

不同土壤改良措施对冷浸田温室气体排放的影响

邵玲玲^{1,2}, 邹平², 杨生茂^{2,3*}, 叶静², 陶林富⁴, 俞巧钢², 符建荣²

(1.浙江师范大学化学与生命科学学院, 浙江 金华 321004; 2.浙江省农业科学院环境资源与土壤肥料研究所, 杭州 310021; 3.浙江省生物炭工程技术研究中心, 杭州 310021; 4.浙江省临安市於潜镇农业办公室, 浙江 临安 311311)

摘要:以临安山区典型的冷浸田为试验对象,通过开展田间水稻种植试验,探究生石灰、水稻秸秆和竹质生物炭对冷浸田温室气体(GHG)排放、作物产量和土壤理化性质的影响,旨在为改良冷浸田,实现水稻高产的同时,通过相关措施为实现稻田温室气体减排提供理论依据和技术支撑。结果表明,不同土壤改良处理对水稻产量和土壤肥力都有所提高,其中秸秆还田处理增产效果最显著,产量高达 7 728.25 kg·hm⁻²,而施用生物炭对土壤中全氮、有效磷和速效钾含量的提高效果最明显,增幅分别为 15.1%、49.0%和 22.1%。与常规施肥处理相比,生石灰处理 CH₄ 累积排放量提高了 21.9%,而生物炭处理 CH₄ 累积排放量降低了 33.3%。试验各处理氧化亚氮排放通量和累积排放量都较低,其原因可能是各处理稻田土壤一直处于冷水浸润状态,施用生石灰提高了冷浸田土温,激发了微生物的活动,从而导致 CH₄ 大量排放,而施用生物炭改善了稻田土壤通气状况,增强甲烷氧化菌活性,进而导致 CH₄ 排放量降低。

关键词:冷浸田;生物炭;温室气体;排放量

中图分类号:X511 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2014)06-1240-07 **doi:**10.11654/jaes.2014.06.027

Effects of Different Soil Amendments on Greenhouse Gas Emissions from a Cold Waterlogged Paddy Field

SHAO Ling-ling^{1,2}, ZOU Ping², YANG Sheng-mao^{2,3*}, YE Jing², TAO Lin-fu⁴, YU Qiao-gang², FU Jian-rong²

(1.College of Chemistry and Life Sciences, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China; 2.Institute of Environment, Resource, Soil & Fertilizer, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310021, China; 3.Zhejiang Biochar Engineering and Technology Research Center, Hangzhou 310021, China; 4.Agricultural Office of Yuqian town in Lin'an City, Zhejiang Province, Lin'an 311311, China)

Abstract: A rice field experiment was conducted to explore the effects of quicklime, rice straw and bamboo biochar applications on the greenhouse gas (GHG) emissions, soil physical-chemical properties and rice yields in a typical cold waterlogged paddy field in Lin'an mountain area, Zhejiang Province. Conventional fertilization without amendments served as a control (CK). Rice yields and soil fertility were generally improved with all amendment treatments as compared with CK. Rice yields were 7 728.25 kg·hm⁻² in the rice straw treatment, while 6 685.84 kg·hm⁻² in CK. Compared with CK, soil total nitrogen, available phosphorus and available potassium contents in the biochar treatment increased 15.1%, 49.0% and 22.1%, respectively. Cumulative CH₄ emissions were increased by 21.9% in the quicklime treatment, but decreased by 33.3% in the bamboo biochar treatment in comparison with CK. Such effects could be attributed to increased soil temperature and thus microbial activity by quicklime, and improved soil aeration and methane oxidation by bamboo biochar. However, nitrous oxide fluxes and cumulative emissions were quite low in all treatments, might due to low nitrification and denitrification from long-term anaerobic condition with cold water. These results could shed light on reclamation of cold waterlogged paddy fields with aim at high yield as well as reduced GHG emission.

Keywords: cold waterlogged paddy field; biochar; greenhouse gas (GHG); emissions

收稿日期:2013-10-22

基金项目:国家公益性行业科研专项(201003059,201303095);国家国际科技合作项目(2011DFA91190);国家自然科学基金项目(41201233);浙江省自然科学基金项目(LQ12D01003)

