农业环境科学学报
JOURNAL OF AGRO-ENVIRONMENT SCIENCE
中文核心期刊/CSCD
请通过网上投稿系统投稿
网址：http://www.aes.org.cn

秸秆配施蓝藻和针铁矿对黑土区稻田土壤温室气体排放的影响

樊聪聪, 吴帆, 赵丽霞, 梁玉婷, 肖娴, 蔡浩, 赵远, 王晓玥

引用本文:
樊聪聪, 吴帆, 赵丽霞, 等. 秸秆配施蓝藻和针铁矿对黑土区稻田土壤温室气体排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2025, 44(12): 3282-3292.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.11654/jaes.2024-1027

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

巢湖圩区再生稻田甲烷及氧化亚氮的排放规律研究
王天宇, 樊迪, 宋开付, 张广斌, 徐华, 马静
农业环境科学学报. 2021, 40(8): 1829-1838 https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0181

有机无机肥配施对苹果园温室气体排放的影响
马艳婷, 赵志远, 冯天宇, SOMPOUVISETThongsouk, 孔旭, 翟丙年, 赵政阳
农业环境科学学报. 2021, 40(9): 2039-2048 https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1477

生物基包膜抑制型尿素对土壤温室气体排放及小青菜产量的影响
刘楚桐, 陈松岭, 邹洪涛, 叶旭红, 陈春羽, 雷洋, 张玉龙
农业环境科学学报. 2021, 40(3): 677-684 https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0658

厢作免耕下生态种养对稻田CH_4和N_2O排放的影响
陈璐, 陈灿, 黄璜, 任勃, 王忍, 梁玉刚, 周晶
农业环境科学学报. 2021, 40(6): 1354-1365 https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0015

种植年限对京郊设施菜地温室气体排放的影响
王学霞, 张磊, 张卫东, 倪小会, 王甲辰, 曹兵, 刘东生
农业环境科学学报. 2021, 40(7): 1601-1610 https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1276

关注微信公众号，获得更多资讯信息

樊聪聪，吴帆，赵丽霞，等. 秸秆配施蓝藻和针铁矿对黑土区稻田土壤温室气体排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2025, 44(12): 3282-3292.
FAN C C, WU F, ZHAO L X, et al. Impacts of straw incorporation with nitrogen-fixing cyanobacteria and goethite on greenhouse gas emissions from paddy soils in the black soil region[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2025, 44(12): 3282-3292 .

开放科学OSID

秸秆配施蓝藻和针铁矿对黑土区稻田土壤温室气体排放的影响

樊聪聪[1]，吴帆[1]，赵丽霞[2]，梁玉婷[2]，肖娴[1]，蔡浩[1]，赵远[1*]，王晓玥[2*]

（1.常州大学环境科学与工程学院，江苏 常州 213164；2.中国科学院南京土壤研究所，南京 211135）

摘　要：为探明使用针铁矿作为减排材料对蓝藻与秸秆配施下稻田土壤温室气体排放的影响及其微生物学机制，采集东北黑土区白浆型水稻土，开展100 d、温度为20 ℃的室内淹水培养实验，设置4个处理：秸秆（S）、秸秆+针铁矿（SFe）、秸秆+蓝藻（SB）和秸秆+针铁矿+蓝藻（SFeB）。分析各处理中温室气体排放量、土壤可溶性有机碳（DOC）、NO_3^--N、NH_4^+-N、Fe^{2+}，以及碳氮转化功能基因的丰度。结果表明：与S处理相比，SB处理虽然使CO_2累积排放量降低了11.58%，但使CH_4和N_2O，累积排放量分别提高了54.47%和84.05%，全球增温潜势（*GWP*）增加了57.69%。与SB处理相比，SFeB处理使CH_4和N_2O的累积排放量分别降低了10.31%和38.79%，*GWP*降低了13.69%。此外，与S处理相比，SFe、SB和SFeB处理均显著改变了土壤理化性质以及与温室气体排放相关的微生物群落丰度。通过相关性和随机森林模型分析，确定DOC、NO_3^--N、NH_4^+-N以及*mcrA*与*nirS*功能基因丰度是温室气体排放的主要因子。研究表明，与单独添加秸秆相比，秸秆配施蓝藻会促进黑土区水稻土温室气体的排放，通过添加针铁矿可以有效抑制秸秆配施蓝藻的水稻土中CH_4和N_2O的排放，从而缓解*GWP*的加剧。

关键词：固氮蓝藻；针铁矿；秸秆还田；温室气体；功能基因

中图分类号：X71；X16；S154　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1672-2043(2025)12-3282-11　　doi:10.11654/jaes.2024-1027

Impacts of straw incorporation with nitrogen-fixing cyanobacteria and goethite on greenhouse gas emissions from paddy soils in the black soil region

FAN Congcong[1], WU Fan[1], ZHAO Lixia[2], LIANG Yuting[2], XIAO Xian[1], CAI Hao[1], ZHAO Yuan[1*], WANG Xiaoyue[2*]

(1. School of Environmental Science and Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China; 2. Nanjing Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, China)

Abstract: To investigate the effects of using goethite as a mitigation material on greenhouse gas emissions from paddy soil under the co-application of nitrogen-fixing cyanobacteria and rice straw, as well as its microbial mechanisms, a 100-day waterlogged incubation experiment was conducted at a constant temperature of 20 ℃ using albic paddy soil from the black soil region in northeast China. Four treatments were established: straw (S), straw + goethite (SFe), straw + nitrogen-fixing cyanobacteria (SB), and straw + goethite + nitrogen-

收稿日期：2024-11-25　　**录用日期：**2025-03-12

作者简介：樊聪聪（1999—），女，硕士研究生，主要研究方向为土壤碳循环。E-mail：tucciafan@foxmail.com

***通信作者：**赵远　E-mail：zhaoyuan@cczu.edu.cn；王晓玥　E-mail：wangxy@issas.ac.cn

基金项目：中国科学院战略性先导科技专项（XDA28030102）；国家自然科学基金项目（U24A20632）；江苏省农业科技自主创新项目（CX（24）3117）；南京土壤所自主部署项目（ISSAS2401）；江苏省研究生科研与实践创新计划项目（SJCX24_1647）；常州市科技支撑计划项目（CE20235036）；常州市科技支撑计划项目（CE20232021）

Project supported: Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (XDA28030102); National Natural Science Foundation of China (U24A20632); Independent Innovation Program of Agricultural Science and Technology in Jiangsu Province (CX(24)3117); Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences Independent Deployment Project (ISSAS2401); Postgraduate Research & Practice Innovation Program of Jiangsu Province (SJCX24_1647); Changzhou Science and Technology Support Program (CE20235036); Changzhou Science and Technology Support Program (CE20232021)

fixing cyanobacteria（SFeB）. Greenhouse gas emissions, soil DOC, NO_3^--N, NH_4^+-N, Fe^{2+}, and the abundance of functional genes involved in carbon and nitrogen transformation were analyzed. Compared to the S treatment, the SB treatment reduced cumulative CO_2 emissions by 11.58%, while increasing CH_4 and N_2O emissions by 54.47% and 84.05%, respectively, ultimately leading in a 57.69% rise in global warming potential（*GWP*）. Compared to the SB treatment, the SFeB treatment reduced cumulative emissions of CH_4 and N_2O by 10.31% and 38.79%, respectively, while decreasing the *GWP* by 13.69%. Moreover, compared to the S treatment, the SFe, SB, and SFeB treatments significantly altered soil chemical properties and the abundance of microbial communities associated with greenhouse gas emissions. Based on correlation analysis and random forest modeling, soil DOC, NO_3^--N, NH_4^+-N, and the abundance of *mcrA*, and *nirS* genes were identified as key drivers of greenhouse gas emissions. This study revealed that compared to straw addition alone, the co-application of straw and nitrogen-fixing cyanobacteria significantly enhanced greenhouse gas emissions in paddy soils in the black soil regions. However, the addition of goethite effectively suppressed CH_4 and N_2O emissions induced by straw-cyanobacteria co-application in paddy soils, thereby mitigating the *GWP*.

