ISSN 0564-3929

Acta Pedologica Sinica 土壤学报

Turang Xuebao

中国土壤学会 主办
科学出版社 出版

2015
第52卷 第4期
Vol.52 No.4

土壤学报

（Turang Xuebao）

第52卷　第4期　　2015年7月

目次

综述与评论

土壤科学与现代农业

研究论文

研究简报

封面图片：离子型稀土矿废弃地全景（由汤叶涛、刘文深提供）

第52卷第4期　　　　土　壤　学　报　　　　Vol. 52，No. 4
2015年7月　　　　ACTA PEDOLOGICA SINICA　　　　July，2015

DOI：10.11766/trxb201407160357

不同时期施用生物炭对稻田N_2O和CH_4排放的影响*

李　露　周自强　潘晓健　熊正琴†
（南京农业大学资源与环境科学学院，江苏省低碳农业和温室气体减排重点实验室，南京　210095）

摘　要　通过分别在水稻季（R）和小麦季（W）设置对照（RB$_0$-N$_0$、WB$_0$-N$_0$）、单施氮肥（RB$_0$-N$_1$、WB$_0$-N$_1$）、20 t hm^{-2}生物炭与氮配施（RB$_1$-N$_1$、WB$_1$-N$_1$）、40 t hm^{-2}生物炭与氮配施（RB$_2$-N$_1$、WB$_2$-N$_1$）等8个处理，研究稻麦轮作周年系统N_2O和CH_4排放规律及其引起的综合温室效应（Global warming potential，GWP）和温室气体强度（Greenhouse gas intensity，GHGI）特征。结果表明：稻季配施20 t hm^{-2}生物炭对N_2O和CH_4的排放、作物产量及GWP和GHGI均都无明显影响；稻季配施40 t hm^{-2}生物炭能显著降低8.6%的CH_4的排放和9.3%的GWP，显著增加作物产量17.2%。麦季配施20 t hm^{-2}生物炭虽然对温室气体及GWP影响不明显，但显著增加21.6%的作物产量，从而显著降低21.7%的GHGI；麦季配施40 t hm^{-2}生物炭能显著降低20.9%和11.3%的N_2O和CH_4排放，显著降低15.7%和23.5%的GWP和GHGI。因此麦季配施生物炭对减少N_2O和CH_4的排放、增加稻麦轮作产量及降低GWP和GHGI的效果较稻季配施生物炭效果更好。

关键词　生物炭；N_2O排放；CH_4排放；综合温室效应；温室气体强度
中图分类号　P461.4；S152.6　　**文献标识码**　A

气候变暖已成为人类目前面临最为严峻的环境问题，CO_2、CH_4、N_2O等温室气体排放增加所引起的全球气候变暖已经是无可争议的事实[1]。农田土壤作为N_2O和CH_4的重要排放源，对温室效应的影响不容忽视[2]。农业排放的温室气体占全球人为排放源的10% ~ 12%[1]。在过去的几十年中，大气中CH_4、CO_2、N_2O的浓度以每年0.8%、0.5%、0.3%持续增加[3]，农业土壤排放的N_2O约占全球N_2O排放的60%[1]，人为排放的CH_4占总排放量的50% ~ 65%，而农业活动排放的CH_4约占全球CH_4排放的50%[1]。

温室气体减排已成为当前研究热点。生物炭是指在厌氧或无氧的条件下生物质高温热解而生成的含有丰富空隙、含碳量高的固体生物燃料[4-5]。由于生物质经炭化后还田可快速提升土壤稳定性碳库储量[6]，提供作物生长所需要的氮、磷、钾、钙、镁等营养元素，同时减少温室气体的排放，因此生物炭在农业领域的应用研究日益受到关注，逐渐成为一种农业增汇减排的新途径[7-8]。Zhang等[9]研究发现，在淹水稻田中施用生物炭能显著降低稻田N_2O的排放，增加CH_4的排放。Zhang等[10]还发现生物炭能显著降低旱地玉米地的N_2O排放。稻麦轮作生态系统作为我国华东地区典型的农业种植制度，是N_2O和CH_4的重要排放源[11-13]。然而国内外学者对生物炭在稻季施用对当季稻田N_2O和CH_4排放的影响已做了大量的研究报道[14-16]，蒋晨等[17]研究发现生物炭还田能减少稻田CH_4的排放，张斌等[18]发现40 t hm^{-2}生物炭能显著降低稻田 CH_4和N_2O的排放；而对于不同季节施用生物炭对稻麦轮作周年N_2O和CH_4排放的影响还很少。

---

* 国家自然科学基金项目（40971139，41171238）和“十二五”农村领域国家科技计划课题“农业生态系统固碳减排技术研发集成与示范”（2013BAD11B01）资助

† 通讯作者，E-mail：zqxiong@njau.edu.cn

作者简介：李露（1989—），男，安徽宣城人，硕士研究生，主要从事农田温室气体排放研究。E-mail：2012103110@njau.edu.cn

收稿日期：2014-07-16；收到修改稿日期：2014-09-09

在水旱轮作稻田的水稻季还是麦季施用，由于不同的土壤环境条件，可能将对稻田N_2O和CH_4排放产生不同的影响。Spokas和Reicosky[19]、Wang[20]等发现生物炭及土壤类型的不同对温室气体的影响也不一致。因此很有必要同步研究在稻季和麦季分别施用生物炭对稻麦轮作周年N_2O和CH_4排放的影响。本研究分别在2012年水稻季和2012年小麦季开始时施用不同水平的生物炭，田间原位研究淹水条件和旱作条件下施入生物炭对稻麦轮作周年内N_2O和CH_4排放规律的影响，同时结合稻麦轮作产量评估对该生态系统温室气体强度的综合效应。

1 材料与方法

1.1 试验设计

本试验在江苏省南京市秣陵镇（31°58' N，118°48' E）开展。该区属北亚热带季风气候区，年均日照2 048 h，年平均气温15.7 ℃，年均降水量1 050 mm。试验田为第四纪黄土母质发育的黄棕壤，常年进行稻麦轮作，土壤类型为水稻土，土壤质地为粉壤土。

田间试验共设8个处理，即：RB_0-N_0（水稻季不施生物炭不施氮肥）、RB_0-N_1（水稻季不施生物炭施氮肥）、RB_1-N_1（水稻季20 t hm^{-2}生物炭与氮肥配施）、RB_2-N_1（水稻季40 t hm^{-2}生物炭与氮肥配施）、WB_0-N_0（小麦季不施生物炭不施氮肥）、WB_0-N_1（小麦季不施生物炭施氮肥）、WB_1-N_1（小麦季20 t hm^{-2}生物炭与氮肥配施）、WB_2-N_1（小麦季40 t hm^{-2}生物炭与氮肥配施）。