作者简介:邵玲玲(1988—),女,江西九江人,硕士研究生,主要从事土壤碳库研究。E-mail:sl1210807@163.com

*通信作者:杨生茂 E-mail:yangshengmao@263.net

我国水稻田分为高产田、中产田和低产田三种,改良中低产田,提高粮食产出水平是各级政府长期以来一直关注的问题。冷浸田是我国低产水稻土的一个主要类型,是指在自然或人为因素的作用下,地下水位过高,土壤发生层内长期遭到地下水浸渍,使土壤产生冷浸渍害,还原作用强烈,理化性状和作物根系生长环境恶化的病害农田,也是长期积水的强潜育性低产水稻土。全国冷浸田约有 346 万 hm^2 ,占全国稻田面积的 15.07%,占低产稻田面积的 44.2%^[1],主要分布在南方山区谷地、丘陵低洼地、平原湖沼低洼地,以及山塘、水库堤坝的下部。据初步统计,长江以南的低产水田中冷浸田占有很大的比重^[2],而且对于终年淹水的稻田,土壤长期处于还原状态,水稻移栽后即有大量的 CH_4 排放^[3],因此有必要开展冷浸田温室气体的监测,在改良冷浸田,实现水稻高产的同时,通过相关措施实现温室气体减排,具有重要意义。

浙江省是典型中低产水稻土主要分布地之一,据全国第二次土壤普查,全省冷浸田面积 3.62 万 hm^2 ^[4]。本试验以山区丘陵区临安冷浸田为试验对象,开展定位试验,研究施用生石灰、水稻秸秆还田和添加竹炭处理对冷浸田温室气体 CH_4 、 N_2O 排放以及土壤理化性质的影响,从而揭示生物炭在稻田生态系统对温室气体的减排作用,为冷浸田改良以及我国粮食安全提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验地处浙江省临安市於潜镇昔口村茅亭垄,与西天目山国家级自然保护区相邻,位于东经 $119^\circ 22' 11''$,北纬 $30^\circ 10' 28''$ 。属于北亚热带季风气候,年平均气温 15.7°C 。供试地块平整,地力均一,茬口一致,其总面积约为 600 m^2 。本试验地土壤按照中国土壤发生分类系统中浙江土种的分类方法,系水稻土中烂泥田土属烂泥田土种,如按照国家公益性行业(农业)科研专项“江南地区冷浸田治理技术与示范”项目组的分类方法,系冷浸田中冷水型冷浸田(犁底层发育)。试验地位于山坡中部,试验地右侧山边有冷泉水冒出。在本试验开展之前,当地镇政府投资修复加固了排水沟,极大地改善了试验区域的排水条件,为本实验取得一定的成果提供了极为有利的先决条件。试验小区示意图见图 1。

试验小区 0~20 cm 表层土壤在实施改良措施之前的基本理化性状为:容重 $0.86\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 、有机碳

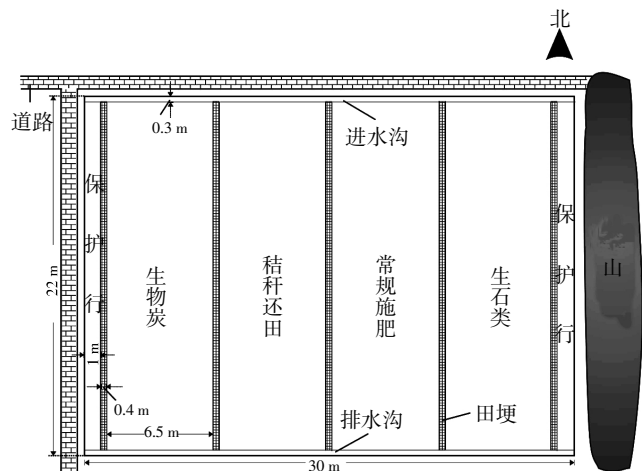


图 1 临安实验小区示意图

Figure 1 Layout of Lin'an experimental plots

2.97%、全氮 $1.80\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、碱解氮 $184.18\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、有效磷 $7.76\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、速效钾 $114\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验设计

试验采用单水平设计,设置了 4 个处理:①生石灰;②秸秆还田;③生物炭;④常规施肥(对照)。每小区采样重复 3 次,供试作物为单季稻,品种为中浙优 8 号。小区面积 $6.5\text{ m}\times 22\text{ m}$,在每个小区中各埋设 6 个 $50\text{ cm}\times 50\text{ cm}$ 的 PVC 底座,两两平行,用于安放 50 cm 高度的气体采样箱。底座嵌入土中 15 cm ,不再移动,上沿带凹槽。各底座内水稻种植密度一致(比田间种植密度稍小),并采取田间正常管理方式,其中 3 个种植 4 株水稻,另外 3 个不种植物。基肥为碳铵,追肥为尿素、过磷酸钙和氯化钾。各小区施肥方案见表 1。

供试水稻来自大田育苗,2012 年 6 月 18 日将长势一致的幼苗移栽到试验区,每小区种植规格 $15\text{ cm}\times 20\text{ cm}$ (每 667 m^2 约 2 万穴),每穴 4 株,2012 年 10 月 16 日进行收割。试验期间,因为处于山旁冷泉附近,稻田一直处于水分饱和状态,保持淹水 3~8 cm。水稻移苗约 7 d 后,开始采集气体。