Keywords：nitrogen-fixing cyanobacteria; goethite; straw return; greenhouse gases; functional genes

农业生态系统排放的温室气体占陆地生态系统总排放的23%~30%[1]，其中稻田由于长期处于淹水厌氧状态而成为CH_4和N_2O等温室气体的重要排放源。我国稻田排放的温室气体约占农业生态系统温室气体排放的51.07%[2]。东北黑土区稻田因其土壤有机碳库储量大，加之独特的白浆层导致铁铝氧化物淋失严重[3]，削弱了土壤对可溶性有机碳（DOC）的吸附能力[4]，对温室气体排放贡献显著。有研究预测，在有机物料还田等土壤培肥措施下，10 a后黑土区稻田CH_4等温室气体的排放量可能增加17.8%~63.6%[5]。因此，如何兼顾粮食增产、稻田土壤培肥与温室气体减排，是实现黑土区稻田绿色发展的关键问题。

长期不合理的耕作管理导致黑土区稻田土壤肥力严重退化。单一秸秆还田难以高效提升土壤有机质且加剧温室气体的排放[6]，其高碳氮比的特性会引发微生物与作物竞争氮素，抑制作物生长[7]。相关研究表明，添加绿肥、粪肥等低碳氮比物料可通过调控碳氮比促进秸秆腐解，提升固碳效率与作物产量[8]。多元有机物料配施对温室气体排放的影响在南方稻田中有较多研究[9-10]，但针对东北黑土区稻田的系统研究仍较为匮乏。

蓝藻作为兼具生物固氮与有机碳输入的绿肥资源[11]，可通过转氨酶将大气氮转化为铵态氮，从而有助于化肥减施和作物增产[12-13]，但其对温室气体排放的影响研究有限。针对亚热带的研究表明，蓝藻输入为土壤微生物提供了大量可利用碳源和氮源，从而引发稻田温室气体排放量增加[14]。而在我国东北黑土冷凉区稻田施用蓝藻的温室效应尚未明确，同时蓝藻和秸秆配施影响温室气体排放的机制仍需深入探究。

施用温室气体减排材料是缓解稻田温室气体排放的有效途径。针铁矿（α-FeOOH）作为一种温室气体减排材料，由于环境友好、容易获得而被关注[15]。在淹水条件下铁氧化物通过多种途径协同抑制CH_4和N_2O的排放，铁-碳耦合是影响土壤有机碳固持和温室气体排放的关键[16]。DOC与铁氧化物通过表面络合和胶结作用形成稳定的铁结合态有机碳（Fe-OC）[17]，其能显著降低DOC的生物有效性，减少产甲烷菌的底物供应[18]，从而抑制CH_4生成[19-20]。同时，针铁矿作为电子受体驱动异化铁还原，促使铁还原菌（如地杆菌属）与产甲烷菌竞争H_2/乙酸等电子供体，进一步抑制CH_4的生成[21]。此外，在厌氧条件下Fe^{3+}通过Feammox反应直接参与硝化作用促进N_2生成，减少N_2O排放[22]。但目前针对针铁矿在蓝藻和秸秆配施条件下对温室气体排放的影响缺乏系统评价，其作用机制仍有待研究。

基于上述背景与现状，本研究以秸秆配施蓝藻及针铁矿对黑土区稻田温室气体排放的影响为研究核心，开展室内培养试验。通过气相色谱和荧光定量PCR等技术手段，研究秸秆配施蓝藻下温室气体排放的特征，评估针铁矿对秸秆配施蓝藻下温室气体的减排效应，并初步阐释其微生物学机制，以期为稻田土壤固碳减排提供理论依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤采集自黑龙江省佳木斯市二道河农场水稻田（47°43′41″N，134°16′48″E），该地属冷温带季风气候区，年均温3.4 ℃，年均降雨量954.7 mm。土壤类型为白浆型水稻土。土样自然风干过10目筛。其基本理化性质为：pH 5.64、有机碳23.37 g·kg^{-1}、全氮1.81 g·kg^{-1}、全磷0.59 g·kg^{-1}、全铁17.00 g·kg^{-1}。供试蓝藻为中国科学院水生生物研究所提供的

Anabaena azotica(FACHB-119)蓝藻,经扩大培养后,采用离心法获得浓缩藻液,含蓝藻量为1.24 g·L^{-1},收获后1 d内使用。蓝藻烘干后测定其干基的理化性质:全碳425.51 g·kg^{-1}、全氮57.20 g·kg^{-1}、全磷12.11 g·kg^{-1}。供试水稻秸秆采集自盆栽成熟期水稻,其养分含量为:全碳452.69 g·kg^{-1}、全氮5.57 g·kg^{-1}、全磷1.59 g·kg^{-1}。本试验添加针铁矿粉末(Sigma-Aldrich,纯度为63%)调节土壤铁含量,添加量为本底值的100%[23]。

1.2 试验设计

采用微宇宙试验探究添加针铁矿和蓝藻对秸秆还田过程中水稻土温室气体排放的影响。试验设置4个处理:水稻秸秆(S);水稻秸秆+针铁矿(SFe);水稻秸秆+蓝藻(SB);水稻秸秆+针铁矿+蓝藻(SFeB)。每组处理设置3个重复。其中,水稻秸秆粉碎后过2 mm筛,各处理添加量按每千克风干土中添加10 g秸秆(即质量分数为1%)计算;SB和SFeB处理中蓝藻均以藻液形式添加,添加量根据蓝藻能提供N 45 kg·hm^{-2}换算,即相当于112.50 mg干藻的藻液;SFe和SFeB处理中针铁矿的添加量为4 g,添加量为供试土壤全铁含量的100%[23]。

在150 g供试土样中逐样添加秸秆、蓝藻和针铁矿,使用去离子水调节液面至覆盖土壤2~3 cm,在培养箱中培养100 d,每7 d称质量补水,保持土壤淹水状态。培养温度根据采样地点秸秆腐解和温室气体排放高峰期(5—8月)近3 a的月均温确定,为20 ℃。培养过程中对瓶内气体进行取样。培养结束后,对土壤进行破坏性取样,部分鲜样保存于-80 ℃冰箱用于微生物群落丰度的测定,部分鲜样保存于4 ℃冰箱用于DOC、NH_4^+-N、NO_3^--N以及Fe^{2+}含量的测定,剩余部分风干保存。

1.3 气体样品采集及测定方法

在试验的第1.5、3.5、5.5、7.5、14、25、32、39、56、82、100天进行气体的采集。在试验初始(第0小时),用带三通阀的注射器抽取瓶内的气体注入真空瓶作为本底值;后续每次采气后揭开培养瓶的丁基塞,使用通气泵通气1 min,平衡瓶内外气压与气体浓度,重新密封后采集新本底值。

气体中CO_2、CH_4、N_2O的浓度用安捷伦气相色谱仪(Agilent 7890, Agilent Technologies, Santa Clara, CA,美国)测定,色谱柱为80/100目porapak Q填充柱,柱温55 ℃,载气为N_2。标准气体由中国标准物质研究中心提供。

1.4 土壤样品采集及测定方法

土壤NH_4^+-N和NO_3^--N:采用2 mol·L^{-1}氯化钾溶液(水土比5∶1)振荡60 min后过滤,使用流动分析仪(AA3 AutoAnalyzer, Bran+Luebbe,德国)分别在660 nm和550 nm波长处测定[24]。土壤DOC:以0.5 mol·L^{-1}的硫酸钾溶液(水土比4∶1)在250 r·min^{-1}下振荡30 min后离心过滤,使用总有机碳分析仪(TOC-LCPH, SHIMADZU,日本)测定[25]。Fe^{2+}:采用邻菲罗啉比色法测定,即10 g土样经0.1 mol·L^{-1}硫酸铝溶液浸提5 min,过滤后加入邻菲罗啉溶液,通过酶标仪(Bio Tek Epoch,美国)于530 nm波长处测定[24]。

土壤DNA使用SPINeasy™ DNA Pro Kit for Soil(MP Biomedicals)试剂盒提取,经琼脂糖凝胶电泳和NanoDrop®ND2000(ThermoFisher Scientific,美国)检测纯度与浓度后使用。使用ABI7300荧光定量PCR仪(Applied Biosystems,美国)测定细菌总丰度及*mcrA*、*nirK*、*nirS*基因丰度。qPCR采用10 μL反应体系,其中包含5.0 μL ChamQ SYBR Color qPCR Master Mix(2×)、0.4 μL引物F(5 μmol·L^{-1})、0.4 μL引物R(5 μmol·L^{-1})、0.2 μL ROX Reference Dye1(50×)、1.0 μL DNA模版、3.0 μL ddH$_2$O。各基因扩增引物序列及反应条件见表1。

