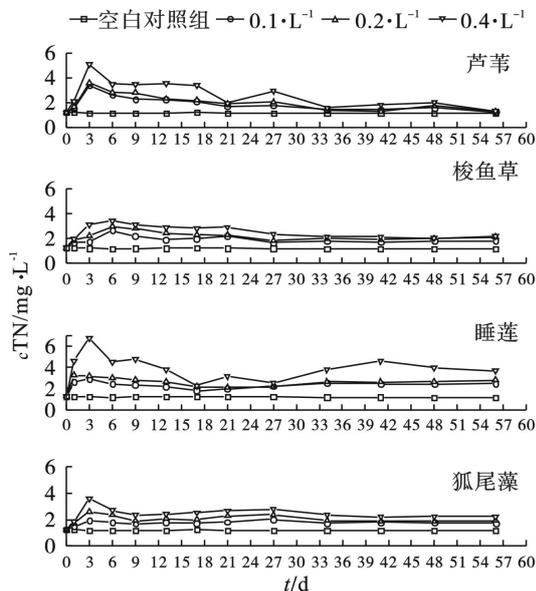


图4 水生植物腐解对TN的影响

图4可知,空白对照组TN含量由 $(1.23 \pm 0.04)$ 降为 $(1.17 \pm 0.06)$ mg/L,试验组水体TN呈现出 $COD_{Mn}$ 类似的释放规律,第3天时TN浓度最高,分别为睡莲 $(4.29 \pm 2.17)$  mg/L>芦苇 $(4.05 \pm 0.94)$  mg/L>狐尾藻 $(2.71 \pm 0.84)$  mg/L>梭鱼草 $(2.34 \pm 0.69)$  mg/L。相同条件下,睡莲吸收的氮约为芦苇的1.2倍<sup>[21]</sup>。唐金艳<sup>[22]</sup>也发现,具有较高氮含量的浮叶植物的分解速率要快于氮含量偏低得挺水植物。且腐解时间相同时,同种植物生物量密度越大,氮释放量越大。

淋溶阶段中,植物中溶解态氮会快速溶出。李文朝等<sup>[23]</sup>研究提出,植物中氮的70%会快速进入水体,30%则进入沉积物;而且腐解过程中植物释放的氮以溶解态氮为主,占TN的一半以上<sup>[24]</sup>。同时,前期生物量密度较大时易造成水体缺氧而向水体中释放一定量的氮<sup>[25]</sup>,因此试验前期水体中氮浓

度大幅上升,且在试验第3天达到峰值。腐解后期,植物体内含有的木质素、纤维素等难溶物质会被缓慢分解<sup>[26]</sup>;同时植物腐解释放的有机物能够为微生物的反硝化作用提供一定碳源,有利于增强微生物的脱氮作用<sup>[27]</sup>。腐解第3天时收割4种水生植物,可转移出水体的氮含量分别为睡莲 $(3.06 \pm 2.17)$  mg/L>芦苇 $(2.82 \pm 0.94)$  mg/L>狐尾藻 $(1.48 \pm 0.84)$  mg/L>梭鱼草 $(1.11 \pm 0.69)$  mg/L,这是减轻水体氮平衡的主要措施之一<sup>[28]</sup>。