供试生物炭选用竹炭,原材料在 350°C 下制得,基本理化性状见表 2。

1.3 样品采集与分析

1.3.1 样品采集

气体样品采用静态暗箱法采集。静态采样箱分为箱体和底座两部分,箱体顶端设置了温度传感器、三通阀采气孔和气压平衡孔,温度传感器测温杆伸至采样箱中部以观测箱内温度;三通阀采气孔是采集气体样品的接口,而气压平衡孔只是为了维持采样过程中

表1 试验处理及实施方案

Table 1 Experimental treatments and applications

编号	处理	化肥施用量/kg·hm ⁻²	物质投入量
1	常规施肥(CK)	202.5+45+90(N+P ₂ O ₅ +K ₂ O)	0
2	生石灰	202.5+45+90(N+P ₂ O ₅ +K ₂ O)	生石灰:750 kg·hm ⁻² ,
3	秸秆还田+快速腐熟剂	202.5+45+90(N+P ₂ O ₅ +K ₂ O)	稻草产量 50%+2 kg 腐熟剂
4	生物炭(竹炭)	202.5+45+90(N+P ₂ O ₅ +K ₂ O)	竹炭:1.5 万 kg·hm ⁻²

表2 供试生物炭(竹炭)基本理化性状

Table 2 Basic physical and chemical properties of tested biochar

pH	含碳量/%	填充密度/g·cm ⁻³	阳离子交换量/cmol·kg ⁻¹	总孔容积/cm ³ ·g ⁻¹	全氮含量/g·kg ⁻¹	全磷含量/g·kg ⁻¹	全钾含量/g·kg ⁻¹
9.80	68.70	0.56	17.20	0.16	6.9	0.3	5.2

箱内外气压平衡。底座嵌入土中 15 cm 固定,箱体地面开口,测量时连接底座凹槽,凹槽内用水密封,使箱内空气不与外界相通。为避免太阳辐射引起箱内升温而对所测小气候产生影响,箱体外均贴覆一层锡箔纸。将顶箱罩住后,开始采样,一般在当地时间 9:00—11:00 进行,采样间隔时间为关箱后的 0、10、20 min。由于田间采样不能及时对样品进行分析,采用 100 mL 注射器抽取 60 mL 气体注入铝箔材质的真空气体样品袋备测。在采样的同时记录箱内温度、土表温度以及距土表 10、20 cm 和 30 cm 的土壤温度、田面水温、水深和株高等环境参数。

冷浸田试验气体样品从 2012 年 6 月 25 日开始采集,连续监测直到水稻收割后两个月,即 2012 年 12 月 23 日。在插秧前期,每周采样一次;追肥后要相应地增加采样次数,2~3 d 采集一次;后期可降低频率,每隔 10 d 或 15 d 采集一次。同时记录相关植物和环境参数。

1.3.2 样品分析

采用气相色谱仪(Agilent 6820)分析气体样品 CH₄(FID 检测器)和 N₂O(ECD 检测器)的浓度,根据 3 次样品两种气体浓度随时间的变化速率计算土壤的气体释放通量,并通过加权平均计算累计排放量。计算公式为:

$$F=\rho\times H\times dc/dt\times 273/(273+T)\times t^{[5]}$$

式中: F 为排放通量,mg·m⁻²·h⁻¹; ρ 为 CH₄和 N₂O 在标准状态下的密度,其值分别是 0.714、1.25 kg·m⁻³; H 为采样箱高度,m; dc/dt 为采样过程中箱内 CH₄和 N₂O 浓度变化率(可将两个气样浓度值经线性回归分析得出); T 为采样箱内的平均温度,℃; t 为扣箱时间,h。

累积排放量是指在水稻一个生长季内温室气体的总排放量,是各种气体日排放通量的叠加,单位为

kg·hm⁻²。土壤容重、有机碳、全氮、碱解氮、有效磷、速效钾等测定方法参考《土壤农化分析》^[6]。

1.4 数据处理

采用 DPS v7.05 版软件、Excel 2003 对实验数据进行分析。

2 结果与讨论

2.1 冷浸田土壤改良措施对水稻产量的影响

从 2012 年度水稻试验的结果来看,施用秸秆和生物炭处理,有助于提高水稻产量。由于秸秆还田处理提高了土壤肥力,该处理产量最高,达 7 728.25 kg·hm⁻²,比常规施肥处理提高了 15.6%(图 2)。另外本年度试验水稻生长期,降水比去年充沛,土壤淹水一直处于饱和状态,与常规施肥相比,生物炭处理改善了稻田土壤的通气状况,有利于水稻对养分的吸收,从而导致水稻产量比农民常规施肥处理高出 11.3%。徐培智等^[7]研究测土配方施肥对南方冷浸田水稻产量的影响结果表明早晚稻产量分别为 6 519.0、6 757.5 kg·hm⁻²,与本试验水稻产量是相当的。

