

DOI: 10.5846/stxb201310082413

高德才, 张蕾, 刘强, 荣湘民, 张玉平, 田昌. 生物黑炭对旱地土壤 CO₂、CH₄、N₂O 排放及其环境效益的影响. 生态学报, 2015, 35(11): 3615-3624.

Gao D C, Zhang L, Liu Q, Rong X M, Zhang Y P, Tian C. Effects of biochar on CO₂, CH₄, N₂O emission and its environmental benefits in dryland soil. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(11): 3615-3624.

生物黑炭对旱地土壤 CO₂、CH₄、N₂O 排放及其环境效益的影响

高德才^{1,2,3,4}, 张蕾^{1,4}, 刘强^{1,2,3,4,*}, 荣湘民^{1,2,3,4}, 张玉平^{1,2,3,4}, 田昌^{1,2,3,4}

1 湖南农业大学资源环境学院, 长沙 410128

2 农田污染控制与农业资源利用湖南省重点实验室, 长沙 410128

3 植物营养湖南省普通高等学校重点实验室, 长沙 410128

4 土壤肥料资源高效利用国家工程实验室, 长沙 410128

摘要: 采用土柱室内模拟的方法, 通过添加 0%、0.5%、2%、4%、6%、8% 生物黑炭于土壤中, 测定土壤 CO₂、CH₄、N₂O 排放通量, 探讨生物黑炭对旱地土壤 CO₂、CH₄、N₂O 排放及其环境效益的影响。结果表明: 室内模拟土柱培养期内, 施用生物黑炭能显著增加 CO₂ 排放, 且生物黑炭添加百分数(x)与 CO₂ 累积排放量(y)之间满足线性方程: $y = 12.591x + 235.02$ ($R^2 = 0.834$, $n = 24$); 当生物黑炭添加量达到 2% 及以上时, 基本抑制了 CH₄ 的排放和显著减少土壤 N₂O 排放, 并显著减少 CH₄ 和 N₂O 的综合温室效应, 当其达到 4% 以上时, CH₄ 和 N₂O 的综合温室效应降幅更大并趋于稳定, 但施用少量生物黑炭(0.5%)可显著促进 N₂O 排放, 对减少 CH₄ 和 N₂O 综合温室效应并无明显效果。生物黑炭表观分解率随其添加量的增加逐渐减少, 生物黑炭添加比例越高, 积累于土壤中的碳越多, 从投入生物黑炭量与固碳量和减排比角度综合考虑, 农业生产中推荐生物黑炭施用量为 20 t/hm², 其固碳减排效果俱佳。

关键词: 生物黑炭; CO₂; CH₄; N₂O; 环境效益

Effects of biochar on CO₂, CH₄, N₂O emission and its environmental benefits in dryland soil

GAO Decai^{1,2,3,4}, ZHANG Lei^{1,4}, LIU Qiang^{1,2,3,4,*}, RONG Xiangmin^{1,2,3,4}, ZHANG Yuping^{1,2,3,4}, TIAN Chang^{1,2,3,4}

1 College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China

2 Hunan Provincial Key Laboratory of Farmland Pollution Control and Agricultural Resources Use, Changsha 410128, China

3 Hunan Provincial Key Laboratory of Plant Nutrition in Common University, Changsha 410128, China

4 National Engineering Laboratory on Soil and Fertilizer Resources Efficient Utilization, Changsha 410128, China

Abstract: Farmland soils are the important source of greenhouse gases emissions, so it plays an important role for slowdown of the climate change by reducing the emissions of greenhouse gases from farmland soils. Because of high carbon content and carbon stability of biochar, and its influence on regulation of soil structure and microorganism, biochar has the important effect on increasing of soil carbon accumulation and reducing of the greenhouse emissions. However, biochar is setting up with high or low addition amount currently, possess a big blind area, and few reports are involved in effecting of biochar on

基金项目: 南方丘陵地区农业面源防控技术集成与示范(2012BAD15B04); 湖南省教育厅重点项目(11K034); 国家支撑计划(2010BAD01B01); 国家自然科学基金项目(31101596); 湖南省高校创新平台开放基金项目(12K065, 10K034); 湖南省研究生科研创新项目(CX2012B289); 湖南农业大学青年基金(12QN25)

收稿日期: 2013-10-08; 网络出版日期: 2014-08-22

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lq8053@hunau.net

reducing effectiveness of comprehensive greenhouse. Simulation experiment indoor of soil column was conducted in this experiment, and adding 0% (0 t/hm²), 0.5% (5 t/hm²), 2% (20 t/hm²), 4% (40 t/hm²), 6% (60 t/hm²), 8% (80 t/hm²) biochar (the biochar was prepared by pyrolyzing corn straw at 500—550 °C under oxygen limited condition) into red dryland land of Southern China under urea application condition (300 kg/hm²), and using static chamber/gas chromatograph techniques to collect and determine the CO₂, CH₄, N₂O fluxes. The results showed that CO₂ emission was significantly increased by biochar application during simulation experiment indoor of soil column, and the relationship between addition amount of biochar and emission amount of CO₂ meet the linear equation: $y = 12.591x + 235.02$ ($R^2 = 0.834$, $n = 24$). The CH₄ emission was almost inhibited and the N₂O flux was significantly decreased when biochar addition ratio was above 2% (including 2%), and the comprehensive greenhouse effective of CH₄ and N₂O were significantly decreased, and the decreased range was bigger when the ratio reached 4%. But N₂O emission was significantly accelerated by adding small amount of biochar (0.5%), and no significant effective of reducing the comprehensive greenhouse. The apparent decomposition rate of biochar decreased as the increasing of biochar addition, indicating that the higher biochar addition with the more carbon accumulated in soil. As a conclusion, recommended applying amount of biochar is 20 t/hm² in agricultural production, which has a better effect both on carbon fixation and reduction.

