

舒 同, 周贝贝, 段婧婧, 等. 添加秸秆碳源对沟渠水体中氮素去除及温室气体排放的影响[J]. 江苏农业学报, 2023, 39(1): 81-87.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2023.01.010

添加秸秆碳源对沟渠水体中氮素去除及温室气体排放的影响

舒 同^{1,2}, 周贝贝³, 段婧婧^{1,2}, 马如龙¹, 薛利祥¹, 何世颖^{1,2}, 薛利红^{1,2}, 杨林章¹
(1.江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 江苏 南京 210014; 2.江苏大学环境与安全工程学院, 江苏 镇江 212013; 3.江苏开放大学环境生态学院, 江苏 南京 210017)

摘要: 为探究夏季添加纤维素类固体有机碳源(秸秆)对沟渠水体中氮素去除效果及温室气体排放的影响,在试验期内设定密集采样法代替常规采样法探究水体中氮质量浓度的变化,并通过静态箱-气相色谱法测定温室气体排放通量。结果表明,试验期间总氮(TN)质量浓度下降了35.9%,硝态氮(NO_3^- -N)去除率高达97.6%;温室气体排放较为稳定,氧化亚氮(N_2O)排放通量呈现昼高夜低的趋势,甲烷(CH_4)排放通量出现多个峰值。整体来看,添加秸秆增强了水体中氮素的去除效果,同时修正系数分析结果表明,试验初期温室气体排放通量变化较大,而在后期较稳定。因此,建议试验前期密集采样,后期可常规采样,后期最佳采样时间为9:00–11:00。

关键词: 秸秆; 碳源; 农业面源污染; 氮素; 温室气体

中图分类号: X522 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2023)01-0081-07

Changes of nitrogen removal and greenhouse gas emission in ditch water with straw carbon source

SHU Tong^{1,2}, ZHOU Bei-bei³, DUAN Jing-jing^{1,2}, MA Ru-long¹, XUE Li-xiang¹, HE Shi-ying^{1,2}, XUE Li-hong^{1,2}, YANG Lin-zhang¹

(1. Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 2. School of Environmental and Safety Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China; 3. College of Environment and Ecology, Jiangsu Open University, Nanjing 210017, China)

Abstract: In order to explore the nitrogen removal effect and greenhouse gas emission law in ditch water under the addition of cellulose solid organic carbon source (straw) in summer, dense sampling was set to replace the conventional sampling method to explore the change of nitrogen mass concentration in water during the experimental period, and the greenhouse gas emission flux was measured by static box gas chromatography. The results showed that the mass concentration of total nitrogen (TN) decreased by 35.9%, and the removal rate of nitrate nitrogen (NO_3^- -N) was as high as 97.6%. Greenhouse gas emissions were relatively stable, nitrous oxide (N_2O) emission flux showed a trend of high in the day and low at night, and methane (CH_4) emission flux showed multiple peaks. In conclusion, the addition of straw enhanced the removal efficiency of nitrogen in water. At the same time, the results of correction coefficient analysis indicated that the

greenhouse gas emission flux changed greatly in the early stage of the experiment and was relatively stable in the later stage. Therefore, it is suggested that intensive sampling should be carried out in the early stage, conventional sampling can be carried out in the later stage, and the best sampling time in the later stage is 9:00–11:00.

Key words: straw; carbon source; agricultural

收稿日期: 2022-03-28

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD1700803); 江苏省农业科技自主创新基金项目[CX(19)1007]

作者简介: 舒 同(1997-), 男, 陕西西安人, 硕士研究生, 从事农村低污染水生态化处理研究。(E-mail) chdjaas_st@163.com

通讯作者: 周贝贝, (E-mail) zhou_bae@163.com; 段婧婧, (E-mail) duanjingjing_23@163.com

non-point source pollution; nitrogen; greenhouse gas

目前,随着工业废水和城市生活污水等点源污染得到有效控制,农业面源污染已经取代点源污染成为水环境污染最重要的来源^[1]。太湖流域稻-麦轮作产生的氮径流损失是造成水体富营养化的重要氮素来源。范宏翔等^[2]研究发现,由于小麦苗期叶面积指数小、根系不发达,加上土壤裸露较多,导致约44%~57%的降水会通过径流迁移出农田;麦季径流中硝态氮的平均质量浓度可达 30 mg/L,远高于铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)的平均质量浓度,而稻季农田渗漏液中的氮素形态虽主要为铵态氮(>70%),但 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 随径流进入沟渠后经微生物作用会很快转化成硝态氮。同样的,对于设施菜地而言,普遍存在氮肥过量施用的现象,土壤淋洗液中通常携带大量硝态氮。陆扣萍等^[3]调查发现,在农民习惯施肥的条件下,番茄生长季移栽后 2 个月内土壤淋洗液中的硝态氮质量浓度为 31.6~54.4 mg/L,而番茄收获后揭棚期的淋洗液中硝态氮质量浓度可高达 95.5 mg/L。然而,由于农田排水中的有机碳含量较低,使得硝态氮的生物反硝化过程受到抑制,大量硝态氮随农田排水汇入农田周围的水体中,使得水质安全受到威胁。