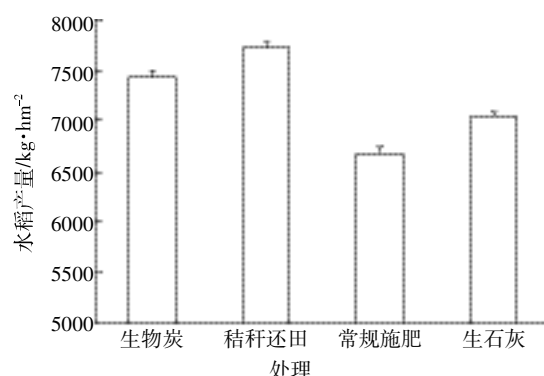


图2 不同处理小区水稻产量

Figure 2 Rice yields under different treatments

2.2 冷浸田土壤改良措施对土壤理化性质的影响

冷浸田改良的一个重要方面是改善土壤的理化性质,提高土壤的通透性,从而提高作物对养分的吸收能力。从2012年的示范试验来看(表3),生物炭处理在一定程度上增加了土壤容重,而秸秆还田处理则有助于土壤容重的降低,但由于试验时间还比较短,各改良处理对土壤容重的影响还不太明显。

表3 不同处理对冷浸田土壤理化性质的影响

Table 3 Effects of different treatments on soil physical and chemical properties in cold waterlogged paddy field

处理	容重/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	全氮/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	碱解氮/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	有效磷/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	速效钾/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
生物炭	1.04	1.98a	114.10a	4.10a	85.50a
秸秆还田	0.93	1.48b	105.74b	3.09ab	81.00a
常规施肥	0.99	1.72ab	114.82ab	2.75b	70.00ab
生石灰	1.05	1.64ab	110.46ab	3.33ab	61.00b

注:同列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

土壤中的养分含量如表3所示,与常规施肥相比,施用生物炭可增加土壤中的养分含量,全氮、有效磷和速效钾含量增幅分别为15.1%、49.0%和22.1%,与刘玉学等^[8]研究结果一致。一方面可能由于生物炭本身富含这些营养元素;另一方面可能由于生物炭能够吸附土壤溶液中 NH_4^+ ,从而降低了溶液中 NH_4^+ 的浓度,生物炭对氮素的这种固化作用可以减少土壤中的氮素淋洗。除此之外,生物炭还可吸附磷和其他水溶性盐离子,具有保肥性能。从土壤速效养分的结果来看,土壤碱解氮含量在秸秆还田处理时最低,可能是在水稻成熟期,其含量降至最低,秸秆自身分解对碱解氮含量影响不大,这大概与水稻养分吸收有关。土壤有效磷含量的变化规律与速效钾类似,除了生石灰处理时有效磷含量有所提高外,其余处理均随着种

植水稻时间的延长,有效磷、速效钾含量降低。其原因可能是冷浸田土温太低,养分吸收存在障碍,也可能是其他因素,有待进一步深入研究。

2.3 冷浸田土壤改良措施对温室气体排放的影响

2.3.1 对 CH_4 排放的影响

CH_4 是稻田最主要的温室气体^[9],浙江省绍兴平原典型稻田土壤在不同施肥条件下 CH_4 平均排放通量为 $2.88 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$,累积排放量为 $102.88 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ^[10];浙江省农业科学院海宁市杨渡村试验基地稻田在不同处理下 CH_4 平均排放通量为 $2.35 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$,累积排放量为 $48.23 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ^[8]。与这些研究结果相似,试验中水稻生长季 CH_4 排放通量如图3所示,常规施肥处理 CH_4 排放通量为 $-0.59\sim 5.30 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$,均值为 $1.35 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$;生石灰和秸秆还田处理 CH_4 排放通量均值分别为 2.43 、 $1.36 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$;生物炭处理 CH_4 排放通量均值仅为 $1.26 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。移栽初期 CH_4 排放量较低,这可能因为水稻土中产甲烷菌的最佳生长温度为 35°C ,在最佳生长温度以下,土壤生成 CH_4 的能力随温度的升高而增加^[3],冷浸田土温低阻碍其排放。随移栽时间增长, CH_4 排放量显著增加,在监测半年的数据中,整个水稻生长季稻田 CH_4 排放通量的峰值出现在7月13日,处于温度最高、水稻生长最旺盛的分蘖期,这个峰值可能是由于冷浸淹水处于稳定还原状态,有利于 CH_4 排放;10月中旬进入收割期, CH_4 排放量迅速下降,后期几乎无排放。不同改良处理对冷浸田 CH_4 累积排放量的影响如图4所示,生物炭、秸秆还田和生石灰处理 CH_4 累积排放量分别为 45.44 、 56.53 、 $83.03 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,其中生物炭处理 CH_4 累积排放量最低,生石灰处理最高。结合图3和图4可以看出,三种不同处理对冷浸田 CH_4 的排放都有一定的影响,其中生石灰处理对 CH_4 的排放有明显的促进