Key Words: biochar; carbon dioxide; methane; nitrous oxide; environmental benefits

大气中温室气体浓度的不断增加,导致全球气候持续变暖,其中最重要的温室气体有二氧化碳(CO₂)、甲烷(CH₄)、氧化亚氮(N₂O)^[1]。大气中 CO₂ 浓度的增加主要是由于化石燃料的使用和耕地利用的改变,CH₄ 和 N₂O 浓度的增加则主要是由农业活动引起^[2]。据估计,大气中每年有 5%—20% 的 CO₂、15%—30% 的 CH₄、80%—90% 的 N₂O 来源于土壤,农田土壤是温室气体重要的排放源^[3]。因此,减少农田土壤温室气体的排放对减缓气候恶化具有重要的作用^[4]。

近年来,生物黑炭(biochar)日益受到国内外研究学者的普遍关注,它是在完全或部分缺氧以及高温下通过热解将木材、草、玉米秸秆或其他农作废弃物炭化产生的一类高度芳香化难溶性固态物质,富含碳并具有高度稳定性。生物黑炭将植物固定的有机碳转化为惰性碳,使其不被微生物迅速矿化,达到固碳减排的作用^[5-6]。大量文献资料表明,生物黑炭施入土壤可减少温室气体的排放^[7-9],对缓解全球变暖有非常重要的意义^[10-11]。然而,目前对生物黑炭的研究缺乏广泛而深入的应用机理研究,大多数研究均采用高低水平设置,不具有科学系统性,存在较大盲区,且生物黑炭对减少温室气体综合温室效应方面的研究也鲜有报道。因此,本试验利用土柱室内模拟的方法,通过添加 0%、0.5%、2%、4%、6%、8% 生物黑炭于旱地土壤中,研究不同生物黑炭添加量对旱地土壤主要温室气体的排放及其环境效益的影响,以期为旱地土壤合理的生物黑炭施用量提供科学依据。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 供试土壤

供试土壤采自湖南省长沙市长沙县榔梨镇(28°11′0.72″ N, 113°06′23.79″ E)蔬菜基地的耕作层(0—20 cm),地属亚热带大陆性季风气候,年平均气温为 17.2 °C,年降雨量为 1360 mm,土壤母质为第四纪红壤,质地以砂壤为主。土样采集后风干,挑去肉眼可以看见的细根和石块后过 5 mm 筛保存备用。供试土壤的基本理化性质为 pH 5.18,有机质 14.66 g/kg,全氮 1.61 g/kg,全磷 0.81 g/kg,碱解氮 123.62 mg/kg,速效磷 45.22 mg/kg,土壤容重 1.11 g/cm³。

1.1.2 生物黑炭

原材料为玉米秸秆,在 500—550 °C 下限氧烧制而成,研磨后过 2 mm 筛。

生物黑炭基本性质:pH10.08,C 含量 51.8%,H 含量 2.65%,N 含量 1.11%,O 含量 45.2%,S 含量 0.39%。

1.1.3 试验装置

室内模拟土柱装置为内径 10 cm,高度 32 cm 的 PVC 圆柱管,管顶和管底分别有一个配套的螺口盖子。顶部螺口盖子中间打孔后插入一根塑料管连通土柱内气体与三通阀,便于采集气体,顶盖只在每次模拟降雨后采集气体时盖上(用于密封),管底的螺旋盖一直保持旋紧状态,且底盖中央开有一个 2 cm 的孔,用以连接配套的塑料管以便柱内液体流出。圆柱管底部铺有 2 cm 厚,粒径为 1—2 mm,经 2.0 mol/L H₂SO₄浸泡过夜并用蒸馏水洗净的干燥石英砂,砂粒与底盖接触面及与土壤接触面分别铺有一层大小与底盖面积一致的 200 目尼龙网。每个土柱内装填的生物黑炭和土壤混合物质量均为 1.82 kg,为保持各处理土壤容重一致(土壤容重为 1.11 g/cm³),通过慢慢压实土柱,将不同处理的土柱均保持在 20cm 高度。土柱分两层装入(从下到上填装土柱),先装 5—20 cm 土层,后装 0—5 cm 土层,其中 5—20 cm 土层为土壤与生物黑炭充分混匀后慢慢压实装入,0—5 cm 土层是土壤与生物黑炭充分混匀,再添加尿素混匀后慢慢压实装入^[12]。模拟土柱示意图如图 1 所示。

1.2 试验方法与设计

试验共设置 7 个处理:(1)不施肥(CK);(2)单施尿素(CF);(3)施用尿素+添加生物黑炭量为土壤全重(干重)的 0.5%(BC0.5);(4)施用尿素+添加生物黑炭量为土壤全重(干重)的 2%(BC2);(5)施用尿素+添加生物黑炭量为土壤全重(干重)的 4%(BC4);(6)施用尿素+添加生物黑炭量为土壤全重(干重)的 6%(BC6);(7)施用尿素+添加生物黑炭量为土壤全重(干重)的 8%(BC8)。每个处理设 4 个重复。其中施肥量与当地常规施肥量一致,即每个土柱加 0.512 g 尿素(CK 除外),施氮量相当于 300 kg/hm²。

模拟降雨时,在模拟土柱的表土放置一张大小适宜的滤纸,并用注射器缓缓加入蒸馏水,使蒸馏水均匀通过土体下渗,每次模拟降雨结束后将滤纸全部取出。土柱装好后的前 7d,每天在土柱上端用注射器缓缓注入 78 mL 的去离子水,折合降雨量为 10 mm,历时 1 h,让尿素在土壤中充分反应。从第 7 天正式开始模拟降雨,每隔 7d 降 1 次雨,参照当地平均降雨量和平均降雨强度,每次降雨 205 mL,折合降雨量 26.1 mm。在试验开展的第 1,4,8,11,15,18 天采集气样,之后每隔 7d 采集 1 次,共模拟降雨 10 次,历时 67d。