## 2.5 水生植物腐解对TP的影响

4种水生植物腐解过程中水体TP的变化情况,见图5。

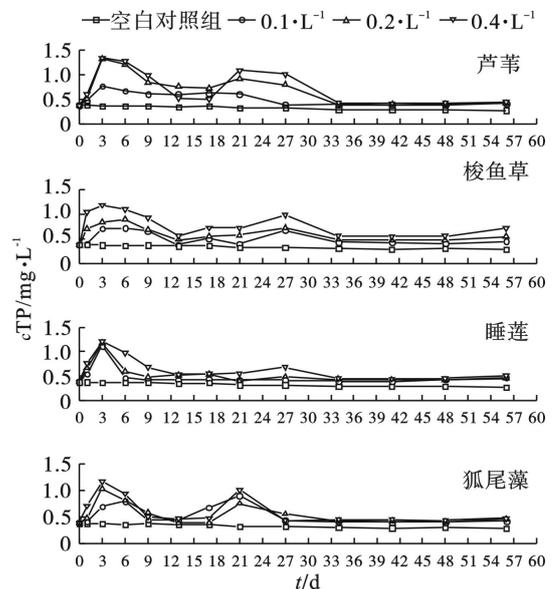


图5 水生植物腐解对TP的影响

相比较空白对照组TP略有降低,试验组水体TP表现出了先升高后降低的规律,第3天时TP浓度最高,增幅分别为浮叶植物 $(0.79 \pm 0.04)$  mg/L>挺水植物 $(0.65 \pm 0.29)$  mg/L>沉水植物 $(0.59 \pm 0.25)$  mg/L,这是因为浮叶植物和挺水植物腐解过程中磷的释放速率高于沉水植物<sup>[16]</sup>;相同条件下,睡莲吸收的磷约为芦苇的2.4倍<sup>[21]</sup>。而且,随着生物量密度提高至4倍,3类植物中磷的释放量增幅为挺水植物 $(0.28 \pm 0.21)$  mg/L>浮叶植物 $(0.16 \pm 0.14)$  mg/L>沉水植物 $(0.12 \pm 0.17)$  mg/L。腐解56d后,水体TP由V类水降为劣V类,水生植物一旦枯萎应及时收割。第3d收割比第56d收割,可以使得水体中TP消减量分别提高 $(0.69 \pm 0.04)$  mg/L(浮叶植物)、 $(0.53 \pm 0.30)$  mg/L(挺水植物)和 $(0.52 \pm 0.22)$  mg/L(沉水植物);同时, $COD_{Mn}$ 和TN消减量最高

分别增加 (4.93±0.63) mg/L(沉水植物)和 (1.53±1.49) mg/L(挺水植物)。

植物体内的磷主要以磷酸根和化合态存在,在淋溶状态下很容易造成流失<sup>[29]</sup>。试验初期 TP 上升是因为睡莲中有较多易腐解的海绵组织等物质,而磷主要存在于这些物质中,在试验前期最先被释放出来。随后 DO 的减少会抑制植物中磷的释放,导致水体磷浓度有所降低;同时,在缺少底泥吸附的情况下,沉淀就成了湿地植物除磷的主要途径<sup>[30]</sup>。

### 3 结论

(1)4 种水生植物均呈现“快速腐解-缓慢趋平”的腐解特征,快速腐解发生在 3 d 左右,9 d 后缓慢趋于平稳。56 d 模拟实验过程中,pH 由初始时的弱碱性降至结束时的中性,DO 由(8.48±0.02)降为(7.07±0.75) mg/L,且降幅顺序为浮叶植物>挺水植物>沉水植物。

(2)腐解 3 d 时,水体 COD<sub>Mn</sub>、TN 和 TP 浓度分别增加了(8.31±2.87)、(2.12±1.41)和(0.67±0.24) mg/L,且睡莲>芦苇>狐尾藻>梭鱼草,可使水西河水质由地表水Ⅳ~Ⅴ类快速恶化至劣Ⅴ类。该 4 种湿地植物可在腐解 3 d 内进行收割为适,相比第 56 天收割,可以使得水体 COD<sub>Mn</sub>、TN 和 TP 消减量最高分别提升(4.93±0.63)、(1.53±1.49)和(0.69±0.04) mg/L。

(3)同种水生植物,生物量密度越高,腐解量越大,越容易加剧水质恶化,恢复水质所需时间越长。相比较挺水植物(芦苇和梭鱼草)、沉水植物(狐尾藻),浮叶植物(睡莲)的腐解过程对水质的影响更大。

### 参考文献

[1] VYMAZAL J. Plants in constructed, restored and created wetlands[J]. *Ecological Engineering*, 2013(61): 501 - 504.  
 [2] ZHANG H, TANG W Z, WANG W D, et al. A review on China's constructed wetlands in recent three decades: Application and practice[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2021, 104(6): 53 - 68.  
 [3] 史宪惠. 人工湿地常见水生植物腐解污染释放性能及机理研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2021.  
 [4] 汤楠. 洞庭湖芦苇腐解过程对周边水体水质影响的研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2020.  
 [5] 汤志凯, 张毅敏, 杨飞, 等. 3 种水生植物腐解过程中磷营养物质迁移、转化过程研究[J]. *环境科学学报*, 2019, 39(3): 716 - 721.

