

湿地植物固体碳源养分释放动态及其对人工湿地水体脱氮效率的影响*

谭佩阳^{1,2}, 侯志勇^{1**}, 谢永宏¹, 李峰¹, 杨扬³, 陈薇³, 李阳³

(1: 中国科学院亚热带农业生态研究所农业生态过程重点实验室, 中国科学院洞庭湖湿地生态系统观测研究站, 长沙 410125)

(2: 中国科学院大学, 北京 100049)

(3: 湖南农业大学园艺学院, 长沙 410128)

摘要: 污水低碳氮比(C/N)是影响人工湿地氮去除效果限制因素, 传统的碳源添加及利用存在成本较高、补充困难的局限性。本研究契合“就地取材, 原位处理”的废物利用原则, 选择人工湿地常见的水生植物和农业废弃物(玉米芯、稻草)作为对照, 对比了挺水植物(香蒲、美人蕉)、浮叶植物(莲)、沉水植物(菹草)、湿生植物(南荻、短尖苔草)的释碳能力, 初步确定了以香蒲、美人蕉、南荻为代表的植物具有较好的释放碳能力, 在中国湿地中分布广泛, 且均对水体二次污染较小。以南荻、美人蕉、玉米芯作为碳源添加的模拟人工湿地实验验证表明, 在低碳氮比的模拟表流人工湿地投入植物碳源, 能有效提高系统的脱氮效率, 对照组、南荻组、美人蕉组和玉米芯组的出水总氮浓度分别为(5.24±0.07)、(4.50±0.10)、(3.75±0.17)和(2.97±0.18)mg/L, 对应的去除率分别为58%、64%、70%和76%, 确定南荻和美人蕉植物残体以及改性材料均残体和改性材料适合作为人工湿地中原位利用的外加碳源。本研究探索了通过湿地植物配置解决人工湿地水体低C/N比的问题, 为提高湿地脱氮效果提供了有意义的新途径。

关键词: 人工湿地; 碳源利用; 湿地植物; 污水脱氮

Dynamics of nutrient release from solid carbon sources of wetland plants and its effect on the efficiency of nitrogen removal from artificial wetland water bodies*

Tan Peiyang^{1,2}, Hou Zhiyong^{1**}, Xie Yonghong¹, Li Feng¹, Yang Yang³, Chen Wei³ & Li Yang³

(1: Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Chinese Academy of Sciences, Dongting Lake Station for Wetland Ecosystem Research, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, P. R. China)

(2: University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P.R.China)

(3: College of Horticulture, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, P.R.China)

Abstract: The low carbon to nitrogen ratio (C/N) of wastewater is a limiting factor of nitrogen removal in artificial wetlands, and traditional carbon sources are costly and difficult to replenish. This study, taking aquatic plants and agricultural wastes (corn cobs and rice straw) which commonly exist in artificial wetlands as a reference, compared the carbon release capacity of water-supporting plants (*Typha orientalis* and *Canna indica*), floating-leaf plants (*Nelumbo nucifera*), submerged plants (*Potamogeton crispus*), and wet plants (*Triarrhena lutarioriparia* and *Carex brevicuspis*). The results show that the plants, such as *Typha orientalis*, *Canna indica* and *Triarrhena lutarioriparia*, which widely distribute in wetlands of China, have high carbon release capacities and have less secondary pollution to water bodies. The experiments of artificial wetlands added with *Triarrhena lutarioriparia*, *Typha*

* 2021-12-14 收稿; 2022-01-17 收修改稿。

国家自然科学基金项目(41601106)、湖南省自然基金项目(2017JJ3374)、湖南省-国家自然科学基金委区域创新发展联合基金项目(U19A2051)、中国科学院青年创新促进会优秀会员项目(Y201861)、湖南省重点研发计划课题(2022NK2059)和湖南省高新技术产业科技创新引领计划课题(2020SK2019)联合资助。

** 通信作者; E-mail: hzy2005@isa.ac.cn.

orientalis and corn cob as carbon source explored that addition of plant carbon source in the surface flow of artificial wetlands with low C/N ratio could effectively improve the denitrification efficiency of the system. Total nitrogen concentration of the control group, *Triarrhena lutarioriparia* group, *Typha orientalis* group and corn cob group were (5.24±0.07), (4.50±0.10), (3.75±0.17) and (2.97±0.18) mg/L, respectively. Correspondingly, the removal rates account for 58%, 64%, 70% and 76%, respectively. It is confirmed that plant residues and modified materials of *Triarrhena lutarioriparia* and *Canna indica* were appropriate as an *in-situ* source of additional carbon in artificial wetlands. Exploring the low C/N ratio in artificial wetlands through wetland plant configuration would provide a new way to improve wetland denitrification.

