

## 利用农业废弃物强化人工湿地处理污水处理厂尾水机理研究

许兵, 郭培勋, 刘佳, 张旭, 姚兴洁, 杨晓彤, 张新玉

### 引用本文:

许兵, 郭培勋, 刘佳, 张旭, 姚兴洁, 杨晓彤, 张新玉. 利用农业废弃物强化人工湿地处理污水处理厂尾水机理研究[J]. *农业环境科学学报*, 2024, 43(2): 411-418.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2023-0247>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 蔬菜废弃物蚯蚓堆肥对鸡毛菜生长的影响

王亚利, 杨光, 熊才耘, 谢尚宏, 李银生, 曹林奎, 赵琦

*农业环境科学学报*. 2017, 36(10): 2129-2135 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0335>

#### 同源猪场废弃物对土壤-生菜系统铜锌迁移的影响

唐明灯, 王艳红, 余丹妮, 李盟军, 李义纯, 李林峰, 艾绍英

*农业环境科学学报*. 2019, 38(9): 2111-2120 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1206>

#### 稻作条件下不同施肥模式对盐碱化土壤细菌和古菌群落结构的影响

李明, 马飞, 肖国举

*农业环境科学学报*. 2018, 37(3): 495-504 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1107>

#### 不同植物组合人工湿地中磷去向特征研究

叶磊, 李希, 田日昌, 吴凤平, 孟岑, 夏梦华, 郭宁宁, 凡翔, 李裕元, 王辉

*农业环境科学学报*. 2020, 39(10): 2409-2419 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0761>

#### 甘蔗渣碳源释放规律及其硫酸盐还原菌利用性试验

狄军贞, 李拓达, 赵微

*农业环境科学学报*. 2019, 38(5): 1151-1157 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0994>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

许兵, 郭培勋, 刘佳, 等. 利用农业废弃物强化人工湿地处理污水处理厂尾水机理研究[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(2): 411-418.

XU B, GUO P X, LIU J, et al. Research on mechanism of utilizing agricultural waste to strengthen constructed wetland to treat tailwater of a sewage treatment plant[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2024, 43(2): 411-418.



开放科学 OSID

# 利用农业废弃物强化人工湿地处理 污水处理厂尾水机理研究

许兵<sup>1</sup>, 郭培勋<sup>1</sup>, 刘佳<sup>2</sup>, 张旭<sup>1,3</sup>, 姚兴洁<sup>1</sup>, 杨晓彤<sup>1</sup>, 张新玉<sup>1\*</sup>

(1. 山东建筑大学市政与环境工程学院, 济南 250101; 2. 济南水务集团有限公司, 济南 250013; 3. 扬州大学环境科学与工程学院, 江苏 扬州 225009)

**摘要:**为研究3种典型的农业废弃物(玉米芯、玉米秸秆和小麦秸秆)作为人工湿地外加碳源脱氮的可行性,利用三维荧光和高通量测序分析了植物碳源在人工湿地中促进废水脱氮的增强机制。结果表明:农业废弃物材料可以很好地释放有机碳,累计碳释放量为119.78~172.84 mg·g<sup>-1</sup>,同时分解释放的溶解性有机物(Dissolved organic matter, DOMs)主要由腐植酸和黄腐酸组成。在添加农业废弃物的人工湿地中,TN去除效率提高了30.8%~41.2%,并且脱氮菌属*Pseudomonas*、*Thauera*等的相对丰度提高了16.38%~22.02%。添加玉米秸秆的人工湿地具有较好的脱氮效果。研究表明,利用农业废弃物作为人工湿地外部碳源处理污水处理厂尾水,可以显著降低尾水中TN,这也为农业废弃物的处理找到了一个新的出路。

**关键词:**脱氮;人工湿地;农业废弃物;植物碳源;碳排放量;尾水

中图分类号:X71;X703 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2024)02-0411-08 doi:10.11654/jaes.2023-0247

## Research on mechanism of utilizing agricultural waste to strengthen constructed wetland to treat tailwater of a sewage treatment plant

XU Bing<sup>1</sup>, GUO Peixun<sup>1</sup>, LIU Jia<sup>2</sup>, ZHANG Xu<sup>1,3</sup>, YAO Xingjie<sup>1</sup>, YANG Xiaotong<sup>1</sup>, ZHANG Xinyu<sup>1\*</sup>

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China; 2. Jinan Water Group Co., Ltd., Jinan 250013, China; 3. School of Environmental Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

**Abstract:**To investigate the feasibility of utilizing three typical agricultural waste materials (i.e., corn cobs, corn stalks, and wheat straw) as external carbon sources for denitrification in constructed wetlands, the enhancement mechanism of plant carbon sources in promoting nitrogen removal from wastewater was analyzed using three-dimensional fluorescence and high-throughput sequencing. The results showed that agricultural waste materials can release organic carbon effectively, with an accumulated carbon release of 119.78–172.84 mg·g<sup>-1</sup>. The dissolved organic matter (DOMs) decomposed and released mainly consisted of humic acid and fulvic acid. In the constructed wetlands with added agricultural waste materials, the removal efficiency of TN increased by 30.8%–41.2%, and the relative abundance of denitrifying bacteria genera such as *Pseudomonas* and *Thauera* increased by 16.38%–22.02%. The constructed wetland with added corn stalks represented better denitrification performance. Utilizing agricultural waste materials as external carbon sources in constructed wetlands for treating tailwater from sewage treatment plants can significantly reduce the TN concentration in the effluent, providing a new avenue for agricultural waste treatment.