分别于2012年6月10日水稻移栽前和2012年11月10号小麦播种前施用生物炭，翻地前施入生物炭，以保证生物炭和土壤充分混匀。生物炭为小麦秸秆在高温（450 ℃）限氧条件下炭化所得。生物炭和土壤的基本理化性质见表1。

试验田各小区随机排列，3次重复，每个小区为4 m × 5 m，各小区具有独立灌排水系统，并用混凝土分隔。

表1 供试生物炭和土壤基本理化性质

Table 1 Basic chemical and physical properties of tested soil and biochar

类型 Type	总碳 Total C ($g\ kg^{-1}$)	有机碳 Organic C ($g\ kg^{-1}$)	全氮 Total N ($g\ kg^{-1}$)	全磷 Total P ($g\ kg^{-1}$)	全钾 Total K ($g\ kg^{-1}$)	pH (1∶2.5 H_2O)	阳离子交换量 CEC ($cmol\ kg^{-1}$)	表面积 Surface area ($m^2\ g^{-1}$)	灰分 Ash content (%)
生物炭 Biochar	467.0	—	5.6	—	—	9.4	24.1	8.9	20.8
土壤 Soil	—	14.7	1.32	0.36	13.5	5.7	31.2	—	—

1.2 田间管理

依据当地常规进行田间管理，稻季按照淹水—中期烤田—复水后间歇性湿润灌溉—收获前落干进行水分管理，冬季旱作期间不进行人工灌溉。各试验小区稻季、麦季肥料管理与当地一致，所有处理一次性施用钙镁磷肥和氯化钾作为基肥，每季作物磷钾肥施用量分别为（以P_2O_5计）60 kg hm^{-2}和（以K_2O计）120 kg hm^{-2}；施氮处理的尿素用量（以N计）为250 kg hm^{-2}，以4∶3∶3的比例分基肥和两次追肥施用。水稻季施用生物炭的试验区沿用试验基地水稻—小麦轮作体系，水稻于2012年6月17日插秧，2012年10月30收获；小麦于2012年10月31日播种，2013年5月28日收获。小麦季施用生物炭的试验区改自试验基地双季稻—油菜轮作体系，小麦于2012年11月20日播种，2013年6月4收获，水稻于2013年6月13日插秧，2013年10月26日收获。

1.3 样品采集与测定

气体样品采用静态暗箱观测法采集并同步开展环境条件及产量的观测，观测时期为2012年6月至2013年10月。采样箱规格为43 cm × 43 cm × 50 cm或43 cm × 43 cm × 110 cm，随水稻和小麦生长高度改变箱体高度为50 cm或110 cm。采样箱外面用锡箔纸包裹，采样箱的底座在试验开始前翻地时埋入土层，每次采样前将底座注满水防止采样时底座漏气。采样时间上午9：00 ~ 11：00，采样时将

采样箱扣在底座上，用20 ml针筒分别于密封后0、10、20、30 min采集气体样品，然后带回实验室用安捷伦气相色谱仪（Agilent 7890A）于48 h内测定气体样品中CH_4和N_2O含量。其中CH_4用氢火焰离子化检测器（FID）测定，N_2O用电子捕获检测器（ECD）测定。整个水稻和小麦生长周期内每星期至少观测1次；基肥和追肥时则隔天观测一次，并持续4 ~ 5次。每次观测时用温度计同步测定采样箱内温度、用便携式数字温度计JM222测定大气温度、10 cm土层温度，用刻度尺测量水稻季水层深度，以及用烘干法测定0 ~ 15 cm土层含水量。日降雨量、日均温等数据从邻近气象观测站获得。

1.4 数据处理与分析方法

CH_4和N_2O排放通量计算公式：$F=\rho \times V/A \times dC/dt \times 273/(273+T)$

式中，F为CH_4-C排放通量（mg m^{-2} h^{-1}）或N_2O-N排放通量（μg m^{-2} h^{-1}）；ρ为标准状态下CH_4-C或N_2O-N的密度，分别为0.54 g L^{-1}和1.25 g L^{-1}；V为采样箱内有效体积（m^3）；A为采样箱所覆盖的土壤表面积（m^2）；dC/dt为CH_4或N_2O的排放速率（μl L^{-1} h^{-1}或nl L^{-1} h^{-1}）；T为采样过程中静态箱内的平均温度（℃）。用各重复的平均值表示各处理的每次排放通量。

综合温室效应（Global warming potential，GWP）常被用来估计几种不同温室气体对气候变化的综合效应[21]。温室气体强度（Greenhouse gas intensity，GHGI）表示农业中生产单位产量的粮食对气候的影响，是一个将环境效益与经济效益相协调统一的综合评价指标[22]。在100 a时间尺度上，单位质量CH_4和N_2O的全球增温潜势分别为CO_2的25倍和298倍[2]。GWP计算公式：

$GWP=R_{CH_4} \times 25+R_{N_2O} \times 298$

式中，GWP为综合温室效应（CO_2-eq kg hm^{-2}）；R_{CH_4}为CH_4季节累积排放量（kg hm^{-2}）；R_{N_2O}为N_2O季节累积排放量（kg hm^{-2}）。