Keywords: Artificial wetland; carbon source utilization; wetland plant; wastewater denitrification

水体富营养化是我国目前所面临的水体污染领域常见问题之一^[1]。研究发现,造成水体富营养化的原因之一是含氮物质的过量排放^[2]。2020年中国生态环境状态公告显示湖泊(水库)重要渔业水域主要超标指标为总氮,且总氮比2019年有所上升。同时,水体中较高的氮浓度也会危害人们的健康,因此对于污染水体进行有效脱氮处理、改善水体水质成为了迫切需求。

人工湿地因其在含氮废水的治理上有着投资低、运行费用少、耗能低等独特的优势而被广泛应用^[3-5]。但人工湿地所承接的污水主要为污水处理厂处理后的尾水,其碳浓度较低,使人工湿地普遍面临进水中C/N较低的问题。低C/N会对湿地系统中的异养反硝化过程产生阻碍,从而限制湿地对水体中氮的去除效果^[6-7]。因此,外部碳源的投加是强化湿地水体脱氮有效的途径。

甲醇、乙醇、乙酸和糖类等小分子有机物在污水处理中应用较为常见,但需通过持续添加来维持其持续供碳能力,运行和管理成本较高^[8]。固体碳源中,聚己酸内酯(PCL)、聚乳酸(PLA)等人工聚合物因成本高,难以实现广泛应用^[9-10]。近年来,农业废弃物以其成本低廉、分布广泛、易于取材、符合资源循环利用的优势,成为了碳源添加材料研究领域的热门,比如稻草、稻壳、花生壳、秸秆、玉米芯、木屑和棉花等^[11-13]。人工湿地生态系统中配置的湿地植物普遍具有丰富的木质素和纤维素,有作为外加碳源的潜力^[14],湿地植物由于周期性生长,生长到一定阶段会进入枯死期,枯死后植物腐烂分解释放的有机物能够为反硝化作用提供一定的碳源。因此,可利用湿地植物作为外加碳源解决湿地污水脱氮问题,其不但契合“就地取材,原位处理”的废物利用原则,同时节省了大量处理调亡水生植物的运输、掩埋等费用,体现了“原位处理”的高效性和经济性,与农业废弃物相比更有优势。但目前有关湿地植物的释碳特性以及湿地植物的反硝化脱氮效果的研究还有待完善,且大部分研究集中于潜流人工湿地,对表流人工湿地的研究相对较少。

本研究揭示了湿地植物作为植物碳源添加,在模拟表流人工湿地中处理模拟污水厂尾水的脱氮效果,首先分析了不同湿地植物的碳源释放动态;其次,对筛选出释碳效果较好的外加碳源湿地植物进行模拟表流人工湿地生物反硝化实验;以期通过湿地植物原位利用的方式解决人工湿地C/N较低的问题,进而以人工湿地植物配置方式解决湿地外加碳源添加,为提高湿地污水脱氮效果提供有意义的新模式。

1 材料与amp;方法

1.1 实验材料

本研究选取玉米芯及稻草秸秆2种农业废弃物和美人蕉(*Canna indica*)、南荻(*Triarrhena lutarioripari*)、香蒲(*Typha orientalis*)、莲(*Nelumbo nucifera*)、菹草(*Potamogeton crispus*)、短尖苔草(*Carex brevicuspis*)6种典型湿地植物研究其释碳能力,玉米芯和稻草秸秆都是较为成熟的植物碳源添加材料,美人蕉、南荻、香蒲、莲、菹草、短尖苔草是湿地生态系统中的常见植物,取材简单,适合原位处理。上述湿地植物碳源材料均采自中国科学院亚热带农业生态研究所洞庭湖观测研究站内人工湿地,采集时间为12月上旬,采集植物为植物地上部分,稻草秸秆与玉米芯购置附近农户,在实验室内将其切成2 cm × 2 cm的片状,洗净后在78℃烘箱中烘72 h,自然冷却混合均匀后装入样品袋置于干燥器中备用。

1.2 碳源释放实验

选取1000 mL的锥形瓶,洗净并烘干,分别称取5 g上述经过预处理的植物碳源材料加入锥形瓶,并加入1000 mL的自来水充分浸泡,最后瓶口使用带有小孔的塑料薄膜密封。水样采集前先摇晃锥形瓶使其混合均匀,取其上清液100 mL,每次水样采集完后更换自来水。实验开始后分别在第2、4、6、8、10、12和14天

开始采集各处理水样,分析各样品的总有机碳(TOC)和总氮(TN)浓度.