1.5 数据计算与分析

CO_2、CH_4、N_2O的排放通量计算公式为[26]:

表1 实时荧光定量PCR引物序列及反应条件

Table 1 Primer sequences and thermal conditions of qPCR

项目 Item	引物 Primer	反应条件 Thermal condition
细菌	515F(5′-GTGCCAGCMGCCGCGGTAA-3′) 907R(5′-CCGTCAATTCMTTTRAGTTT-3′)	95 ℃预变性3 min; 95 ℃变性5 s,58 ℃退火30 s,72 ℃延伸60 s,循环40次
mcrA	*mcrAF*(5′-GGTGGTGTMGGATTCACACARTAYGCWACAGC-3′) *mcrAR*(5′-TTCATTGCRTAGTTWGGRTAGTT-3′)	95 ℃预变性15 min; 94 ℃变性20 s,54 ℃退火40 s,72 ℃延伸45 s,循环40次
nirK	FlaCu(5′-ATCATGGTSCTGCCGCG-3′) R3Cu(5′-GCCTCGATCAGRTTGTGGTT-3′)	94 ℃预变性3 min; 94 ℃变性15 s,63 ℃退火30 s,72 ℃延伸45 s,循环40次
nirS	cd3aF(5′-GTSAACGTSAAGGARACSGG-3′) R3cdR(5′-GASTTCGGRTGSGTCTTGA-3′)	94 ℃预变性3 min; 94 ℃变性45 s,54 ℃退火55 s,72 ℃延伸90 s,循环40次

$$F=\frac{\rho\times V\times 273.15}{m\times(273.15+T)}\times\frac{\Delta c}{\Delta t}$$

式中：F为CO_2、CH_4、N_2O的排放通量，mg·kg^{-1}·d^{-1}；ρ为标准状态下N_2O-N、CO_2-C、CH_4-C的取值，分别为1.25、0.53、0.54 kg·m^{-3}；m为干土质量，kg；$\Delta c/\Delta t$为单位时间培养瓶内气体浓度的变化量，μg·d^{-1}；V为培养瓶内气体体积，m^3；T为采集气体时的温度，20 ℃。

CO_2、CH_4、N_2O的累积排放量计算公式[27]：

$$f=\sum_{i=1}^{n}\frac{F_i+F_{i+1}}{2}\times(t_{i+1}-t_i)$$

式中：f为CO_2、CH_4、N_2O的累积排放量，mg·kg^{-1}；i为采样次数；n为总采样次数；t_{i+1}和t_i为第i+1次和第i次采样的时间，d；F_i和F_{i+1}为第i次和第i+1次气体的排放通量，μg·kg^{-1}·d^{-1}或mg·kg^{-1}·d^{-1}。

采用IPCC评估的100 a尺度下的增温潜势系数来计算全球增温潜势（GWP，t CO_2e·hm^{-2}）[27-29]：

$$GWP=E(CO_2)+E(CH_4)\times 34+E(N_2O)\times 298$$

式中：$E(CO_2)$、$E(CH_4)$和$E(N_2O)$分别表示CO_2、CH_4和N_2O的累积排放量，t·hm^{-2}。

利用SPSS 19.0软件进行不同处理下温室气体排放量、土壤DOC、NO_3^--N、NH_4^+-N、Fe^{2+}，以及碳氮转化功能基因丰度的方差分析（ANOVA），采用Duncan检验评估不同处理之间的差异显著性（P<0.05），并使用Graphpad Prism 9.5软件绘制柱状图。利用R语言（4.4.1版本）中“linkET”程序包进行相关性分析和Mantel test分析，利用“randomForest”程序包构建随机森林模型，并利用“ggplot2”可视化统计分析的结果。

2 结果与分析

2.1 秸秆配施蓝藻和针铁矿对水稻土温室气体排放通量的影响

如图1a所示，培养初期（3.5 d）各处理CO_2排放通量迅速上升至峰值（40.55~79.85 mg·kg^{-1}·d^{-1}）。与S处理相比，各处理CO_2排放通量显著降低，其中SFeB处理的CO_2排放通量最小。在第25天CO_2排放达到次峰时，不同处理CO_2排放通量表现为S>SFeB>SFe>SB。

CH_4排放通量整体呈现14 d后显著上升而后显著下降最后趋于平稳的趋势（图1b）。S处理于第32天达到CH_4排放通量峰值（23.99 mg·kg^{-1}·d^{-1}）。而SFe、SB、SFeB处理峰值分别延迟至第56、39、39天，且SFe和SFeB处理峰值较S处理分别降低了63.55%和46.33%。

如图1c所示，S和SFe处理在开始培养后剧烈排放N_2O，在培养第1.5天达到峰值后迅速归0。SB和SFeB处理的N_2O排放通量分别在培养第7.5天和第5.5天达到峰值，其峰值较S处理分别降低了39.89%和17.17%，并于7~9 d后降至0。

2.2 秸秆配施蓝藻和针铁矿对水稻土温室气体累积排放量和GWP的影响

CO_2的累积排放量在S和SFe处理下最高；与S处理相比，SB和SFeB处理的CO_2累积排放量分别降低了11.58%和11.83%（图2a）。CH_4累积排放量在S和SFe处理下最低，分别为314.24 mg·kg^{-1}和322.92 mg·kg^{-1}；SB和SFeB处理较S处理分别使CH_4累积排放量增加了54.47%和42.34%，SFeB较SB处理降低了7.86%（图2b）。N_2O的累积排放量在SFe处理下较S处理减少21.81%；SB和SFeB处理的N_2O累积排放量均显著高于SFe处理（P<0.05）；与SB处理相比，SFeB处理降低了N_2O累积排放量的38.79%（图2c）。GWP以CH_4贡献为主（72.14%~84.08%），SB和SFeB处理分别较S处理显著增加57.69%和35.89%（P<0.05），而SFe处理没有显著改变GWP（图2d）。

2.3 秸秆配施蓝藻和针铁矿对土壤基本化学性质和微生物群落丰度的影响

蓝藻和针铁矿的添加影响了土壤化学性质和微生物群落丰度。土壤Fe^{2+}含量在SFeB处理中最高，其次为SFe和S处理，在SB处理中最低（图3a）。DOC含量在SFe、SB和SFeB处理中分别较S处理提高8.01%、18.50%和12.32%（图3b）。与S处理相比，NO_3^--N含量在SFe处理中降低了16.66%，而在SB处理中增加了16.67%；与SB处理相比，SFeB处理的NO_3^--N含量显著降低（P<0.05），降幅为11.98%（图3c）。SB处理中土壤NH_4^+-N含量显著高于其他处理（P<0.05），而其他处理间NH_4^+-N含量没有显著差异（图3d）。

细菌16S rDNA丰度在SB处理中最高，其他处理间没有显著差异（图4a）。与S处理相比，产甲烷菌*mcrA*基因丰度在SFe处理中显著降低（P<0.05），而在SB处理中显著增加（P<0.05）；与SB处理相比，SFeB处理降低了产甲烷菌*mcrA*基因丰度（图4b）。添加针铁矿处理显著降低了反硝化菌*nirK*基因丰度（P<0.05），其中SFe较S和SFeB较SB处理分别降低了50.59%和73.85%（图4c）。SB和SFeB处理分别较S处理的*nirS*基因丰度显著提高了141.04%和81.80%（P<0.05，图4d）。

