

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第9期

Vol.38 No.9

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

中国国道和省道机动车尾气排放特征 王人洁,王堃,张帆,高佳佳,李悦,岳涛(3553)

北偏西大风对北京冬季生物气溶胶的影响 闫威卓,王步英,Oscar Fajardo Montana,蒋靖坤,郝吉明(3561)

不同空气质量等级下环境空气颗粒物及其碳组分变化特征 方小珍,吴琳,张静,李怀瑞,毛洪钧,宋从波(3569)

大气颗粒物及降尘中重金属的分布特征与人体健康风险评价 王永晓,曹红英,邓雅佳,张倩(3575)

2014年6月南京大气复合污染观测 郝建奇,葛宝珠,王自发,张祥志,汤莉莉,徐丹卉(3585)

嘉兴市不同天气条件下大气污染物和气溶胶化学组分的分布特征 王红磊,沈利娟,唐倩,吕升,田旭东,李莉,张孝寒(3594)

应用扩散管测量霾污染期间大气氮硫化合物浓度的方法 田世丽,刘学军,潘月鹏,周焱博,许稳,王跃思(3605)

福建省地级市人为源活性氮排放及其特征分析 张千湖,高兵,黄蕙,颜晓妹,崔胜辉(3610)

珠三角某高校室内灰尘重金属含量水平、来源及其健康风险评价 蔡云梅,黄涵书,任露陆,张艳林(3620)

贵金属和助剂负载量对柴油公交车 CDPF 颗粒净化性能的影响 谭丕强,仲益梅,郑源飞,楼狄明,胡志远(3628)

东营市北部海域沉积物中重金属的分布、来源及生态风险评价 刘群群,孟范平,王菲菲,崔鸿武,王曰杰(3635)

基于 MERIS 影像的洪泽湖叶绿素 a 浓度时空变化规律分析 刘阁,李云梅,吕恒,牟蒙,雷少华,温爽,毕顺,丁潇蕾(3645)

太湖蠡河小流域水质的空间变化特征及污染源解析 连慧姝,刘宏斌,李旭东,宋挺,雷秋良,任天志,武淑霞,李影(3657)

黄河高村至利津河段水体和沉积物中不同形态磷的分布特征 赵瞰,贾雁翔,姜兵琦,梅翔宇,李敏(3666)

三峡澎溪河流域消落区与岸边土壤磷形态特征 黄俊杰,王超,方博,冯磊,方芳,李哲,郭劲松(3673)

网湖沉积物正构烷烃分布特征及其记录的环境变化 沈贝贝,吴敬禄,曾海鳌,张永东,金苗(3682)

高地下水位地区透水停车场的水文控制效果 金建荣,李田,王圣思,陈子隼,周佳雯(3689)

北方典型设施蔬菜种植区地下水水质特征 于静,虞敏达,蓝艳,何小松,李敏(3696)

垃圾填埋水溶性有机物组成、演化及络合重金属特征 肖骁,何小松,席北斗,高如泰,李丹,张慧,崔东宇,袁志业(3705)

潜流人工湿地基质结构与微生物群落特征的相关性 李振灵,丁彦礼,白少元,李雪芬,游少鸿,解庆林(3713)

滑石矿开采对着生藻群落结构和水环境的影响 臧小苗,张远,林佳宁,王书平,高欣,赵茜,王靖淇(3721)

高铵条件下绿狐尾藻的生理与氮磷吸收特征 刘少博,冉彬,曾冠军,李宝珍,朱红梅,刘锋,肖润林,吴金水(3731)

活性炭吸附对藻类有机物的去除及其消毒副产物的控制 苗雨,翟洪艳,于珊珊,张婧,史常香(3738)

石墨烯凝胶电极的制备及电吸附 Pb^{2+} 的性能 王瑶,吉庆华,李永峰,胡承志(3747)

电流密度对 BDD 电极电催化矿化吡啶的影响与机制 张佳维,王婷,郑彤,蒋欢,倪晋仁(3755)

黄铁矿光化学氧化降解微囊藻毒素-LR 的机制 周薇,方艳芬,张钰,吴春红,黄应平(3762)

双氧水协同生化法强化处理印染废水 岳秀,唐嘉丽,于广平,吉世明,刘竹寒(3769)

基于 ABR-MBR 组合工艺不同进水 C/N 比对反硝化除磷性能的影响机制 吴鹏,程朝阳,沈耀良,赵诗惠,吕亮(3781)

利用好氧颗粒污泥持续增殖启动高性能亚硝化反应器 高军军,钱飞跃,王建芳,陈希,沈耀良,张泽宇,闫俞廷(3787)

零价铁自养反硝化过程活性污泥矿化及解决措施 张宁博,李祥,黄勇,张文静(3793)

低氧污泥丝状菌膨胀的呼吸图谱特征分析 马智博,李志华,杨成建,贺春博,秋亮,张晶(3801)

市政污泥接种焦化废水好氧降解能力及微生物群落演替的响应分析 刘国新,吴海珍,孙胜利,胡肖怡,吴晓英,陈华勇,范一文,胡成生,韦朝海(3807)

高效反硝化细菌的快速培养及群落结构多样性分析 孟婷,杨宏(3816)

两座污水处理系统中细胞态和游离态抗生素抗性基因的丰度特征 张衍,陈吕军,谢辉,李奥林,代天娇(3823)

生物炭对土壤 CH_4 、 N_2O 排放的影响 周凤,许晨阳,王月玲,林云,王强,张彤彤,耿增超(3831)

江西省耕地土壤碳氮比空间变异特征及其影响因素 江叶枫,郭熙,孙凯,饶磊,李婕,王澜珂,叶英聪,李伟峰(3840)

碳酸钙与生物炭对酸化菜地土壤持氮能力的影响 俞映惊,杨林章,Alfred Oduor Odindo,薛利红,何世颖,段婧婧(3851)

黄土丘陵区小流域不同整地措施长期影响下的土壤水力学特性 冯天骄,卫伟,陈利顶,陈蝶,干洋,杨磊(3860)

有机碳含量对多环芳烃在土壤剖面残留及迁移的影响 费佳佳,张枝焕,万甜甜,何奉朋(3871)

酸雨区不同用地类型土壤有效态 Cd 含量季节变化及关键影响因子 刘孝利,曾昭霞,铁柏清,叶长城,周俊驰,雷鸣(3882)

陕西潼关冶金污染土壤的修复评价及应用潜力 王姣,肖然,李荣华,宁西翠,蒋顺成,李晓龙,张增强,沈锋(3888)

甘肃白银东大沟铅锌镉复合污染场地水泥固化稳定化原位修复 吕浩阳,费杨,王爱勤,阎秀兰,李发生,李春萍,杜延军,郑梓铭(3897)

设施栽培对土壤与蔬菜中 PAHs 污染特征及其健康风险评价 金晓佩,贾晋璞,毕春娟,王薛平,郭雪,陈振楼,仇新莲(3907)

镉-铅复合污染下 AM 真菌对玉米生长和镉、铅吸收的影响 常青,郭伟,潘亮,王起凡,周昕南,杨亮,李娥(3915)

秸秆还田对水稻镉积累及其亚细胞分布的影响 段桂兰,王芳,岑况,王伯勋,程旺大,刘跃川,张红梅(3927)

Pantoea sp. IMH 介导土壤中砷锑的形态转化 张林,卢金锁(3937)

生物炭对土壤中重金属铅和锌的吸附特性 王红,夏雯,卢平,布雨薇,杨浩(3944)

浒苔生物炭的特征及其对 Cr(VI) 的吸附特点和吸附机制 陈友媛,惠红霞,卢爽,王报英,王志婕,王楠(3953)

灼烧净水污泥对外源磷的吸附和固定作用 于胜楠,李勇,李大鹏,黄勇(3962)

污泥生物炭制备吸附陶粒 李杰,潘兰佳,余广炜,汪印,尤甫天,谢胜禹(3970)

石墨相氮化碳-碘氧化铋层状异质结的构建及其光催化杀菌性能 黄建辉,林文婷,谢丽燕,陈建琴(3979)

《环境科学》征稿简则(3859) 《环境科学》征订启事(3952) 信息(3644, 3688, 3768)