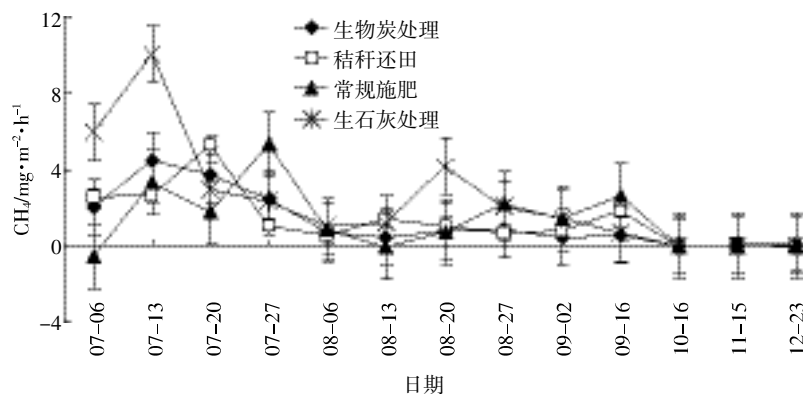


图3 不同处理水稻生长季 CH_4 排放通量

Figure 3 Methane emission fluxes in different treatments during rice growth season

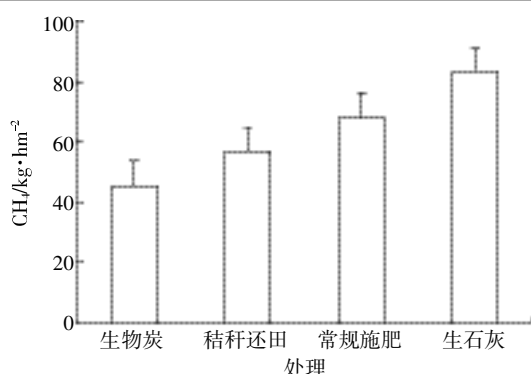
图4 不同处理水稻生长季 CH₄ 累积排放量

Figure 4 Cumulative emissions of methane in different treatments during rice growth season

效应,水稻秸秆还田处理增强排放作用不显著,而生物炭处理一定程度上抑制了 CH₄ 的排放。与常规施肥处理相比,生石灰处理 CH₄ 累积排放量提高了 21.9%,而生物炭处理 CH₄ 累积排放量降低了 33.3%。

生石灰处理 CH₄ 平均排放量高于其他处理,其原因可能是在水稻生长期,生石灰处理提高了冷浸田土壤温度(图 5),激发了微生物的活动,导致有机质的分解速度加快,从而使甲烷气体大量排放。有关研究表明,施用秸秆后稻田土壤 CH₄ 排放通量增加 2~25 倍^[11-14],但本试验秸秆还田处理 CH₄ 平均排放通量高于常规施肥处理,而 CH₄ 累积排放量却低于常规施肥处理,可能与种植后期采样次数减少,或是冷浸环境温度太低不利于 CH₄ 排放有关。有研究表明施用生物炭能抑制 CH₄ 排放^[15-16],如 Liu 等^[16]在实验室内淹水培养条件下分别添加竹炭和秸秆炭等生物炭,发现减少 CH₄ 排放幅度高达 51.1%~91.2%,与本试验研究结果一致。生物炭处理减排作用的原因可能是生物炭增加了稻田土壤甲烷氧化菌的丰度,降低了产甲烷菌

与甲烷氧化菌的丰度比^[17],也可能是施加生物质炭增加了土壤孔隙度。一方面,由于产甲烷菌是严格厌氧细菌,土壤通气性良好的情况下,产甲烷菌活性受到抑制;另一方面,土壤孔隙度增大,氧气容量增加,为甲烷氧化菌的生长提供了条件,大量 CH₄ 通过扩散进入氧化区域时被甲烷氧化菌氧化^[16]。与有关研究结果不同的是,本试验生物炭抑制作用并不特别显著,可能与冷浸田这类长期冷浸渍水、土温低、还原性强的农田环境有关。