**Keywords:** nitrogen removal; constructed wetland; agricultural waste; plant carbon source; carbon emissions; tailwater

收稿日期:2023-04-01 录用日期:2023-07-07

作者简介:许兵(1977—),男,山东济南人,博士,副教授,主要从事饮用水处理、污水生态化处理研究。E-mail:xubing1977@sdjzu.edu.cn

\*通信作者:张新玉 E-mail:11387@sdjzu.edu.cn

人工湿地是一种高效的水生态处理技术,可广泛用于生活污水、受污染河流等水体的净化<sup>[1-2]</sup>。湿地生态系统利用微生物作用、植物吸收和基质吸附等方式处理含氮废水,其中反硝化是生物脱氮的关键步骤<sup>[3-4]</sup>。研究表明,当废水的C/N大于5时,微生物的脱氮效果较为明显,然而,碳源不足是低C/N废水处理过程中面临的主要问题<sup>[5]</sup>。He等<sup>[6]</sup>研究处理低C/N废水,开发了一种新型的CW-BER系统,该系统通过提高进水中的C/N使总氮和硝态氮的去除率得到提高。研究简单、有效、低成本的材料作为人工湿地脱氮的外部碳源具有重要意义。目前,用于人工湿地反硝化的外加碳源主要有:小分子碳源(糖类、醇类等小分子有机物)和天然植物碳源材料(稻壳、芦苇、花生壳等)<sup>[7-9]</sup>,此外还包括可生物降解的高分子聚合物碳源,如聚-β-羟丁酸(Poly-β-hydroxybutyrate, PHB)、聚己内酯(Polycaprolactone, PCL)、聚羟基烷酸(Poly-hydroxy-alkanoates, PHAs)等<sup>[10-12]</sup>。小分子碳源可以迅速提高废水中的C/N,能够起到极佳的脱氮效果,如Abu-Ghararah等<sup>[13]</sup>选择甲醇和乙醇作为外加碳源处理高浓度含氮废水,研究结果表明,当原水中氮浓度较高时,将小分子醇类加到缺氧静态床柱中可显著减少水的含氮量。但小分子碳源消耗速度快、用量大,难以控制投加量,且部分材料有一定的致病性,在实际工程中,更多地被用于紧急处理。可生物降解的高分子聚合物碳源具有较好的物理性能,能够以稳定的速率释碳,是理想的固态碳源材料。Xiong等<sup>[14]</sup>利用PCL和聚乳酸(Polylactic acid, PLA)合成了新的碳源,研究发现,合成碳源能够表现出稳定的缓释性能,实现了较高的脱氮效率,并且有机物残留浓度更低。高分子聚合物的化学成分比较简单,制备过程复杂,成本高,因此并不适合大规模的应用。天然植物碳源来源广、成本低、可再生<sup>[15-17]</sup>,其主要成分纤维素在水解过程中主要以含碳化合物的形式存在,能够作为外加碳源对污水脱氮起到促进作用;此外,也为解决农业废弃物因不当焚烧所造成的环境污染问题提供一条新的思路<sup>[18]</sup>。

在不影响人工湿地出水水质的前提下,选择有潜力的农业废弃物作为外加碳源,能够有效回收利用废弃植物材料,减少水体污染。近几年,诸多学者已经将农业废弃物作为外加碳源研究其对污水脱氮的影响。如Boussaid等<sup>[19]</sup>利用秸秆修复硝态氮含量高的地下水,通过微生物和土壤的协同净化,使受污染的地下水达到了饮用水标准。Tanner等<sup>[20]</sup>在研究中发

现,将人工湿地与反硝化生物反应器组合成一个混合反应系统,通过添加木屑、椰壳等含碳物质,反应系统出水含氮量明显降低。Yang等<sup>[21]</sup>选择8种植物材料作为固态碳源进行脱氮研究,通过膜生物反应柱试验评价了它们的释碳能力和反硝化潜力,研究结果表明,添加植物碳源能够明显提高微生物的反硝化能力。Saeed等<sup>[22]</sup>选择甘蔗渣作为构建人工湿地填料,研究发现加入甘蔗渣填料可以提高污水C/N,人工湿地的除氮效率明显增强,更重要的是,添加甘蔗渣可以有效提高人工湿地中微生物的活性。因此,选择具有可持续供碳能力的天然植物材料作为外部碳源具有重要的现实意义,既能够实现资源循环回收,又能为处理污水处理厂尾水提供必要条件。近年来,全球变暖问题加剧,选择将废弃植物材料作为外加碳源用于污水脱氮已成为一种备受关注的方法,且该方法可以有效降低不当焚烧所造成的空气污染,从而提升区域空气质量<sup>[23-24]</sup>。

本研究选取玉米芯、玉米秸秆、小麦秸秆3种农业废弃物,研究其COD和TN的释放量及释放规律,利用三维荧光和SUVA<sub>254</sub>分析农业废弃物水解释放的溶解性有机物(DOMs),并研究添加植物碳源的人工湿地在脱氮过程中的N<sub>2</sub>O释放规律和脱氮菌属的相对丰度,以评价农业废弃物作为外加碳源强化人工湿地处理污水处理厂尾水的可行性和效率。

## 1 材料和方法

### 1.1 植物材料

根据自然环境的实际情况,在山东省济南市采集了玉米芯、玉米秸秆和小麦秸秆3种材料作为实验用的农业废弃物。将材料粉碎成1~2 cm后,在2%NaOH溶液中浸泡24 h,用去离子水调节pH至中性,烘箱(40℃)烘干至恒质量。将处理好的材料放入干燥容器中备用。

### 1.2 实验设计

#### 1.2.1 间歇浸出试验

称取各种植物材料2 g于锥形瓶中,加入去离子水至固定刻度,瓶口用密封膜密封。实验装置放置于恒温室中,每天对锥形瓶摇动3次。实验第1、3、5、7、9、11、13、15、19、25天时定期更换去离子水,将上清液用0.45 μm滤膜浸出后,检测过滤水样中TN和COD等参数,同时设置两组平行样本。上述实验是在25℃条件下进行,以评估农业废弃物对有机碳和氮的潜在释放能力。