1.3 测定方法

1.3.1 基础指标按照土壤农化分析中的方法测定^[13]。

1.3.2 CO₂、CH₄和 N₂O 的采集、测定与计算

采用密闭室法采集气体样品,在 PVC 土柱顶端用螺口的盖子密封,形成一个密闭性气体空间,用带有三通阀的 20 mL 注射器从土柱顶端取样口采集气体样品,采气前,先来回抽动几次,使土柱中气体充分混匀,再按照 0、10、20、30 min 时间间隔定量采集 10 mL 气体样品,同时测定第 1 针采气和最后一针采气的温度。采样时间为 9:00—10:00。

气样采集完毕后,立即用气相色谱分析仪(GC580)测定气样 CO₂、CH₄和 N₂O 排放通量。CO₂和 CH₄测定检测器为 FID,柱温为 40 ℃,检测器温度为 375 ℃,以 N₂作为载气,H₂作为燃气。N₂O 测定检测器为 ECD,柱温为 40 ℃,检测器温度为 350 ℃,以高纯 N₂作为载气。通过标准气体和待测气体的峰面积来计算待测气体

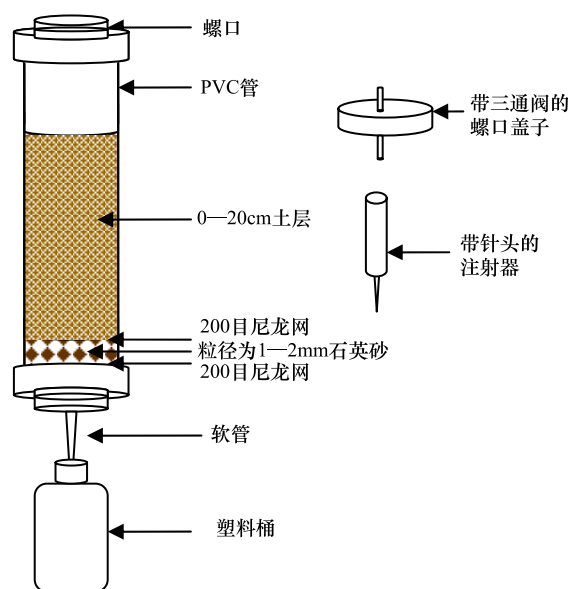


图 1 模拟土柱示意图

Fig.1 The sketch map of simulated soil column

浓度。

气体通量计算公式为:
$$F = \rho \times V / A \times \Delta C / \Delta t \times 273 / (273 + T)$$

式中, F 为气体排放通量 ($\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$ 或 $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$); ρ 为标准状态下气体的密度 ($\rho_{(\text{CO}_2)} = 1.965 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{(\text{CH}_4)} = 0.714 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{(\text{N}_2\text{O})} = 1.98 \text{ kg/m}^3$); V 为模拟土柱密封气体体积 (m^3); A 为模拟土柱内土壤表面积 (m^2); ΔC 为气体浓度差; Δt 为时间间隔 (h); T 为采样时土柱内温度 ($^{\circ}\text{C}$)。

气体累计排放量计算公式为:
$$M = \sum (F_{i+1} + F_i) / 2 \times (t_{i+1} - t_i) \times 24$$

式中, M 为土壤气体累计排放量 (kg/hm^2 或 g/hm^2); F 为气体排放通量 ($\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$ 或 $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$); i 为采样次数, t 为采样时间 (d)。

1.4 数据处理与统计检验

综合温室效应(GWP) 按照单位质量 CH_4 和 N_2O 的全球增温潜势在 100a 时间尺度上分别为 CO_2 的 25 倍和 298 倍计算不同处理的综合温室效应(GWP)^[14], 即:

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

式中, GWP 为室内模拟土柱培养期内 CH_4 和 N_2O 排放的综合温室效应 ($\text{kgCO}_2\text{-e/hm}^2$), $R_{(\text{CH}_4)}$ 和 $R_{(\text{N}_2\text{O})}$ 分别为模拟土柱培养期内 CH_4 和 N_2O 的排放总量 (kg/hm^2)。

表观分解率(%) 添加生物黑炭处理 $\text{CO}_2\text{-C}$ 排放总量减去纯施化肥 $\text{CO}_2\text{-C}$ 排放总量占添加生物黑炭碳量的百分数;

投入固碳比 投入生物黑炭碳量与固定于土壤中碳量之间比值;

投入减排比 投入生物黑炭量与由纯施化肥产生 CH_4 和 N_2O 的综合效益减去不同生物黑炭添加量产生的 CH_4 和 N_2O 的综合效益的比值。

所有试验数据采用 Microsoft Excel 2003 进行整理, 不同处理间差异采取 SPSS10.0 软件进行单因素方差分析, LSD 法进行显著性检验 ($P < 0.05$), 所有结果数据均以平均值 $\pm$ 标准差的形式来表达。