1.3 反硝化实验

实验采用 1 m×1 m×1 m 的水泥池作为模拟湿地. 将采集于洞庭湖湿地的土壤,经过晾晒、捣碎、去除植物根茎等前处理后装入水泥池作为湿地植物生长基质,土壤厚度约 20 cm. 每个池中种植菹草 36 株构建人工湿地植被,模拟表流人工湿地装置如图 1. 实验水泥池共 12 个,设置南荻、香蒲、玉米芯和对照(不添加碳源)共 4 个处理,每个处理重复 3 次作为平行对照. 其中,植物碳源处理的碳源添加量为 500 g/池.

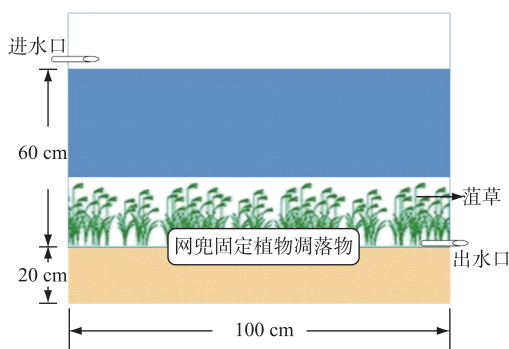


图 1 人工湿地模拟装置

Fig.1 Artificial wetland simulation device diagram

系统进水采用自配污水,主要参考《城镇污水处理厂处理排放标准》(GB 18918—2002),模拟污水处理厂的尾水. 其中碳源采用葡萄糖,氮源采用硝酸钾、氯化铵,磷源采用磷酸二氢钾. 实际配制后的污水总有机碳(TOC)、总氮(TN)、氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)、硝态氮($\text{NO}_3\text{-N}$)和总磷(TP)浓度分别为 21.5、12.5、7.2、4.0、1 mg/L. 系统添加碳源放置于水池底部厌氧区^[15],使用网兜保护,防止其扩散. 采用间歇式供水方式,每 6 天定时进水一次,日进水量为 600 L,水力停留时间(HRT)设定为 144 h. 系统自 2020 年 3 月 8 日建成后,稳定半个月后(3 月 23 日)开始本实验研究. 在水池的出水口采样,在实验运行的前两个周期每两天一次,之后每 6 天一次采集各处理水样,分析各样品的 TOC、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 TN 浓度. 本实验共运行了 5 个周期,实验截止至 4 月 27 日.

1.4 水样测定方法

水样 TN、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度均采用流动注射分析仪(FIAstar 5000 Analyzer, Foss Tecator, Denmark)测定. TOC 浓度采用岛津-有机碳分析仪(TOC-vwp)测定.

1.5 统计与分析

采用 Excel 2017 进行数据的初步处理,数据作图使用 GraphPad Prism 8,各阶段实验数据采用 IBM SPSS 21.0 统计软件进行 One-way ANOVA 方差分析,用 Duncan 法进行多个样本的平均值比较,显著性水平设为 0.05.

2 结果与分析

2.1 碳源静态释放实验结果

8 种植物碳源材料在 14 天内 TOC 的静态释放情况如图 2a 所示. 除南荻以外其他材料在实验开始 2 天内释放量最大,在 6 天内释放速率逐渐降低,6 天以后趋近于稳定. 各种植物碳源材料 6 天内的释碳能力依次为:美人蕉>玉米芯>香蒲>短尖苔草>菹草>南荻>莲>稻草,其中美人蕉的 TOC 释放最多,其释放量为 288.07 mg/L. 6 天后碳源释放稳定期间,如表 1 所示,各植物材料的碳源持续释放能力有明显的差异($P < 0.05$),释碳能力依次为:玉米芯>稻草>莲>香蒲>美人蕉>短尖苔草>菹草>南荻,其中玉米芯的持续释放能力最强,2 天释放量为 5.23 mg/L,湿地植物中持续释放能力较强的为香蒲与莲. 综合分析发现,美人蕉的释碳能力最强,但其碳源的释放主要在前期,稳定释碳能力较弱;玉米芯的释碳能力和稳定释碳能力都比

较强.