### 1.2.2 人工湿地试验设计与运行

为探究植物碳源应用于人工湿地处理污水处理厂尾水的可行性,采用PVC材料设计4组结构相同的潜流人工湿地,并分别标记为:A(玉米芯)、B(玉米秸秆)、C(小麦秸秆)、D(空白对照),同时实验组设置3个平行单元,其结构如图1所示,湿地采用连续运行模式。装置长2.0 m、宽0.5 m、深0.5 m,基质深0.45 m,孔隙率为60%。实验装置分成3个体积相同的前端、中端、后端,分别填充陶粒( $d=3\sim 5$  mm)、碎石( $d=5\sim 7$  mm)和矿渣( $d=8\sim 10$  mm),总体积约为500 L。将曝气装置安放在系统底部,用于供氧<sup>[25]</sup>。为防止填料堵塞湿地,本设计在顶部添加植物碳源,依据间歇浸出试验结果,添加的废弃物材料质量约为3 000 g,放置时保证3种实验材料的添加体积均匀压缩,以保持一致性。前端、中端、后端3部分处理面积分别为总面积的1/2、1/3和1/6。同时,农业废弃物经碱处理后,需先用水清洁,去除水中过多的色素,防止造成干扰。空白对照组仅在顶层铺设沙砾,水平高度同实验组相同。人工湿地中菖蒲的种植密度为13株·m<sup>-2</sup>。

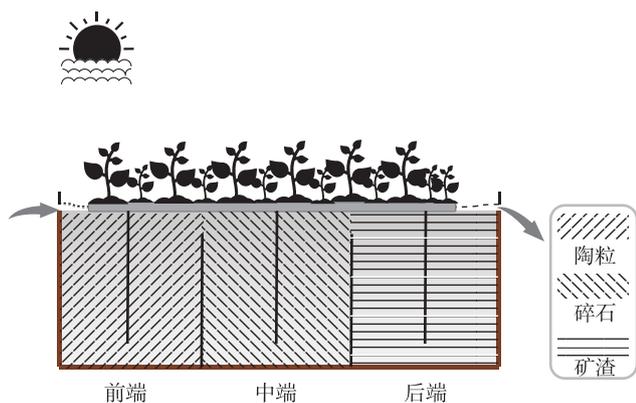


图1 潜流人工湿地设计

Figure 1 Design of subsurface flow constructed wetland

人工湿地装置安置于模拟日照的恒温室中。使污水厂的二沉池出水流入人工湿地30 d,主要目的是对系统内的植物和微生物进行驯化和培养。稳定阶段将合成废水流入湿地进行实验,在对水样的检测中,实验组每个人工湿地进行一次采样检测;空白组在同一湿地进行3次采样检测。合成废水采用C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>O<sub>6</sub>、KNO<sub>3</sub>、NH<sub>4</sub>Cl、KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>等配制,设计浓度控制在:COD 26~30 mg·L<sup>-1</sup>;TN 12~14 mg·L<sup>-1</sup>(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 7~8 mg·L<sup>-1</sup>,NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 5~6 mg·L<sup>-1</sup>);合成废水C/N为2:1。人工湿地的设计水力停留时间(Hydraulic retention

time, HRT)为72 h,并对稳定阶段时TN、COD等指标进行检测,以分析添加植物碳源对人工湿地强化脱氮的影响。

### 1.3 分析方法

间歇浸出试验和人工湿地进出水的COD和TN检测均采用标准方法<sup>[26]</sup>。三维荧光用于检测植物材料浸出试验和稳定阶段中的DOMs。荧光数据的参数范围设置:Ex波长范围为200~500 nm,Em波长范围为250~550 nm,狭缝宽度为5 nm,扫描速度为12 000 nm·min<sup>-1</sup>。在系统运行稳定时,采用静态暗箱法收集产生的温室气体N<sub>2</sub>O<sup>[27-28]</sup>。湿地系统上部设置水封装置,并配备静态集气箱。每隔0、20、40、60 min采集一次N<sub>2</sub>O气体,采集时间固定在上午8:00。气体样品在24 h内通过气相色谱仪Agilent7890A(Generic Cabling,GC)进行分析。

### 1.4 数据分析

统计分析采用单因素方差分析(ANOVA)方法,包括平均值和标准差。在所有实验中,只有当P值小于0.05时才认为差异具有统计学意义。

## 2 结果与讨论

### 2.1 植物碳源有机质释放特征

分批浸出试验过程中的COD、TN、C/N特征如图2所示,3种农业废弃物的COD和TN释放趋势相同。总体来看,在试验的前5 d COD和TN有较快的释放速率,随后逐渐放缓,并且后期3种植物碳源的释放速率相差不大,COD释放速率低于5 mg·g<sup>-1</sup>·d<sup>-1</sup>,TN释放速率在0.1 mg·g<sup>-1</sup>·d<sup>-1</sup>以下,这些结果反映出植物碳源存在后期碳释放不足的缺点。在25 d内玉米芯、玉米秸秆和小麦秸秆累计释放COD分别为135.49、172.84 mg·g<sup>-1</sup>和119.78 mg·g<sup>-1</sup>,累积释放TN分别为3.43、3.87 mg·g<sup>-1</sup>和2.96 mg·g<sup>-1</sup>。不同农业废弃物COD和TN累积释放量存在一定差异,且释放量的差异主要是由早期阶段的差异造成的。图2(c)显示了不同农业废弃物释放周期内C/N差异及变化,3种农业废弃物的C/N在试验期间表现出不同的波动趋势,但后期逐渐趋于稳定,其中,玉米秸秆的平均C/N为44.86,远高于玉米芯(42.71)和小麦秸秆(42.5)。

### 2.2 植物碳源的EEM-PARAFAC分析

如图3所示,玉米芯、玉米秸秆、小麦秸秆出现类腐植酸荧光峰Ex/Em(图中A点)分别为370 nm/470 nm、360 nm/470 nm、360 nm/460 nm,类富里酸荧光峰Ex/Em(图中B点)分别为240 nm/460 nm、270 nm/460