为了促进以高硝态氮为主的低污染的反硝化脱氮,污水处理厂等通常选用价格较高的乙酸、乙醇、葡萄糖等可溶性碳来提高异养反硝化菌的活性,但是存在碳源投加量不足或容易过量的风险,造成出水水质恶化。因此在治理面源污染的过程中,研究者尝试用天然纤维素类碳源作为替代物用于促进氮素的去除,特别是锯末、秸秆、稻壳等理论上具有长期释碳特点,不仅能够发挥此类碳源的优点,同时也能够在一定程度上促进农业固体废弃物的资源化利用^[4-6]。Warneke 等^[7]对比了 5 种碳源材料对硝态氮的去除效果,发现玉米芯的去除效率最高,但其同时存在总有机碳(TOC)大量释放造成水体二次污染等不良影响,因此建议将玉米芯换为稳定的木屑组合以降低环境风险。孙凤海等^[8]探究了添加活性污泥条件下 3 种固体碳源(玉米芯、大豆壳、稻秆)的沉降性和可生化性,发现有皮玉米芯、稻秆的释碳品质优于大豆壳。然而,添加纤维素类碳源在促进去除低污染水体中氮素的同时是否会增加温室气体如甲烷(CH_4)、氧化亚氮(N_2O)等的排放还需进一步研究。

农田排水沟渠作为一种特殊的线性浅水湿地,在调节农田多余水分排放和物质循环方面发挥了重要作用^[9],其主要通过土壤吸附、植物吸收、生物降解等一系列过程降低农田排水中氮、磷等养分的含量,从而减少最终进入受纳水体的营养物质总量,减轻水体富营养化问题。但是目前人们对于农田排水沟渠的综合利用水平仍然较低^[10-11],可否将植物碳源材料应用于沟渠,从而促进农田排水反硝化脱氮仍然值得探讨。因此,研究如何更高效地发挥农田沟渠截留和净化低污染水体中氮、磷污染物的功能十分必要。本研究通过静态水箱试验模拟农田排水沟渠中以小麦秸秆作为外加碳源材料促进水体反硝化脱氮的过程,并测定温室气体日排放规律,从而确定污染水体温室气体观测的最佳时间,为探究外加碳源下水体氮素的去除能力及温室气体采集时间提供科学依据,并为后续试验提供参考和理论支持。

1 材料与方法

1.1 供试材料与试验处理

碳源材料选择江苏省农业科学院试验基地的小麦秸秆,将其自然风干后剪至 2~3 cm 长度备用。试验于 2020 年 7 月 30 日~8 月 5 日在江苏省农业科学院试验基地进行。用硝酸钾(分析纯)人工配制模拟的低污染水,调节总氮(TN)质量浓度为 15 mg/L,进水量约为 40 L。每个水箱(内径 355 mm,高 500 mm)底部用网袋装取等质量(230 g)的麦秸,上层用托盘装 2 kg 石英砂以保证碳源材料沉底。设置 3 个重复,将每天 07:00~19:00 的时间段划分为白天,19:00 至次日 07:00 的时间段划分为夜晚。将试验装置静置 12 h 后,同步采集温室气体和水样进行分析。

1.2 样品采集

1.2.1 气体样品采集与测定 采用静态箱法采集温室气体。试验前 3 d 进行连续 72 h 的观测,每 2 h 取样 1 次;试验后 4 d 只在白天(07:00~19:00)进行取样。静态箱由有机玻璃制成,箱体设有温度计及采样口。水箱上部四周设置宽为 5 cm 的水槽,采样时将静态箱置于水箱上部的水槽内并水封,同时在采样口安装双头阀门以保证箱内气体与外部大气独立。分别在关箱起始阶段与关箱后 10 min、20 min、30 min 用 20 ml 注射器来回抽动 3~4 次后在箱内抽取气体

并保存于真空玻璃瓶中,带回实验室进行分析,同时读取并记录箱内温度。

温室气体浓度用 Agilent 7890A 气相色谱仪测定,CH₄浓度用火焰离子化检测器(FID)测定,N₂O浓度用电子俘获检测器(ECD)测定,设2个检测器的操作温度均为300℃,柱箱温度均为60℃。气体排放通量的计算公式如下:

$$F = \rho \cdot h \cdot dc/dt \cdot 273/(273+T)^{[12]} \quad (1)$$

式中, F 为温室气体排放通量或吸收通量,mg/(m²·h); ρ 为气体的标准密度,kg/m³;h为静态箱有效高度,m;dc/dt为箱内温室气体浓度随时间变化的速率;T为箱内的平均温度,℃;273为理想气体常数。