8 种植物碳源材料在 14 天内 TN 的静态释放情况如图 2b 所示. 其变化趋势与碳源释放基本相同, 植物碳源 TN 的释放能力依次为: 菹草>稻草>短尖苔草>莲>玉米芯>美人蕉>香蒲>南荻, 其中菹草的 TN 释放最多, 其释放量为 20.00 mg/L, 南荻的释放量最少, 其释放量为 1.04 mg/L. 如表 1 所示, 植物稳定释放期, 植物碳源添加的水体 TN 浓度均小于对照组 ($P<0.05$), 由此可见植物作为反硝化固体碳源添加到水体, 本身所释放的氮素污染对水体的影响主要集中在前 6 天内, 6 天后对水体的氮素污染无影响, 由此可见南荻、美人蕉和香蒲都是较为适合的碳源材料.

综合分析选取总体碳释放能力最强的美人蕉和氮素释放最少的南荻作为植物碳源添加物, 以有较好脱氮能力的玉米芯作为参照, 衡量湿地植物作为碳源添加材料的可能性.

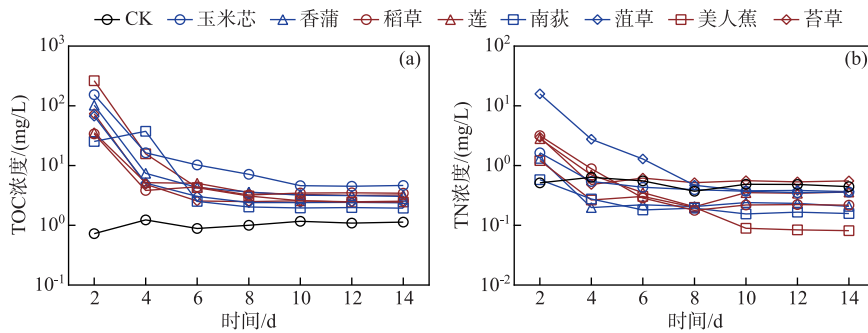


图 2 不同植物碳源 TOC(a) 和 TN(b) 静态释放曲线

Fig.2 Static release curves of TOC (a) and TN (b) from different plant carbon sources

表 1 不同植物碳源 6 天后稳定释放期 TN、TOC 和 TOC/TN 对比*

Tab.1 Comparison of TN, TOC and TOC/TN in the stable release period after 6 days for different plant carbon sources

碳源	TN/(mg/L)	TOC/(mg/L)	TOC/TN
CK	0.447±0.016 ^f	1.099±0.025 ^a	2.479±0.634 ^a
玉米芯	0.370±0.042 ^d	5.233±0.376 ^e	14.172±0.995 ^c
稻草	0.210±0.007 ^{bc}	3.415±0.058 ^d	16.513±0.660 ^c
南荻	0.169±0.009 ^b	1.977±0.033 ^b	12.156±0.810 ^{bc}
美人蕉	0.114±0.016 ^a	2.647±0.083 ^c	27.092±2.713 ^d
香蒲	0.222±0.009 ^c	3.264±0.186 ^d	15.172±1.370 ^c
莲	0.316±0.032 ^d	3.307±0.114 ^d	12.720±2.290 ^c
菹草	0.340±0.019 ^{ef}	2.409±0.019 ^e	6.138±0.732 ^{ab}
短尖苔草	0.542±0.017 ^e	2.529±0.070 ^e	4.720±0.729 ^a

* 数据为平均值±标准误; 不同字母表示各指标在 0.05 水平差异显著.

2.2 不同碳源反硝化实验结果

如图 3 所示, 3 种植物碳源的添加都提高了系统对 NO_3^- -N 的处理效果 ($P<0.05$), NO_3^- -N 基本降低为 0 mg/L, 实验组之间无显著差异, 在第 1 个周期内实验组的反硝化脱氮效果较好, 硝酸盐的去除效率均能达到 97% 以上; 从第 2 个周期开始, 出水的 NO_3^- -N 浓度随时间逐渐增加至趋于稳定, 实验组的浓度都显著低于对照组 ($P<0.05$), 其中玉米芯的反硝化脱氮效果最好, 平均去除效率为 77.58%, 南荻和美人蕉无明显差异, 分别为 61.26% 和 64.85%, 虽然南荻和美人蕉的反硝化脱氮效果不如玉米芯, 但它们的加入都能有效地提高人工湿地反硝化脱氮效果.