GHGI计算公式：GHGI=GWP/产量

式中，GHGI单位为CO_2-eq kg kg^{-1}；GWP单位为CO_2-eq kg hm^{-2}；产量单位为kg hm^{-2}。

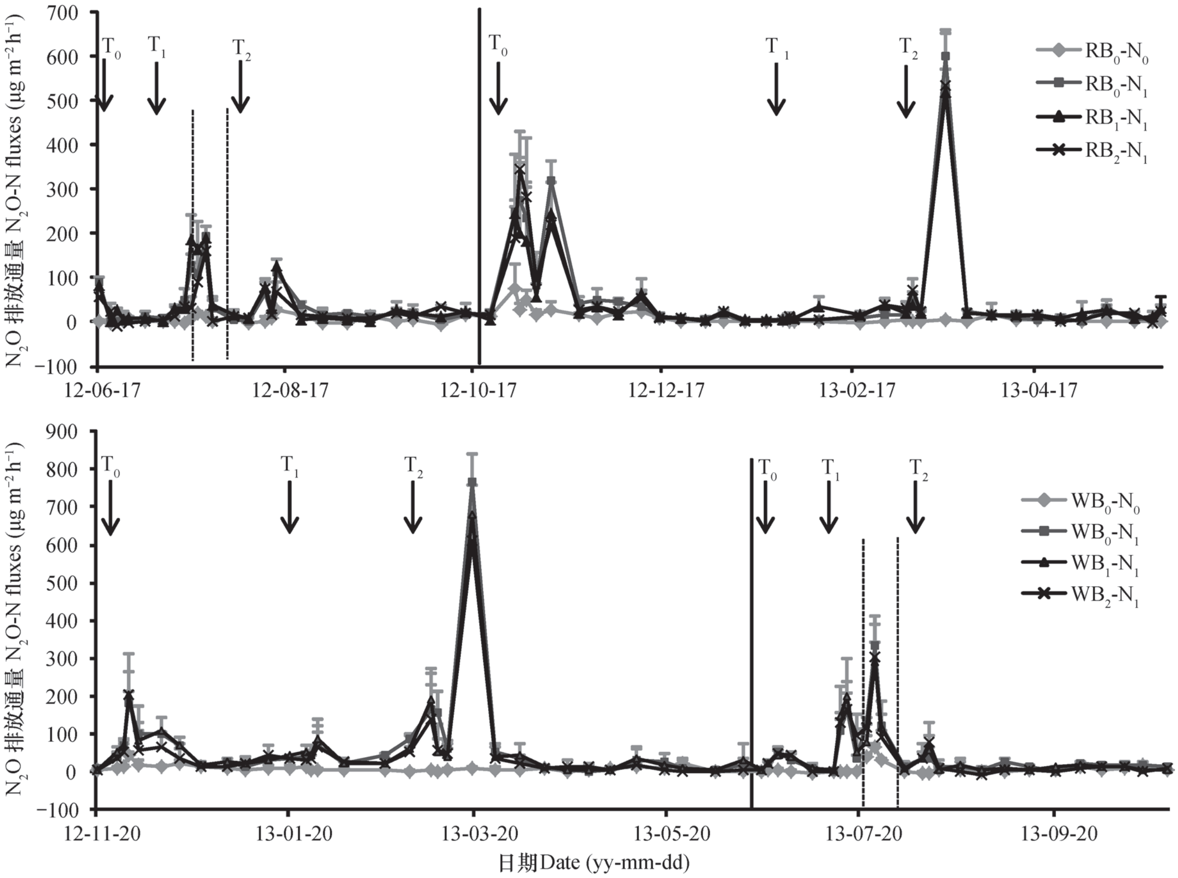
采用Excel 2010软件进行数据计算及图表制作，采用JMP 9.0软件进行方差分析及多重比较（LSD法）。

2 结果与讨论

2.1 不同时期施用生物炭对稻麦轮作周年N_2O排放规律的影响

从稻麦轮作周年N_2O排放通量的季节变化（图1）可见，无论稻季还是麦季施用生物炭均有相同的排放规律，在整个稻麦轮作周年N_2O均以排放为主。小麦季施用生物炭的N_2O的最高排放峰高于水稻季施用的生物炭，并均出现在麦季的第二次追肥后，结合图2可知，强降雨导致干湿交替加之追肥从而出现明显的N_2O排放峰。N_2O排放除主要受到氮肥施用影响外[23]，还受到土壤含水量[24]和温度[25]的影响，N_2O排放峰与土壤含水量和温度的增加有关。整个稻麦轮作周年N_2O累积排放量在不同时期施用生物炭处理间无明显差异（表2）。

施用氮肥一段时间后均能明显促进小麦N_2O的排放，其中稻季烤田期间也会出现N_2O小的排放峰，其他时期的排放量均很低（图1）。从表2中可以看出，施氮处理均显著增加N_2O的排放通量。然而在施氮的同时配施生物炭均能一定程度上降低N_2O排放。这是因为无论稻季还是麦季施用生物炭均能增加土壤孔隙度和土壤透气性，也可能减弱反硝化细菌的活性[26]，提高土壤的阳离子交换量[27]，从而增加土壤对NH_4^+的吸附[20]，使得土壤溶液中无机氮减少抑制硝化过程的进行，从而减少N_2O的排放[28]。但是，稻季配施生物炭处理间N_2O累积排放量无显著差异；WB_2-N_1较WB_0-N_1处理N_2O累积排放量显著降低了20.9%（$p<0.05$），而WB_1-N_1与WB_0-N_1无显著差异。表明随着麦季生物炭施用量增加，N_2O减排效果越明显[29]，麦季配施40 t hm^{-2}生物炭较稻季配施等量的生物炭N_2O减排效果更明显。而稻季配施生物炭与稻季单施氮肥之间均没有显著差异。可能由于麦季配施40 t hm^{-2}生物炭可更好地吸附和保持水分、降低土壤容重、增加通气性，同时生物炭具有高碳氮比，能限制硝化和反硝化作用的氮底物，促进氮素的固持，从而降低N_2O排放[30-31]。还有可能是因为麦季施用生物炭可更好地改善土壤通气，促进生物炭的快速氧化和微生物活动[32-33]，增加土壤孔隙度[34]，从而减少通过反硝化产生的N_2O。



注：R表示水稻季施用生物炭，W表示小麦季施用生物炭。T_0表示基肥，T_1和T_2表示第一次和第二次追肥。实线用来区分小麦和水稻的生长季，虚线表示水稻季的烤田期。下同 Note: R stands for biochar application in the rice season，W for biochar application in the wheat season. T_0 for basal fertilization，T_1 for first top-dressing and T_2 for second top dressing. Solid line is used to distinguish wheat growing season from rice growing season and，dotted line indicates mid-season drainage during the rice season. The same below

图1　不同时期施用生物炭稻麦轮作周年N_2O排放通量的季节变化

Fig. 1　Seasonal variation of N_2O emissions from paddy fields under rice-wheat rotation relative to timing of biochar amendment

表2　稻麦轮作周年CH_4和N_2O累积排放量、作物产量、综合温室效应和温室气体强度（100 a）

Table 2　Cumulative CH_4 and N_2O emissions，grain yield，global warming potential and greenhouse gas intensity （100 a） of one cycle of the crop rotation