1.2.2 温室气体日排放通量最佳采集时间的修正系数 以各时刻采集的温室气体的测定值与当日平均排放通量的计算值之比作为修正系数,可以估算最佳采集时间,计算公式如下^[13]:

$$C_i = F_{\text{avg}}/F_i \quad (2)$$

式中, C_i 为修正系数; F_{avg} 为温室气体日平均排放通量; F_i 为第*i*次观测的温室气体排放通量。

1.3 水样的采集

水样的采集与温室气体的采集同步。在水箱中部200 mm处设置1个取样口并连接硅胶管(长约50 cm,内径4 mm,外径6 mm),取样时打开硅胶管上的止水夹,使约100 ml的水样缓慢流入取样瓶内,过滤后保存于4℃冰箱中。

1.4 数据处理

用Excel进行数据处理,本试验中的误差用标准差表示。用SPSS中的单因素方差分析法进行各处理间的差异显著性检验,用Origin 2019b进行绘图。

2 结果与分析

2.1 对水体氮素的去除效果

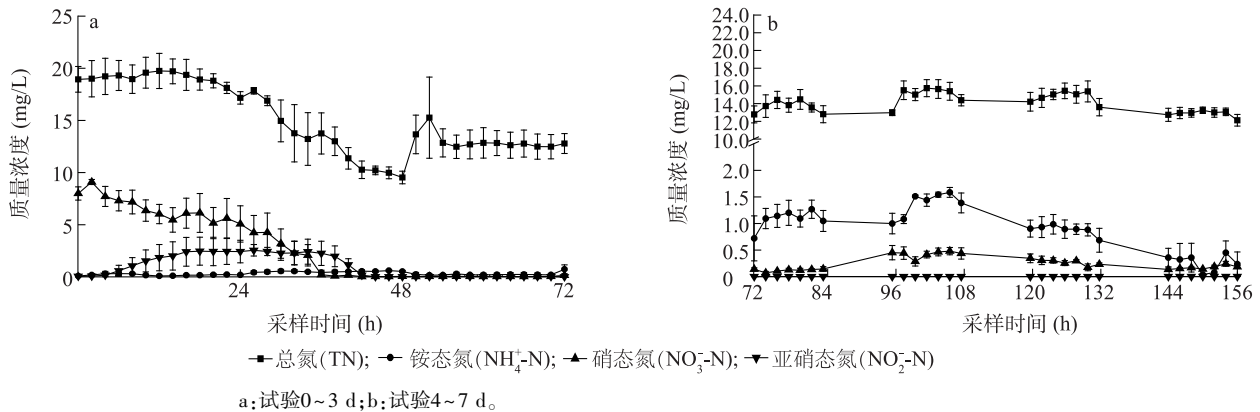
添加小麦秸秆后的前3 d,模拟污水中的TN、NH₄⁺-N(铵态氮)、NO₃⁻-N(硝态氮)和NO₂⁻-N(亚硝态氮)质量浓度的动态变化见图1a。可以看出,水体中不同形态氮的质量浓度在添加小麦秸秆后前2 d变化较为剧烈。在添加小麦秸秆后前24 h,水体TN质量浓度维持在较高水平(17.16~19.74 mg/L),NO₃⁻-N质量浓度呈现逐步下降的趋势,而NO₂⁻-N质量浓度则从0 mg/L上升至2.45 mg/L。在试验第2 d,TN质

量浓度出现明显下降,最低值仅为9.97 mg/L,较初始质量浓度下降了47.4%;NO₃⁻-N质量浓度在第36 h几乎降为0;NO₂⁻-N质量浓度在试验第1 d累积后开始下降,在试验第40 h几乎降为0。NH₄⁺-N的质量浓度始终较低,在试验第3 d,不同形态氮的质量浓度趋于稳定,TN质量浓度维持在12 mg/L左右,无明显波动,较初始质量浓度下降了34.1%,NH₄⁺-N、NO₃⁻-N和NO₂⁻-N的质量浓度维持在较低水平。

由图1b可以看出,从试验第4 d开始,由于水体氮素质量浓度变化平稳且数值较低,故只在白天进行采样。TN质量浓度整体呈下降趋势,最终稳定在13.0 mg/L以下。同时观察到,TN质量浓度呈波动变化,在试验第4~7 d的7:00~11:00时间段,TN质量浓度分别上升了12.79%、15.77%、5.78%与1.71%,在15:00~19:00时间段则,TN质量浓度则下降。NH₄⁺-N质量浓度在试验的第96~108 h略有上升,之后降至较低水平。NO₃⁻-N、NO₂⁻-N质量浓度无明显波动,始终处于较低水平。