2 结果与分析

2.1 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 排放动态变化

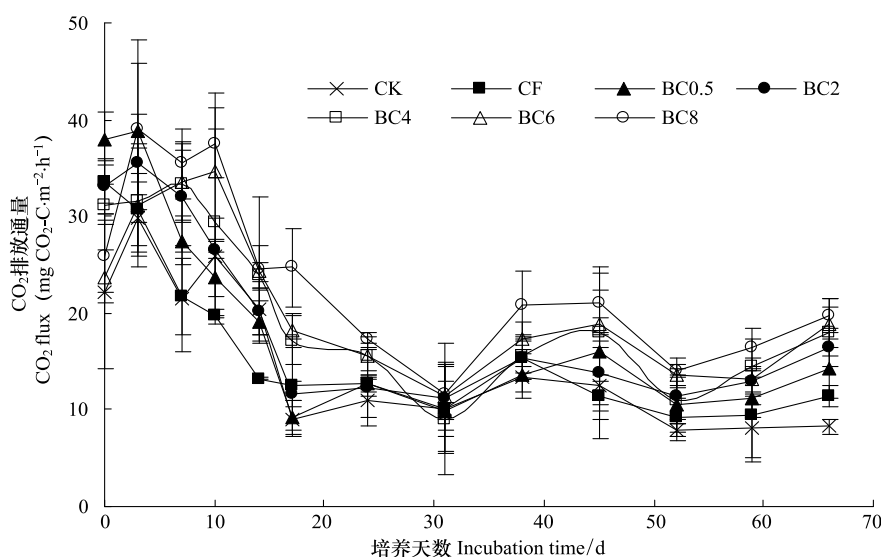
2.1.1 CO_2 排放动态变化

整个培养期内, 各处理 CO_2 排放通量 (F_{CO_2}) 变化趋势基本一致 (图 2)。各处理 F_{CO_2} 均呈先增加后降低的趋势, 其中 CF、CK、BC0.5、BC2、BC4、BC6、BC8 分别在培养第 1、3、3、3、7、10、10 天达到峰值, 峰值分别为 33.60、29.92、38.75、35.59、33.25、34.63 和 37.58 $\text{mg CO}_2\text{-C m}^{-2} \text{h}^{-1}$ 。由此说明尿素能在短时间内激发土壤 CO_2 的产生, 生物黑炭的添加能延迟 CO_2 排放达到峰值的时间, 且添加量越多, 时间延迟越长。培养第 31 天, BC0.5、BC2、BC4、BC6 和 BC8 的 F_{CO_2} 均达到观测期内最低水平, 分别为 9.81、11.26、8.98、11.39 和 11.72 $\text{mg CO}_2\text{-C m}^{-2} \text{h}^{-1}$, 而 CK 和 CF 的 F_{CO_2} 均第 52 天达到最低值, 分别为 7.87 和 9.20 $\text{mg CO}_2\text{-C m}^{-2} \text{h}^{-1}$, 之后各处理 F_{CO_2} 均有小幅增加, 并在较低的水平内波动。

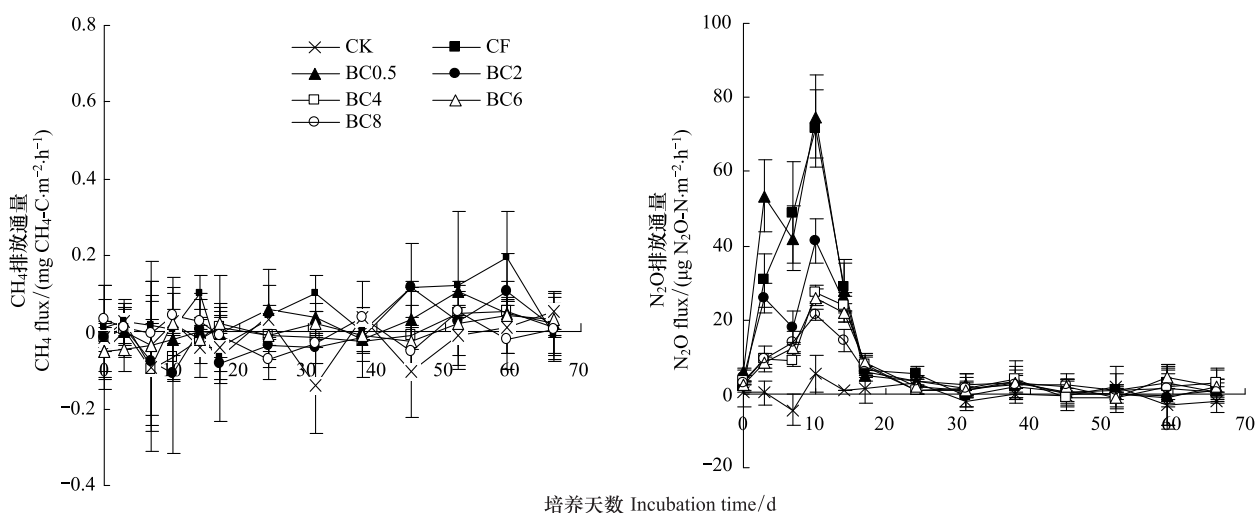
2.1.2 CH_4 和 N_2O 排放动态变化

7 种处理 CH_4 排放通量 (F_{CH_4}) 均处于较低水平, 其值在 $-0.141 \sim 0.193 \text{ mg CH}_4\text{-C m}^{-2} \text{h}^{-1}$ 之间波动 (图 3)。培养前 40d, 各处理 F_{CH_4} 多为负值, 对大气 CH_4 有微弱的吸收, 表现为 CH_4 汇; 40d 后, 各处理 CH_4 排放通量均略有增加, 并均达到各自的峰值, 其峰值大小顺序为: CF ($0.193 \text{ mg CH}_4\text{-C m}^{-2} \text{h}^{-1}$) > BC2 ($0.115 \text{ mg CH}_4\text{-C m}^{-2} \text{h}^{-1}$) > BC0.5 ($0.108 \text{ mg CH}_4\text{-C m}^{-2} \text{h}^{-1}$) > CK ($0.056 \text{ mg CH}_4\text{-C m}^{-2} \text{h}^{-1}$) > BC4 ($0.054 \text{ mg CH}_4\text{-C m}^{-2} \text{h}^{-1}$) = BC8 ($0.054 \text{ mg CH}_4\text{-C m}^{-2} \text{h}^{-1}$) > BC6 ($0.045 \text{ mg CH}_4\text{-C m}^{-2} \text{h}^{-1}$)。

各处理 N_2O 排放通量 ($F_{\text{N}_2\text{O}}$) 在培养期内的变化趋势基本一致 (图 3), 均在前期迅速增至峰值 (第 10 天) 后快速下降, 其峰值大小为 BC0.5 ($74.66 \mu\text{g N}_2\text{O-N m}^{-2} \text{h}^{-1}$) > CF ($71.50 \mu\text{g N}_2\text{O-N m}^{-2} \text{h}^{-1}$) > BC2 ($41.14 \mu\text{g N}_2\text{O-N m}^{-2} \text{h}^{-1}$)。