处理 Treatment	N_2O-N （kg hm^{-2}）	CH_4-C （kg hm^{-2}）	产量 Yield （kg hm^{-2}）	综合温室效应 GWP （CO_2-eq kg hm^{-2}）	温室气体强度 GHGI （CO_2-eq kg kg^{-1}）
RB_0-N_0	0.66 ± 0.13c	56.67 ± 4.01e	7 748 ± 249d	2 198.3 ± 193.6d	0.284 ± 0.035ab
RB_0-N_1	3.91 ± 0.24ab	87.95 ± 1.85a	13 593 ± 1 190bc	4 761.6 ± 168.9a	0.352 ± 0.029a
RB_1-N_1	3.76 ± 0.18ab	86.27 ± 2.74a	15 286 ± 342ab	4 634.3 ± 79.9ab	0.303 ± 0.004ab
RB_2-N_1	3.50 ± 0.08b	80.42 ± 1.46b	14 790 ± 303abc	4 318.1 ± 62.6c	0.292 ± 0.008ab
WB_0-N_0	0.68 ± 0.07c	47.83 ± 0.53f	7 236 ± 1 015d	1 911.1 ± 35.5d	0.267 ± 0.031b
WB_0-N_1	4.45 ± 0.30a	74.20 ± 0.86c	13 225 ± 532c	4 555.4 ± 112.8ab	0.345 ± 0.021a
WB_1-N_1	4.18 ± 0.46ab	71.46 ± 3.50c	16 081 ± 208a	4 338.7 ± 116.4b	0.270 ± 0.011b
WB_2-N_1	3.52 ± 0.38b	65.83 ± 2.20d	14 552 ± 526abc	3 840.5 ± 187.2c	0.264 ± 0.021b

注：平均值 ± 标准差，n=3。同列相同字母表示处理间差异不显著，同列不同字母表示处理间差异显著（p<0.05）Note: Means ± SD，n=3. Same letters in the same column mean insignificant difference between treatments，different letters in the same column mean significant difference at α =0.05 level between treatments

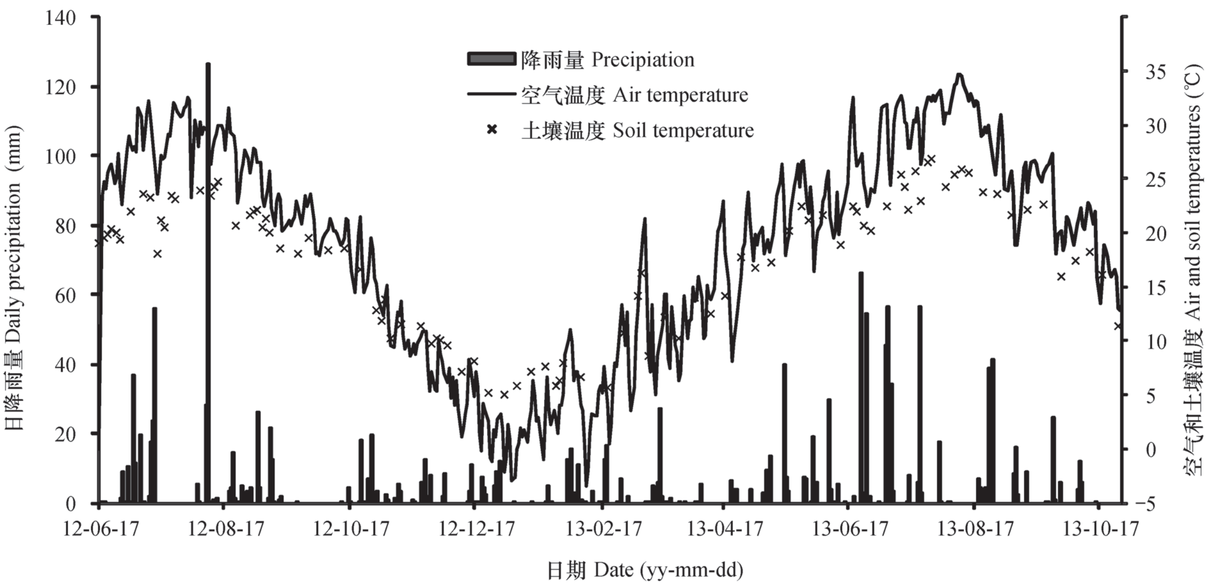


图2　稻麦轮作周年日降雨量、土壤温度与空气温度的分布

Fig.2　Distribution of daily precipitation and air and soil temperatures during one cycle of rice-wheat rotion from June 2012 to October 2013

2.2　不同时期施用生物炭对稻麦轮作周年CH_4排放规律的影响

在稻麦轮作周年中整个旱作麦季CH_4排放通量均很低（图3），有时甚至出现负值，CH_4排放和吸收过程相互交替，无明显规律。而CH_4的排放主要集中在稻季，其中水稻季施用生物炭，CH_4排放量急剧增加，最高排放峰出现在2012年水稻移栽后的一个星期；麦季施用生物炭，CH_4排放量逐渐增加，最高排放峰出现在2013年水稻第二次追肥后。

在施氮肥的同时，稻季和麦季配施20 t hm^{-2}的生物炭对周年CH_4的排放均无显著影响，但稻季和麦季配施40 t hm^{-2}的生物炭均显著降低8.6%和11.3%的CH_4排放。这可能是因为生物炭能增加土壤通气，增加阳离子交换量[35]，抑制产甲烷细菌的活动，从而减少稻田CH_4的排放[36]。Abel等[37]研究表明当生物炭作用于旱地时可更好地降低土壤容重，增加土壤孔隙度，增加微生物的丰度[38]，从而更大程度上减少CH_4的排放。Yanai等[39]研究发现生物炭可提高土壤pH，周叶锋和廖晓兰[40]研究发现影响甲烷排放的几个主要因素有温度、产甲烷细菌和甲烷氧化细菌、pH等。对于本试验，麦季配施40 t hm^{-2}的生物炭pH增加至6.20，均高于其他处理，从而更有效地减少CH_4的排放。

2.3　不同时期施用生物炭对稻田小麦产量的影响

从表2可看出，稻季配施生物炭与单施氮肥之间产量并没有显著性差异；麦季配施低量生物炭较单施氮肥显著增产21.6%（$p<0.05$），而麦季配施高量生物炭较单施氮肥也无显著性差异。这可能是因为生物炭施入土壤后易形成大团聚体，对NH_4^+有很强的吸附和保持作用，减少氮损失，提供氮素营养，增加作物产量[41]，与Asai等[42]研究结果一致，适量生物炭能显著改善土壤肥力，提高产量[43]。麦季施用生物炭处理的增产效果优于稻季施用生物炭处理，这可能是因为生物炭施入后因翻地而与土壤充分混合，从而促进了土壤中微生物活性，改变微生物群落结构[44-45]，从而更好地增加作物产量。

2.4　不同时期施用生物炭对稻麦轮作周年GWP和GHGI的影响

在100a时间尺度上，不同时期施用生物炭对稻麦轮作周年CH_4和N_2O的综合温室效应（GWP）和温室气体强度（GHGI）见表2。由表2可知虽然RB_0-N_1与WB_0-N_1、RB_1-N_1与WB_1-N_1、RB_2-N_1与WB_2-N_1的GWP和GHGI差异均不显著，但WB_2-N_1较WB_0-N_1的GWP显著减少15.7%，WB_1-N_1和WB_2-N_1与WB_0-N_1相比分别显著降低GHGI 21.7%和23.5%。不同时期配施的生物炭稻麦轮