2.2 温室气体(N₂O、CH₄)排放通量的变化

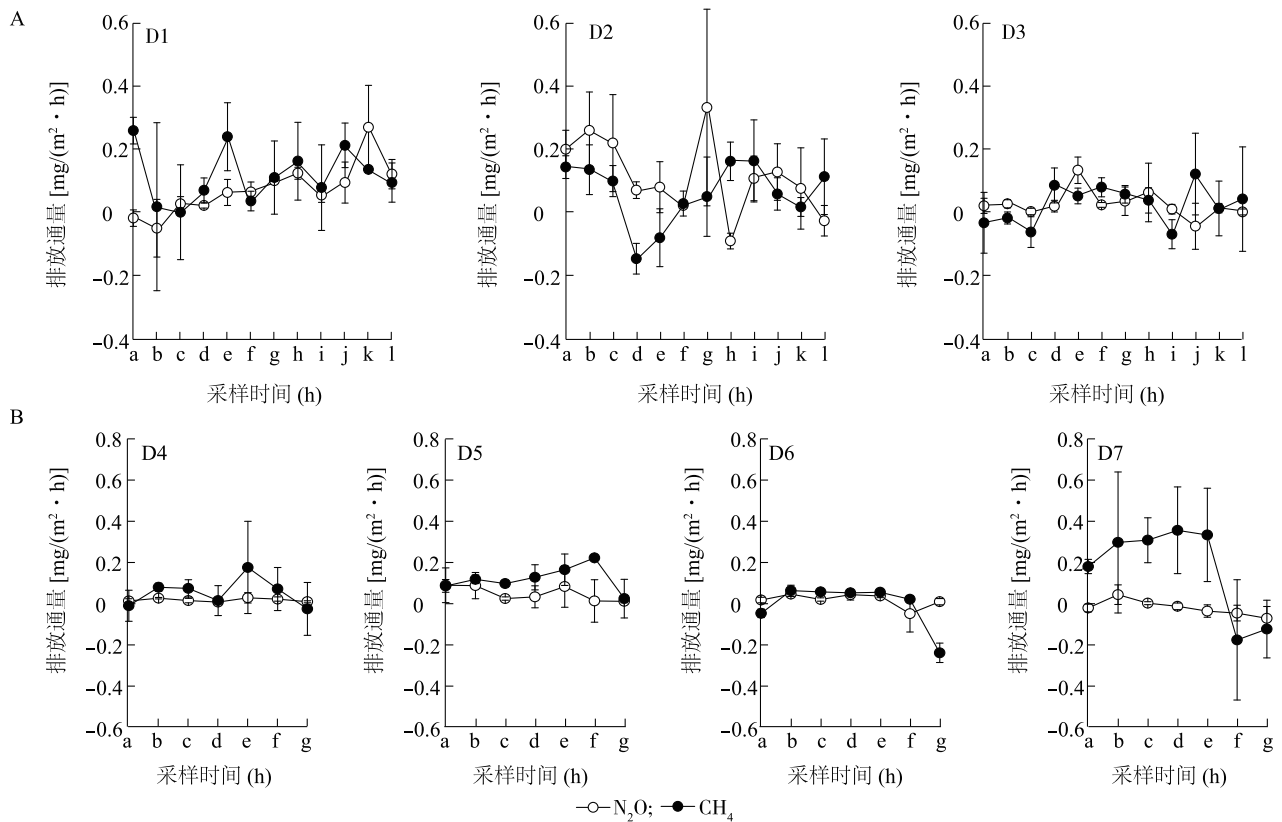
如图2所示,在添加小麦秸秆后前3 d,N₂O排放通量的变化范围为-0.099 1~0.334 4 mg/(m²·h),在试验后第4 d至第7 d N₂O排放通量的变化范围为-0.072 7~0.086 0 mg/(m²·h);在添加小麦秸秆后前3 d CH₄排放通量的变化范围为-0.081 0~0.260 8 mg/(m²·h),在试验第4 d至第7 d CH₄排放通量的变化范围为-0.240 4~0.355 1 mg/(m²·h)。在试验第1 d,N₂O排放通量整体呈上升趋势,至次日03:00时达到1个峰值。在试验第2 d的19:00和第3 d的15:00,N₂O的排放通量达到当日峰值,而后下降,大致呈现昼高夜低的现象。CH₄排放通量在试验第1 d表现为波动上升趋势,白天在07:00、15:00时出现明显的排放峰,分别达0.260 8 mg/(m²·h)、0.241 5 mg/(m²·h),夜间的CH₄排放通量变化相对平稳但始终维持在较高值;而在试验第2 d、3 d的表现则与N₂O相反,排放峰分别出现在23:00、01:00,同时观察到试验第3 d的CH₄整体排放强度弱于试验第1 d、2 d。在试验第4 d至第7 d,N₂O排放通量的变化趋势较为稳定且未出现排放峰值;CH₄排放通量在试验第7 d出现峰值,07:00~15:00间的排放通量为0.179 2~0.355 1 mg/(m²·h),而当日平均排放通量为0.166 8 mg/(m²·h),明显高于试验第4 d、5 d、6 d。



a: 试验0~3 d; b: 试验4~7 d。

图1 试验0~3 d (a) 和4~7 d (b) 水体氮素质量浓度的变化

Fig.1 Changes of nitrogen mass concentration in water in 0-3 d (a) and 4-7 d (b)