图2 生物黑炭对 CO_2 排放通量的影响Fig.2 The effects of biochar on CO_2 flux

CK;不施肥 No fertilization;CF;单施尿素 Urea application;BC0.5;施用尿素+添加生物黑炭量为 0.5% Urea application and 0.5% biochar addition;BC2;施用尿素+添加生物黑炭量为 2% Urea application and 2% biochar addition;BC4;施用尿素+添加生物黑炭量为 4% Urea application and 4% biochar addition;BC6;施用尿素+添加生物黑炭量为 6% Urea application and 6% biochar addition;BC8;施用尿素+添加生物黑炭量为 8% BC8; Urea application and 8% biochar addition

图3 生物黑炭对 CH_4 和 N_2O 排放通量的影响Fig.3 The effects of biochar on CH_4 and N_2O flux

$\text{O-N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) > BC4 ($27.07 \mu\text{g N}_2\text{O-N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) > BC6 ($26.03 \mu\text{g N}_2\text{O-N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) > BC8 ($21.24 \mu\text{g N}_2\text{O-N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) > CK ($5.23 \mu\text{g N}_2\text{O-N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$), 在第 17 天及之后几乎呈现零排放, 因此, 旱地土壤 N_2O 的排放主要集中在施肥后 17d。

2.2 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 的累积排放量

2.2.1 CO_2 累积排放量

整个培养期内, 各处理 CO_2 累积排放量 (ΣCO_2) 大小为: BC8 > BC6 > BC4 > BC2 > BC0.5 > CF > CK (表 1)。CK 的 ΣCO_2 较 CF 减少 4.22%, 说明在旱地土壤上施用化肥可促进土壤 CO_2 的排放, 但二者差异不显著;

BC0.5、BC2、BC4、BC6 和 BC8 的 ΣCO_2 均显著高于 CK 和 CF ($P<0.05$), 表明生物黑炭能显著增加土壤 CO_2 排放, 且 ΣCO_2 随生物黑炭添加量的增加而增加。生物黑炭添加百分数 (x) 与 ΣCO_2 (y) 之间满足线性方程 (图 4): $y = 12.591x + 235.02$ ($R^2 = 0.834, n = 24$)。

表 1 生物黑炭对 CO_2 累积排放量的影响

Table 1 The effects of biochar on CO_2 cumulative flux

处理 Treatment	累积排放量 Cumulative flux/ ($\text{kgCO}_2\text{-C/hm}^2$)	增加量 Increasing amount/ ($\text{kgCO}_2\text{-C/hm}^2$)	增加率 Increasing rate/%	处理 Treatment	累积排放量 Cumulative flux/ ($\text{kgCO}_2\text{-C/hm}^2$)	增加量 Increasing amount/ ($\text{kgCO}_2\text{-C/hm}^2$)	增加率 Increasing rate/%
CK	213.43 $\pm$ 26.20De	-9.39	-4.22	BC4	286.34 $\pm$ 8.79BCbc	63.52	28.51
CF	222.82 $\pm$ 8.95De	—	—	BC6	301.01 $\pm$ 26.55Bb	78.18	35.09
BC0.5	252.40 $\pm$ 11.54CDd	29.58	13.27	BC8	340.50 $\pm$ 18.84Aa	117.68	52.81
BC2	265.14 $\pm$ 14.62BCcd	42.32	18.99				

同一列数据后标识大写字母表示差异极显著 ($P<0.01$), 同一列数据后标识小写字母表示差异显著 ($P<0.05$); “—” 表示参比

2.2.2 CH_4 和 N_2O 累积排放量

各处理 CH_4 累积排放量 (ΣCH_4) 大小顺序为: CF > BC0.5 > BC2 > BC6 > BC8 > BC4 > CK (表 2), 其中 CF 的 ΣCH_4 显著高于 CK, 在旱地土壤上施用尿素能显著增加 CH_4 的排放; BC0.5、BC2、BC4、BC6 和 BC8 的 ΣCH_4 均极显著小于 CF ($P<0.01$), 说明在施用尿素的旱地土壤上添加生物黑炭可显著减少 CH_4 的排放; 其中 BC0.5 的 ΣCH_4 极显著 ($P<0.01$) 大于 BC2、BC4、BC6、BC8, 其 ΣCH_4 较 CF 只减少了 48.43%, 而 BC2、BC4、BC6 和 BC8 的 ΣCH_4 较 CF 减少了 102.85—132.91%, 表明当生物黑炭添加量为 0.5% 时, 生物黑炭对 ΣCH_4 的降低作用较小, 远小于生物黑炭添加量大于 2% 的处理。

各处理 N_2O 累积排放量 ($\Sigma \text{N}_2\text{O}$) 大小为: BC0.5 > CF > BC2 > BC4 > BC6 > BC8 > CK。CF 的 $\Sigma \text{N}_2\text{O}$ 极显著高于 CK ($P<0.01$), 说明尿素极显著促进 N_2O 排放; BC0.5 的 $\Sigma \text{N}_2\text{O}$ 极显著高于 CF ($P<0.01$), 添加少量生物黑炭会明显促进 N_2O 的排放; CF 的 $\Sigma \text{N}_2\text{O}$ 极显著高于 BC2、BC4、BC6 和 BC8, BC2 的 $\Sigma \text{N}_2\text{O}$ 又极显著高于 BC4、BC6 和 BC8, 所以, 当生物黑炭添加量达到 2% 以上时, 即可显著减少 N_2O 排放, 当生物黑炭添加量达到 4% 及以上时, N_2O 排放降幅稳定在 54.28%—56.72% 之间。

培养前 17d, 各处理 (CK, CF, BC0.5, BC2, BC4, BC6, BC8) N_2O 排放量占总 $\Sigma \text{N}_2\text{O}$ 的百分数分别为 12.57%、86.41%、92.29%、84.07%、77.60%、74.89% 和 68.63%, BC0.5 前 17d N_2O 排放量占总 $\Sigma \text{N}_2\text{O}$ 的比例最高, 说明少量生物黑炭的添加能在短时间内促使土壤释放出大量 N_2O ; 而当生物黑炭添加比例达到 2% 时, 随着生物黑炭添加量的继续增加, 前 17d N_2O 排放量占总 $\Sigma \text{N}_2\text{O}$ 的比例逐渐减少, 表明生物黑炭的添加不仅能降低 N_2O 的排放量, 还能降低 N_2O 产生的强度, 延长土壤 N 分解消耗的时间。