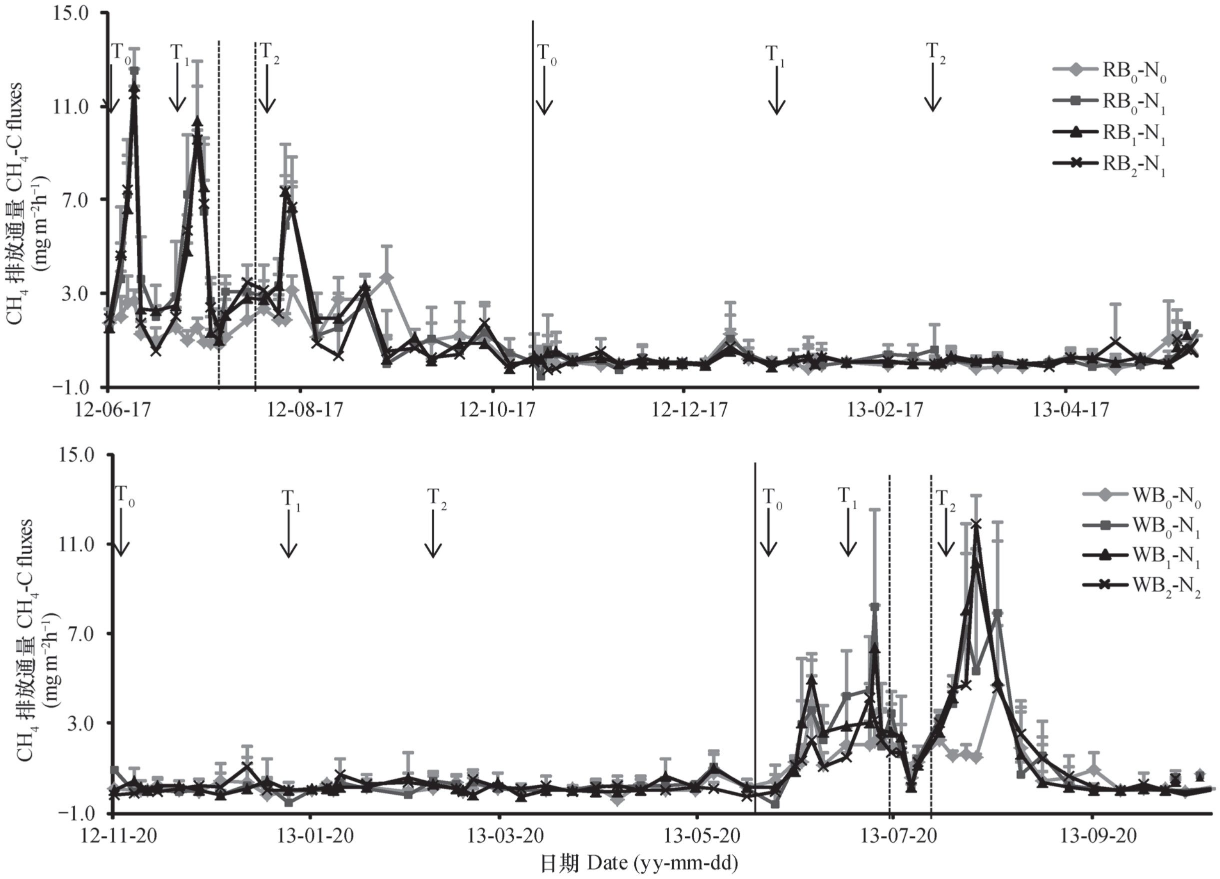


图3　不同时期施用生物炭稻麦轮作周年CH_4排放通量的季节变化

Fig. 3　Seasonal variation of CH_4 emissions from paddy fields under rice-wheat rotation relative to timing of biochar amendment

作周年GWP和GHGI的影响不尽相同，主要与土壤特性的差异有关[46]。由于麦季配施生物炭对土壤有机碳、全氮及pH值的增加效果优于稻季施用生物炭（表3），从而促进土壤中微生物的生长，增加有机物质的矿化[47-48]，增加作物产量[49]，所以麦季配施生物炭在增产和减排的同时对降低轮作周年的GWP和GHGI效果更好（表2）。

表3　不同时期施用生物炭对土壤理化性质的影响

Table 3　Effect of biochar on soil total N，pH，SOC of topsoil（0 ~ 15 cm）relative to timing of the amendment

处理 Treatment	总氮 Total N（$g\ kg^{-1}$）	pH （1：2.5 H_2O）	有机碳 Organic C（$g\ kg^{-1}$）
RB_0-N_0	1.29 ± 0.03c	5.67 ± 0.10d	14.90 ± 0.75d
RB_0-N_1	1.31 ± 0.04c	5.64 ± 0.09d	14.77 ± 0.74d
RB_1-N_1	1.44 ± 0.03b	5.95 ± 0.07c	18.73 ± 0.55c
RB_2-N_1	1.48 ± 0.05ab	6.08 ± 0.08ab	21.90 ± 0.46a
WB_0-N_0	1.28 ± 0.05c	5.65 ± 0.06d	14.70 ± 0.66d
WB_0-N_1	1.32 ± 0.06c	5.73 ± 0.08d	14.73 ± 0.40d
WB_1-N_1	1.47 ± 0.04ab	6.02 ± 0.08bc	20.30 ± 0.46b
WB_2-N_1	1.54 ± 0.03a	6.20 ± 0.03a	22.80 ± 0.53a

注：平均值 ± 标准差，n=3。同列不同字母表示处理间差异显著（$p<0.05$）Note: Means ± SD，n=3. Different letters in the same column meant significant difference at α =0.05 level between treatments

3 结 论

相比稻季单施氮肥处理，稻季配施20 t hm^{-2}生物炭对稻麦轮作周年的N_2O和CH_4排放、作物产量及GWP和GHGI均无明显差异，其中配施40 t hm^{-2}生物炭能显著降低8.6%的CH_4排放，显著增产17.2%和显著降低9.3%的GWP。相比麦季单施氮肥处理，麦季配施20 t hm^{-2}生物炭对稻田旱作麦季的N_2O和CH_4排放及GWP也均无显著影响，但显著增加小麦产量21.6%，从而显著降低GHGI 21.7%；而麦季配施40 t hm^{-2}生物炭显著降低20.9%和11.3%的N_2O和CH_4排放，显著降低GWP 15.7%和GHGI 23.5%。说明麦季配施生物炭对作物增产及降低GWP和GHGI效果较稻季配施生物炭更好。由于生物炭是一种多孔富碳、难降解、高度芳香化，类似活性炭的物质，这决定了生物炭在土壤中能够长期稳定的存在[50]，生物炭的后续效应将持续存在，因此对生物炭的长期研究很有必要。