2.3.2 对 N₂O 排放的影响

稻田另一主要温室气体是 N₂O^[18],绍兴平原典型稻田土壤在不同施肥条件下 N₂O 平均排放通量为 6.98 μg·m⁻²·h⁻¹,累积排放量为 255.23 g·hm⁻²^[10];浙江省农业科学院海宁市杨渡村试验基地稻田在不同处理下 N₂O 平均排放通量为 10.25 μg·m⁻²·h⁻¹,累积排放量为 223.11 g·hm⁻²^[8]。与上述研究结果相反,本试验冷浸田 N₂O 的排放量较少,并不存在明显的变化规律。本试验三种改良处理对稻田 N₂O 排放通量的影响如图 6 所示。常规施肥处理 N₂O 的平均排放通量为 0.55 μg·m⁻²·h⁻¹,而生石灰、秸秆还田和生物炭处理的排放通量均值分别为 1.48、1.79、0.24 μg·m⁻²·h⁻¹。从图 6 可以看出,水稻生长初期各个处理 N₂O 排放量相差较大,而且高于生长后期的排放量。总体上,N₂O 的排放量较低,排放曲线变化不显著,也没有出现明显的峰值。

不同改良处理对冷浸田 N₂O 累积排放量的影响如图 7 所示,生物炭、秸秆还田和生石灰处理 N₂O 累积排放量分别为 46.72、71.53、84.70 g·hm⁻²,其中生物炭处理 N₂O 累积排放量最低,生石灰处理最高,但各处理 N₂O 累积排放量都较低。土壤中硝化、反硝化作

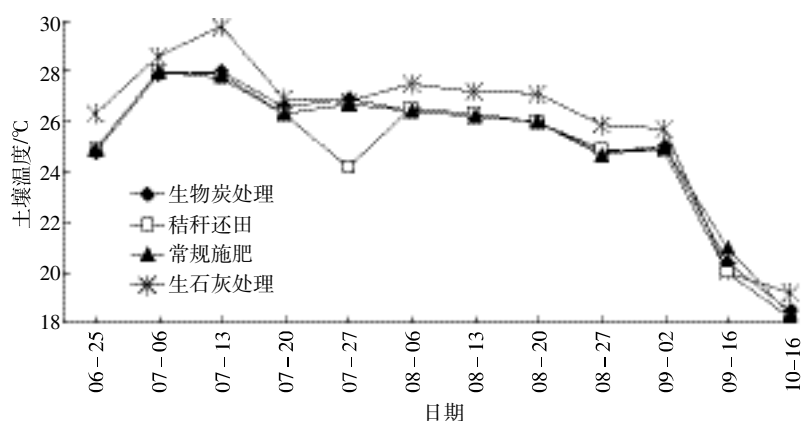


图5 不同处理水稻生长季距地表 20 cm 土壤温度变化

Figure 5 Dynamic of soil temperature at 20 cm depth in different treatments during rice growth season

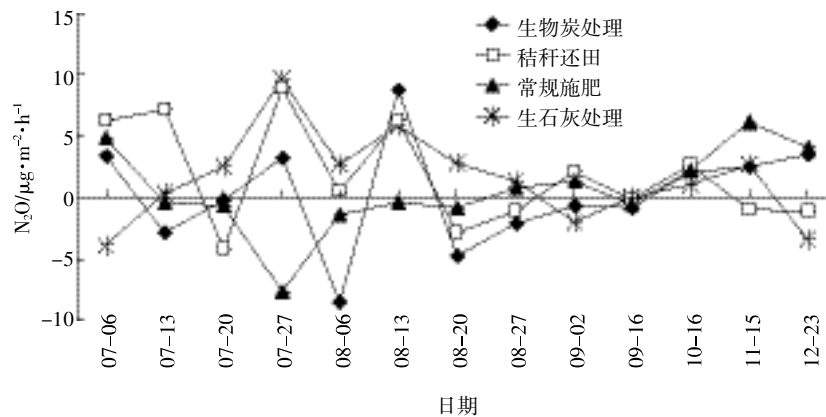
图 6 不同处理水稻生长季 N_2O 排放通量

Figure 6 Nitrous oxide emission fluxes in different treatments during rice growth season in rice growing season

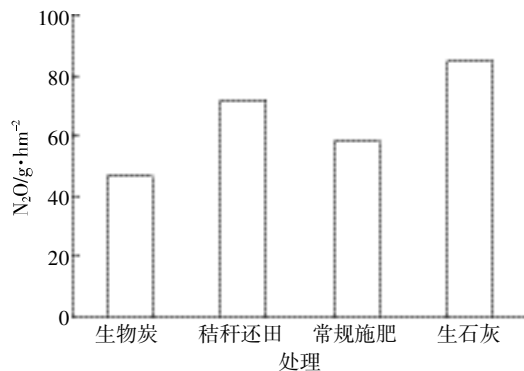
图 7 不同处理水稻生长季 N_2O 累积排放量

Figure 7 Cumulative emissions of nitrous oxide in different treatments during rice growth season