2.4 温室气体排放与土壤化学性质、微生物群落丰度的关系

相关性分析结果（图5）表明，CO_2的累积排放量

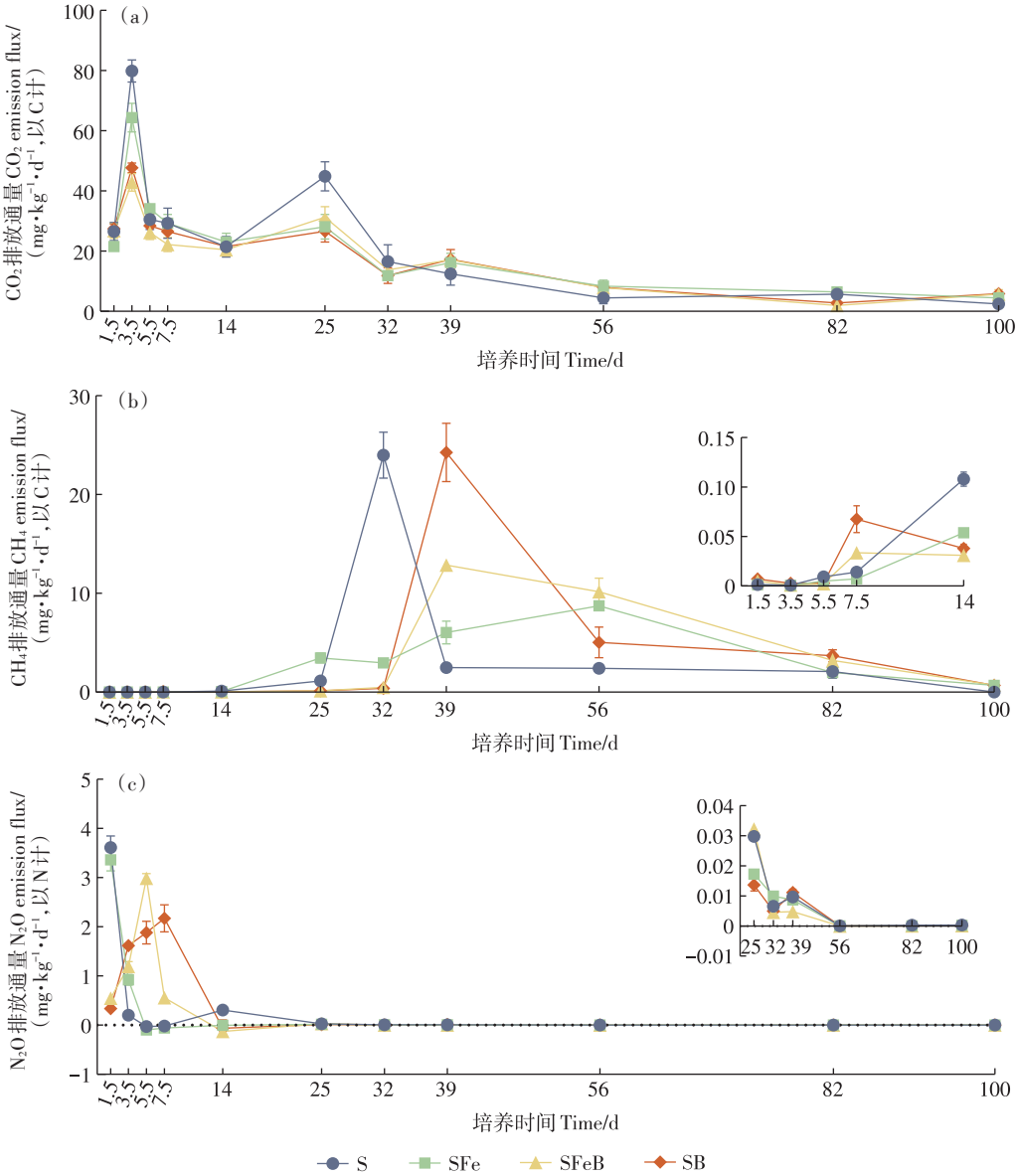


图1 不同处理下CO_2、CH_4和N_2O排放通量随时间的变化

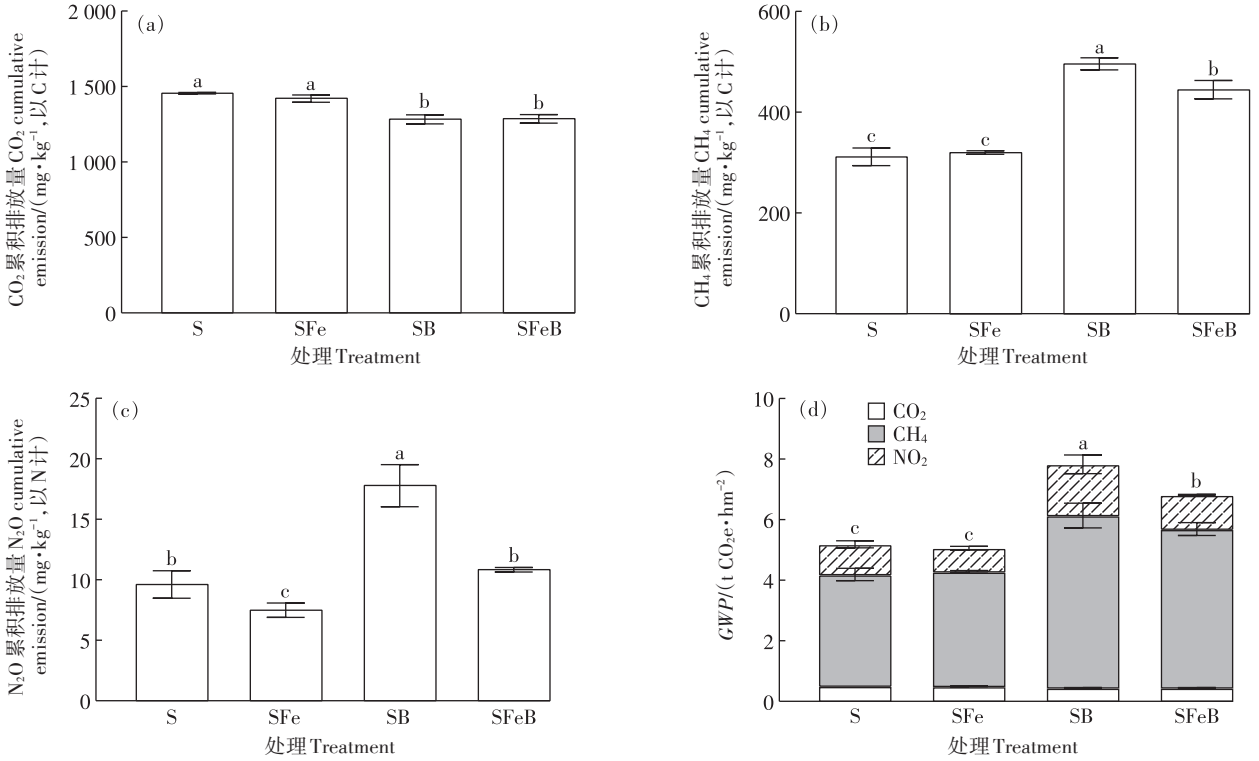
Figure 1 Changes of CO_2, CH_4, and N_2O emission fluxes over time under different treatments

与DOC、NO_3^--N含量以及CH_4的累积排放量呈显著负相关；CH_4的累积排放量与DOC、NO_3^--N含量以及*mcrA*功能基因丰度呈显著正相关；N_2O的累积排放量与DOC、NO_3^--N、NH_4^+-N含量以及*nirS*功能基因丰度呈显著正相关，与Fe^{2+}含量呈显著负相关。*GWP*与CH_4和N_2O的累积排放量以及DOC、NO_3^--N、NH_4^+-N含量显著正相关，与CO_2的累积排放量呈显著负相关。随机森林模型结果进一步证明了CO_2的累积排放量与DOC和NO_3^--N含量有显著相关性（$P<0.05$，图6a）；CH_4的累积排放量主要受DOC（5.59%，$P<0.05$）、NO_3^--N（5.41%，$P<0.05$）和*mcrA*功能基因丰度（4.56%，$P<0.05$）的显著影响（图6b）；N_2O的累积排放量主要受到DOC（5.15%，$P<0.05$）、NO_3^--N（4.87%，$P<0.05$）、NH_4^+-N（2.83%，$P<0.05$）和*nirS*功能基因丰度（4.14%，$P<0.05$）的影响（图6c）。*GWP*主要受DOC（6.65%，$P<0.01$）、NO_3^--N（6.91%，$P<0.01$）以及*mcrA*（4.85%，$P<0.05$）和*nirS*功能基因丰度（8.58%，$P<0.05$）的影响（图6d）。

3 讨论

3.1 秸秆配施蓝藻和针铁矿对水稻土CO_2排放的影响

在本试验中，与S处理相比，SB处理降低了CO_2的累积排放量（图2a），且CO_2的累积排放量与CH_4的累积排放量呈现负相关关系（图5）。其可能原因之



图柱上方不同小写字母表示不同处理间差异达P<0.05显著水平。下同。

Different lowercase letters at the top of the column indicate that the difference between different treatments is significant at P<0.05. The same bellow.