生物炭对壤土 CH₄、N₂O 排放的影响

周凤, 许晨阳, 王月玲, 林云, 王强, 张彤彤, 耿增超*

(西北农林科技大学资源环境学院, 农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 杨凌 712100)

摘要: 为了探讨生物炭对壤土 CH₄、N₂O 排放的影响, 采用田间小区试验, 测定了生物炭不同添加量 (0、20、40、60、80 t·hm⁻²) 下冬小麦田 CH₄、N₂O 的吸收/排放通量、小麦产量、土壤有机碳、土壤含水率及不同土层土壤温度。结果表明, CH₄、N₂O 的吸收/排放通量随生育期不同变化明显。添加生物炭后, CH₄ 累积吸收量增加了 12.88%~71.61%, 当添加量 ≥ 40 t·hm⁻² 时, 增“汇”作用达到显著水平, 且添加量为 40 t·hm⁻² 时 CH₄ 累积吸收量最高; N₂O 累积排放量和全球增温潜势与对照相比没有显著差异; 温室气体强度降低了 13.24%~22.14%。添加生物炭提高了冬小麦产量, 增产幅度为 1.72%~32.19%, 当添加量 ≥ 40 t·hm⁻² 时, 麦田增产效果达到显著水平, 40 t·hm⁻² 生物炭为麦田增产的最适添加量。同时, 添加生物炭显著提高了土壤有机碳和土壤含水率, 与对照相比, 分别增加了 1.42~2.69 倍、7.08%~11.96%。综合来看, 试验壤土表现为 CH₄ 汇和 N₂O 源的功能, 40 t·hm⁻² 是其适宜的生物炭添加量。

关键词: 生物炭; CH₄ 吸收; N₂O 排放; 全球增温潜势; 温室气体强度

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)09-3831-09 DOI: 10.13227/j.hj.kx.201612210

Effect of Biochar on CH₄ and N₂O Emissions from Lou Soil

ZHOU Feng, XU Chen-yang, WANG Yue-ling, LIN Yun, WANG Qiang, ZHANG Tong-tong, GENG Zeng-chao*

(Key Laboratory of Plant Nutrition and Agrienvironment in Northwest China, Ministry of Agriculture, College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: In order to investigate the effect of biochar on CH₄ and N₂O emissions from Lou soil, field plot experiments of winter wheat were conducted with five levels of biochar addition (0, 20, 40, 60, and 80 t·hm⁻²). The fluxes of CH₄ and N₂O, wheat production, soil organic carbon, soil water content, and temperature of each soil layer were measured. The results showed that the fluxes of CH₄ and N₂O changed significantly in different growth periods of winter wheat. Compared with the control, the cumulative CH₄ uptake under the biochar amendment increased by 12.88%~71.61%. When the biochar addition was ≥ 40 t·hm⁻², the cumulative CH₄ uptake was significantly higher and the highest uptake was at the level of 40 t·hm⁻². Biochar amendment had no significant effect on cumulative N₂O emissions and the global warming potential (GWP). The greenhouse gas intensity (GHGI) decreased by 13.24%~22.14%. The wheat yield increased by 1.72%~32.19% after biochar addition. When the applied biochar level was ≥ 40 t·hm⁻², the wheat yield increments were significantly higher. The biochar addition of 40 t·hm⁻² was the optimal level for increasing the wheat yield. The soil organic carbon and water content under biochar amendment increased by 1.42~2.69 times and 7.08%~11.96%, respectively. The results suggested that Lou soil was the sink of atmospheric CH₄ and the emission source of N₂O during the winter wheat growth period, and the biochar level of 40 t·hm⁻² was the optimal addition amount.

Key words: biochar; CH₄ uptake; N₂O emission; global warming potential; greenhouse gas intensity

甲烷(CH₄)和氧化亚氮(N₂O)作为大气中重要的温室气体,在长寿命温室气体总辐射强迫中的贡献率分别为15%和5%^[1]。其大量排放造成的全球增温效应有目共睹,仅在1951~2010年,温室气体导致全球地表气候变暖0.5~1.3℃^[2]。自工业化以来,全球大气CH₄和N₂O浓度持续增加。未来温室气体继续排放将会造成全球温度进一步升高,与1986~2005年相比,预计2081~2100年全球平均温度将升高0.3~4.8℃,而且人为温室气体排放的越多,增温幅度就越大^[2]。大气中CH₄、N₂O的增加来自于使用化石燃料和土地利用及其利用方式改变造成的人为排放,其中农业排放的

CH₄、N₂O分别占人为排放源的52%和84%^[2,3]。我国是农业大国,在缓减气候变化进程中,如何在农业可持续发展的前提下减排温室气体,成为亟待研究的重要问题。

生物炭作为一种碳封存技术,因其具有更低的风险而备受关注。有研究表明,生物炭施入土壤,不仅快速提升了土壤稳定性碳库,而且可以减少温室气体排放^[4]。李露等^[5]研究发现,麦季配施生物炭

收稿日期: 2016-12-24; 修订日期: 2017-04-05

基金项目: 杨凌示范区科技计划项目(2015SF-03)

作者简介: 周凤(1992~),女,硕士研究生,主要研究方向为土壤微生物, E-mail: zhoulfeng2536314083@163.com

* 通信作者, E-mail: gengzengchao@126.com

对减少 CH_4 、 N_2O 排放的效果比稻季配施生物炭更好. Zhang 等^[6] 研究表明,在稻田中施用生物炭减少了 N_2O 的排放. 然而,添加生物炭对农田土壤 CH_4 、 N_2O 排放的影响因生物炭的来源、添加年限、制备过程以及种植作物、土壤类型的不同而呈现截然不同的效果^[7]. Verhoeven 等^[8] 利用松木屑和胡桃壳所制生物炭的试验结果显示,2 种生物炭添加后均增加了葡萄园 N_2O 的排放. Shen 等^[9] 研究显示,在红壤中添加小麦秸秆制成的生物炭后,当季 CH_4 排放降低,但效果并不显著,而在后续的水稻季及休闲季中,显著降低了 CH_4 的排放^[10]. 目前,添加生物炭多年后,其对土壤 CH_4 、 N_2O 排放影响的研究还未见报道. 本文采用田间小区试验,在分析耕层土壤有机碳、土壤含水率及不同土层土壤温度与冬小麦各生育期 CH_4 、 N_2O 排放通量相关关系的

基础上,明确添加废弃果树枝条制成的生物炭 3 a 后,不同添加量对土壤 CH_4 、 N_2O 排放的持续性影响,同时结合冬小麦产量评估了温室气体强度的综合效应,以期为合理施用生物炭提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2015 年 10 月到 2016 年 6 月在陕西省杨凌示范区西北农林科技大学试验田 ($34^\circ 16' \text{N}$, $108^\circ 04' \text{E}$, 海拔 458.6 m) 进行,其基本理化性质见表 1. 试验区地势平坦,属于暖温带大陆性季风气候,年均气温 $11 \sim 13^\circ \text{C}$,年降水量 500 ~ 700 mm,年均日照时数 2 196 h,无霜期 210 d. 试验区土壤类型为褐土类,暗棕壤亚类,红油土属,黄土母质,系统分类为土垫旱耕人为土,属石灰性土壤.

表 1 供试土壤基本理化性质

有机质 / $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	全氮 / $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	全磷 / $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	全钾 / $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	硝态氮 / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	铵态氮 / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	速效磷 / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	速效钾 / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	pH (水土比 2.5:1)	容重 / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$
12.64	0.71	0.43	19.64	18.20	15.90	12.38	193.00	7.33	1.30

1.2 试验材料

供试生物炭(废弃果树树干、枝条在 450°C 裂解炉中,限氧条件下裂解所得)由陕西亿鑫生物能源科技开发有限公司提供,其基本理化性质见表 2.

供试小麦品种为西农 509 (西北农林科技大学选育),2015 年 10 月 15 日播种,播种量为 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,小麦行间距为 15 cm,2016 年 6 月 3 日收获.