2.3 环境效益

2.3.1 固碳效益

BC0.5、BC2、BC4、BC6、BC8 的生物黑炭表观分解率均明显小于 BC0.5 (表 3), 并随着生物黑炭添加量的增加, 生物黑炭表观分解率逐渐减少, 当达到 4% 及以上时, 其表观分解率稳定在 0.43%—0.53% 之间。从投入与固碳比角度考虑, 随着生物黑炭添加量的增加, 逐渐减少, 当生物黑炭添加量达到 2% 及以上时, 其投入

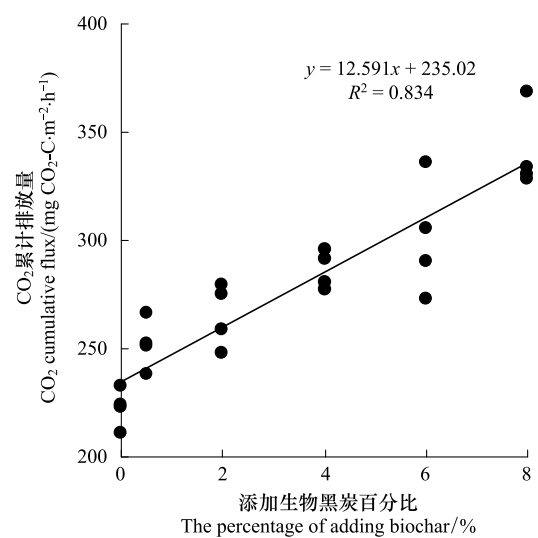


图 4 生物黑炭添加百分比与 CO_2 累积排放量的关系

Fig.4 Relationships between the adding percentage of biochar and CO_2 cumulative flux

固碳比较小,并稳定在 1.004—1.007 之间,由此表明当生物黑炭添加量达 2% 及以上时,即可达到较好的固碳效果。

表 2 生物黑炭对 CH₄和 N₂O 累积排放量的影响
Table 2 The effects of biochar on CH₄ and N₂O cumulative flux

处理 Treatment	CH ₄ 通量 CH ₄ flux			N ₂ O 通量 N ₂ O flux		
	累积排放量 Cumulative flux/ (kgCH ₄ -C/hm ²)	减少量 Decreasing amount/ (kgCH ₄ -C/hm ²)	减少率 Decreasing rate/%	累积排放量 Cumulative flux/ (kgCH ₄ -C/hm ²)	减少量 Decreasing amount/ (kgCH ₄ -C/hm ²)	减少率 Decreasing rate/%
CK	-0.361±0.020Cd	1.379	135.46	0.32±18.33Ee	178.30	55718.75
CF	1.018±0.121Aa	—	—	178.62±24.58Bb	—	—
BC0.5	0.525±0.298Bb	0.493	48.43	204.32±44.43Aa	-40.39	-14.39
BC2	-0.029±0.077Cc	1.047	102.85	101.44±5.91Cc	121.27	43.21
BC4	-0.335±0.136Ccd	1.353	132.91	81.66±11.71Dd	152.36	54.28
BC6	-0.123±0.195Ccd	1.141	112.08	78.42±26.59Dd	157.46	56.10
BC8	-0.222±0.104Ccd	1.240	121.81	77.31±10.61Dd	159.20	56.72

同一列数据后标识大写字母表示差异极显著 ($P<0.01$),同一列数据后标识小写字母表示差异显著 ($P<0.05$);“—”表示参比

表 3 生物黑炭表观分解率
Table 3 The apparent decomposition rate of biochar

处理 Treatment	生物黑炭含碳量 Carbon content of biochar/g	CO ₂ -C 排放总量 Total amount of CO ₂ -C flux/g	表观分解率 Apparent decomposition rate/%	投入固碳比 The ratio of inputted carbon accounting for carbon sequestration
CF	0	0.175±0.007De	—	—
BC0.5	1.18	0.198±0.009CDd	1.95	1.020
BC2	4.70	0.208±0.011BCcd	0.70	1.007
BC4	9.40	0.225±0.007BCbc	0.53	1.005
BC6	14.10	0.236±0.021Bb	0.43	1.004
BC8	18.80	0.267±0.015Aa	0.49	1.005

同一列数据后标识大写字母表示差异极显著 ($P<0.01$),同一列数据后标识小写字母表示差异显著 ($P<0.05$);“—”表示参比

2.3.2 CH₄和 N₂O 的综合温室效益

由图 5 可知,CF 的 GWP 最高,远远高于 CK 的 GWP,施肥是导致旱地土壤 CH₄和 N₂O 综合温室效应增加的主要原因。CF 的 GWP 大于 BC0.5,但二者之间差异不显著,说明施用少量生物黑炭对减少施氮旱地土壤 CH₄和 N₂O 综合温室效应的效果并不明显。而 BC2、BC4、BC6 和 BC8 的 GWP 值均极显著低于 CF ($P<0.01$),较 CF 的降幅分别为 60.41%、76.97%、72.26%和 75.51%,BC4、BC6 和 BC8 的 GWP 极显著低于 BC2,说明当生物黑炭添加量为 2% 以上时,即可显著减少 CH₄和 N₂O 的 GWP,当生物黑炭添加量达到 4% 及以上时,CH₄和 N₂O 的 GWP 降幅稳定在 72.26%—76.97%之间。从投入减排比角度考虑,随着生物黑炭添加量的增加,投入减排比呈先降低后升高的趋势(图 6),其中以添加 2% 的生物黑炭投入减排比最小,添加 0.5% 的生物黑炭的投入减排比最大。