图2 不同处理对CO_2、CH_4和N_2O的累积排放量及GWP的影响

Figure 2 Cumulative emissions of CO_2, CH_4, N_2O, and GWP from agricultural practices under different treatments

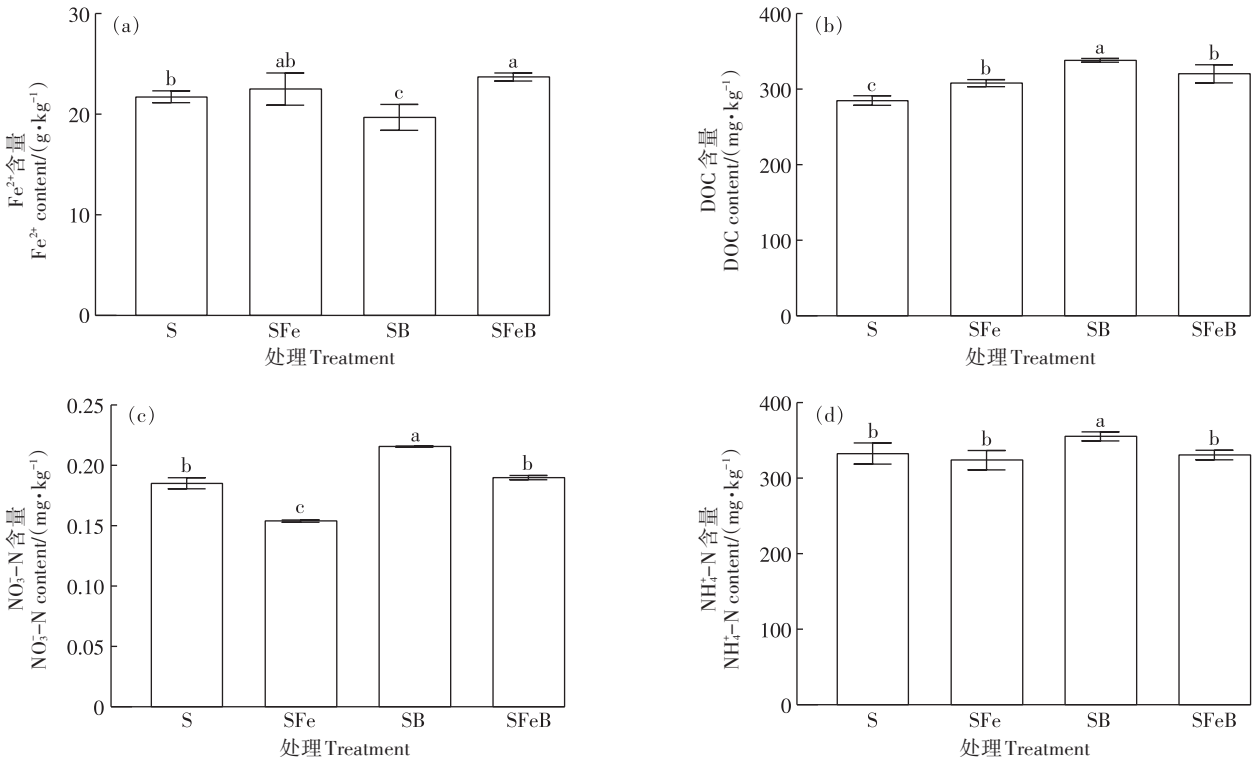


图3 不同处理对Fe^{2+}、DOC、NO_3^--N和NH_4^+-N的影响

Figure 3 Effects of different treatments on Fe^{2+}, DOC, NO_3^--N, and NH_4^+-N

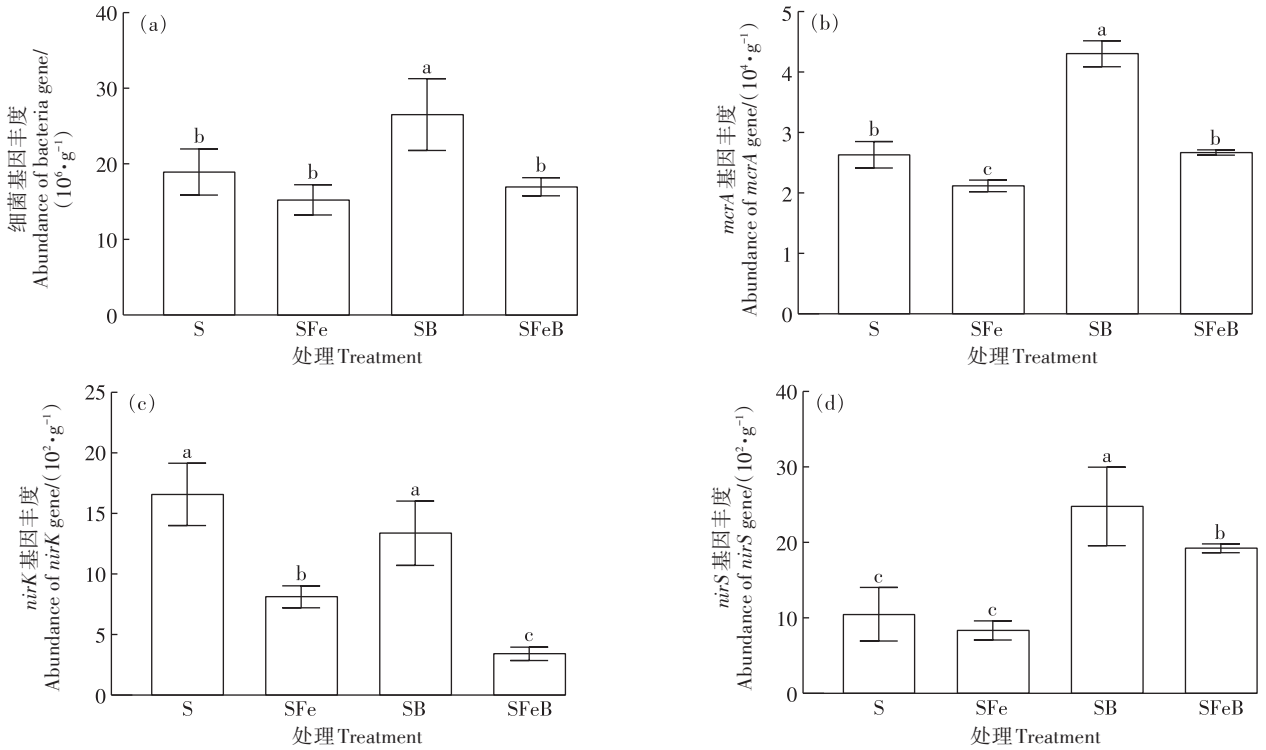
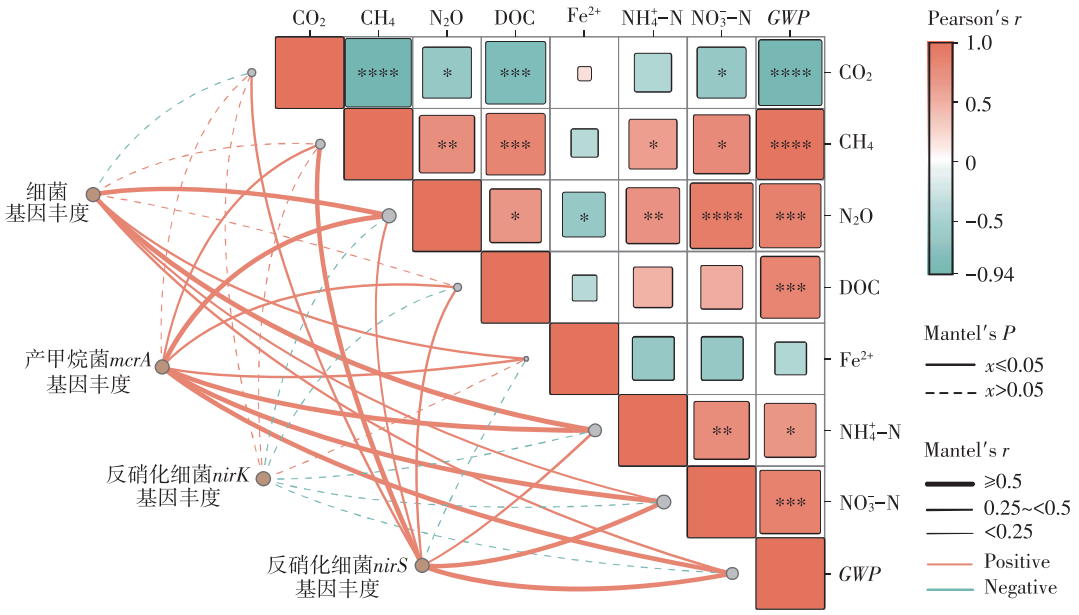