在第 1 个周期 (6 d) 内, 美人蕉组的 NH_3 -N 浓度显著高于对照组; 从第 2 个周期开始, NH_3 -N 浓度随时

间逐渐降低至趋于稳定,其中对照组、南荻组和美人蕉组差异不显著,其去除效率分别为 56.44%、56.58% 和 61.34%,玉米芯组的去除效果有较好的提升,其去除效率为 66.88%,南荻和美人蕉的添加对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除的提升效果不明显,但在稳定后不会对系统有负面影响;其中美人蕉在前期会出现 $\text{NH}_3\text{-N}$ 积累的情况,在应用中需要注意,控制碳源添加的量。

在第 1 个周期(6 d)内,玉米芯和南荻对系统进水 TN 处理效果较好,美人蕉的处理效果较差;从第 2 个周期开始,碳源的释放逐渐减少至趋于稳定,从 TN 的去除效率上来看,南荻、美人蕉和玉米芯都有显著的处理效果($P<0.05$),对照组、南荻组、美人蕉组和玉米芯组的出水 TN 浓度分别为 (5.24 ± 0.07) 、 (4.50 ± 0.10) 、 (3.75 ± 0.17) 和 $(2.97\pm 0.18)\text{mg/L}$,对应的去除率分别为 58%、64%、70% 和 76%,所有植物碳源添加显著提高了 TN 的去除效率($P<0.05$)。

实验组的出水 TOC 浓度均高于对照组,其中玉米芯的浓度最高,与碳源释放的结果基本一致,植物碳源的添加对出水 TOC 浓度有一定的影响,出水的碳氮比提高,可考虑作为前置池汇入未经处理的污水,对 TOC 进行二次利用。

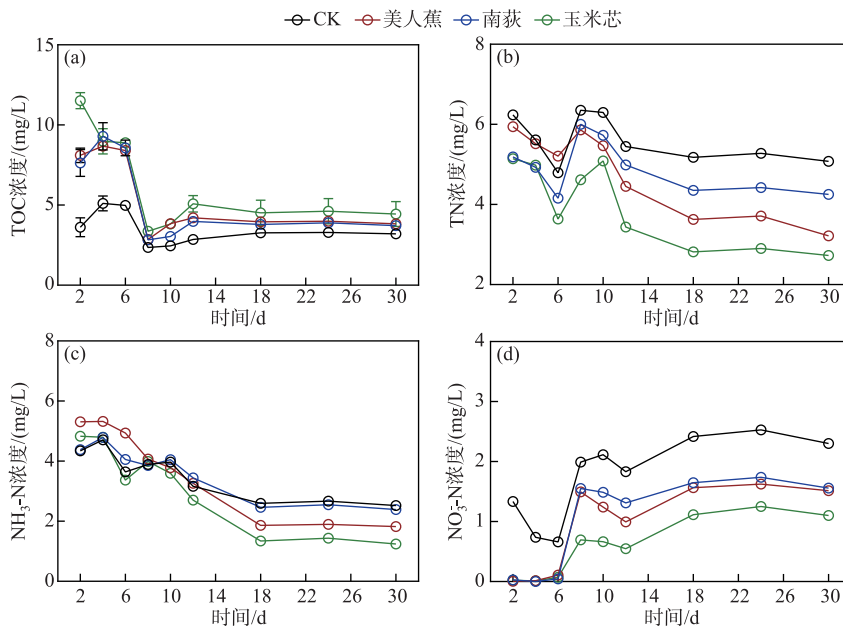


图 3 3 种植物碳源 TOC (a)、TN (b)、 $\text{NH}_3\text{-N}$ (c) 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ (d) 浓度变化特征

Fig.3 Variation characteristics of TOC (a), TN (b), $\text{NH}_3\text{-N}$ (c) and $\text{NO}_3\text{-N}$ (d) concentrations of three plant carbon sources

3 讨论

3.1 碳源静态释放特征

本研究的 8 种植物碳源释放特征与 Brodersen 等的研究基本符合^[16],主要分为 3 个过程:前期由于植物凋落物所含的糖类、有机酸、蛋白质和易溶性物质快速溶出,2 天内水体的 TOC 浓度迅速上升;中期植物凋落物所含的难溶易分解物质开始逐渐被微生物利用,2~6 天水体的 TOC 浓度呈现下降的趋势;后期植物凋落物所含的物质多为木质素、纤维素等较为难分解的物质,其水解速率受到抑制,在 6 天后水体 TOC 浓度降至最低水平并趋于平稳. 植物碳源 TN 的释放能力依次为:菹草>稻草>短尖苔草>莲>玉米芯>美人蕉>香蒲>南荻,菹草前期会释放较多的 TN,对水体的影响相对较大,需慎重考虑其原位利用的可行性. 各种植物碳源材料 6 天内的释碳能力依次为:美人蕉>玉米芯>香蒲>短尖苔草>菹草>南荻>莲叶>稻草,湿地植物中