D1~D7 表示试验第1~7 d。a: 07:00; b: 09:00; c: 11:00; d: 13:00; e: 15:00; f: 17:00; g: 19:00; h: 21:00; i: 23:00; j: 01:00; k: 03:00; l: 05:00。

图2 试验0~3 d (A) 和4~7 d (B) N₂O、CH₄排放通量的日变化

Fig.2 Diurnal variations of N₂O and CH₄ emission fluxes during 0-3 d (a) and 4-7 d (b) in experiments

由图3可以看出, N₂O集中在试验第1 d的夜晚、第2 d的白天排放, 分别达到当日总排放量的72.3%、76.2%, 而在试验第3 d起日累积排放量就有明显下降, 而后始终保持在较低水平。其中, 试验第2 d白天的N₂O累积排放量显著高于其他6 d。CH₄的日累积排放量在前2 d均呈昼低夜高的趋势, 夜间的CH₄累积排放量分别达到当日总排放量的

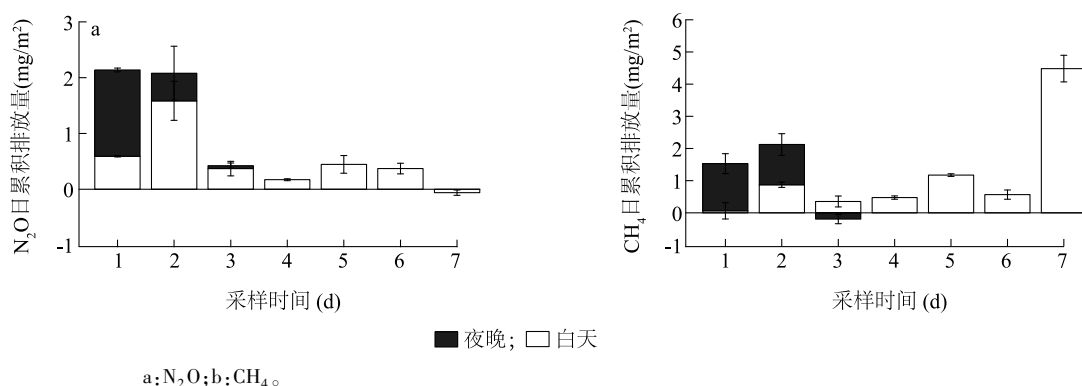
95.4%、62.9%, 而在试验第3 d夜间累积CH₄排放量下降至负值; 在试验第7 d, CH₄的日累积排放量高达4.48 mg/m², 高于试验第4 d、5 d、6 d这3 d的总和, 占7 d白天CH₄总排放量的56.2%。

2.3 温室气体(N₂O、CH₄)排放的最佳观测时间

在本研究中, N₂O、CH₄排放通量的矫正系数随采样次数的变化见图4, N₂O、CH₄排放通量的矫正

系数越接近 1,则说明该时间段内的气体排放通量越接近其日平均排放通量。在试验 0~3 d(试验初期), N_2O 日累积排放通量的最佳观测时间为 15:00–19:00、01:00–03:00; CH_4 日累积排放通量的

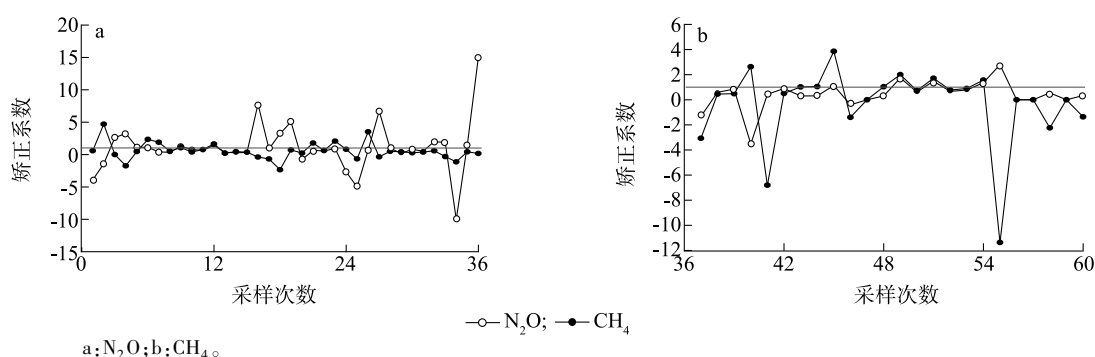
最佳观测时间为 21:00–23:00。在试验 4~7 d, N_2O 日累积排放通量的最佳观测时间为 09:00–11:00, CH_4 日累积排放通量的最佳观测时间为 07:00–11:00。