图4 不同处理对细菌16S rDNA、产甲烷菌功能基因*mcrA*、反硝化菌功能基因*nirK*和*nirS*的影响

Figure 4 Effects of different treatments on bacterial 16S rDNA, methanogenic functional gene *mcrA*, and denitrifier functional genes *nirK* and *nirS*

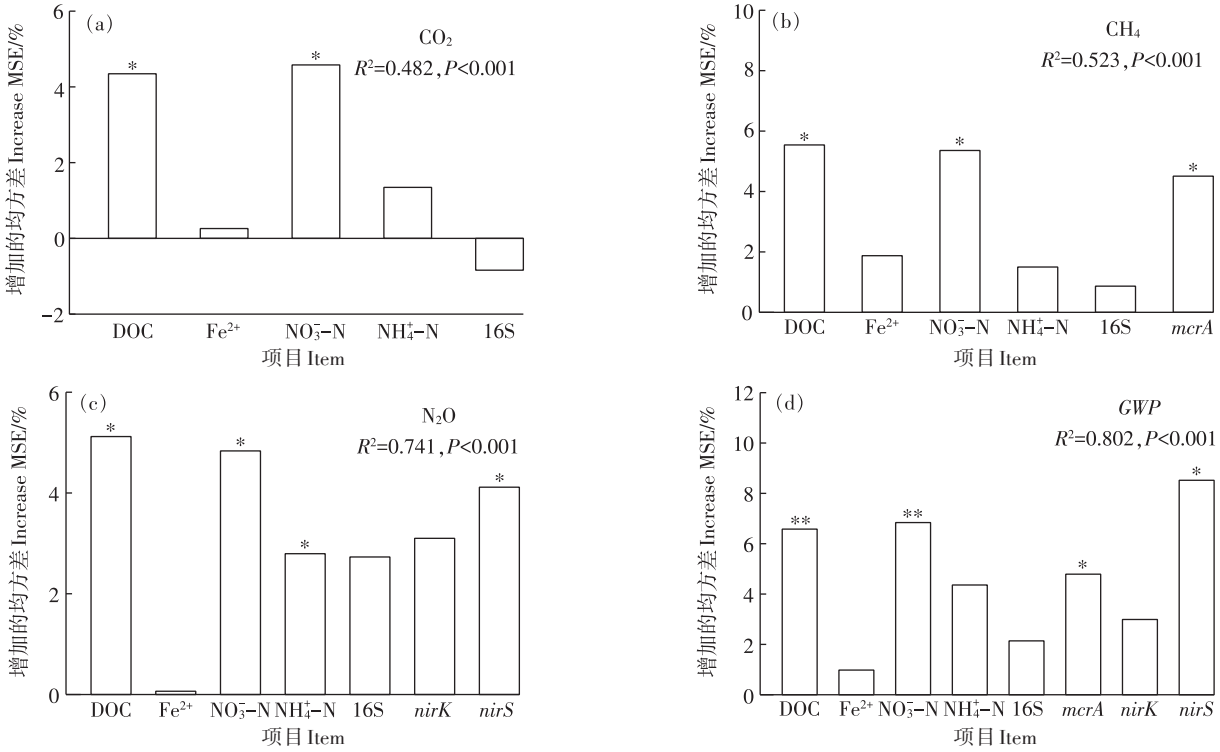


*P<0.05, **P<0.01, ***P<0.001, ****P<0.000 1.

图5 16S rDNA、*mcrA*、*nirK*、*nirS*和土壤化学性质与温室气体排放之间的关系

Figure 5 Relationship between 16S rDNA, *mcrA*, *nirK*, *nirS*, soil chemical properties, and greenhouse gas emissions

一是持续淹水的条件下微生物对蓝藻残体的分解加速了土壤的还原过程[30]，抑制了CO_2的排放，使更多的碳以CH_4的形式排放。此外，本试验中SB处理的DOC含量增加（图3b），Fe^{2+}含量相对较低（图3a），可能是蓝藻作为易分解有机碳通过配位交换、多价阳离子桥和弱键胶结等方式促进土壤Fe-OC稳定有机无



*P<0.05，**P<0.01

图6 温室气体和*GWP*的随机森林模型分析

Figure 6 Random forest model analysis of greenhouse gases and *GWP*

机复合体的形成，从而降低了CO_2的排放[31-32]。因此，在淹水稻田中添加蓝藻可以减少CO_2排放量。虽然有研究表明针铁矿可以通过提供电子受体促进CO_2的排放[16]，但由于本试验中所有处理都添加了秸秆，外源碳和铁配施可能通过促进Fe-OC形成，抑制有机碳矿化，从而抵消Fe^{2+}作为电子受体对矿化的促进作用[33]，因此针铁矿的添加在本试验中对CO_2排放没有显著影响。

3.2 秸秆配施蓝藻和针铁矿对水稻土CH_4排放的影响

本试验中与S处理相比，SB处理促进了CH_4的排放（图2b）。在淹水条件下，蓝藻等易分解外源碳的输入为微生物提供了丰富的碳源、氮源和电子供体[34]，促进了微生物的生长，产甲烷菌丰度的增加（图4b）激发了土壤CH_4的产生和排放[35]。同时，土壤氮含量的增加会抑制甲烷氧化菌的活性，降低CH_4的氧化，间接促进CH_4的排放[36]。本研究结果发现单独添加蓝藻显著提高了土壤DOC和可溶性氮含量（图3b和图3d），提高了*mcrA*功能基因的丰度（图4b），促进了CH_4的产生和排放（图2b）。这一现象与前人研究结果一致[37-38]。

针铁矿的引入，有效地缓解了蓝藻加入带来的激发效应。与SB处理相比，SFeB处理降低了CH_4的排放（图2b），土壤Fe^{2+}含量显著提升（图3a），Fe^{2+}含量与CH_4排放量的趋势相反（图5）可能与细菌的异化铁还原作用有关[39]。针铁矿作为Fe^{3+}电子受体，在厌氧条件下被铁还原菌优先利用，触发$Fe^{3+}\rightarrow Fe^{2+}$的还原反应[40]。异化铁还原的吉布斯自由能显著低于产CH_4过程的自由能[41-42]，在热力学上优先驱动电子流向Fe^{3+}还原途径；并且铁还原细菌与产甲烷菌竞争小分子碳源和氮源以及H_2、乙酸等关键电子供体，导致产甲烷底物匮乏从而抑制了CH_4的生成[43]。此外，针铁矿通过表面络合作用减少可生物利用的DOC[4]，进一步限制产甲烷底物供给。本试验发现异化铁还原主要通过降低排放高峰期的CH_4通量从而降低CH_4的累积排放量。值得注意的是，在本试验中针铁矿对CH_4排放的抑制不足以抵消蓝藻对其排放的激发作用，而CH_4作为*GWP*的主要贡献者，是导致SFeB处理*GWP*显著高于常规秸秆还田处理的主要原因。因此，在后续研究中应进一步优化蓝藻和针铁矿添加的比例，或配合间歇淹水、氮素调控等策略，强化铁氧化物的持续还原能力，实现CH_4减排与土壤培肥的协同增效。