3 讨论

3.1 生物黑炭对 CO₂、CH₄、N₂O 排放的影响

整个培养期内,化肥处理的 F_{CO_2} 最早达到峰值,其 ΣCO_2 大于不施肥处理,但二者差异不显著,说明尿素只能在短期内促进 CO₂ 的排放,这与武文明等^[15]的研究一致,其原因可能是施用尿素激发了土壤有机碳的矿化分解,随着时间的延长,激发效应减弱并消失。生物黑炭延迟 CO₂ 达到峰值的时间,投入越多,延迟越长。本试验结果表明,旱地土壤生物黑炭添加比大于 0.5% (5 t/hm²) 时,即可显著增加 CO₂ 的排放,且生物黑炭添加百分数(x)与 ΣCO_2 (y) 之间呈线性关系,而 Karhu 等^[16]和 Knoblauch 等^[17]的研究结果表明,当生物黑炭添

加量小于 10 t/hm^2 时,其对农田土壤土壤呼吸无明显影响,zhang 等^[18]发现,当生物黑炭施用量在 40 t/hm^2 时,可显著增加 CO_2 排放,Spokas 等^[8]的研究得出,施用生物黑炭可降低土壤 CO_2 的排放。这些不同结论的得出可能是因为不同生物黑炭类型和不同土壤水分状况致使生物黑炭对 CO_2 排放既有促进作用亦有抑制作用^[18],因此,未来还需要进一步深刻研究生物黑炭对土壤 CO_2 排放影响的作用过程与机理。

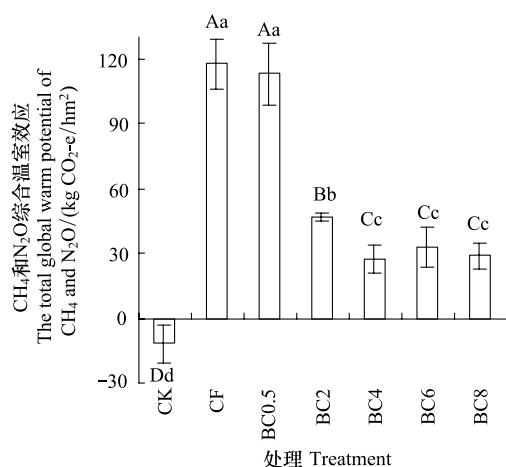


图5 CH_4 和 N_2O 综合温室效应

Fig.5 The total global warm potential of CH_4 and N_2O

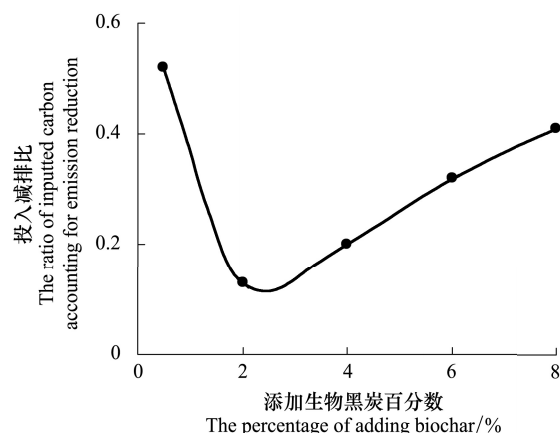


图6 生物黑炭添加百分数与投入减排比关系

Fig.6 Relationships between the adding percentage of biochar and the ratio of inputted carbon accounting for emission reduction

土壤 CH_4 的产生是产甲烷菌和甲烷氧化菌综合作用的结果^[19],其中产甲烷菌为厌氧菌,甲烷氧化菌为好氧菌,因此,通气良好的旱地土壤抑制产甲烷菌的活性,导致 CH_4 排放较低。本试验各处理的 F_{CH_4} 值均较小 ($-0.141\text{—}0.193 \text{ mg CH}_4\text{-C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$),这与张中杰^[20]在川中丘陵旱地的研究结果相似。尿素显著促进旱地土壤 CH_4 排放,原因可能是尿素抑制旱地甲烷氧化菌的活性,从而提高土壤 CH_4 的产生与排放^[21]。本试验结果表明,添加生物黑炭能降低 CH_4 排放,与前人研究结果一致^[22-23],且本试验进一步得出,当生物黑炭的添加量达到 2% 以上时,土壤表现为弱 CH_4 汇, CH_4 排放基本被抑制,这与 Rondon 研究结果一致^[24],原因可能是生物黑炭通过影响参与 CH_4 产生和吸收过程的微生物而减少 CH_4 的排放^[25],也有可能是通过增加甲烷氧化菌群结构的多样性,进而使 CH_4 氧化增加而导致 CH_4 的排放减少^[26]。但也有一些研究表明施用生物黑炭使 CH_4 的排放量增加^[16,27],其原因可能是生物质炭本身含有的某种有毒有害化学物质抑制了土壤甲烷氧化活性作用有关^[28]。

土壤中 N_2O 主要是在微生物的参与下,通过硝化与反硝化过程产生的。本试验得出,在旱地土壤上施用尿素可显著增加 N_2O 的排放,与张玉铭等^[29]和王重阳等^[30]的研究一致,这主要由于土壤中充足的氮素为土壤硝化与反硝化微生物提供丰富的氮源。因此在农业生产中,减少化肥施用是减少农田 N_2O 排放的重要途径之一。大量研究表明^[18,22-23,27,31],生物黑炭的添加可以显著降低农田 N_2O 的排放,本试验进一步得出,旱地土壤生物黑炭添加量为 2% 时即可显著减少 N_2O 排放,当生物黑炭添加量达到 4% (40 t/hm^2) 及以上时, N_2O 的排放降幅稳定在 54.28%—56.72% 之间,张斌等^[32]和 zhang 等^[33]的研究结果表明当生物黑炭用量为 40 t/hm^2 时, N_2O 的排放降幅达 53.6%—65.7% 和 50.7%—56.0%,与本试验研究结果十分接近。对于该现象的原因,张广斌等^[34]认为添加生物黑炭提高了土壤的阳离子交换量,进而增加了 NH_4^+ 的吸附,使得土壤中无机氮减少,抑制了硝化过程的进行,从而减少 N_2O 的产生,Rondon 等^[22]认为是由于生物质炭含有的某种组分抑制了 NO_3^- -N 向 N_2O 转化关键酶的活性,或是促进了 N_2O 向 N_2 转化还原酶的活性,Lehmann 等^[7]则认为可能是由于生物黑炭施入土壤后土壤容重降低,通气性改善,加上生物黑炭的高 C/N,限制了氮素的微生物转化和反硝化,从而改变了农田生态系统的氮循环。目前,关于生物黑炭减少 N_2O 排放的机理研究还处于起步阶段,