参 考 文 献

[1] IPCC. Climate change 2013：The physical science basis：Working group I contribution to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Stockholm：Cambridge University Press，2013

[2] IPCC. Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing.//ArtaxoP，Climate change 2007：The physical science basis：Contribution of working group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge，UK：Cambridge University Press

[3] IPCC. Fourth assessment report：Climate change 2007：The physical science basis-summary for policymakers. http：//www.ipcc.ch/SPM2feb07.pdf

[4] Roberts K G，Gloy B A，Joseph S，et al. Life cycle assessment of biochar systems：Estimating the energetic，economic，and climate change potential. Environmental Science & Technology，2009，44（2）：827—833

[5] Karhu K，Mattila T，Bergström I，et al. Biochar addition to agricultural soil increased CH_4 uptake and water holding capacity-Results from a short-term pilot field study. Agriculture，Ecosystems & Environment，2011，140（1）：309—313

[6] Marris E. Putting the carbon back：Black is the new green. Nature，2006，442（7103）：624—626

[7] Harder B. Smoldered-Earth policy：Created by ancient amazonian natives，fertile，dark soils retain abundant carbon. Science News，2006，169（9）：133—133

[8] Lehmann J. A handful of carbon. Nature，2007，447（7141）：143—144

[9] Zhang A F，Cui L Q，Pan G X，et al. Effect of biochar amendment on yield and methane and nitrous oxide emissions from a rice paddy from Tai Lake Plain，China. Agriculture，Ecosystems & Environment，2010，139（4）：469—475

[10] Zhang A F，Liu Y M，Pan G X，et al. Effect of biochar amendment on maize yield and greenhouse gas emissions from a soil organic carbon poor calcareous loamy soil from Central China Plain. Plant and Soil，2012，351（1/2）：263—275

[11] Khalil M A K，Rasmussen R A，Wang M X，et al. Emissions of trace gases from Chinese rice fields and biogas generators：CH_4，N_2O，CO，CO_2，chlorocarbons，and hydrocarbons. Chemosphere，1990，20（1）：207—226

[12] Cai Z C，Xing G X，Yan X Y，et al. Methane and nitrous oxide emissions from rice paddy fields as affected by nitrogen fertilisers and water management. Plant and Soil，1997，196（1）：7—14

[13] Xing G X，Zhu Z L. Preliminary studies on N_2O emission fluxes from upland soils and paddy soils in China. Nutrient Cycling in Agroecosystems，1997，49（1/3）：17—22

[14] 刘玉学，王耀锋，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. 应用生态学报，2013，24（8）：2166—2172. Liu Y X，Wang Y F，Lü H H，et al. Effects of biochar application on greenhouse gas emission from paddy soil and its physical and chemical properties（In Chinese）. Chinese Journal of Applied Ecology，2013，24（8）：2166—2172

[15] Xie Z B，Xu Y P，Liu G，et al. Impact of biochar application on nitrogen nutrition of rice，greenhouse-gas emissions and soil organic carbon dynamics in two paddy soils of China. Plant and Soil，2013，370（1/2）：527—540

[16] Knoblauch C，Maarifat A A，Pfeiffer E M，et al. Degradability of black carbon and its impact on trace gas fluxes and carbon turnover in paddy soils. Soil Biology & Biochemistry，2011，43（9）：1768—1778

[17] 蒋晨，麻培侠，胡保国，等. 生物质炭还田对稻田甲烷的减排效果. 农业工程学报，2013，29（15）：184—191. Jiang C，Ma P X，Hu B G，et al. Effect of biochar returning to paddy field on CH_4 emission reduction（In Chinese）. Transactions of the Chinese Society of

Agricultural Engineering，2013，29（15）：184—191

［18］ 张斌，刘晓雨，潘根兴，等. 施用生物质炭后稻田土壤性质，水稻产量和痕量温室气体排放的变化. 中国农业科学，2012，45（23）：4844—4853. Zhang B，Liu X Y，Pan G X，et al. Changes in soil properties，yield and trace gas emission from a paddy after biochar amendment in two consecutive rice growing cycles（In Chinese）. Scientia Agricultura Sinica，2012，45（23）：4844—4853

［19］ Spokas K A，Reicosky D C. Impacts of sixteen different biochars on soil greenhouse gas production. Annals of Environmental Science，2009，3（1）：179—193

［20］ Wang J Y，Zhang M，Xiong Z Q，et al. Effects of biochar addition on N_2O and CO_2 emissions from two paddy soils. Biology and Fertility of Soils，2011，47（8）：887—896

［21］ Frolking S，Li C，Braswell R，et al. Short-and long-term greenhouse gas and radiative forcing impacts of changing water management in Asian rice paddies. Global Change Biology，2004，10（7）：1180—1196

［22］ Mosier A R，Halvorson A D，Reule C A，et al. Net global warming potential and greenhouse gas intensity in irrigated cropping systems in northeastern Colorado. Journal of Environmental Quality，2006，35（4）：1584—1598

［23］ Snyder C S，Bruulsema T W，Jensen T L，et al. Review of greenhouse gas emissions from crop production systems and fertilizer management effects. Agriculture，Ecosystems & Environment，2009，133（3）：247—266

［24］ del Prado A，Merino P，Estavillo J M，et al. N_2O and NO emissions from different N sources and under a range of soil water contents. Nutrient Cycling in Agroecosystems，2006，74（3）：229—243

［25］ Lee J，Hopmans J W，van Kessel C，et al. Tillage and seasonal emissions of CO_2，N_2O and NO across a seed bed and at the field scale in a Mediterranean climate. Agriculture，Ecosystems & Environment，2009，129（4）：378—390

［26］ Cavigelli M A，Robertson G P. Role of denitrifier diversity in rates of nitrous oxide consumption in a terrestrial ecosystem. Soil Biology & Biochemistry，2001，33（3）：297—310

［27］ 陈红霞，杜章留，郭伟，等. 施用生物炭对华北平原农田土壤容重、阳离子交换量和颗粒有机质含量的影响. 应用生态学报，2011，22（11）：2930—2934. Chen H X，Du Z L，Guo W，et al. Effects of biochar amendment on cropland soil bulk density，cation exchange capacity，and particulate organic matter content in the North China Plain（In Chinese）. Chinese Journal of Applied Ecology，2011，22（11）：2930—2934