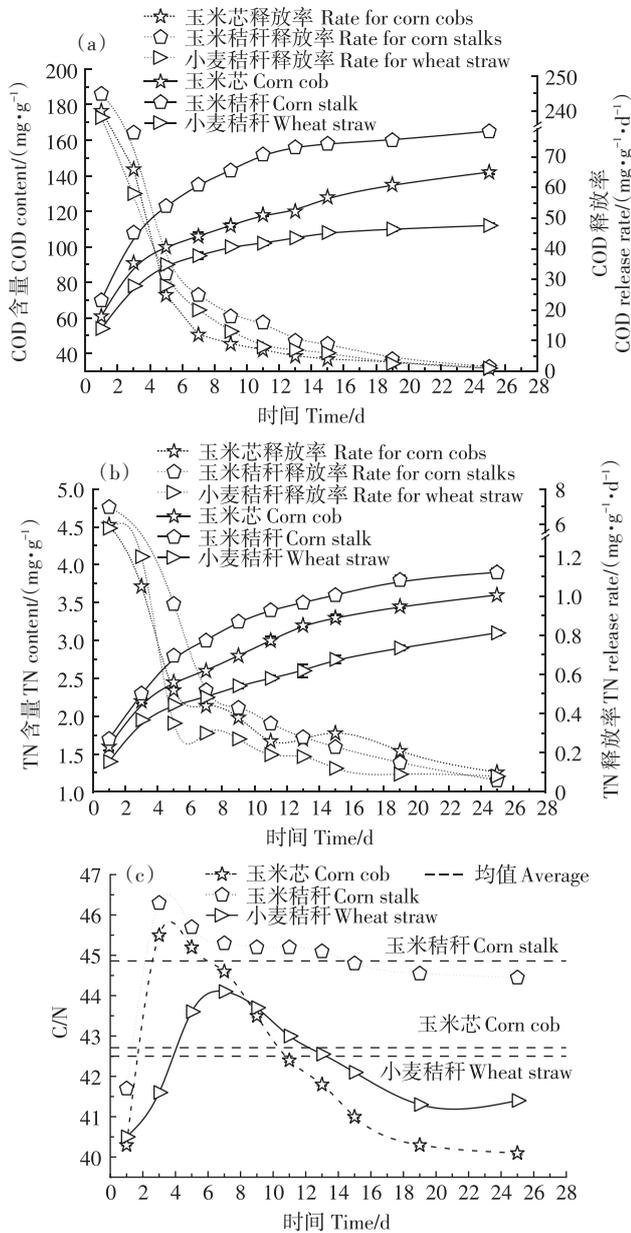


图2 不同农业废弃物 COD 和 TN 释放动态

Figure 2 Dynamics of COD and TN release from different agricultural waste

nm、260 nm/460 nm, 玉米芯黄腐酸荧光峰 Ex/Em (图中 C 点) 为 430 nm/520 nm, 小麦秸秆出现类酪氨酸荧光峰 Ex/Em (图中 C 点) 为 270 nm/360 nm。整个试验期间, 玉米芯释放的 DOMs, 前期 A 组分 (腐植酸类) 类腐植酸相对丰度高达 80%, 但后期 A 组分相对分布逐渐低于 50%, B 组分富里酸和 C 组分酪氨酸分别增加到 24% 和 35%。在玉米秸秆和小麦秸秆中, 其成分的相对变化波动较小。

一般采用 SUVA<sub>254</sub> 指数来反映 DOMs 的腐殖化程度。从图 4 中可以看出, 不同物质的平均 SUVA<sub>254</sub> 值

依次为玉米秸秆 (0.632 L·mg<sup>-1</sup>·m<sup>-1</sup>) > 玉米芯 (0.276 L·mg<sup>-1</sup>·m<sup>-1</sup>) > 小麦秸秆 (0.097 L·mg<sup>-1</sup>·m<sup>-1</sup>)。试验结果表明, 玉米秸秆的芳香性最低, 腐殖化程度较高。先前研究发现 DOMs 的 SUVA<sub>254</sub> 值大于 4 L·mg<sup>-1</sup>·m<sup>-1</sup> 主要表示疏水性, 尤其是芳香性物质, 而 SUVA<sub>254</sub> 值小于 3 L·mg<sup>-1</sup>·m<sup>-1</sup> 则表示亲水性 DOM 物质<sup>[29]</sup>。本研究中 SUVA<sub>254</sub> 值均低于 1.0 L·mg<sup>-1</sup>·m<sup>-1</sup>, 表示农业废弃物释放的 DOMs 可能是一种亲水物质。通过分析水中 3 种实验材料释放的 DOMs 和腐殖程度可以更好地了解这些农业废弃物的碳供应机制。所以, 了解农业废弃物水解释放的 DOMs 特性和功能是研究其在人工湿地中应用的重要因素。