表 2 供试生物炭基本理化性质

C/%	N/%	O/%	H/%	硝态氮 / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	铵态氮 / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	比表面积 / $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$	pH (水土比为 10:1)
72.38	1.19	23.81	2.62	0.52	1.86	86.7	10.43

1.3 试验设计

本试验采用随机区组设计,根据前期室内模拟试验及前人研究文献中生物炭(于 2012 年 4 月 27 日田间试验开始前磨细过 1 mm 筛后一次性撒施于耕层土壤中并与之充分混匀,之后不再施用生物炭)的不同添加量^[10,11],共设置 5 个处理,分别为 B_0 ($0 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)、 B_{20} ($20 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)、 B_{40} ($40 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)、 B_{60} ($60 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)、 B_{80} ($80 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$),每个处理 3 次重复. 小区面积为 $1.35 \text{ m} \times 3.50 \text{ m}$,各个小区之间均设有 0.5 m 隔离保护带. 氮、磷、钾肥(分别为尿素、磷酸二铵、硫酸钾)均作为基肥于种植前施入每个小区,用量为每公顷 225 kg N,180 kg P_2O_5 ,150 kg K_2O ,依据当地常规进行田间管理(包括除草、冬灌、防控病虫害等).

1.4 样品的采集与分析

采用静态箱-气相色谱法测定 CH_4 、 N_2O 的吸收/排放通量. 静态箱箱体 ($50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$) 由不锈钢材料自制而成,箱内顶部配有风扇,箱体配有采样口和温度计. 底座也为不锈钢材料,高为 20 cm,底部插入地下 15 cm,底座上部设置有水槽,用于采集气体时浇水密封. 播种后,将底座安放在小麦播种行上,为防止边际效应带来的影响,每个试验小区均在中心处固定一个底座,重复 3 次,期间不再移动,当小麦株高超过静态箱箱体的高度时,在底座与静态箱中间加一个上下中通的静态箱,使采集气体时能完全覆盖住作物,又不影响其正常生长. 冬小麦生长期间每 10 d 采一次气,时间均为上午 08:00 ~ 11:00,下雨天除外. 采集气体时,浇水密封

底座后,把箱体安放在底座上,打开风扇使箱内气体混匀,用 50 mL 医用注射器插入箱体采样口,于 0、10、20、30 min 依次采集气体。与此同时,测定气温、箱温、地温和土壤含水率(烘干法)。采集气体完成后立即带回实验室用 Agilent 7890A 气相色谱仪进行测定,其中 CH₄ 浓度测定采用氢火焰离子化检测器(FID),检测器温度 200℃,N₂O 浓度测定采用电子捕获检测器(ECD),检测器温度 330℃,H₂ 流量 40 mL·min⁻¹,空气流量 400 mL·min⁻¹,载气为高纯度 N₂,毛细柱流速 3 mL·min⁻¹。

采用随机布点法,于小麦种植前、各个生育期及收获后分别用土钻采集 0~20 cm 的土壤样品,每个处理均 3 次重复,将所采集的土壤样品带回实验室风干过 1 mm 筛测定有机碳(重铬酸钾-浓硫酸外加热法)含量。

1.5 试验数据处理

气体样品吸收/排放通量是通过单位面积的气体浓度随时间的变化来计算的。计算公式如下^[12,13]:

$$F = \rho \cdot h \cdot (dc/dt) \cdot 273 / (273 + T)$$

式中, F 为气体吸收/排放通量,所测气体是 CH₄ 时,单位为 $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$,N₂O 时,单位为 $\mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$; ρ 为所测气体标准状况下的密度,单位为 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; h 为静态箱的有效高度,单位为 m; T 为静态箱内的平均温度,单位为℃; dc/dt 为所测气体浓度随时间变化的直线斜率。

CH₄、N₂O 的累积吸收/排放量是通过相邻两次采气所得的气体吸收/排放通量平均值来计算其整个生长期间的累积吸收/排放量。计算公式如下:

$$C = \sum_{i=1}^n (F_i + F_{i+1}) \cdot 24 \cdot d$$

式中, C 为冬小麦田的累积吸收/排放量,单位为 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; F_i 为第 n 次采气时的气体吸收/排放通量; 24 为天与小时的转换系数; d 为相邻两次采气所间隔的天数。

全球增温潜势是通过某一给定物质(所采集的气体)在一定时间积分范围内与二氧化碳相比而得到的相对辐射影响值来计算的。CH₄、N₂O 在 100 a 时间尺度上造成的全球增温潜势计算公式^[14]如下:

$$\text{GWP} = 25R_{\text{CH}_4} + 298R_{\text{N}_2\text{O}}$$

式中,GWP 为全球增温潜势(以 CO₂ 排放量计),单位为 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; R_{CH_4} 为冬小麦整个生长期间 CH₄ 的累积吸收量,单位为 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; $R_{\text{N}_2\text{O}}$ 为冬小麦整个生

长期间 N₂O 的累积排放量,单位为 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; 25、298 为 CH₄、N₂O 转换为 CO₂ 排放量的转换系数。

温室气体强度表示农业中生产单位产量的粮食对气候的影响。计算公式^[15,16]如下:

$$\text{GHGI} = \text{GWP} / \text{小麦产量}$$

式中,GHGI 为温室气体强度(以 CO₂ 排放量计),单位为 $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$; GWP 为全球增温潜势,单位为 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; 小麦产量单位为 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

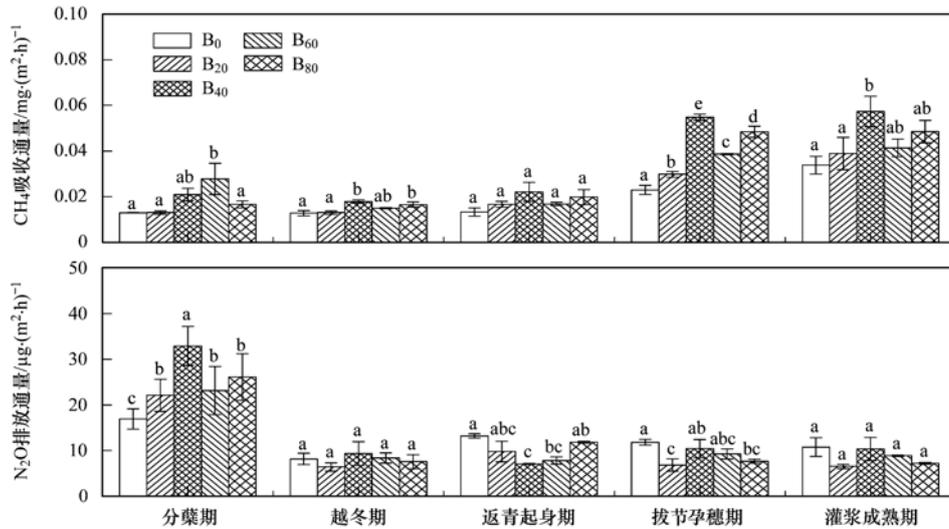
试验数据采用 Microsoft Excel 2013、SPSS 20.0 (采用 Duncan 多重比较检验法分析不同处理之间各指标的显著性差异,采用 Pearson 系数代表各指标之间的相关性)整理分析,图形采用 Origin 9.0 绘制。

2 结果与分析

2.1 各生育期 CH₄、N₂O 吸收/排放通量动态变化

冬小麦整个生长期,各处理均表现为 CH₄ 的吸收汇,且 CH₄ 吸收通量变化的趋势基本一致,具有明显的季节性,分蘖期到越冬期,CH₄ 吸收通量随着温度降低而降低,越冬期 CH₄ 吸收通量跌至最低,其中 B₀ 低至 $0.013 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$; 越冬期到灌浆成熟期,CH₄ 吸收通量随着温度升高而升高,灌浆成熟期 CH₄ 吸收通量达到最高,其中 B₄₀ 高达 $0.054 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 。B₂₀、B₄₀、B₆₀、B₈₀ 的 CH₄ 吸收通量均高于 B₀,其均值分别为 0.022 、 0.035 、 0.028 、 $0.030 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$,比 B₀ 高 16.48%、80.79%、45.79%、56.70%,B₄₀、B₆₀、B₈₀ 与 B₀ 相比,差异均达到显著水平,除分蘖期以外,其它生育期 B₄₀ 的 CH₄ 吸收通量均为最高,具体表现为 B₄₀ > B₈₀ > B₆₀ > B₂₀ > B₀,分蘖期则为 B₆₀ > B₄₀ > B₈₀ > B₂₀ > B₀。分蘖期中,B₀、B₂₀、B₈₀ 的 CH₄ 吸收通量与 B₆₀ 差异显著;越冬期中,B₀、B₂₀ 与 B₄₀、B₈₀ 差异显著;返青起身期各处理间的差异均不显著;拔节孕穗期各处理间的差异均达到显著水平;灌浆成熟期中 B₀、B₂₀ 与 B₄₀ 差异显著(图 1)。