3.3 秸秆配施蓝藻和针铁矿对水稻土 N_2O 排放的影响

在淹水条件下，N_2O 的生成主要通过反硝化作用，NO_3^--N 和 DOC 是提高反硝化微生物活性、促进 N_2O 排放的关键因子[44]。本试验中添加蓝藻通过提高可溶性碳、氮（图3b至图3d），提高了 *nirS* 基因的丰度（图4d），促进了 N_2O 排放。N_2O 的排放主要在培养前期，这与蓝藻残体腐解主要发生在培养前期有一定关系，土壤无机氮的浓度在这期间维持在一个较高的值[45]，进而会增加稻田 N_2O 的释放[46-47]。

本试验中针铁矿对 N_2O 的排放有一定的抑制作用（图2c）。针铁矿的引入通过对铁介导的氧化还原调控展现出对 N_2O 排放的抑制，针铁矿异化还原[39]生成的 Fe^{2+} 可作为电子供体驱动 N_2O 进一步还原为 N_2，促进完全反硝化过程[48]；Fe^{2+} 通过硝酸盐依赖型亚铁氧化（$Fe^{2+}+NO_3^-\rightarrow Fe^{3+}+NH_4^+$）消耗 NO_3^--N（图3c和图3d），削弱反硝化底物供应，并抑制反硝化功能基因 *nirS* 表达，从而导致 N_2O 排放量的降低[49]。培养后期 N_2O 排放趋0（图1c）印证了长期淹水条件下铁驱动的完全反硝化主导地位，而土壤 NO_3^--N 含量远低于 NH_4^+-N 含量（图3c和图3d）进一步表明亚铁氧化路径的潜在贡献。此外，对于 N_2O 的排放及其导致的 *GWP* 而言，针铁矿的抑制作用可以抵消蓝藻的激发作用，说明在蓝藻-秸秆共施体系中整合针铁矿，可通过铁-碳-氮耦合调控实现 N_2O 减排。

4 结论

（1）在淹水厌氧条件下，秸秆配施蓝藻通过提高土壤 DOC 和可溶性氮含量，促进产甲烷菌（*mcrA* 基因）和反硝化菌（*nirS* 基因）活性，导致 CH_4 和 N_2O 排放量增加，但 CO_2 排放量有所降低。针铁矿的添加显著抑制了秸秆配施蓝藻处理下水稻土中 CH_4 和 N_2O 的累积排放量，其减排机制与 DOC 和 NO_3^--N 浓度显著相关，功能基因 *mcrA* 和 *nirS* 的丰度分别显著影响了 CH_4 和 N_2O 的排放。

（2）针铁矿主要通过削弱 CH_4 排放高峰期的通量来实现减排效应。黑土稻田采用秸秆配施蓝藻时，添加针铁矿可作为 CH_4 和 N_2O 减排的有效措施，减缓由蓝藻与秸秆添加导致的 *GWP* 的加剧。

（3）未来需优化针铁矿与蓝藻的添加量配比，并结合水分调控、氮素调控等措施，深入评估并挖掘针铁矿在秸秆配施蓝藻条件下的减排潜力，推动秸秆-蓝藻资源化利用与碳中和目标的协同实现，实现黑土区稻田的绿色发展。

参考文献：

[1] 赵宁, 周蕾, 庄杰, 等. 中国陆地生态系统碳源/汇整合分析[J]. 生态学报, 2021, 41(19): 7648-7658. ZHAO N, ZHOU L, ZHUANG J, et al. Integration analysis of the carbon sources and sinks in terrestrial ecosystems, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(19): 7648-7658.

[2] 范紫月, 齐晓波, 曾麟岚, 等. 中国农业系统近40年温室气体排放核算[J]. 生态学报, 2022, 42(23): 9470-9482. FAN Z Y, QI X B, ZENG L L, et al. Accounting of greenhouse gas emissions in the Chinese agricultural system from 1980 to 2020[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(23): 9470-9482.

[3] 冯浩原, 张春峰. 白浆土改良研究进展及展望[J]. 黑龙江农业科学, 2022(11): 104-109. FENG H Y, ZHANG C F. Research progress and prospect on improvement effect of albic soil[J]. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2022(11): 104-109.

[4] 陈梦蝶, 崔晓阳. 土壤有机碳矿物固持机制及其影响因素[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2022, 30(2): 175-183. CHEN M D, CUI X Y. Mechanisms and influencing factors of soil organic carbon sequestration by minerals[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2022, 30(2): 175-183.

[5] 李志慧, 王艺霏, 邓祥征. 东北黑土地区稻田甲烷排放时空演变及排放潜力分析[J]. 生态学报, 2024, 44(9): 3814-3829. LI Z H, WANG Y F, DENG X Z. Spatiotemporal evolution and potential prediction of methane emission from paddy fields in the black soil region of northeast China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(9): 3814-3829.

[6] 韩晓增, 邹文秀. 东北黑土地保护利用研究足迹与科技研发展望[J]. 土壤学报, 2021, 58(6): 1341-1358. HAN X Z, ZOU W X. Research perspectives and footprint of utilization and protection of black soil in northeast China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58(6): 1341-1358.

[7] NICHOLSON F A, CHAMBERS B J, MILLS A R, et al. Effects of repeated straw incorporation on crop fertilizer nitrogen requirements, soil mineral nitrogen and nitrate leaching losses[J]. *Soil Use and Management*, 1997, 13(3): 136-142.

[8] ZHANG J L, SONG X N, WEI H, et al. Effect of substituting nitrogen fertilizer with nitrogen-fixing cyanobacteria on yield in a double-rice cropping system in southern China[J]. *Journal of Applied Phycology*, 2021, 33(4): 2221-2232.

[9] 沈芳芳, 张哲, 袁颖红, 等. 生物质炭配施有机肥对旱地红壤酶活性及其微生物群落组成的影响[J]. 中国农学通报, 2021, 37(18): 65-74. SHEN F F, ZHANG Z, YUAN Y H, et al. Effects of biochar and organic manure combined application on soil enzyme activities and microbial community component in upland red soil[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2021, 37(18): 65-74.

[10] RAHEEM A, YU X C, LIU K L, et al. Combined application of green manure and straw mulch improves rice yield and mitigates methane emissions[J]. *Soil Advances*, 2025, 3: 100030.

[11] LIANG X, ZHU Y, LIU H Y, et al. Nitrogen-fixing cyanobacteria enhance microbial carbon utilization by modulating the microbial

community composition in paddy soils of the Mollisols region[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 929:172609.

[12] NAWAZ T, JOSHI N, NELSON D, et al. Harnessing the potential of nitrogen-fixing cyanobacteria: a rich bio-resource for sustainable soil fertility and enhanced crop productivity[J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2024, 36:103886.

[13] SONG X N, ZHANG J L, LI D H, et al. Nitrogen-fixing cyanobacteria have the potential to improve nitrogen use efficiency through the reduction of ammonia volatilization in red soil paddy fields[J]. *Soil and Tillage Research*, 2022, 217:105274.

[14] BHATIA A, COWAN N J, DREWER J, et al. The impact of different fertiliser management options and cultivars on nitrogen use efficiency and yield for rice cropping in the Indo-Gangetic Plain: two seasons of methane, nitrous oxide and ammonia emissions[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2023, 355:108593.

[15] LUO D, YU H Y, CHEN J X. Elevated CO_2 and goethite inhibited anaerobic oxidation of methane in paddy soils[J]. *Journal of Environmental Management*, 2025, 373:123883.

[16] ZHENG Y, WANG H, LIU Y, et al. Electrochemically coupled CH_4 and CO_2 consumption driven by microbial processes[J]. *Nature Communications*, 2024, 15(1):3097.

[17] SUN H, MA X M, VAN ZWIETEN L, et al. Iron oxides promote physicochemical stabilization of carbon despite enhancing microbial activity in the rice rhizosphere[J]. *Science of the Total Environment*, 2025, 958:178019.

[18] DUAN X, LI Z, LI Y H, et al. Iron-organic carbon associations stimulate carbon accumulation in paddy soils by decreasing soil organic carbon priming[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2023, 179:108972.