［28］ 刘娇，高健，赵英. 玉米秸秆及其黑炭添加对黄绵土氮素转化的影响. 土壤学报，2014，51（6）：1361—1368. Liu J，Gao J，Zhao Y. Effects of addition of both maize stalk and its biochar to loess soil on N transformations（In Chinese）. Acta Pedologica Sinica，2014，51（6）：1361—1368

［29］ 李力，刘娅，陆宇超，等. 生物炭的环境效应及其应用的研究进展. 环境化学，2011，30（8）：1411—1421. Li L，Liu Y，Lu Y C，et al. Review on environmental effects and applications of biochar（In Chinese）. Environmental Chemistry，2011，30（8）：1411—1421

［30］ Tanaka F，Ono S，Hayasaka T. Identification and evaluation of toxicity of rice root elongation inhibitors in flooded soils with added wheat straw. Soil Science & Plant Nutrition，1990，36（1）：97—103

［31］ Jensen E S. Nitrogen immobilization and mineralization during initial decomposition of ^{15}N-labelled pea and barley residues. Biology and Fertility of Soils，1997，24（1）：39—44

［32］ Nguyen B T，Lehmann J. Black carbon decomposition under varying water regimes. Organic Geochemistry，2009，40（8）：846—853

［33］ 王晓辉，郭光霞，郑瑞伦，等. 生物炭对设施退化土壤氮相关功能微生物群落丰度的影响. 土壤学报，2013，50（3）：624—631. Wang X H，Guo G X，Zheng R L，et al. Effect of biochar on abundance of N-related functional microbial communities in degraded greenhouse soil（In Chinese）. Acta Pedologica Sinica，2013，50（3）：624—631

［34］ Tammeorg P，Simojoki A，Mäkelä P，et al. Biochar application to a fertile sandy clay loam in boreal conditions：Effects on soil properties and yield formation of wheat，turnip rape and faba bean. Plant and Soil，2014，374（1/2）：89—107

［35］ Silber A，Levkovitch I，Graber E R. pH-dependent mineral release and surface properties of cornstraw biochar：Agronomic implications. Environmental Science & Technology，2010，44（24）：9318—9323

［36］ Khan S，Wang N，Reid B J，et al. Reduced bioaccumulation of PAHs by *Lactuca satuva* L. grown in contaminated soil amended with sewage sludge and sewage sludge derived biochar. Environmental Pollution，2013，175：64—68

［37］ Abel S，Peters A，Trinks S，et al. Impact of biochar and hydrochar addition on water retention and water repellency of sandy soil. Geoderma，2013，202：183—191

［38］ Lehmann J，Rillig M C，Thies J，et al. Biochar effects on soil biota-A review. Soil Biology & Biochemistry，2011，43（9）：1812—1836

［39］ Yanai Y，Toyota K，Okazaki M. Effects of charcoal addition on N_2O emissions from soil resulting from rewetting air-dried soil in short-term laboratory experiments. Soil Science & Plant Nutrition，2007，53（2）：181—188

［40］ 周叶锋，廖晓兰. 影响甲烷排放量的两种细菌——产甲烷细菌和甲烷氧化菌的研究进展. 农业环境科学学报，2007，26（增）：340—346. Zhou Y F，Liao X L. Emission of methane from environment affected by methanogens and methanotrophs（In Chinese）. Journal of Agro-Environment Science，2007，26（Suppl）：340—346

［41］ Steiner C，Teixeira W G，Lehmann J，et al. Long term effects of manure，charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil. Plant and Soil，2007，291（1/2）：275—290

［42］ Asai H，Samson B K，Stephan H M，et al. Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos：1. Soil physical properties，leaf SPAD and grain yield. Field Crops Research，2009，111（1）：81—84

［43］ 何绪生，张树清，佘雕，等. 生物炭对土壤肥料的作用及未来研究. 中国农学通报，2011，27（15）：16—25. He X S，Zhang S Q，She D，et al. Effects of biochar on soil and fertilizer and future research（In Chinese）. Chinese Agricultural Science Bulletin，2011，27（15）：16—25

［44］ Forbes M S，Raison R J，Skjemstad J O. Formation，transformation and transport of black carbon（charcoal） in terrestrial and aquatic ecosystems. Science of the Total Environment，2006，370（1）：190—206

［45］ Cheng C H，Lehmann J，Engelhard M H. Natural oxidation of black carbon in soils：Changes in molecular form and surface charge along a climosequence. Geochimica et Cosmochimica Acta，2008，72（6）：1598—1610

［46］ 焦燕，黄耀，宗良纲，等. 不同水稻土水稻生长季施用秸秆对后季麦田N_2O排放的影响. 南京农业大学学报，2004，27（1）：36—40. Jiao Y，Huang Y，Zong L G，et al. Effect of straw in corporation to different soils in rice-growing season on N_2O emission in following wheat-growing season（In Chinese）. Journal of Nanjing Agricultural University，2004，27（1）：36—40

［47］ Major J，Lehmann J，Rondon M，et al. Fate of soil-applied black carbon：Downward migration，leaching and soil respiration. Global Change Biology，2010，16（4）：1366—1379

［48］ Kuzyakov Y，Subbotina I，Chen H，et al. Black carbon decomposition and incorporation into soil microbial biomass estimated by ^{14}C labeling. Soil Biology & Biochemistry，2009，41（2）：210—219

［49］ Chan K Y，van Zwieten L，Meszaros I，et al. Agronomic values of greenwaste biochar as a soil amendment. Soil Research，2008，45（8）：629—634

［50］ 张阿凤，潘根兴，李恋卿. 生物黑炭及其增汇减排与改良土壤意义. 农业环境科学学报，2009，28（12）：2459—2463. Zhang A F，Pan G X，Li L Q. Biochar and the effect on C stock enhancement，emission reduction of greenhouse gases and soil reclaimation（In Chinese）. Journal of Agro-Environment Science，2009，28（12）：2459—2463

EFFECTS OF BIOCHAR ON N_2O AND CH_4 EMISSIONS FROM PADDY FIELD UNDER RICE-WHEAT ROTATION DURING RICE AND WHEAT GROWING SEASONS RELATIVE TO TIMING OF AMENDMENT

Li Lu　Zhou Ziqiang　Pan Xiaojian　Xiong Zhengqin†

（*Jiangsu Key Laboratory of Low Carbon Agriculture and GHGs Mitigation*，*College of Resources and Environmental Sciences*，*Nanjing Agricultural University*，*Nanjing* 210095，*China*）