对于 N₂O 而言,不同处理均表现为 N₂O 的排放源,N₂O 排放通量变化的趋势表现为降低-升高-降低,B₀、B₂₀、B₈₀ 的 N₂O 排放通量在越冬期降到最低,B₄₀、B₆₀ 的 N₂O 排放通量在返青起身期降到最低。N₂O 排放通量变异性较大,处理间没达到显著水平。分蘖期各处理的 N₂O 排放通量均为最高,维持在 $16.92 \sim 32.93 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$; 其它生育期的 N₂O 排放通量则始终维持在 $6.41 \sim 11.81 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ (图 1)。



分蘖期(2015年10月20日至2015年11月30日);越冬期(2015年12月1日至2016年2月29日);返青起身期(2016年3月1日至2016年3月31日);拔节孕穗期(2016年4月1日至2016年4月30日);灌浆成熟期(2016年5月1日至2016年6月3日);数据为平均值±标准误;不同小写字母表示该指标处理在同一生育期0.05显著水平下的差异性

图1 各生育期CH₄、N₂O吸收/排放通量动态变化

Fig. 1 Dynamic changes of CH₄ uptake and N₂O emission fluxes in different growth periods of winter wheat

2.2 CH₄、N₂O 累积吸收/排放量、产量、全球增温潜势及温室气体强度的变化

与 B₀ 相比, B₂₀、B₄₀、B₆₀、B₈₀ 的 CH₄ 累积吸收量分别增加了 12.88%、71.61%、42.74%、50.03%, B₄₀、B₆₀、B₈₀ 的 CH₄ 累积吸收量达到显著水平(表3);添加生物炭对 N₂O 的累积排放量无显著影响. 与 B₀ 相比, B₂₀、B₄₀、B₆₀、B₈₀ 分别增产 1.72%、32.19%、6.01%、9.01%, 除 B₂₀ 以外, 其它处理的增产效果均达到显著水平. B₂₀、B₆₀、B₈₀

的全球增温潜势减少了 4.69%~19.55%, B₄₀ 则增加了 13.76%, 与 B₀ 相比, 均不显著; B₂₀、B₄₀、B₆₀、B₈₀ 的温室气体强度与 B₀ 相比降低了 13.24%~22.14%, 但差异不显著. 试验结果表明, 添加高量生物炭对全球增温潜势和温室气体强度无显著影响, 而添加低量生物炭对产量无显著影响, 虽然 B₄₀ 的全球增温潜势和温室气体强度与 B₀ 相比差异不显著, 但增产作用明显, 因此在供试壤土中添加 40 t·hm⁻² 生物炭效果最佳.

表3 添加生物炭对冬小麦田 CH₄、N₂O 累积吸收/排放量、产量、全球增温潜势及温室气体强度的影响¹⁾

Table 3 Cumulative uptake or emissions of methane (CH₄) and nitrous oxide (N₂O) from the winter wheat field, wheat yield, global warming potential, and greenhouse gas intensity as affected by biochar treatments (mean ± SD)

处理	CH ₄ 累积吸收量 /kg·hm ⁻²	N ₂ O 累积排放量 /kg·hm ⁻²	产量 /kg·hm ⁻²	全球增温潜势 (以 CO ₂ -eq 计) /kg·hm ⁻²	温室气体强度 (以 CO ₂ -eq 计) /kg·hm ⁻²
B ₀	0.91 ± 0.14a	0.61 ± 0.02ab	7 766.67 ± 808.29d	158.27 ± 9.22ab	0.021 ± 0.002a
B ₂₀	1.02 ± 0.08a	0.53 ± 0.03b	7 900 ± 556.78cd	132.39 ± 11.97b	0.017 ± 0.002a
B ₄₀	1.56 ± 0.02c	0.73 ± 0.18a	10 266.67 ± 709.46a	180.05 ± 52.83a	0.018 ± 0.005a
B ₆₀	1.30 ± 0.07b	0.60 ± 0.03ab	8 233.33 ± 1 159.02bc	147.20 ± 6.95ab	0.018 ± 0.003a
B ₈₀	1.36 ± 0.20bc	0.62 ± 0.15ab	8 466.67 ± 709.46b	151.18 ± 38.59ab	0.018 ± 0.004a

1) 数据为平均值 ± 标准差; 不同小写字母表示该指标处理在 0.05 显著水平下的差异性

2.3 各处理 0~20 cm 土壤有机碳含量及含水率动态变化

添加生物炭对耕层土壤有机碳含量有显著影响, 见图2. 在本季作物种植前-冬小麦的整个生长期-收获后之间, 添加生物炭的处理 0~20 cm 土壤有机碳含量较对照均显著增加 (P < 0.01), 其均值分别为

13.46、17.99、20.84、25.44 g·kg⁻¹, 是对照的 1.42、1.91、2.21、2.69 倍. 整个生长期, 0~20 cm 土壤有机碳含量与生物炭添加量的变化基本一致, 生物炭添加量越大, 0~20 cm 土壤的有机碳含量越高.

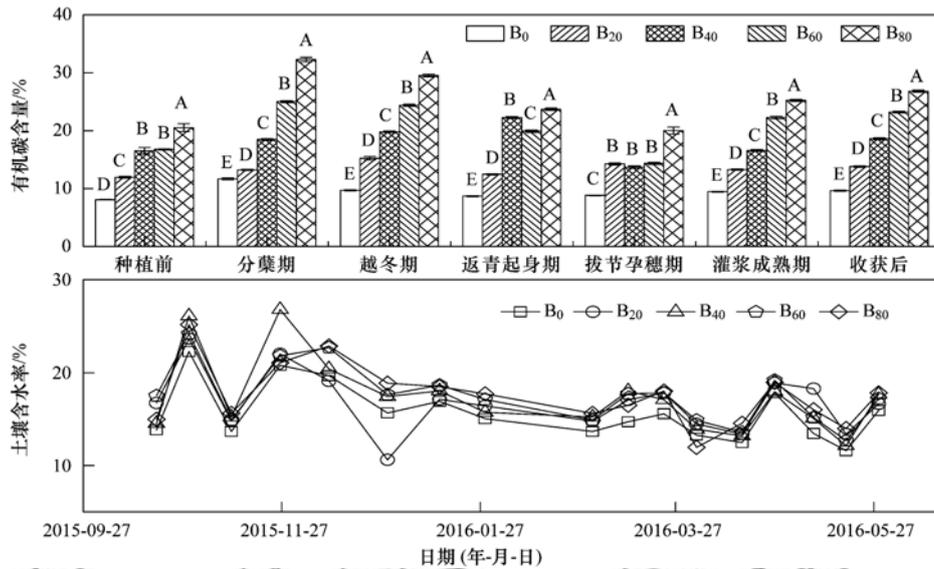
各处理的土壤含水率呈现一定的季节变化, 且变化趋势基本一致. 冬小麦生长期间, 土壤水分一

般维持在 10.61% ~ 26.82%, 分蘖期因降水较多, 导致土壤含水率出现高峰; 越冬前期为满足冬小麦生长需要, 进行了灌溉, 致使土壤含水率达到最高; 越冬期-收获前, 土壤含水率在 11.60% ~ 19.20% 之间波动, 收获期达到最低. 冬小麦整个生长期, 随生物炭添加量的增加, 土壤含水率依次增加, B₂₀、B₄₀、B₆₀、B₈₀ 的土壤含水率分别比 B₀ 高 7.08%、

10.57%、11.78%、11.96%, 均达到显著水平.

2.4 CH₄、N₂O 吸收/排放通量与土壤有机碳、土壤含水率、土壤温度和大气温度的相关关系

不同处理下, 地表温度、地下 5 cm 温度变化趋势基本一致, 均为先降低后升高, 在越冬期达到最低, 收获期最高, 见图 3; 且都与大气温度的变化趋势极显著相关.