以美人蕉、香蒲为代表的挺水植物具有相对较好的碳释能力, TN 的释放较少, 对水体产生二次污染的可能性小, 是较为适合的碳源添加材料, 南荻释碳能力相对较弱, 但在人工湿地生态系统中应用广泛, 并且其 TN 的释放显著低于其他各类植物, 出于“就地取材, 原位处理”的原则, 综合考虑其低 TN 释放特征和应用广泛性, 可以将其作为碳源添加材料。

3.2 植物碳源添加对人工湿地氮素净化的影响

玉米芯、南荻、美人蕉凋落物的添加都提高了系统对 NO_3^- -N 的处理效果 ($P < 0.05$), 在其加入的第 1 个周期, 各植物碳源释放的 TOC 剧烈, 根据植物静态释放的结果, 添加南荻、美人蕉、玉米芯所释放进入水体的 TOC 浓度分别为 10.91、47.50、30.20 mg/L, 出水 TOC 浓度比对照组仅增加了 3.43、3.60、3.92 mg/L, TOC 利用率分别为 68.56%、92.42%、87.02%, 说明各实验所释放的 TOC 为易溶性有机碳, 结合各实验组硝酸盐的去除效率均能达到 97% 以上, 比对照组均有较大幅度的提升, 这可能与反硝化细菌对可溶性有机碳的利用有关; 从第 2 个周期开始各植物碳源释放 TOC 逐渐降低, 添加南荻、美人蕉、玉米芯所释放进入水体的 TOC 浓度分别为 0.99、1.33、2.60 mg/L, 出水 TOC 浓度比对照组增加了 0.69、0.84、1.51 mg/L, TOC 利用率分别为 30.24%、37.17%、42.26%, 可以看出各系统所利用的碳源量从大到小依次为玉米芯组、美人蕉组、南荻组, 这与各组对 NO_3^- -N 的处理提升效率是吻合的, 通过 Pearson 相关系数分析, NO_3^- -N 与 TOC 之间为显著负相关 ($P < 0.05$), 进一步验证了有机碳的添加量是促进反硝化反应的关键因子, 本研究推测植物碳源的分解加剧了厌氧环境的形成以及其表面粗糙的孔隙结构都会促进系统中反硝化细菌的生长和繁殖, 进而促进反硝化作用。现有研究对玉米芯、木块、香蒲的利用同样证实了植物碳源添加可以显著提高人工湿地中 NO_3^- -N 的处理效果^[17-19]。

玉米芯、南荻、美人蕉凋落物的添加降低了水体的 NH_3 -N, 这与孙琳琳等所得到玉米芯添加会导致系统出水 NH_3 -N 升高的结果不同^[20], 这可能是由于加入的植物碳源的量与添加位置不同引起的植物碳源的添加在人工湿地底部, 且添加量较少时, 对湿地上层水体的溶解氧影响较小, 碳源的加入对硝化反应的抑制效果不明显。而魏星等发现 NO_3^- -N 作为硝化产物, 其浓度的降低会进一步的促进硝化作用, 也可以说明适当的碳源添加量可能会促进 NH_3 -N 的转化^[21], Yu 等研究使用玉米芯作为碳源添加的湿地系统同样对 NH_3 -N 转化有促进效果^[17]。由此可见, 在碳源添加过程中控制适宜的碳源添加量, 在较高浓度 NH_3 -N 水体, 不会抑制硝化反应的速率, 反之会促进 NH_3 -N 的去除。

根据上文对实验组的出水 TOC 分析, 发现出水 TOC 较高可能有两个方面的原因: 前期植物所含易溶物质迅速溶出, 水体中的 NO_3^- -N 反应完全, 过多的碳源在较少的水力停留时间内无法被利用完全; 后期由于植物碳源纤维素和半纤维素成分不断水解释放, 实验组厌氧降解释放出的不可生物降解有机物浓度高于可生物降解有机物 (部分可生物降解部分在反硝化过程中被消耗), 导致水体 TOC 较高。Paul 等研究表明木质纤维素残留物降解过程中所产生的难降解物质, 主要是由于木质素的解聚作用, 复杂的结构和高分子量阻止了难降解物质生物降解^[22], 南荻的 TOC 利用效率明显低于美人蕉, 这与南荻所含的木质素较多有关 (南荻与美人蕉的木质素含量分别为 20%、15%), 由此说明美人蕉作为碳源添加所释放的碳更利于水体反硝化过程利用。植物碳源前期快速淋溶所释放的 TOC 较后期利用效率更高, 这与范天凤等发现枸杞枝释放的 TOC 在快速释放期利用效率较高是一致的^[23], 说明利用植物碳源添加提升人工湿地脱氮效能上, 应该考虑少量多次投放, 充分利用其前期大量释放的可溶性有机碳。Wu 等研究发现分批添加香蒲对湿地系统 TN 的去除效率提升更好^[14]。