Abstract　A field experiment was carried out in a paddy field under rice-wheat rotation，to study effects of biochar amended at the rice or wheat season on paddy CH_4 and N_2O emissions throughout the cycle of rotation，their consequential global warming potential（GWP） and greenhouse gas intensity（GHGI）， with a view to providing some scientific basis for extrapolation of the use biochar in mitigating global warming potentials and in agricultural production as well. The field experiment was designed to last an entire cycle of crop rotation, that is, two cropping seasons, rice season and wheat season, and to have eight treatments in triplicate, i.e. Treatment RB_0-N_0 or CK（zero N fertilizer applied & zero biochar amended in the rice season）, Treatment RB_0-N_1（250 kg hm^{-2} N fertilizer applied & zero biochar amended in the rice season）, Treatment RB_1-N_1（250 kg hm^{-2} N fertilizer applied & 20 t hm^{-2} biochar amended in the rice season）, Treatment RB_2-N_1（250 kg hm^{-2} N fertilizer applied & 40 t hm^{-2} biochar amendment at rice season）, Treatment WB_0-N_0（zero N fertilizer applied & zero biochar amended in the wheat season）, Treatment WB_0-N_1（250 kg hm^{-2} N fertilizer applied & biochar amended in the wheat season）, Treatment WB_1-N_1（250 kg hm^{-2} N fertilizer applied & 20 t hm^{-2} biochar amended in the wheat season）, and Treatment WB_2-N_1（250 kg hm^{-2} N fertilizer applied & 40 t hm^{-2} biochar amended in the wheat season）. Biochar was amended before rice transplanting on June 10, 2012 and wheat seeding on November 10, 2012. CH_4 and N_2O gas emission fluxes were monitored with the static chamber and gas chromatography method. Results show that Relative to Treatment RB_0-N_1 Treatment RB_1-N_1 did not have much significant effect on N_2O and CH_4 emissions, GWP and GHGI, while Treatment RB_2-N_1 significantly improved crop yield by 17.2%, and significantly reduced total CH_4 emissions and GWP by 8.6% and 9.3%, respectively. Treatment WB_1-N_1 did not have much effect on GHGI and GWP, but did increase wheat yield by 21.6%, which in turn significantly reduced GHGI by 21.7%. Treatment WB_2-N_1 significantly reduced N_2O and CH_4 emissions by 20.9% and 11.3%, respectively and GWP and GHGI by 15.7% and 23.5%, respectively. In terms of total GWP on a 100-year horizon, the treatments followed an order of $RB_0-N_1 > RB_1-N_1 > WB_0-N_1 > WB_1-N_1 > RB_2-N_1 > WB_2-N_1 > RB_0-N_0 > RB_0-N_0$, while in terms of GWPs per unit crop grain yield, they followed another, i.e. $RB_0-N_1 > WB_0-N_1 > RB_1-N_1 > RB_2-N_1 > RB_0-N_0 > WB_1-N_1 > WB_0-N_0 > WB_2-N_1$. Obviously biochar application is more effective in the wheat season than in the rice season, in reduciing N_2O and CH_4 emissions, lowering the GWP and GHGI and increasing crop yield of the rotation system. Although Treatment WB_2N_1 was lower than Treatment WB_1N_1 in N_2O and CH_4 emission, and also in wheat yield which to use depends on balance between GHG mitigation and grain yield. However, consequential effects and underlying mechanisms of the use of biochar in the field on scale need further field study Results incorporation at rice season had no significant difference on N_2O and CH_4 emissions, GWP and GHGI. Relative to the RB_0-N_1 treatment, the RB_2-N_1 treatment significantly improved crop yield by 17.2%, significantly reduced the total CH_4 emissions and GWP by 8.6% and 9.3%, respectively. The crop yield of biochar incorporation at wheat season with 20 t hm^{-2} significantly improved by 21.6%, and significantly reduced 21.7% GHGI compare with WB_0-N_1. Biochar incorporation at wheat season with 40 t hm^{-2} significantly reduced N_2O and CH_4 emissions by 20.9% and 11.3%, respectively, significantly reduced GWP and GHGI by 15.7% and 23.5%, respectively. Biochar application at wheat season was better than rice season. iochar incorporation at wheat season on improved crop production, reduced N_2O and CH_4 emissions, while simultaneously lower the GWP and GHGI were superior to the biochar incorporation at rice season in the rice-wheat rotation system.

key words Biochar; N_2O emission; CH_4 emission; Global warming potential; Greenhouse gas intensity

（责任编辑：卢 萍）

ACTA PEDOLOGICA SINICA Vol. 52 No. 4 July，2015

CONTENTS

Reviews and Comments

Soil Science and Modern Agriculture

Research Articles

Research Notes

Cover Picture: Full view of ionic rare earth mine desert (by Tang Yetao, Liu Wenshen)

土壤学报
Turang Xuebao
（双月刊，1948年创刊）
第52卷　第4期　2015年7月

ACTA PEDOLOGICA SINICA
（Bimonthly，Started in 1948）
Vol. 52　No. 4　July，2015

编　　辑	《土壤学报》编辑委员会 地址：南京市北京东路71号　邮政编码：210008 电话：025－86881237 E-mail：actapedo@ issas. ac. cn	Edited by	Editorial Board of Acta Pedologica Sinica Add：71 East Beijing Road，Nanjing 210008，China Tel：025－86881237 E-mail：actapedo@ issas. ac. cn
主　　编	史学正	Editor-in-Chief	Shi Xuezheng
主　　管	中国科学院	Superintended by	Chinese Academy of Sciences
主　　办	中国土壤学会	Sponsored by	Soil Science Society of China
承　　办	中国科学院南京土壤研究所	Undertaken by	Institute of Soil Science， Chinese Academy of Sciences
出　　版	科学出版社 地址：北京东黄城根北街16号 邮政编码：100717	Published by	Science Press Add：16 Donghuangchenggen North Street， Beijing 100717，China
印刷装订	北京中科印刷有限公司	Printed by	Beijing Zhongke Printing Limited Company
总发行	科学出版社 地址：北京东黄城根北街16号 邮政编码：100717 电话：010－64017032 E-mail：journal@ mail. sciencep. com	Distributed by	Science Press Add：16 Donghuangchenggen North Street， Beijing 100717，China Tel：010－64017032 E-mail：journal@ mail. sciencep. com
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址：北京399信箱　邮政编码：100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add：P. O. Box 399，Beijing 100044，China

国内统一刊号：CN 32-1119/P　国内邮发代号：2-560　国外发行代号：BM45　定价：60.00元
国内外公开发行

ISSN 0564-3929
07>
9 770564 392156