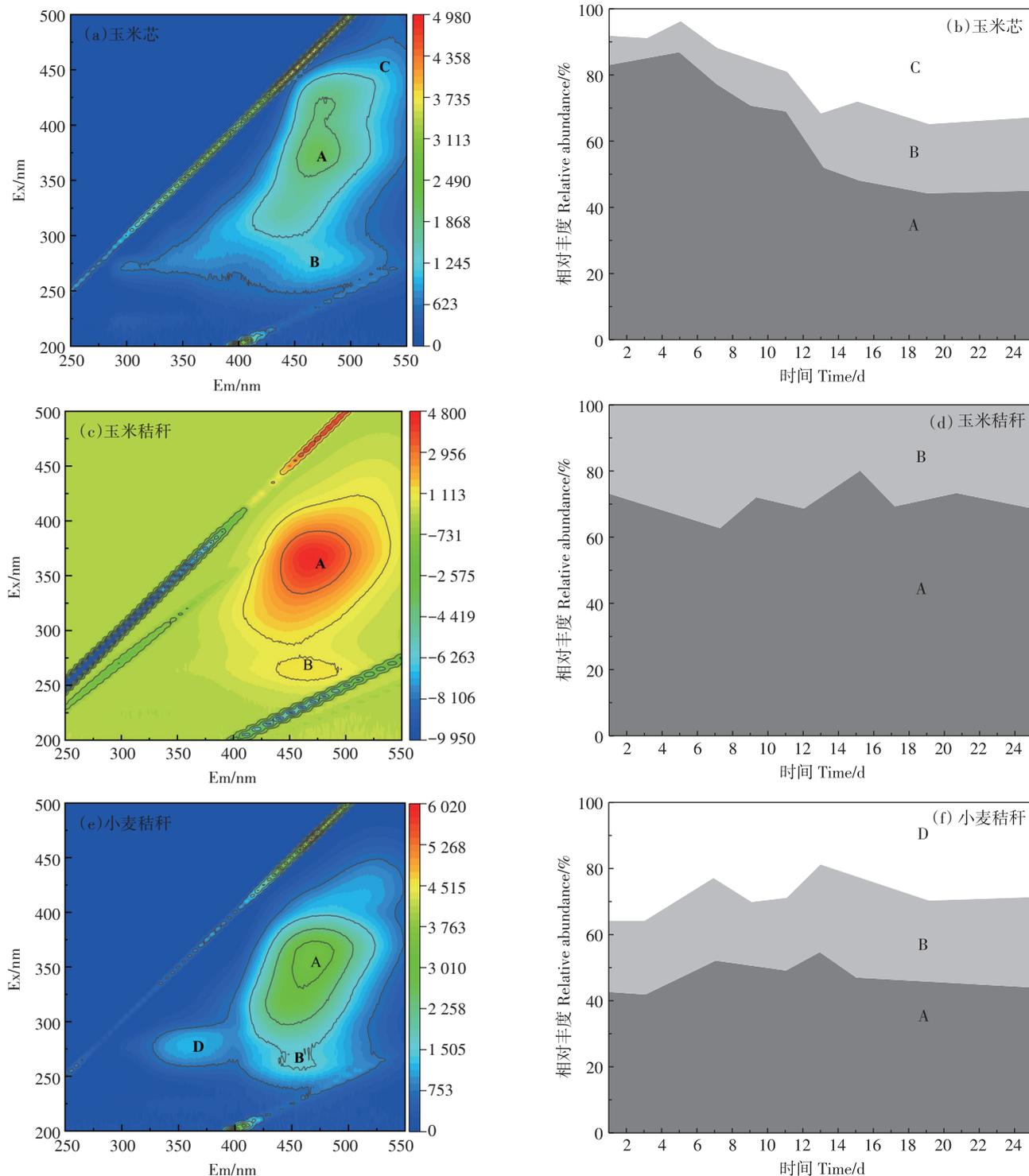
### 2.3 添加农业废弃物的人工湿地脱氮研究

#### 2.3.1 人工湿地脱氮可行性研究

图 5 显示了 4 种人工湿地中不同污染物的去除效率。添加玉米芯、玉米秸秆、小麦秸秆 3 种不同植物碳源的人工湿地的平均 COD 出水浓度分别为 12.4、13.9 mg·L<sup>-1</sup> 和 13.1 mg·L<sup>-1</sup>, 与添加植物碳源的人工湿地相比, 空白对照组平均出水 COD 浓度较低, 为 9.12 mg·L<sup>-1</sup>。造成这种现象的主要原因是添加的植物碳源分解释放有机物, 导致 COD 出水浓度略高于空白对照组, 这一结果与 Yang 等<sup>[21]</sup>的结果一致。同时, 在稳定阶段, 添加玉米芯、玉米秸秆和小麦秸秆 3 种不同植物碳源的人工湿地的 TN 平均去除率分别为 56.9%、67.3% 和 61.9%, 脱氮效果最好的是添加玉米秸秆的人工湿地 (P<0.05), 而空白对照组对 TN 的去除率仅有 26.1%, 证明植物碳源的添加能够有效增强人工湿地对污水的脱氮效果, 使去除效率提高 30.8~41.2 个百分点。在实验运行后期, 实验组人工湿地出水 TN 浓度逐渐缓慢上升, 去除效率降低。考虑到实验材料的使用寿命, 造成该现象的主要原因是实验材料后期碳释放不足。结果表明, 添加植物碳源可以明显提高人工湿地处理低 C/N 废水的脱氮效率。

#### 2.3.2 添加植物碳源人工湿地中 DOMs 的变化规律

图 6 揭示了在稳定阶段添加 3 种实验材料植物碳源的人工湿地中 DOMs 的相对分布。从图中可以看出, 人工湿地中 DOMs 的主要成分仍然是腐植酸, 此外还有一定量的黄腐酸和少量酪氨酸, 这一结果与分批浸出试验中释放的 DOMs 相似。通过研究添加植物碳源的人工湿地中 DOMs 变化规律, 可以更好地解释纤维素植物降解机理和人工湿地中 DOMs 的变化过程, 为研究利用植物碳源提高人工湿地脱氮提供理论指导。



溶解性有机物类型: A 为类腐植酸; B 为类富里酸; C 为富里酸; D 为类酪氨酸

Types of dissolved organic matter: A, kind of humic acid; B, kind of fulvic acid; C, fulvic acid; D, class tyrosine

图3 EEM-PARAFAC分析

Figure 3 EEM-PARAFAC analysis

#### 2.4 人工湿地中的N<sub>2</sub>O排放量

图7为稳定阶段人工湿地中N<sub>2</sub>O排放量。在人工湿地系统中,微生物进行硝化反硝化反应时通常会

产生N<sub>2</sub>O。N<sub>2</sub>O主要在反硝化过程中释放,但在好氧硝化阶段也会产生少量的N<sub>2</sub>O<sup>[30]</sup>。整个实验期间,添加不同植物碳源的人工湿地中N<sub>2</sub>O排放量平均值为