a: N_2O ; b: CH_4 。

图3 试验 7 d 的 N_2O 与 CH_4 日累积排放量

Fig.3 Daily cumulative emissions of N_2O and CH_4 during seven days of the experiment



a: N_2O ; b: CH_4 。

图4 N_2O 、 CH_4 日排放通量的修正系数随采样次数的分布

Fig.4 Distribution of correction coefficients of daily N_2O and CH_4 emission fluxes with sampling times

3 讨论

3.1 添加植物碳源材料对水体反硝化脱氮的影响

异养反硝化是去除水体硝态氮的重要生物化学过程,异养反硝化菌利用碳源作为电子供体将硝态氮还原成 N_2O 和 N_2 , 最终实现水体氮的脱除^[14]。许多农业废弃物如小麦、水稻秸秆、木屑以及许多湿地植物如香蒲、水葱等本身含有丰富的纤维素、半纤维素等,在纤维素分解菌的作用下可释放出单糖和其他营养元素,亦可作为反硝化碳源^[15-17]。相较于简单有机碳源,复杂有机碳化合物既能作为反硝化细菌生长代谢的物质和能量来源,又可以作为生物的附着载体,为反硝化细菌提供稳定的环境,从而提高反硝化细菌的数量和活性^[18]。Fu 等^[19]将芦竹和鱼腥草混合作为外源碳添加到室内模拟人工湿地装

置中,发现 TN 去除效率由 33.78% 提高到 92.80%,并且显著增加了亚硝酸盐还原酶编码基因 *nirS* 的数量,表明植物生物质外源碳有利于促进反硝化细菌的生长繁殖,从而促进反硝化脱氮。本研究将小麦秸秆作为碳源用于增强水体中 NO_3^- -N 的去除,效果良好。模拟污水中的硝态氮含量在添加小麦秸秆后 2 d 即可降至 0.02 mg/L。但是,虽然小麦秸秆可以有效减少硝态氮含量,但是小麦秸秆在添加初期分解过程中可能会释放大量有机氮,导致模拟污水中的总氮含量升高,使得总氮去除效果变差,因此利用植物生物质促进污水中硝态氮反硝化时要同时考虑植物碳源材料的特性并选择合适添加量。

3.2 添加植物碳源材料对水体 N_2O 排放的影响

在低氧或厌氧条件下,反硝化细菌将硝酸盐最终还原成氮气需要经过一系列还原反应($NO_3^- \rightarrow$

$\text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO} \rightarrow \text{N}_2\text{O} \rightarrow \text{N}_2$), 其中 N_2O 作为重要的中间产物伴随反硝化过程而生成^[20]。将植物碳源材料添加到污水中, 其氧化腐解过程会消耗水体中的氧气, 有利于加速厌氧还原条件的形成, 从而为微生物反硝化作用提供有利的环境条件。王正等^[21]的研究结果证实了这一点, 他们发现植物残体淹水后上覆水的溶解氧浓度在试验前期比较低, 第7 d 开始出现缓慢上升。有研究发现, 影响水体反硝化过程中 N_2O 释放的主要因素有碳氮比、硝酸盐浓度、溶解氧浓度、温度以及碳源类型等^[22-23]。本试验在模拟污水中添加小麦秸秆后, 初期 NO_3^- 质量浓度较高, N_2O 排放主要集中在前2 d 并在0~12 h 逐渐增加达到峰值; 此时 NO_3^- -N 不断消耗, 但是水中可溶性碳消耗得较慢, 导致 NO_2^- -N 积累, 该结果与翟晓峰等^[24]的结果一致。 NO_3^- -N 质量浓度在第2 d 降到较低水平, 而后 N_2O 排放通量也维持在较低水平。 N_2O 排放通量存在昼夜差异, 白天排放通量高而晚上排放通量低。不同地区、不同水文等条件下, 温室气体的排放具有较大差异, 董宏伟^[25]指出, 中国绵阳地区丘陵农田部分沟渠无外加碳源条件下的 N_2O 排放通量为 $0.0012 \sim 0.4415 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 而 Hasegawa 等^[26]测定日本一处农业区河流的 N_2O 排放通量最高值达到了 $56.5 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。因此综合来看, 本试验添加秸秆后水体中 N_2O 排放通量略高于湖泊自然水体^[20], 但并未发现温室气体有明显增加的风险。