不同大写字母表示该指标处理在同一生育期 0.01 显著水平下的差异性

图 2 各处理 0 ~ 20 cm 土壤有机碳、土壤含水率的动态变化

Fig. 2 Dynamic changes in soil organic carbon and soil water content in the soil layer of 0-20 cm under different treatments

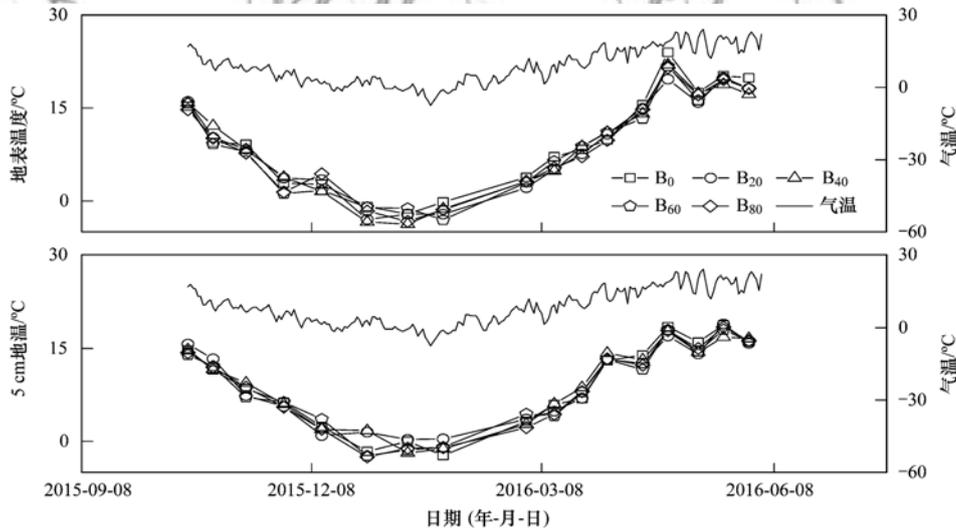


图 3 各处理土壤温度、大气温度的动态变化

Fig. 3 Dynamic changes in soil and air temperature under different treatments

由表 4 可知, B₄₀、B₈₀ 的 CH₄ 吸收通量与 0 ~ 20 cm 土壤有机碳极显著正相关, 其它处理差异均不显著. B₀、B₈₀ 的 CH₄ 吸收通量与 0 ~ 20 cm 土壤含水率显著正相关, 其它处理差异均不显著. 不同处理下, CH₄ 吸收通量均与地表温度极显著正相关;

B₀、B₈₀ 的 CH₄ 吸收通量与地下 5 cm 处土温极显著正相关, B₂₀、B₄₀、B₆₀ 的 CH₄ 吸收通量与地下 5 cm 处土温显著正相关. B₄₀ 的 CH₄ 吸收通量与大气温度显著正相关, 其它处理均与之极显著正相关. 表明 CH₄ 的吸收通量受到土壤有机碳、土壤含水率、

土壤温度、大气温度等多重因素影响。

B_{80} 的 N_2O 排放通量与 0~20 cm 土壤有机碳极显著正相关, B_0 、 B_{60} 与之呈正相关, B_{20} 、 B_{40} 与之呈负相关, 但均不显著。 N_2O 排放通量与 0~20 cm 土

壤含水率、土壤温度和大气温度均呈正相关, 但不显著。说明 N_2O 排放通量受土壤有机碳、土壤含水率、土壤温度、大气温度等多重因素影响, 但不是主要因素, 因此各个因素对其影响不显著。

表 4 各处理 CH_4 、 N_2O 吸收/排放通量与土壤有机碳、土壤含水率、土壤温度和大气温度的相关系数¹⁾

Table 4 Correlation coefficients of CH_4 uptake, N_2O emission fluxes, soil organic carbon, soil water content, soil temperature, and air temperature under different treatments

处理		土壤有机碳 / $g \cdot kg^{-1}$	土壤含水率 /%	土壤温度/ $^{\circ}C$		大气温度 / $^{\circ}C$
				地表	地下 5 cm	
CH_4	B_0	0.272	0.492 *	0.737 **	0.681 **	0.801 **
	B_{20}	0.104	0.104	0.682 **	0.593 *	0.705 **
	B_{40}	0.784 **	0.16	0.612 **	0.542 *	0.546 *
	B_{60}	0.375	0.326	0.645 **	0.576 *	0.691 **
	B_{80}	0.675 **	0.498 *	0.815 **	0.730 **	0.791 **
N_2O	B_0	0.504	0.102	0.346	0.351	0.341
	B_{20}	-0.324	0.174	0.238	0.304	0.185
	B_{40}	-0.059	0.186	0.265	0.269	0.110
	B_{60}	0.399	0.266	0.200	0.255	0.138
	B_{80}	0.569 *	0.282	0.155	0.233	0.127

1) 样本数 $n=17$, * 表示显著相关 ($P<0.05$), ** 表示极显著相关 ($P<0.01$)

3 讨论

3.1 添加生物炭对 CH_4 、 N_2O 吸收/排放通量及累积吸收/排放量的影响

本试验结果表明, 添加生物炭促进了壤土对 CH_4 的吸收, 这与王月玲等^[17] 在辣椒田中添加生物炭和 Karhu 等^[18] 在芬兰小麦田中添加生物炭的研究结果一致。生物炭具有巨大的比表面积, 添加到土壤中增加了其孔隙度, 有效改善了土壤的通气状况^[19], 抑制了产甲烷菌的活性^[20]; 同时, 为甲烷氧化菌的生长提供了充足的能源, 通过氧化作用增加了 CH_4 的吸收通量^[21]。越冬期由于土壤温度的限制, 微生物活性较低, CH_4 吸收通量在一个较低水平波动; 进入返青起身期后, 随着土壤温度的回升, 土壤对 CH_4 的吸收逐渐增加, 主要原因在于这一时期土壤含水量较低, 处于好气状态, 有利于 CH_4 氧化菌生长, 促进了 CH_4 的氧化^[22]。随生物炭用量的增加, 整个生长期土壤 CH_4 吸收通量相应递增, 这可能与土壤中水溶性碳含量降低有关^[23]。当添加量大于 $40 t \cdot hm^{-2}$ 时, 与对照相比, CH_4 吸收通量递增速率减慢。一方面, 各处理施肥水平相同, 随着生物炭添加量的增加, C/N 增大, 作物与微生物对养分吸收竞争的激化导致土壤微生物活性降低; 另一方面, 参与 CH_4 氧化的关键酶是 CH_4 单氧化酶, 随着生物炭添加量的增加, 其中含有的铵态氮较高, 由于氨和甲烷都能竞争 CH_4 单氧化酶上的活性结合点,

高浓度的氨可以把甲烷从结合点上驱赶下来, 导致 CH_4 氧化菌的生长受到抑制, 使氧化 CH_4 的能力下降^[24], 从而减少了 CH_4 的吸收通量。随着生物炭添加量的增加, CH_4 累积吸收量逐渐增加, 当添加量为 $40 t \cdot hm^{-2}$ 时, CH_4 累积吸收量最高, 这与屈忠义等^[25] 在内蒙古河套灌区进行大田试验的结果有差异, 这说明在生物炭、土壤类型及土壤利用模式不同的情况下, 生物炭的最适添加量不同。

整个试验期, 各处理 N_2O 排放通量在分蘖期均为最高, 其原因有以下两点: ①在本季作物种植前, 把尿素作为基肥一次性施入土壤。土壤中 N_2O 主要是通过硝化与反硝化过程产生的, 投入大量的尿素会造成土壤中可利用氮素突增^[26], 为微生物活动提供了充足的底物, 且作物处于分蘖期, 氮素需求量低, 造成可利用氮素过剩, 最终转变成气态氮排放, 促进了农田 N_2O 的生成、排放。段智源等^[27] 在不同氮肥处理试验中表明, 传统施肥处理(硝酸磷+尿素)、尿素处理的 N_2O 排放量均高于其它施肥处理; 李睿达等^[28] 研究表明施氮肥对 N_2O 排放有明显的“激发效应”。②水分。冬小麦分蘖期-越冬前期, 降水、灌溉较频繁, 湿润、厌氧的环境促进了微生物反硝化过程中 N_2O 的生成、排放^[29]。不同处理的 N_2O 排放通量最低点所处生育期不同。是由于生物炭对土壤温度的变化幅度具有一定的减缓作用, 尤其 B_{40} 、 B_{60} , 保温作用明显, 导致 N_2O 排放通量最低点所处生育期推后^[30]。添加生物炭对冬小