4 结论

1) 从碳源的释放实验看, 以美人蕉、香蒲、南荻为代表的挺水植物不但具有较好的释放碳能力, 氮素的释放较少, 且在湿地生态系统中广泛分布, 都可作为碳源添加材料; 以菹草为代表的沉水植物含氮量相对过高, 在投放初期会释放大量的氮素, 在原位利用时需要考虑其对水体的二次污染。

2) 对低碳氮比的模拟湿地投入植物碳源, 有效地提高了系统的脱氮效率, 对照组、南荻组、美人蕉组和玉米芯组的出水 TN 浓度分别为 (5.24 ± 0.07) 、 (4.50 ± 0.10) 、 (3.75 ± 0.17) 和 (2.97 ± 0.18) mg/L, 对应的去除率分别为 58%、64%、70% 和 76%。可见, 南荻、美人蕉等挺水植物均适合作为人工湿地中原位利用的外加

碳源.

3) 根据植物碳源前期快速淋溶期所释放的 TOC 较后期利用效率更高的特征,在人工湿地运行管理过程中应少量多次投放植物碳源,以充分利用淋溶期大量释放的可溶性有机碳提升人工湿地脱氮效能.

4) 通过筛选配置高释碳、低释氮的湿地植物,能解决人工湿地广泛存在的 C/N 较低的问题,为提高湿地污水脱氮效果提供了有意义的新途径.

5 参考文献

- [1] Yuan P, Zhu X. The current situation of water environment in Chinese freshwater lakes and its management measures. In: Chen XH, Zhang Q, Lin KR *et al* eds. Basin water cycle and water security—Proceedings of the 11th China Water Forum. Beijing: China Water & Power Press, 2013: 32-38.[袁萍,朱喜.中国淡水湖泊水环境现状及其治理对策.见:陈晓宏,张强,林凯荣等.流域水循环与水安全——第十一届中国水论坛论文集.北京:中国水利水电出版社,2013: 32-38.]
- [2] Yong Z, Yang ZF, Liu JL. Factor analysis of Beijing north ring water system eutrophication. *Journal of Applied Ecology*, 2005, **16**(8): 1513-1517.[曾勇,杨志峰,刘静玲.北京市北环水系富营养化因子分析.应用生态学报,2005, **16**(8): 1513-1517.]
- [3] Economopoulou MA, Tsihrintzis VA. Design methodology of free water surface constructed wetlands. *Water Resources Management*, 2004, **18**(6): 541-565. DOI: 10.1007/s11269-004-6480-6.
- [4] Ma YH, Zheng XY, Fang YQ *et al*. Autotrophic denitrification in constructed wetlands: Achievements and challenges. *Bioresource Technology*, 2020, **318**: 123778. DOI: 10.1016/j.biortech.2020.123778.
- [5] Kivaisi AK. The potential for constructed wetlands for wastewater treatment and reuse in developing countries: A review. *Ecological Engineering*, 2001, **16**(4): 545-560. DOI: 10.1016/S0925-8574(00)00113-0.
- [6] Zhi W, Ji GD. Quantitative response relationships between nitrogen transformation rates and nitrogen functional genes in a tidal flow constructed wetland under C/N ratio constraints. *Water Research*, 2014, **64**: 32-41. DOI: 10.1016/j.watres.2014.06.035.
- [7] Xia SQ, Li JY, Wang RC. Nitrogen removal performance and microbial community structure dynamics response to carbon nitrogen ratio in a compact suspended carrier biofilm reactor. *Ecological Engineering*, 2008, **32**(3): 256-262. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2007.11.013.
- [8] Gómez MA, González-López J, Hontoria-García E. Influence of carbon source on nitrate removal of contaminated groundwater in a denitrifying submerged filter. *Journal of Hazardous Materials*, 2000, **80**(1/2/3): 69-80. DOI: 10.1016/S0304-3894(00)00282-X.
- [9] Xiong R, Yu XX, Yu LJ *et al*. Biological denitrification using polycaprolactone-peanut shell as slow-release carbon source treating drainage of municipal WWTP. *Chemosphere*, 2019, **235**: 434-439. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2019.06.198.
- [10] Wang JL, Chu LB. Biological nitrate removal from water and wastewater by solid-phase denitrification process. *Biotechnology Advances*, 2016, **34**(6): 1103-1112. DOI: 10.1016/j.biotechadv.2016.07.001.
- [11] Shao L, Xu ZX, Jin W *et al*. Optimization of solid carbon source for denitrification of agriculture wastes. *China Environmental Science*, 2011, **31**(5): 748-754.[邵留,徐祖信,金伟等.农业废物反硝化固体碳源的优选.中国环境科学2011, **31**(5): 748-754.]
- [12] Ling Y, Yan GK, Wang HY *et al*. Release mechanisms of carbon source and dissolved organic matter of six agricultural wastes in the initial stage. *Environmental Science*, 2021, **42**(5): 2422-2431. DOI: 10.13227/j.hjlx.202010177.[凌宇,闫国凯,王海燕等.6种农业废弃物初期碳源及溶解性有机物释放机制.环境科学,2021, **42**(5): 2422-2431.]
- [13] Hua GH, Salo MW, Schmit CG *et al*. Nitrate and phosphate removal from agricultural subsurface drainage using laboratory woodchip bioreactors and recycled steel byproduct filters. *Water Research*, 2016, **102**: 180-189. DOI: 10.1016/j.watres.2016.06.022.
- [14] Wu SQ, He SB, Zhou WL *et al*. Decomposition characteristics of three different kinds of aquatic macrophytes and their potential application as carbon resource in constructed wetland. *Environmental Pollution*, 2017, **231**: 1122-1133. DOI: 10.1016/j.envpol.2017.07.049.
- [15] Xiao L, He F, Liang X *et al*. Effect of the solid carbon sources addition on performance of wastewater treatment efficiency