3.3 添加植物碳源材料对水体 CH_4 排放的影响

CH_4 是在极端厌氧条件下由产甲烷菌产生的, 植物碳源材料添加到污染水体中后其分解过程必然消耗大量氧气, 促进水体厌氧环境的形成, 从而有利于水体中 CH_4 的产生和排放, 同时植物生物质分解产生的可溶性有机碳也可作为产甲烷前体促进水体中 CH_4 排放。本试验对添加小麦秸秆后模拟污水的甲烷排放情况进行测定并揭示了其昼夜排放规律。王正等^[21]通过室内模拟淹水试验发现, 苍耳和鬼针草等植物残体淹水后 CH_4 排放速率不断增加并在第7~10 d 达到峰值, 第20~30 d 时 CH_4 排放速率降至较低水平。陈敏等^[27]对湖北宜昌官庄水库的 CH_4 排放情况进行了连续7 d 的监测, 其 CH_4 排放通量为 $0.007 \sim 0.077 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 6 d 监测期内 CH_4 排放通量均未呈现一致的昼夜变化特征。本试验中

CH_4 排放通量在前2 d 呈现较为明显的昼低夜高现象, 第3~6 d 排放通量为 $-0.2876 \sim 0.5342 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 第7 d 时有较高排放通量但仍低于董宏伟^[25]在沟渠中得到的排放通量 $[-0.04 \sim 44.8 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})]$ 的高值。

温室气体排放具有很大的时空差异性^[28-35], 因此在不同季节、不同地点等前提下, 为最大程度保证观测结果的准确性, 应选择1 d 中最具有代表性的时刻进行观测。本试验中, 初期最佳观测时间主要集中在夜晚, 因此, 考虑到整个试验期内矫正系数分布及实际采样的难易程度, 建议前3 d 应密集采样, 分别于9:00-11:00、17:00-19:00 2 个时间段采集样品并取均值, 而中后期的采样时间以9:00-11:00 为最佳。

4 结论

本试验探讨了外加碳源对低污染水体在夏季高温天气下氮素的去除效果以及温室气体排放特征, 结果表明: (1) 外加小麦秸秆固体碳源对低污染水体中 NO_3^- -N 的去除率高达97.6%, 对TN 的去除率可达35.9%, 具有良好的效果。(2) 温室气体排放整体较为稳定, 未发现大幅增排的风险。 N_2O 排放通量具有明显的昼高夜低趋势; CH_4 排放通量在试验期内出现多个峰值且以第7 d 白天最高, 试验第1 d、第2 d 夜晚的累积排放量高于白天。(3) 矫正系数与采样时间分布结果表明, 在夏季高温情况下, 添加秸秆碳源水体后期(3 d 后) 的最优观测时间为9:00-11:00。

参考文献:

- [1] 杨林章, 薛利红, 施卫明, 等. 农村面源污染治理的“4R”理论与工程实践——案例分析[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(12): 2309-2315.
- [2] 范宏翔, 徐力刚, 赵旭, 等. 太湖流域典型稻-麦轮作农田区氮素流失过程研究[J]. 生态环境学报, 2015, 24(2): 255-262.
- [3] 陆扣萍, 闵炬, 李蒙, 等. 施氮量对太湖地区设施菜地年氮素淋失的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(4): 706-712.
- [4] LI E H, LI W, WANG X L, et al. Experiment of emergent macrophytes growing in contaminated sludge: implication for sediment purification and lake restoration [J]. Ecological Engineering, 2009, 36(4): 427-434.
- [5] MOORMAN T B, PARKIN T B, KASPAR T C, et al. Denitrifica-