麦田 N₂O 累积排放量没有显著影响,这与王月玲等^[17]在辣椒田的试验结果不同,可能是由所种植作物种类和施肥处理不同导致的。

3.2 添加生物炭对冬小麦产量、全球增温潜势及温室气体强度的影响

添加生物炭能够改善土壤理化性质,提高土壤养分含量^[31],从而提高作物产量^[32]。本试验中添加 40 t·hm⁻²生物炭的处理增产效果最明显,但随着生物炭添加量的增加,增产效果反而下降,这与李中阳等^[33]在生物炭对小麦产量、水分利用效率及根系形态影响试验中的研究结果一致。原因可能是生物炭添加量较高时,土壤含碳量极显著增加,使土壤 C/N 随之增加,降低了冬小麦对土壤养分的利用率,导致增产作用下降^[34]。

全球增温潜势主要由 N₂O 贡献,其在大气中存活时间较长,且在 100 年尺度上的值远大于 CH₄,而温室气体排放强度是一个温室效应综合评价指标^[35],其突出优势在于将温室效应与作物经济产出相结合,添加生物炭显著增加了冬小麦产量,通过综合考虑环境和经济效应后,认为全球增温潜势和温室气体排放强度与对照相比差异并不显著。尽管本文的研究结果揭示了添加生物炭 3 a 后 CH₄ 和 N₂O 的变化现象,但生物炭对温室气体排放的持续性影响还需进一步研究。

3.3 添加生物炭对土壤有机碳和土壤含水率的影响

添加生物炭显著提高了耕层土壤有机碳含量,其影响具有长久性(2012 年施入,2015~2016 年测定有机碳含量)。生物炭是一种高度芳香化的难溶性有机物质^[36],施入土壤后很难被土壤微生物利用;同时提高了土壤团聚体的含量和稳定性^[37],团聚体的物理保护作用减轻了土壤微生物对生物炭的分解作用^[38]。冬小麦收获后土壤有机碳含量较种植前有所提高,这主要是由于 0~20 cm 土壤是冬小麦主要根系分布层,其根系重量约占根系总重量的 78%^[39],且添加生物炭对小麦根系生长有促进作用^[33],根系凋落物被土壤微生物分解后,增加了土壤有机碳含量。

添加生物炭显著增加了耕层土壤含水率,生物炭通过其自身所固有的含氧官能团、高的 CEC 以及大的孔隙度等特点改善了土壤理化性质,从而影响土壤水分的渗滤模式、停留时间和流动路径^[40],增加了田间土壤的持水能力。这与杨敏等^[31]在水稻田添加秸秆炭的试验和 Glaser 等^[41]在热带高风土壤中添加木炭的结果一致。冬小麦生长期,

土壤含水率随生物炭添加量的增加而增加,可能是由于生物炭固有亲水基团增多,吸持土壤水分的能力增强,这与 Chan 等^[11]和 Case 等^[42]使用木炭和园林废弃物制备生物炭的研究结果一致。

4 结论

(1) 添加生物炭促进了土壤对 CH₄ 的吸收,当添加量 ≥40 t·hm⁻²时,土壤“汇”的作用达到显著水平,当添加量为 40 t·hm⁻²时,CH₄ 累积吸收量最高;添加生物炭对 N₂O 排放、全球增温潜势和温室气体强度没有显著影响。

(2) 添加生物炭能够提高冬小麦产量,40 t·hm⁻²生物炭为麦田增产的最适添加量。

(3) 与对照相比,添加生物炭显著提高了土壤有机碳和土壤含水率。

(4) 综合分析表明,40 t·hm⁻²生物炭是试验土壤适宜的添加量。

参考文献:

- [1] Rodhe H. A comparison of the contribution of various gases to the greenhouse effect[J]. *Science*, 1990, **248**(4960): 1217-1219.
- [2] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate change 2013-the physical science basis: working group I contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. 467-1031.
- [3] Metz B, Davidson O, Bosch P, et al. Climate change 2007-mitigation of climate change: contribution of working group III to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [4] Lehmann J. A handful of carbon[J]. *Nature*, 2007, **447**(7141): 143-144.
- [5] 李露,周自强,潘晓健,等. 不同时期施用生物炭对稻田 N₂O 和 CH₄ 排放的影响[J]. *土壤学报*, 2015, **52**(4): 839-848.
Li L, Zhou Z Q, Pan X J, et al. Effects of biochar on N₂O and CH₄ emissions from paddy field under rice-wheat rotation during rice and wheat growing seasons relative to timing of amendment[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, **52**(4): 839-848.
- [6] 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[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2010, **139**(4): 469-475.
- [7] 刘杰云,沈健林,邱虎森,等. 生物质炭添加对农田温室气体净排放的影响综述[J]. *农业环境科学学报*, 2015, **34**(2): 205-212.
Liu J Y, Shen J L, Qiu H S, et al. Effects of biochar amendments on net emissions of greenhouse gases from croplands: a review[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, **34**(2): 205-212.
- [8] Verhoeven E, Six J. Biochar does not mitigate field-scale N₂O