- in vertical flow constructed wetland. *J Lake Sci*, 2012, **24**(6): 843-848. DOI: 10.18307/2012.0606. [肖蕾, 贺锋, 梁雪等. 添加固体碳源对垂直流人工湿地污水处理效果的影响. 湖泊科学, 2012, **24**(6): 843-848.]
- [16] Brodersen KE, Koren K, Moßhammer M *et al.* Seagrass-mediated phosphorus and iron solubilization in tropical sediments. *Environmental Science & Technology*, 2017, **51**(24): 14155-14163. DOI: 10.1021/acs.est.7b03878.
- [17] Yu LJ, Chen T, Xu YH. Effect of corn cobs as external carbon sources on nitrogen removal in constructed wetlands treating micro-polluted river water. *Water Science and Technology*, 2019, **79**(9): 1639-1647. DOI: 10.2166/wst.2019.156.
- [18] Wu SQ, Gao L, Gu JY *et al.* Enhancement of nitrogen removal via addition of cattail litter in surface flow constructed wetland. *Journal of Cleaner Production*, 2018, **204**: 205-211. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.09.036.
- [19] Cheng L, Li H, Yan BX *et al.* Purification effects of plant-free horizontal folded submerged artificial wetlands on nitrogen and phosphorus. *Wetland Science*, 2016, **14**(2): 219-225. [程龙, 李怀, 阎百兴等. 无植物水平折流式潜流人工湿地对氮和磷的净化效果. 湿地科学, 2016, **14**(2): 219-225.]
- [20] Sun LL, Song XF, Li M *et al.* Nitrogen removal performance of artificial wetland with plant carbon source from seawater circulating aquaculture tail water. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2019, **13**(6): 1382-1390. [孙琳琳, 宋协法, 李薏等. 外加植物碳源对人工湿地处理海水循环水养殖尾水脱氮性能的影响. 环境工程学报, 2019, **13**(6): 1382-1390.]
- [21] Wei X, Zhu W, Zhao LF *et al.* Effect of plant straw as a supplementary carbon source on the effect of nitrogen removal in artificial wetlands. *J Lake Sci*, 2010, **22**(6): 916-922. DOI: 10.18307/2010.0615. [魏星, 朱伟, 赵联芳等. 植物秸秆作补充碳源对人工湿地脱氮效果的影响. 湖泊科学, 2010, **22**(6): 916-922.]
- [22] Paul S, Dutta A. Challenges and opportunities of lignocellulosic biomass for anaerobic digestion. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018, **130**: 164-174. DOI: 10.1016/j.resconrec.2017.12.005.
- [23] Fan TF, Dong WY, Zhao TJ *et al.* Study of modified Lycium barbarum as a carbon source for denitrification. *Journal of Environmental Science*, 2021, **41**(9): 3513-3520. DOI:10.13671/j.hjkxb.2021.0093. [范天凤, 董伟羊, 赵转军. 改性枸杞枝作为反硝化脱氮碳源的研究. 环境科学学报, 2021, **41**(9): 3513-3520.]