- tion activity, wood loss, and N_2O emissions over 9 years from a wood chip bioreactor[J]. *Ecological Engineering*, 2010, 36(11): 1567-1574.
- [6] 杨 敏,孙永利,郑兴灿,等. 不同外加碳源的反硝化效能与技术经济性分析[J]. *给水排水*, 2010, 46(11): 125-128.
- [7] WARNEKE S, SCHIPPER L A, MATIASSEK M G, et al. Nitrate removal, communities of denitrifiers and adverse effects in different carbon substrates for use in denitrification beds[J]. *Water Research*, 2011, 45(17): 5463-5475.
- [8] 孙凤海,刘昱迪,方远航,等. 活性污泥作用下固体碳源释碳及脱氮性能比选[J]. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)*, 2017, 33(1): 111-118.
- [9] KLEINMAN P J A. Managing drainage ditches for water quality [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 62(4): 80A.
- [10] 姜翠玲,崔广柏,范晓秋,等. 沟渠湿地对农业非点源污染物的净化能力研究[J]. *环境科学*, 2004(2): 125-128.
- [11] KRÖGER R, MOORE M T, LOCKE M A, et al. Evaluating the influence of wetland vegetation on chemical residence time in Mississippi Delta drainage ditches [J]. *Agricultural Water Management*, 2009, 96(7): 1175-1179.
- [12] WANG W Q, SARDANS J, WANG C, et al. Relationships between the potential production of the greenhouse gases CO_2 , CH_4 and N_2O and soil concentrations of C, N and P across 26 paddy fields in southeastern China[J]. *Atmospheric Environment*, 2017, 164: 458-467.
- [13] 田慎重,宁堂原,迟淑筠,等. 不同耕作措施的温室气体排放日变化及最佳观测时间[J]. *生态学报*, 2012, 32(3): 879-888.
- [14] PFANNERSTILL M, KÜHLING I, HUGENSCHMIDT C, et al. Reactive ditches: a simple approach to implement denitrifying wood chip bioreactors to reduce nitrate exports into aquatic ecosystems? [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(13): 1063.
- [15] LOPEZ-PONNADA E V, LYNN T J, ERGAS S J, et al. Long-term field performance of a conventional and modified bioretention system for removing dissolved nitrogen species in stormwater runoff [J]. *Water Research*, 2020, 170: 115336.
- [16] LIU F, WANG Y, XIAO R L, et al. Influence of substrates on nutrient removal performance of organic channel barriers in drainage ditches[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 527: 380-386.
- [17] 严群芳,张世其,蔡秀萍,等. 农作物副产品用作废水处理固体碳源[J]. *江苏农业科学*, 2016, 44(9): 462-464.
- [18] 杨 珊,石纹豪,王 晗,等. 外加碳源影响水体异养反硝化脱氮的研究进展[J]. *环境科学与技术*, 2014, 37(8): 54-58, 86.
- [19] FU G P, HYANGSHENG 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.
- [20] 谭永洁,王东启,周立旻,等. 河流氧化亚氮产生和排放研究综述[J]. *地球与环境*, 2015, 43(1): 123-132.
- [21] 王 正,胡 磊,朱 波. 三峡水库消落带优势草本植物残体淹水后温室气体排放特征[J]. *长江流域资源与环境*, 2020, 29(9): 1965-1974.
- [22] 孙英杰,吴 昊,王亚楠. 硝化反硝化过程中 N_2O 释放影响因素[J]. *生态环境学报*, 2011, 20(2): 5.
- [23] 张 芳,易 能,张振华,等. 不同类型水生植物对富营养化水体氮转化及环境因素的影响[J]. *江苏农业学报*, 2015, 31(5): 1045-1052.
- [24] 翟晓峰,蒋成爱,吴光学,等. 以甲醇为碳源生物反硝化过程释放一氧化二氮的试验研究[J]. *环境科学*, 2013, 34(4): 1421-1427.
- [25] 董宏伟. 川中丘陵区沟渠生态系统 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 通量特征及其影响因素[D]. 重庆:重庆师范大学, 2015.
- [26] HASEGAWA K, HANAKI K, MATSUO T, et al. Nitrous oxide from the agricultural water system contaminated with high nitrogen [J]. *Chemosphere - Global Change Science*, 2000, 2(3/4): 335-345.
- [27] 陈 敏,许浩霆,郑祥旺,等. 夏季降雨事件对水库温室气体通量变化的影响:来自湖北官庄水库的高频观测[J]. *湖泊科学*, 2021, 33(6): 1857-1870.
- [28] 杨滨娟,邓丽萍,袁嘉欣,等. 稻田复种轮作下周年温室气体排放及综合效益评价[J]. *江苏农业科学*, 2022, 50(2): 225-231.
- [29] 郭 亮,丁九敏,徐 侠. 树干甲烷的研究进展[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2021, 45(5): 235-241.
- [30] 吴文丽,谢英添,董晓鸣,等. 塑料中棚番茄有机肥与化肥配施能耗与温室气体排放评估[J]. *江苏农业学报*, 2021, 37(6): 1516-1525.
- [31] 杨慰贤,覃锋燕,刘彦汝,等. 粉垄耕作与氮肥减施对木薯地土壤温室气体排放及土壤酶活性的影响[J]. *南方农业学报*, 2021, 52(9): 2426-2437.
- [32] 刘 天,云 菲,蒋伟峰,等. 农田施用生物炭的固碳减排效应及其影响因素综述[J]. *江苏农业科学*, 2021, 49(18): 7-13.
- [33] 杨红强,余智涵. 全球木质林产品碳科学研究动态及未来的重点问题[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2021, 45(4): 219-228.
- [34] 周 炜,张岳芳,朱普平,等. 种植制度对长江下游稻田温室气体排放的影响[J]. *江苏农业学报*, 2017, 33(2): 340-345.
- [35] 郎 漫,李 平,魏 玮. 不同质地黑土净氮转化速率和温室气体排放规律研究[J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39(2): 429-436.

(责任编辑:徐 艳)