- emissions in a Northern California vineyard: an assessment across two years[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, **191**: 27-38.
- [9] Shen J L, Tong H, Liu J Y, *et al.* Contrasting effects of straw and straw-derived biochar amendments on greenhouse gas emissions within double rice cropping systems[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, **188**: 264-274.
- [10] Liu J Y, Shen J L, Li Y, *et al.* Effects of biochar amendment on the net greenhouse gas emission and greenhouse gas intensity in a Chinese double rice cropping system[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2014, **65**: 30-39.
- [11] Chan K Y, Van Zwieten L, Meszaros I, *et al.* Agronomic values of greenwaste biochar as a soil amendment[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2007, **45**(8): 629-634.
- [12] Castaldi S, Rioldino M, Baronti S, *et al.* Impact of biochar application to a Mediterranean wheat crop on soil microbial activity and greenhouse gas fluxes[J]. *Chemosphere*, 2011, **85**(9): 1464-1471.
- [13] 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[J]. *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[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, **45**(23): 4844-4853.
- [14] 高德才, 张蕾, 刘强, 等. 生物黑炭对旱地土壤 CO₂、CH₄、N₂O 排放及其环境效益的影响[J]. *生态学报*, 2015, **35**(11): 3615-3624.
- Gao D C, Zhang L, Liu Q, *et al.* Effects of biochar on CO₂, CH₄, N₂O emission and its environmental benefits in dryland soil[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(11): 3615-3624.
- [15] Zhang A F, Bian R J, Pan G X, *et al.* Effects of biochar amendment on soil quality, crop yield and greenhouse gas emission in a Chinese rice paddy: a field study of 2 consecutive rice growing cycles[J]. *Field Crops Research*, 2012, **127**: 153-160.
- [16] 刘晓雨, 李志鹏, 潘根兴, 等. 长期不同施肥下太湖地区稻田净温室效应和温室气体排放强度的变化[J]. *农业环境科学学报*, 2011, **30**(9): 1783-1790.
- Liu X Y, Li Z P, Pan G X, *et al.* Greenhouse gas emission and C intensity for a long-term fertilization rice paddy in Tai lake region, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, **30**(9): 1783-1790.
- [17] 王月玲, 耿增超, 王强, 等. 生物炭对壤土土壤温室气体及土壤理化性质的影响[J]. *环境科学*, 2016, **37**(9): 3634-3641.
- Wang Y L, Geng Z C, Wang Q, *et al.* Influence of biochar on greenhouse gases emissions and physico-chemical properties of loess soil[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(9): 3634-3641.
- [18] Karhu K, Mattila T, Bergström I, *et al.* Biochar addition to agricultural soil increased CH₄ uptake and water holding capacity—results from a short-term pilot field study[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2011, **140**(1-2): 309-313.
- [19] 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 and Sediments*, 2011, **11**(6): 930-939.
- [20] Wang Z P, DeLaune R D, Patrick W H, *et al.* Soil redox and pH effects on methane production in a flooded rice soil[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1993, **57**(2): 382-385.
- [21] Liang B, Lehmann J, Solomon D, *et al.* Black carbon increases cation exchange capacity in soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, **70**(5): 1719-1730.
- [22] 张雪松, 申双和, 李俊, 等. 华北平原冬麦田土壤 CH₄ 的吸收特征研究[J]. *南京气象学院学报*, 2006, **29**(2): 181-188.
- Zhang X S, Shen S H, Li J, *et al.* Soil CH₄ uptake in winter wheat field in the north china plain[J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 2006, **29**(2): 181-188.
- [23] 王月玲, 耿增超, 尚杰, 等. 施用生物炭后壤土土壤有机碳、氮及碳库管理指数的变化[J]. *农业环境科学学报*, 2016, **35**(3): 532-539.
- Wang Y L, Geng Z C, Shang J, *et al.* Soil organic carbon and nitrogen and carbon pool management index in loess soil as influenced by biochar[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, **35**(3): 532-539.
- [24] 胡荣桂. 氮肥对旱地土壤甲烷氧化能力的影响[J]. *生态环境*, 2004, **13**(1): 74-77.
- Hu R G. Effects of fertilization on the potential of methane oxidation in upland soil[J]. *Ecology and Environment*, 2004, **13**(1): 74-77.
- [25] 屈忠义, 高利华, 李昌见, 等. 秸秆生物炭对玉米农田温室气体排放的影响[J]. *农业机械学报*, 2016, **47**(12): 111-118.
- Qu Z Y, Gao L H, Li C J, *et al.* Impacts of straw biochar on emission of greenhouse gas in maize field[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, **47**(12): 111-118.
- [26] Zou J W, Huang Y, Lu Y Y, *et al.* Direct emission factor for N₂O from rice-winter wheat rotation systems in southeast China[J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(26): 4755-4765.
- [27] 段智源, 李玉娥, 万运帆, 等. 不同氮肥处理春玉米温室气体的排放[J]. *农业工程学报*, 2014, **30**(24): 216-224.
- Duan Z Y, Li Y E, Wan Y F, *et al.* Emission of green house gases for spring maize on different fertilizer treatments[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, **30**(24): 216-224.
- [28] 李睿达, 张凯, 苏丹, 等. 施氮强度对不同土壤有机碳水平桉树林温室气体通量的影响[J]. *环境科学*, 2014, **35**(10): 3904-3910.
- Li R D, Zhang K, Su D, *et al.* Effects of nitrogen application on soil greenhouse gas fluxes in eucalyptus plantations with different soil organic carbon content[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(10): 3904-3910.
- [29] Ding W X, Cai Y, Cai Z C, *et al.* Nitrous oxide emissions from an intensively cultivated maize-wheat rotation soil in the North China plain[J]. *Science of the Total Environment*, 2007, **373**(2-3): 501-511.
- [30] 尚杰, 耿增超, 赵军, 等. 生物炭对壤土水热特性及团聚体稳定性的影响[J]. *应用生态学报*, 2015, **26**(7): 1969-1976.
- Shang J, Geng Z C, Zhao J, *et al.* Effects of biochar on water thermal properties and aggregate stability of Lou soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, **26**(7): 1969-1976.

- [31] 杨敏, 刘玉学, 孙雪, 等. 生物质炭提高稻田甲烷氧化活性[J]. 农业工程学报, 2013, **29**(17): 145-151.
Yang M, Liu Y X, Sun X, *et al.* Biochar improves methane oxidation activity in rice paddy soil [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, **29**(17): 145-151.
- [32] 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[J]. 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 CH₄ emission reduction [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, **29**(15): 184-191.
- [33] 李中阳, 齐学斌, 樊向阳, 等. 生物质炭对冬小麦产量、水分利用效率及根系形态的影响[J]. 农业工程学报, 2015, **31**(12): 119-124.
Li Z Y, Qi X B, Fan X Y, *et al.* Influences of biochars on growth, yield, water use efficiency and root morphology of winter wheat [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, **31**(12): 119-124.
- [34] Khan M A, Kim K W, Wang M Z, *et al.* Nutrient-impregnated charcoal: an environmentally friendly slow-release fertilizer [J]. The Environmentalist, 2008, **28**(3): 231-235.
- [35] 秦晓波, 李玉娥, 万运帆, 等. 免耕条件下稻草还田方式对温室气体排放强度的影响[J]. 农业工程学报, 2012, **28**(6): 210-216.
Qin X B, Li Y E, Wan Y F, *et al.* Effects of straw mulching on greenhouse gas intensity under on-tillage conditions [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, **28**(6): 210-216.
- [36] 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[J]. 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 reclamation [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, **28**(12): 2459-2463.
- [37] Van Zwieten L, Singh B, Joseph S, *et al.* Biochar and emissions of non-CO₂ greenhouse gases from soil [A]. In: Lehmann J, Joseph S (Eds.). Biochar for Environmental Management: Science and Technology [M]. London: Earthscan Publications Ltd., 2009. 227-249.
- [38] 潘根兴, 周萍, 李恋卿, 等. 固碳土壤学的核心科学问题与研究进展[J]. 土壤学报, 2007, **44**(2): 327-337.
Pan G X, Zhou P, Li L Q, *et al.* Core issues and research progresses of soil science of C sequestration [J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, **44**(2): 327-337.
- [39] 马福生, 刘洪禄, 吴文勇, 等. 再生水灌溉对冬小麦根冠发育及产量的影响[J]. 农业工程学报, 2008, **24**(2): 57-63.
Ma F S, Liu H L, Wu W Y, *et al.* Effects of irrigation with reclaimed water on root system and yield of winter wheat [J]. Transactions of the CSAE, 2008, **24**(2): 57-63.
- [40] Major J, Steiner C, Downie A, *et al.* Biochar effects on nutrient leaching [A]. In: Lehmann J, Joseph S (Eds.). Biochar for Environmental Management: Science and Technology [M]. London: Earthscan Publications Ltd., 2009. 271-287.
- [41] Glaser B, Lehmann J, Zech W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal—a review [J]. Biology and Fertility of Soils, 2002, **35**(4): 219-230.
- [42] Case S D C, McNamara N P, Reay D S, *et al.* The effect of biochar addition on N₂O and CO₂ emissions from a sandy loam soil—the role of soil aeration [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2012, **51**: 125-134.