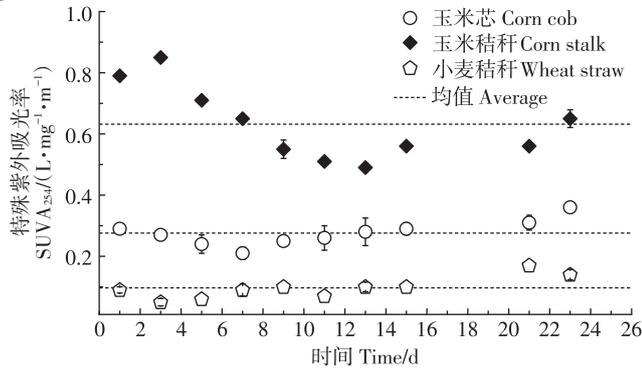


图4 特征紫外吸光度分析

Figure 4 Specific ultraviolet absorbance analysis

75~88  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ , 与空白对照组 30.7  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$  相比, 明显升高, 这一结果表明, 添加植物碳源会导致人工湿地  $\text{N}_2\text{O}$  排放量增加。在反硝化过程中,  $\text{NO}$  在催化酶的作用下被还原为  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  最终会被  $\text{N}_2\text{O}$  还原酶催化还原为  $\text{N}_2$  释放到空气中<sup>[31-32]</sup>。在实验中, 通过向人工湿地外加碳源来有效增强反硝化反应, 提高了  $\text{N}_2\text{O}$  排放, 这与 Han 等<sup>[33]</sup> 的实验结果一致, 随着浓度和物种丰富度水平的增加,  $\text{N}_2\text{O}$  的释放量明显增加, 可能的原因是物种丰富度越高, 碳含量越高, 进而增强反硝化过程, 导致  $\text{N}_2\text{O}$  的排放量增加。总体而言, 由于人工湿地生态系统复杂,  $\text{N}_2\text{O}$  的释放和积累有多种可能的原因, 所以, 添加植物碳源后人工湿地  $\text{N}_2\text{O}$  排放量增加与微生物之间的相互作用还有待进一步研究。

### 2.5 人工湿地微生物群落多样性

图8揭示了人工湿地中微生物属水平的相对丰度。添加玉米芯、玉米秸秆和小麦秸秆植物碳源的3个人工湿地, 通过高通量测序分析发现, *Dechloromonas*、*Hydrogenophaga*、*Zoogloea*、*Sulfurospirillum*、

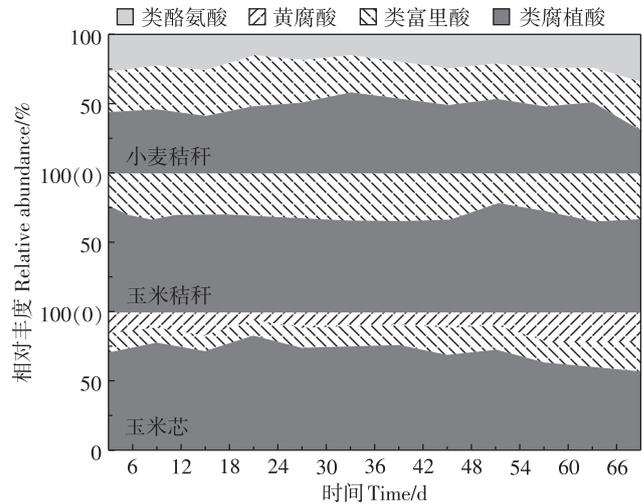


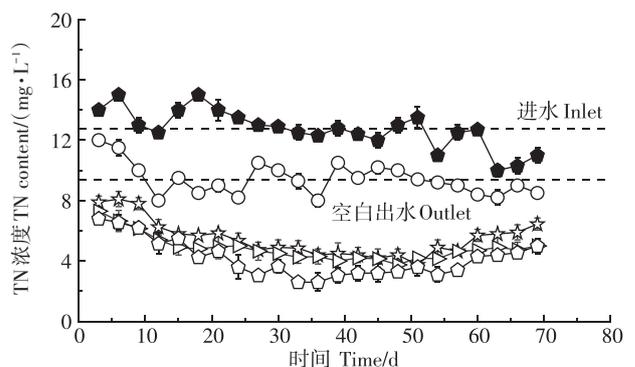
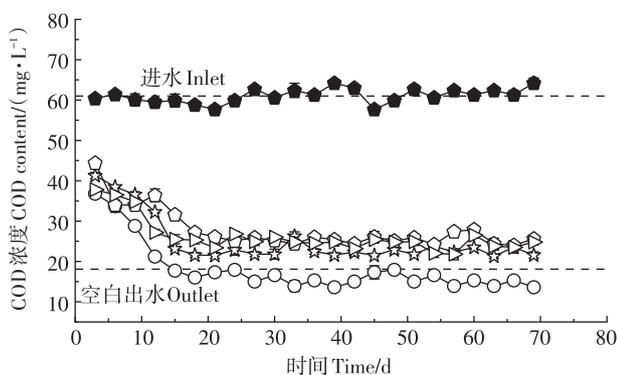
图6 人工湿地稳定阶段 DOMs 变化规律

Figure 6 Variation rules of DOMs at stabilized stage in constructed wetlands

*Sulfurimonas*、*Pseudomonas*、*Thauera*、*Simplicispira* 等与脱氮相关的细菌相对丰度分别为 47.82%、50.62%、44.98%, 与空白对照组 (28.6%) 相比, 有明显提高<sup>[34-35]</sup>。结果表明, 在人工湿地中外加植物碳源, 能够提高反硝化细菌丰度和人工湿地的脱氮效率。研究也进一步揭示了利用农业废弃物作为人工湿地的外加碳源对于  $\text{N}_2\text{O}$  排放与反硝化细菌相对丰度之间的潜在联系。

### 3 结论

(1) 间歇浸出试验研究发现, 碱处理后的农业废弃物能够有效释放有机碳, 释碳速率稳定, 并且具备持久析出碳源的优势; 通过向人工湿地中添加农业废弃物碳源, 可以有效增强微生物的反硝化作用, 提高



---- 均值 Average    ● 进水 Inlet    ○ 空白对照 Outlet    ☆ 玉米芯 Corn cob    ○ 玉米秸秆 Corn stalk    ▷ 小麦秸秆 Wheat straw