用是产生 N_2O 的基本过程,有学者提出,有些硝化细菌不仅能够进行硝化作用,也能够进行反硝化作用,这种类型的反硝化作用是土壤中 NH_4^+ 以 NO 或 N_2O 形式损失的主要途径^[19-20]。有关研究表明,处于稳定还原状态的土壤只有很少量的 N_2O 排放^[21],长期淹水的稻田也只排放少量的 N_2O ^[22]。 N_2O 是氮素转化过程的产物,在长时间、稳定、均一的氧化或还原条件下,土壤中绝大部分无机氮以硝态氮或氨态氮存在而不再发生转化^[3],本试验中冷浸田处于长期淹水的稳定还原状态,导致 N_2O 累积排放量都较低。

大量实验数据显示, CH_4 和 N_2O 由于土壤水分状况的差异呈现出此消彼长的排放关系,其直接原因是土壤水分状况^[23]。而本试验得到不同的结果,从开始采气到收割期间, CH_4 排放一直处于较高水平,但 N_2O 排放较低。冷浸田长期处于淹水状态,没有晒田期,不能很好地提供硝化和反硝化过程需要的氧化还原条件,导致整个水稻生育期 N_2O 排放较少。

3 结论

(1)不同土壤改良处理对水稻产量和土壤肥力都有所提高,在各改良处理中,秸秆还田处理增产效果最显著,产量高达 $7\,728.25\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,比常规施肥处理提高了 15.6%,而生物炭处理改善了土壤的通气状况,促进水稻对养分的吸收,使其产量增加了 11.3%。三种不同处理基本上提高了土壤中养分含量,其中施用生物炭效果最明显,可能是生物炭本身富含这些营养元素,而且生物炭能够吸附土壤溶液中 NH_4^+ ,对氮素有固化作用的缘故。

(2)试验结果表明,生石灰和秸秆还田处理对冷浸田 CH_4 的排放有明显促进作用,而生物炭处理对 CH_4 有一定的减排作用,各处理对 N_2O 排放影响比较小。分析不同处理对温室气体排放影响的原因,生石灰处理提高了冷浸田土温,激发了微生物的活动,导致有机质的分解速度加快,使温室气体大量排放;秸秆还田处理增加了土壤有机质含量,为微生物分解提供了更多的底物,从而促进排放;而生物炭处理增大了土壤孔隙度,溶氧增加,抑制了产甲烷菌活性,加强了甲烷氧化菌活动,综合作用降低了 CH_4 排放;对 N_2O 排放量降低不明显,可能是冷浸田低温环境阻碍排放的缘故。受冷浸田长期淹水处于还原状态的影响, CH_4 和 N_2O 没有呈现出此消彼长的排放关系。

总之,冷浸田是我国一个主要类型的低产水稻田,其温室气体释放是值得关注的。改良冷浸田,提高水稻产量的同时,研究相关措施来实现温室气体的减排已经成为研究的热点。从上述结论可知,生石灰处理冷浸田能提高土壤温度,激发微生物活性,促进温室气体的排放;生物炭进入土壤生态系统后会影响土壤生物地球化学过程,具有减少温室气体排放的效

果,但各处理效果不显著,具有较大不确定性。这与冷浸田低温渍水的环境有关,基于田间的长期效应还有待进一步研究。此外,由于施肥量、肥力状况、生物炭种类和土壤类型等差异,可能得出的结论不尽相同。在以后的研究中,应充分考虑这些因素特别是冷浸田不良环境的影响。

参考文献:

- [1] 全国土壤普查办公室. 中国土壤[M]. 北京:中国农业出版社, 1998: 37-98.
National Soil Survey Office. Chinese soil[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1998: 37-98.
- [2] 柴娟娟. 冷浸田养分障碍因子及其供应动态的研究[D]. 杭州:浙江大学, 2013.
CHAI Juan-juan. Researching on nutrient obstruction factors and dynamic in waterlogged paddy field[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [3] 马毅杰, 陈家坊, 等. 水稻土物质变化与生态环境[M]. 北京:科学出版社, 1999: 123-144.
MA Yi-jie, CHEN Jia-fang, et al. Material changes in paddy soil and environment[M]. Beijing: Science Press, 1999: 123-144.
- [4] 浙江省土壤普查办公室. 浙江土壤[M]. 杭州:浙江科学技术出版社, 1994.
Soil Survey Office of Zhejiang Province. Zhejiang soil[M]. Hangzhou: Zhejiang Science and Technology Press, 1994.
- [5] 程 琨, 潘根兴, 罗 婷. 测土配方施肥固碳减排计量方法指南[M]. 北京:中国标准出版社, 2012: 45.
CHENG kun, PAN Gen-xing, LUO Ting. A guide to the methodology for quantifying carbon sequestration and reduction in greenhouse gas emission under recommended fertilization project[M]. Beijing: China Standards Press, 2012: 45.
- [6] 鲁如坤. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业科学技术出版社, 1999.
LU Ru-kun. Soil agricultural chemical analytical methods[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999.
- [7] 徐培智, 解开治, 刘光荣, 等. 冷浸田测土配方施肥技术对水稻产量及施肥效应的影响[J]. 广东农业科学, 2012(22): 70-73.
XU Pei-zhi, XIE Kai-zhi, LIU Guang-rong, et al. Effects of soil testing and formulated fertilization on rice yield and fertilization effect in cold waterlogged paddy field[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2012(22): 70-73.
- [8] 刘玉学, 王耀峰, 吕豪豪, 等. 生物质炭化还田对稻田温室气体排放及土壤理化性质的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(8): 2166-2172.
LIU Yu-xue, WANG Yao-feng, LÜ Hao-hao, et al. Effects of biochar application on greenhouse gas emission from paddy soil and chemical properties[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(8): 2166-2172.
- [9] Yan X, Ohara T, Akimoto H. Development of region-specific emission factors and estimation of methane emission from rice field in East, Southeast and South Asian countries[J]. *Global Change Biology*, 2003, 9: 237-254.
- [10] 王欣欣. 生物炭施用对稻田温室气体排放的影响研究[D]. 南京:南京农业大学, 2013.
WANG Xin-xin. Studies on the effect of biochar application on paddy greenhouse gas emissions[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2013.
- [11] Yagi K, Minami K. Effect of organic matter application on methane emission from some Japanese paddy fields[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1999, 36: 559-610.
- [12] Wassmann R, Buendia L V, Lantin R S. Mechanisms of crop management impact on methane emissions from rice fields in Los Baños, Philippines[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2000, 58: 107-119.
- [13] Corton T M, Bajita J B, Grospe F S. Methane emission from irrigated and intensively managed rice fields in central Luzon (Philippines)[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2000, 58: 37-53.
- [14] 秦晓波, 李玉娥, 刘克樱, 等. 不同施肥处理稻田甲烷和氧化亚氮排放特征[J]. 农业工程学报, 2006, 22(7): 143-148.
QIN Xiao-bo, LI Yu-e, LIU Ke-ying, et al. Methane and nitrous oxide emission from paddy field under different fertilization treatments[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22(7): 143-148.
- [15] Rondon M A, Lehmann J, Ramirez J, et al. Biological nitrogen fixation by common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) increases with biochar additions[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2007, 43(6): 699-708.
- [16] Liu Y X, Yang M, Wu Y M, et al. Reducing CH₄ and CO₂ emissions from waterlogged paddy soil with biochar[J]. *Journal of Soils Sediments*, 2011, 11(6): 930-939.
- [17] Feng Y, Xu Y, Yu Y, et al. Mechanisms of biochar decreasing methane emission from Chinese paddy soils[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2012, 46: 80-88.
- [18] Houghton J T, Jenkins G J, Ephraums J J. Climate change: the IPCC assessment[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.
- [19] Nicolaisen M H, Risgaard-Petersen N, Revsbech N P, et al. Nitrification-denitrification dynamics and community structure of ammonia oxidizing bacteria in a high yield irrigated Philippine rice field[J]. *Fems Microbiology Ecology*, 2004, 49: 359-369.
- [20] Lou Y S, Ren L X, Li Z P, et al. Effect of rice residues on carbon dioxide and nitrous oxide emissions from a paddy soil of subtropical China [J]. *Water Air and Soil Pollution*, 2007, 178: 157-168.
- [21] Smith C J, Patrick Jr W H. Nitrous oxide emission as affected by alternate anaerobic and aerobic conditions from soil suspensions enriched with (NH₄)₂SO₄[J]. *Soil Biol Biochem*, 1983(15): 693-696.
- [22] Frenzel J R, Denmeand O T, Watanabe I, et al. Ammonia and nitrous oxide losses following applications of ammonium sulfate to flooded rice [J]. *Aust J Agric Res*, 1981(32): 34-37.
- [23] 郑循华, 王明星, 王跃思, 等. 华东稻田 N₂O 和 CH₄ 排放[J]. 大气科学, 1997, 21(2): 231-237.
ZHENG Xun-hua, WANG Ming-xing, WANG Yue-si, et al. CH₄ and N₂O emissions from rice paddy fields in Southeast China[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 1997, 21(2): 231-237.