CONTENTS

Emission Characteristics of Vehicles from National Roads and Provincial Roads in China	WANG Ren-jie, WANG Kun, ZHANG Fan, <i>et al.</i> (3553)
Impact of Gustly Northwesterly Winds on Biological Particles in Winter in Beijing	YAN Wei-zhuo, WANG Bu-ying, Oscar Fajardo Montana, <i>et al.</i> (3561)
Characteristics of Particulate Matter and Carbonaceous Species in Ambient Air at Different Air Quality Levels	FANG Xiao-zhen, WU Lin, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (3569)
Distribution and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric Particulate Matter and Dust	WANG Yong-xiao, CAO Hong-ying, DENG Ya-jia, <i>et al.</i> (3575)
Observational Study of Air Pollution Complex in Nanjing in June 2014	HAO Jian-qi, GE Bao-zhu, WANG Zi-fa, <i>et al.</i> (3585)
Distribution Characteristics of Air Pollutants and Aerosol Chemical Components Under Different Weather Conditions in Jiaxing	WANG Hong-lei, SHEN Li-juan, TANG Qian, <i>et al.</i> (3594)
Observations of Reactive Nitrogen and Sulfur Compounds During Haze Episodes Using a Demuder-based System	TIAN Shi-li, LIU Xue-jun, PAN Yue-peng, <i>et al.</i> (3605)
Analysis of Anthropogenic Reactive Nitrogen Emissions and Its Features on a Prefecture-level City in Fujian Province	ZHANG Qian-hu, GAO Bing, HUANG Wei, <i>et al.</i> (3610)
Levels, Sources, and Health Risk Assessments of Heavy Metals in Indoor Dust in a College in the Pearl River Delta	CAI Yun-mei, HUANG Han-shu, REN Lu-lu, <i>et al.</i> (3620)
Influence of Noble Metal and Promoter Capacity in CDPF on Particulate Matter Emissions of Diesel Bus	TAN Pi-qiang, ZHONG Yi-mei, ZHENG Yuan-fei, <i>et al.</i> (3628)
Spatial Distribution, Source and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Coastal Sediments of Northern Dongying City	LIU Qun-qun, MENG Fan-ping, WANG Fei-fei, <i>et al.</i> (3635)
Remote Sensing of Chlorophyll-a Concentrations in Lake Hongze Using Long Time Series MERIS Observations	LIU Ge, LI Yun-mei, LÜ Heng, <i>et al.</i> (3645)
Analysis of Spatial Variability of Water Quality and Pollution Sources in Lihe River Watershed, Taihu Lake Basin	LIAN Hui-shu, LIU Hong-bin, LI Xu-dong, <i>et al.</i> (3657)
Distribution of Different Phosphorus Species in Water and Sediments from Gaocun to Lijin Reaches of the Yellow River	ZHAO Tun, JIA Yan-xiang, JIANG Bing-qi, <i>et al.</i> (3666)
Characterization of Phosphorus Fractions in the Soil of Water-Level-Fluctuation Zone and Unflooded Bankside in Pengxi River, Three Gorges Reservoir HUANG Jun-jie, WANG Chao, FANG Bo, <i>et al.</i> (3673)
Distribution of <i>n</i> -alkanes from Lake Wanghu Sediments in Relation to Environmental Changes	SHEN Bei-bei, WU Jing-lu, ZENG Hai-ao, <i>et al.</i> (3682)
Hydrological Performance Assessment of Permeable Parking Lots in High Water Areas	JIN Jian-rong, LI Tian, WANG Sheng-si, <i>et al.</i> (3689)
Analysis of the Characteristics of Groundwater Quality in a Typical Vegetable Field, Northern China	YU Jing, YU Min-da, LAN Yan, <i>et al.</i> (3696)
Composition, Evolution, and Complexation of Dissolved Organic Matter with Heavy Metals in Landfills	XIAO Xiao, HE Xiao-song, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (3705)
Correlations Between Substrate Structure and Microbial Community in Subsurface Flow Constructed Wetlands	LI Zhen-ling, DING Yan-li, BAI Shao-yuan, <i>et al.</i> (3713)
Impact of Talc Ore Mining on Periphyton Community Structure and Water Environment	ZANG Xiao-miao, ZHANG Yuan, LIN Jia-ning, <i>et al.</i> (3721)
Physiological Characteristics and Nitrogen and Phosphorus Uptake of <i>Myriophyllum aquaticum</i> Under High Ammonium Conditions	LIU Shao-bo, RAN Bin, ZENG Guan-jun, <i>et al.</i> (3731)
Removal of Algal Organic Matter and Control of Disinfection By-products by Powder Activated Carbon	MIAO Yu, ZHAI Hong-yan, YU Shan-shan, <i>et al.</i> (3738)
Preparation and Pb ²⁺ Electrosorption Characteristics of Graphene Hydrogels Electrode	WANG Yao, JI Qing-hua, LI Yong-feng, <i>et al.</i> (3747)
Influence of Current Densities on Mineralization of Indole by BDD Electrode	ZHANG Jia-wei, WANG Ting, ZHENG Tong, <i>et al.</i> (3755)
Mechanism of Photochemical Degradation of MC-LR by Pyrite	ZHOU Wei, FANG Yan-fen, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (3762)
Enhanced Treatment of Printing and Dyeing Wastewater Using H ₂ O ₂ -Biochemical Method	YUE Xiu, TANG Jia-li, YU Guang-ping, <i>et al.</i> (3769)
Effects of Influent C/N Ratios on Denitrifying Phosphorus Removal Performance Based on ABR-MBR Combined Process	WU Peng, CHENG Chao-yang, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (3781)
Start-up of a High Performance Nitrosation Reactor Through Continuous Growth of Aerobic Granular Sludge	GAO Jun-jun, QIAN Fei-yue, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (3787)
Activated Sludge Mineralization and Solutions in the Process of Zero-Valent Iron Autotrophic Denitrification	ZHANG Ning-bo, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (3793)
Analysis of Respirogram Characteristics of Filamentous Bulking Caused by Low Dissolved Oxygen	MA Zhi-bo, LI Zhi-hua, YANG Cheng-jian, <i>et al.</i> (3801)
Aerobic Degradation and Microbial Community Succession of Coking Wastewater with Municipal Sludge	LIU Guo-xin, WU Hai-zhen, SUN Sheng-li, <i>et al.</i> (3807)
Rapid Culture, Microbial Community Structure, and Diversity of High-Efficiency Denitrifying Bacteria	MENG Ting, YANG Hong (3816)
Abundance of Cell-associated and Cell-free Antibiotic Resistance Genes in Two Wastewater Treatment Systems	ZHANG Yan, CHEN Lü-jun, XIE Hui, <i>et al.</i> (3823)
Effect of Biochar on CH ₄ and N ₂ O Emissions from Lou Soil	ZHOU Feng, XU Chen-yang, WANG Yue-ling, <i>et al.</i> (3831)
Spatial Variability of C-to-N Ratio of Farmland Soil in Jiangxi Province	JIANG Ye-feng, GUO Xi, SUN Kai, <i>et al.</i> (3840)
Influence of Calcium Carbonate and Biochar Addition on Soil Nitrogen Retention in Acidified Vegetable Soil	YU Ying-liang, YANG Lin-zhang, Alfred Oduor Odindo, <i>et al.</i> (3845)
Comparison of Soil Hydraulic Characteristics Under the Conditions of Long-term Land Preparation and Natural Slope in Longtan Catchment of the Loess Hilly Region FENG Tian-jiao, WEI Wei, CHEN Li-ding, <i>et al.</i> (3860)
Effects of Organic Carbon Content on the Residue and Migration of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soil Profiles FEI Jia-jia, ZHANG Zhi-huan, WAN Tian-tian, <i>et al.</i> (3871)
Major Factors Influencing the Cd Content and Seasonal Dynamics in Different Land Cover Soils in a Typical Acid Rain Region	LIU Xiao-li, ZENG Zhao-xia, TIE Bai-qing, <i>et al.</i> (3882)
Application Potential and Assessment of Metallurgical Contaminated Soil After Remediation in Tongguan of Shaanxi	WANG Jiao, XIAO Ran, LI Rong-hua, <i>et al.</i> (3888)
Effects and Mechanisms of In-situ Cement Solidification/Stabilization on a Pb-, Zn-, and Cd-Contaminated Site at Baiyin, China	LÜ Hao-yang, FEI Yang, WANG Ai-qin, <i>et al.</i> (3897)
Concentrations and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Soils and Vegetables influenced by Facility Cultivation JIN Xiao-pei, JIA Jin-pu, BI Chun-juan, <i>et al.</i> (3907)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth and Uptake of La and Pb by Maize Grown in La and Pb-Contaminated Soil	CHANG Qing, GUO Wei, PAN Liang, <i>et al.</i> (3915)
Effects of Straw Incorporation on Cadmium Accumulation and Subcellular Distribution in Rice	DUAN Gui-lan, WANG Fang, CEN Kuang, <i>et al.</i> (3927)
Redox Transformation of Arsenic and Antimony in Soils Mediated by <i>Pantoea</i> sp. IMH ZHANG Lin, LU Jin-suo (3937)
Adsorption Characteristics of Biochar on Heavy Metals (Pb and Zn) in Soil	WANG Hong, XIA Wen, LU Ping, <i>et al.</i> (3944)
Characteristics of <i>Enteromorpha prolifera</i> Biochars and Their Adsorption Performance and Mechanisms for Cr(VI)	CHEN You-yuan, HUI Hong-xia, LU Shuang, <i>et al.</i> (3953)
External Phosphorus Adsorption and Immobility with the Addition of Ignited Water Purification Sludge	YU Sheng-nan, LI Yong, LI Da-peng, <i>et al.</i> (3962)
Preparation of Adsorption Ceramsite Derived from Sludge Biochar	LI Jie, PAN Lan-jia, YU Guang-wei, <i>et al.</i> (3970)
Construction of Graphitic Carbon Nitride-Bismuth Oxide Layered Heterostructures and Their Photocatalytic Antibacterial Performance HUANG Jian-hui, LIN Wen-ting, XIE Li-yan, <i>et al.</i> (3979)