图5 人工湿地 COD 和 TN 的去除效果

Figure 5 COD, TN removal effect in constructed wetlands

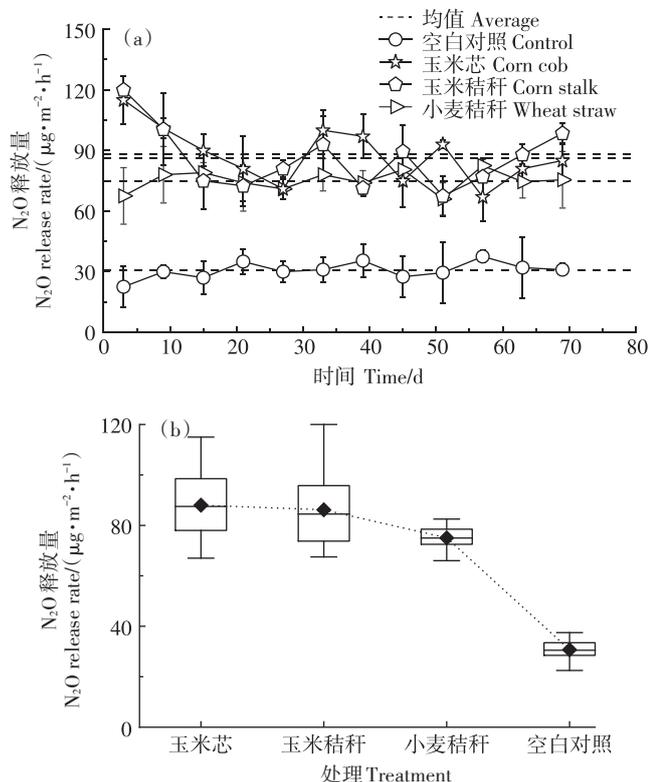
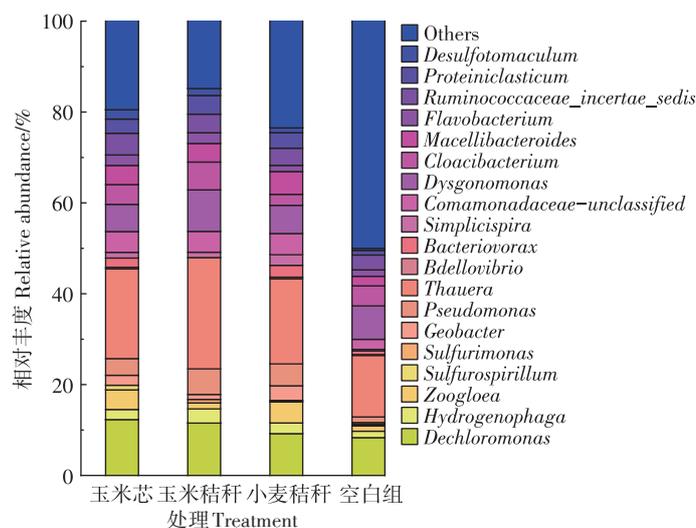
图7 稳定阶段人工湿地的 N<sub>2</sub>O 排放Figure 7 N<sub>2</sub>O emissions in constructed wetlands during stabilized stage

图8 人工湿地微生物属水平相对丰度

Figure 8 Relative abundance of microbial genera in constructed wetlands

脱氮菌属的富集程度,经过处理后的污水处理厂尾水中TN含量明显降低,且添加玉米秸秆的人工湿地具有更好的出水水质。

(2) 利用农业废弃物作为污水反硝化的外加碳

源,不仅能够实现对污水处理厂尾水中氮的有效去除,也为农业废弃物高效资源化利用提供了一条新思路,为处理低C/N废水提供了参考和借鉴。

参考文献:

- [1] WU H P, GAO X F, WU M, et al. The efficiency and risk to groundwater of constructed wetland system for domestic sewage treatment: a case study in Xiantao, China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 277: 123384.
- [2] SILVEIRA E O, LUTTERBECK C A, MACHADO Ê L, et al. Biomonitoring of urban wastewaters treated by an integrated system combining microalgae and constructed wetlands[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 705:135864.
- [3] 战楠, 黄炳彬, 赵立新, 等. 潜流湿地短程硝化反硝化强化脱氮研究[J]. *人民黄河*, 2022, 44(1): 94-99. ZHAN N, HUANG B B, ZHAO L X, et al. Study on enhanced nitrogen removal by short-cut nitrification in subsurface constructed wetland[J]. *Yellow River*, 2022, 44(1): 94-99.
- [4] 奚道国, 张瑞斌, 陈凡. 缓释碳源强化人工湿地脱氮效果研究[J]. *中国环保产业*, 2022(1): 32-34. XI D G, ZHANG R B, CHEN F. Research on nitrogen removal efficiency of constructed wetland enhanced by sustained-release carbon source[J]. *China Environmental Protection Industry*, 2022(1): 32-34.
- [5] 王海燕, 赵远哲, 王文富, 等. 人工湿地脱氮影响因素及强化措施研究进展[J]. *环境工程技术学报*, 2020, 10(4): 585-597. WANG H Y, ZHAO Y Z, WANG W F, et al. A review of influencing factors and enhanced measures for nitrogen removal of constructed wetlands[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2020, 10(4): 585-597.
- [6] HE Y, WANG Y H, SONG X S. High-effective denitrification of low C/N wastewater by combined constructed wetland and biofilm-electrode reactor(CW-BER)[J]. *Bioresource Technology*, 2016, 203:245-251.
- [7] YU L J, CHEN T, XU Y H. Effect of corn cobs as external carbon sources on nitrogen removal in constructed wetlands treating micro-polluted river water[J]. *Water Science and Technology: A Journal of the International Association on Water Pollution Research*, 2019, 79(9): 1639-1647.
- [8] ZHOU B B, DUAN J J, XUE L H, et al. Effect of plant-based carbon source supplements on denitrification of synthetic wastewater: focus on the microbiology[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(24): 24683-24694.
- [9] WEN Y, CHEN Y, ZHENG N, et al. Effects of plant biomass on nitrate removal and transformation of carbon sources in subsurface-flow constructed wetlands[J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(19): 7286-7292.
- [10] SHEN Z Q, ZHOU Y X, WANG J L. Comparison of denitrification performance and microbial diversity using starch / polylactic acid blends and ethanol as electron donor for nitrate removal[J]. *Bioresource Technology*, 2013, 131: 33-39.
- [11] YANG L, GUO L K, REN Y X, et al. Denitrification performance, bio-