[6] WU S Q, HE S B, ZHOU W L, 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.  
 [7] 王薇. 充气复氧对不同水生植物腐解过程水质效应的比较研究[D]. 南京: 南京大学, 2017.  
 [8] 武闯, 张劲, 聂梓源, 等. 不同密度金鱼藻自然腐解时的水体氮素响应[J]. *环境科学与技术*, 2019, 42(8): 13 - 19.  
 [9] 卢少勇, 张彭义, 余刚, 等. 茭草、芦苇与水葫芦的污染物释放规律[J]. *中国环境科学*, 2005, 25(5): 554 - 557.  
 [10] 赵媛媛, 汤楠, 李智慧, 等. 洞庭湖南荻(*Triarrhena lutarioriparia*)腐解对水质的影响[J]. *湖泊科学*, 2021, 33(4): 1188 - 1195.  
 [11] 马明海, 刘岚英, 赵莎莎, 等. 石菖蒲净化微污染水体中氮和磷的试验研究[J]. *安徽农业科学*, 2020, 48(14): 39 - 41.  
 [12] 徐立文. 人工湿地建得好还要管得好[N]. *中国环境报*, 2021-04-28(003).  
 [13] 白彬彬, 王军辉, 吕京京. 人工湿地全生命周期管理策略[J]. *湿地科学与管理*, 2019, 15(2): 70 - 73.  
 [14] 俞新慧, 吴晓东, 葛绪广, 等. 收割强度对粉绿狐尾藻生长和水质的影响[J]. *水生态学杂志*, 2022, 43(1): 95 - 102.  
 [15] 马廷婷, 熊丽黎, 张大文, 等. 淹水条件下鄱阳湖 3 种湿地植物腐烂分解及其对水质的影响[J]. *湖泊科学*, 2021, 33(5): 1 - 13.  
 [16] 周林飞, 赵言稳, 芦晓峰. 不同生活型植物腐解过程对人工湿地水质的影响研究[J]. *生态环境学报*, 2016, 25(4): 664 - 670.  
 [17] 朱翔辉, 张树楠, 彭英湘, 等. 不同固体碳源释碳特征及其对反硝化脱氮效果研究[J]. *农业现代化研究*, 2021, 42(2): 206 - 214.  
 [18] FACELLI J M, PICKETT S T A. Plant litter: Its dynamics and effects on plant community structure[J]. *Botanical Review*, 1991, 57(1): 1 - 32.  
 [19] 刘白贵, 仝川, 罗榕婷. 闽江河口湿地 3 种主要植物冬春季枯落物分解特征[J]. *福建师范大学学报(自然科学版)*, 2008, 4(2): 80 - 85.  
 [20] 张智, 刘亚丽, 龙腾锐, 等. 重庆双龙湖水草对营养盐的吸附与释放试验研究[J]. *资源环境与工程*, 2005, 19(4): 305 - 310.  
 [21] 洪瑜, 王英, 王芳, 等. 不同水生植物组合对稻田退水的氮磷净化效果[J]. *环境科学与技术*, 2020, 43(3): 110 - 115.  
 [22] 唐金艳. 水生植物腐烂分解对水质的影响[D]. 南京: 南京大学, 2013.  
 [23] 李文朝, 陈开宁, 吴庆龙, 等. 东太湖水生植物生物物质腐烂分解实验[J]. *湖泊科学*, 2001(4): 331 - 336.  
 [24] 刘煜. 三峡库区消落带典型植物淹水后氮磷释放特征及影响因素研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2019.  
 [25] 李静, 尹澄清, 王为东, 等. 表流湿地冬季运行效果及植物腐烂影响的初步研究[J]. *农业环境科学学报*, 2008, 27(4): 1482 - 1488.  
 [26] 赵言稳. 石佛寺人工湿地水生植物调查及其腐解过程对水质的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2016.  
 [27] 吕丽萍. 挺水植物残体分解对冷季型植物浮床氮去除的影响及调控[D]. 南京: 南京大学, 2019.  
 [28] 方源, 谢培, 谭林, 等. 生境对挺水植物生长的影响及其反馈作用机制综述[J]. *生态学杂志*, 2021, 40(8): 2610 - 2619.  
 [29] 胡红伟, 刘盼, 吴俊峰, 等. 五种挺水植物腐解过程及其对湿地水质的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(10): 2395 - 2402.  
 [30] 叶磊, 李希, 田日昌, 等. 不同植物组合人工湿地中磷去向特征研究[J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39(10): 2409 - 2419.