[19] SAIDY A R, SMERNIK R J, BALDOCK J A, et al. Effects of clay mineralogy and *Hydrous* iron oxides on labile organic carbon stabilisation[J]. *Geoderma*, 2012, 173:104-110.

[20] RASMUSSEN C, SOUTHARD R J, HORWATH W R. Mineral control of organic carbon mineralization in a range of temperate conifer forest soils[J]. *Global Change Biology*, 2006, 12(5):834-847.

[21] CHIDTHAISONG A, CONRAD R. Turnover of glucose and acetate coupled to reduction of nitrate, ferric iron and sulfate and to methanogenesis in anoxic rice field soil[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2000, 31(1):73-86.

[22] YANG W H, WEBER K A, SILVER W L. Nitrogen loss from soil through anaerobic ammonium oxidation coupled to iron reduction[J]. *Nature Geoscience*, 2012, 5:538-541.

[23] 张杰. 铁氧化物对土壤有机碳稳定和团聚体铁碳结合的影响[D]. 杭州:浙江大学, 2021:10-11. ZHANG J. Effect of iron oxides on soil organic carbon stability and iron-carbon binding in aggregates [D]. Hangzhou:Zhejiang University, 2021:10-11.

[24] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社, 2000. LU R K. Analytical methods for soil and agro-chemical analysis[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.

[25] 李太魁, 郭战玲, 寇长林, 等. 提取方法对土壤可溶性有机碳测定结果的影响[J]. 生态环境学报, 2017, 26(11):1878-1883. LI T K, GUO Z L, KOU C L, et al. Effects of extraction conditions on the test results of soil dissolved organic carbon[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, 26(11):1878-1883.

[26] 胡天怡, 车佳玥, 胡煜杰, 等. 秸秆还田和添加生物炭对热带地区稻菜轮作体系中淹水后土壤温室气体排放的影响[J]. 环境科学, 2024, 45(3):1692-1701. HU T Y, CHE J Y, HU Y J, et al. Effects of straw returning and biochar addition on greenhouse gas emissions from high nitrate nitrogen soil after flooding in rice-vegetable rotation system in tropical China[J]. *Environmental Science*, 2024, 45(3):1692-1701.

[27] 刘怡. 不同有机物料添加对盐碱地温室气体排放的影响[D]. 哈尔滨:哈尔滨师范大学, 2024:10-11. LIU Y. Effect of different organic material additions on greenhouse gas emissions from saline sites effect of different organic material additions on greenhouse gas emissions from saline sites[D]. Harbin: Harbin Normal University, 2024:10-11.

[28] LIU G, YU H Y, ZHANG G B, et al. Combination of wet irrigation and nitrification inhibitor reduced nitrous oxide and methane emissions from a rice cropping system[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2016, 23(17):17426-17436.

[29] 宋博影, 郭艳杰, 王文赞, 等. 生物炭和双氰胺对设施蔬菜土壤温室气体排放的影响[J]. 中国农业科学, 2023, 56(10):1935-1948. SONG B Y, GUO Y J, WANG W Z, et al. Effects of biochar combined with dicyandiamide on greenhouse gases emissions from facility vegetable soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2023, 56(10):1935-1948.

[30] SONG X N, ZHANG J L, PENG C R, et al. Replacing nitrogen fertilizer with nitrogen-fixing cyanobacteria reduced nitrogen leaching in red soil paddy fields[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2021, 312:107320.

[31] JEEWANI P H, GUNINA A, TAO L, et al. Rusty sink of rhizodeposits and associated keystone microbiomes[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, 147:107840.

[32] GAO W, DUAN X, CHEN X B, et al. Iron-carbon complex types and bonding forms jointly control organic carbon mineralization in paddy soils[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 953:176117.

[33] CHEN C M, HALL S J, COWARD E, et al. Iron-mediated organic matter decomposition in humid soils can counteract protection[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1):2255.

[34] LIANG T, ZHOU G P, CHANG D N, et al. Co-incorporation of Chinese milk vetch (*Astragalus sinicus* L.), rice straw, and biochar strengthens the mitigation of Cd uptake by rice (*Oryza sativa* L.)[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 850:158060.

[35] 刘超, 王宪伟, 宋艳宇, 等. 增温对冻土区泥炭沼泽土壤孔隙水甲烷关联微生物和溶解性有机碳的影响[J]. 生态学报, 2021, 41(1):184-193. LIU C, WANG X W, SONG Y Y, et al. Effects of warming on abundances of methane-related microorganisms and concentration of dissolved organic carbon in soil pore water of permafrost peat swamp in Daxing′anling[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(1):184-193.

[36] SCHIMEL J. Rice, microbes and methane[J]. *Nature*, 2000, 403(6768):375-377.

[37] 赵晓萌, 刘婧娜, 易丽霞, 等. 绿肥还田对双季稻根际土壤产甲烷古菌群落结构的影响[J]. 作物学报, 2015, 41(5):698-707. ZHAO X M, LIU J N, YI L X, et al. Community structure of methanogens from double-rice rhizosphere soil as affected by green manure incorporation[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2015, 41(5):698-707.

[38] ZHOU G P, GAO S J, XU C X, et al. Rational utilization of leguminous green manure to mitigate methane emissions by influencing methanogenic and methanotrophic communities[J]. *Geoderma*, 2020, 361:114071.

[39] DING B J, LUO W Q, QIN Y B, et al. Effects of the addition of nitrogen and phosphorus on anaerobic ammonium oxidation coupled with iron reduction(Feammox) in the farmland soils[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 737:139849.

[40] CLÉMENT J C, SHRESTHA J, EHRENFELD J G, et al. Ammonium oxidation coupled to dissimilatory reduction of iron under anaerobic conditions in wetland soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37(12):2323-2328.

[41] 王亚娥, 冯娟娟, 李杰, 等. 不同Fe(Ⅲ)对活性污泥异化铁还原耦合脱氮的影响及机理初探[J]. 环境科学学报, 2014, 34(2):377-384. WANG Y E, FENG J J, LI J, et al. Effect and mechanism of nitrogen removal by dissimilatory reduction of different Fe(Ⅲ) in activated sludge[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34(2):377-384.

[42] 张佩云, 赵丹阳, 丁丽姿, 等. 高温条件下生物炭强化丙酸与乙酸产甲烷的动力学及热力学机制[J]. 环境工程学报, 2023, 17(6):1955-1966. ZHANG P Y, ZHAO D Y, DING L Z, et al. Kinetic and thermodynamic mechanisms of methane production from propionate and acetate enhanced by biochar at high temperature[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2023, 17(6):1955-1966.

[43] GORSKI C A, AESCHBACHER M, SOLTERMANN D, et al. Redox properties of structural Fe in clay minerals. 1. Electrochemical quantification of electron-donating and-accepting capacities of smectites[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(17):9360-9368.

[44] WANG X Y, SICILIANO S, HELGASON B, et al. Responses of a mountain peatland to increasing temperature: a microcosm study of greenhouse gas emissions and microbial community dynamics[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, 110:22-33.

[45] IRISARRI P, GONNET S, DEAMBROSI E, et al. Cyanobacterial inoculation and nitrogen fertilization in rice[J]. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2007, 23(2):237-242.

[46] 郑燕, 侯海军, 秦红灵, 等. 施氮对水稻土N_2O释放及反硝化功能基因(*narG*/*nosZ*)丰度的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(11):3386-3393. ZHENG Y, HOU H J, QIN H L, et al. Effect of N application on the abundance of denitrifying genes(*narG*/*nosZ*) and N_2O emission in paddy soil[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(11):3386-3393.

[47] ZHU K, YE X, RAN H Y, et al. Contrasting effects of straw and biochar on microscale heterogeneity of soil O_2 and pH: implication for N_2O emissions[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2022, 166:108564.

[48] STROUS M, PELLETIER E, MANGENOT S, et al. Deciphering the evolution and metabolism of an anammox bacterium from a community genome[J]. *Nature*, 2006, 440(7085):790-794.

[49] WANG M L, HU R G, ZHAO J S, et al. Iron oxidation affects nitrous oxide emissions *via* donating electrons to denitrification in paddy soils[J]. *Geoderma*, 2016, 271:173-180.

(责任编辑:潘淑君)