- film formation and microbial diversity during startup of slow sand filter using powdery polycaprolactone as solid carbon source[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2021, 9(4):105561.
- [12] JIANG L, WU A Q, FANG D X, et al. Denitrification performance and microbial diversity using starch-polycaprolactone blends as external solid carbon source and biofilm carriers for advanced treatment[J]. *Chemosphere*, 2020, 255:126901.
- [13] ABU-GHARARAH Z H. Biological denitrification of high nitrate water: influence of type of carbon source and nitrate loading[J]. *Journal of Environmental Science and Health. Part A: Environmental Science and Engineering and Toxicology*, 1996, 3:1651-1668.
- [14] XIONG R, YU X X, YU L J, et al. Biological denitrification using polycaprolactone-peanut shell as slow-release carbon source treating drainage of municipal WWTP[J]. *Chemosphere*, 2019, 235:434-439.
- [15] FU G P, HUANGSHEN L K, GUO Z P, et al. Effect of plant-based carbon sources on denitrifying microorganisms in a vertical flow constructed wetland[J]. *Bioresource Technology*, 2017, 224:214-221.
- [16] ZHANG J M, FENG C P, HONG S Q, et al. Behavior of solid carbon sources for biological denitrification in groundwater remediation[J]. *Water Science and Technology: A Journal of the International Association on Water Pollution Research*, 2012, 65(9):1696-1704.
- [17] HUEET D O, MORRIS S G, SMITH G, et al. Nitrogen and phosphorus removal from plant nursery runoff in vegetated and unvegetated subsurface flow wetlands[J]. *Water Research*, 2005, 39(14):3259-3272.
- [18] JIA L X, GUO E F, LIU H, et al. Exploring utilization of recycled agricultural biomass in CWs: characterization of the driving force for high-rate nitrogen removal[J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53:1258-1268.
- [19] BOUSSAID F, MARTIN G, MORVAN J, et al. Denitrification *in-situ* of groundwaters with solid carbon matter[J]. *Environmental Technology*, 1998, 9:803-816.
- [20] TANNER C C, SUKIAS J P S, HEADLEY T R, et al. CWs and denitrifying bioreactors for on-site and decentralised wastewater treatment: comparison of five alternative configurations[J]. *Ecological Engineering*, 2012, 42:112-123.
- [21] YANG X L, JINAG Q, SONG H L, et al. Selection and application of agricultural wastes as solid carbon sources and biofilm carriers in MBR[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2015, 283:186-192.
- [22] SAEED T, MUNTAHA S, RASHID M, et al. Industrial wastewater treatment in CWs packed with construction materials and agricultural by-products[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 189:442-453.
- [23] FAN X, DU Y Y, LUO B, et al. Increasing plant diversity to mitigate net greenhouse effect of wastewater treatment in floating CWs[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 314:127955.
- [24] ZHANG L, WANG H, ZOU J W, et al. Non-native plant litter enhances soil carbon dioxide emissions in an invaded annual grassland[J]. *PLoS ONE*, 2014, 9:e92301.
- [25] 钟秋爽, 王世和, 孙晓文, 等. 曝气气水比对人工湿地处理效果的影响[J]. *环境工程*, 2008, 26(6):42-44. ZHONG Q S, WANG S H, SUN X W, et al. Influence of aerating gas-water ratio on treating effect of constructed wetland[J]. *Environmental Engineering*, 2008, 26(6):42-44.
- [26] APHA. Standard methods for the examination of water and wastewater, 21st ed[S]. APHA and AWWA, WEF: Washington DC, 2005.
- [27] WANG Y S, WANG Y H. Quick measurement of CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O emissions from a short-plant ecosystem[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2003, 5:842-844.
- [28] SONG T, ZHENG X, WANG Y, et al. Field measurement of NO and NO<sub>2</sub> exchanges between cultivated lands and the atmosphere in a FACE study[J]. *The Journal of Applied Ecology*, 2002, 13:1264-1268.
- [29] 宋亚丽, 王奇梁, 董秉直, 等. 微污染水源水中有机物的分布特征及微滤膜对其的影响作用[J]. *环境科学学报*, 2016, 36(10):3623-3628. SONG Y L, WANG Q L, DONG B Z, et al. Distribution characteristics of organic matters in micro-polluted water and variation after microfiltration[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36(10):3623-3628.
- [30] 魏东. 短程硝化反硝化工艺过程控制及N<sub>2</sub>O释放研究[D]. 济南: 山东大学, 2016:19-20. WEI D. Research on the process control of partial nitrification system and its N<sub>2</sub>O emission[D]. Jinan: Shandong University, 2016:19-20.
- [31] HUANG L, GAO X, GUO J S, et al. A review on the mechanism and affecting factors of nitrous oxide emission in CWs[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2013, 68:2171-2180.
- [32] CHON K, CHANG J S, LEE E, et al. Abundance of denitrifying genes coding for nitrate (*narG*), nitrite (*nirS*), and nitrous oxide (*nosZ*) reductases in estuarine versus wastewater effluent-fed CWs[J]. *Ecological Engineering*, 2009, 37:64-69.
- [33] HAN W J, CHNG J, FAN X, et al. Plant species diversity impacts nitrogen removal and nitrous oxide emissions as much as carbon addition in constructed wetland microcosms[J]. *Ecological Engineering*, 2015, 93:144-151.
- [34] LIANG B, WANG L Y, MBADINGA S M, et al. Anaerolineaceae and methanosaeta turned to be the dominant microorganisms in alkanes-dependent methanogenic culture after long-term of incubation[J]. *AMB Express*, 2015, 5:117-130.
- [35] HUANG L P, YE J Y, XIANG H W, et al. Enhanced nitrogen removal from low C/N wastewater using biodegradable and inert carriers: performance and microbial shift[J]. *Bioresource Technology*, 2020, 300:122658.