尚无统一结论,未来需对此进行深刻而系统的研究。值得一提的是,本试验研究结果表明,当生物黑炭添加量为 0.5% (5 t/hm²) 时,会显著促进 N₂O 的排放,原因有可能是添加的少量生物黑炭促进硝化细菌的活性,产生更多的 NO₃⁻-N,为 N₂O 的产生提供充足的底物,因此,在生产实践中应避免添加少量生物黑炭。

3.2 生物黑炭的环境效益

生物黑炭是在限氧或厌氧条件下高温热解碳化后产生的一类高度芳香化富含碳的且非常稳定的固态物质^[35],它在土壤中的平均停留时间可达 1000a^[36],被认为是一种非常有效的碳汇途径^[9],且 Lehmann 等^[7]提出,生物黑炭技术潜在可行增汇量可达 9.5 Pg。因此,生物质炭化还田可能成为人类应对全球气候变化的一条重要途径^[9,37-38]。本试验研究得出,当生物黑炭添加量达到 2% 及以上时,其分解率和投入与固碳比均较小,具有较好的固碳效果,与前人研究结果较一致^[39-40]。CH₄和 N₂O 是重要的温室气体,单位质量 CH₄和 N₂O 的全球增温潜势在 100a 时间尺度上分别为 CO₂的 25 倍和 298 倍,本试验得出,施肥是可显著增加旱地土壤 CH₄和 N₂O 综合温室效应,而在旱地土壤施肥条件下,生物黑炭添加量为 2% 时,即可显著减少 CH₄和 N₂O 的综合温室效应,降幅达到 60.41%,当添加量达到 4% 及以上时,CH₄和 N₂O 的综合温室效应降幅稳定在 72.26%—76.97%之间,张斌等^[32]研究也得出,在施氮条件下,高用量生物质炭 (40 t/hm²) 能显著降低 CH₄和 N₂O 的综合温室效应。当生物黑炭添加量是 2% 时,其投入与减排比最小,因此从生物黑炭投入与减排比的角度考虑,当生物黑炭添加量为 2% 时即可达到生物黑炭投入最少,CH₄和 N₂O 的综合温室效应减少最多。

我国具有丰富的生物质废弃物,其中各种农作物秸秆总产量每年高达 7 亿 t,每年约有 1/4 的秸秆被露天燃烧,造成了大量碳以 CO₂形式进入环境导致温室效应的加剧。因此,利用生物质废弃物制备生物黑炭被认为是一种非常有前景并能够实现碳封存和减缓气候变暖目的的管理策略^[41],本试验基于生物黑炭投入与固碳和减排比的角度综合考虑,在今后的农业生产中,推荐生物黑炭施用量为 2% (20 t/hm²),其固碳减排效果俱佳。

4 结论

(1) CO₂排放随着生物黑炭添加量的增加而增加,且生物黑炭添加百分比(x)与 Σ CO₂(y) 之间满足线性方程: $y = 12.591x + 235.02$ ($R^2 = 0.834, n = 24$);而添加生物黑炭能显著降低旱地土壤 CH₄和 N₂O 的排放,当生物黑炭的添加量达到 2% 以上时,基本抑制了 CH₄的排放且显著减少 N₂O 的排放,其中少量的生物黑炭可促进 N₂O 的排放;

(2) 施肥是导致旱地土壤 CH₄和 N₂O 综合温室效应的主要原因,在旱地土壤上,添加少量生物黑炭 (5 t/hm²) 的环境效益不明显,综合考虑生物黑炭的固碳效益和减排效益,农业生产中推荐最优生物黑炭施用量为 20 t/hm²。

参考文献 (References):

- [1] 黄耀. 中国的温室气体排放、减排措施与对策. 第四纪研究, 2006, 26(5): 722-732.
- [2] ICPP. Climate change 2007: The Physical Science Basis // Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt K B, Tignor M, Miller H L, eds. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- [3] 张玉铭, 胡春胜, 张佳宝, 董文旭, 王玉英, 宋利娜. 农田土壤主要温室气体 (CO₂、CH₄、N₂O) 的源/汇强度及其温室效应研究进展. 中国生态农业学报, 2011, 19(4): 966-975.
- [4] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. Science, 2004, 304(5677): 1623-1627.
- [5] Lehmann J, Czimczik C, Laird D, Sohi S. Stability of biochar in soil // Biochar for Environmental Management. London: Earthscan, 2009: 183-205.
- [6] Laird D A. The charcoal vision: a win-win-win scenario for simultaneously producing bioenergy, permanently sequestering carbon, while improving soil and water quality. Agronomy Journal, 2008, 100(1): 178-181.
- [7] Lehmann J, Gaunt J, Rondon M. Biochar sequestration in terrestrial ecosystems - a review. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 2006, 11(2): 403-427.
- [8] Spokas K A, Reicosky D C. Impacts of sixteen different biochars on soil greenhouse gas production. Annals of Environmental Science, 2009, 3(4):

- 179-193.
- [9] Lehmann J. A handful of carbon. *Nature*, 2007, 447(7141): 143-144.
- [10] Lin X. The effects of biochar addition on greenhouse gases and crop biomass in seashore saline soil // *International Symposium on Biochar Research, Development & Application*. Nanjing, 2011: 26-26.
- [11] Liu Q, Xie Z. Effects of biochar addition on crop yield and greenhouse gases in rice-wheat rotation ecosystem in Jiangdu China // *International Symposium on Biochar Research, Development & Application*. Nanjing, 2011: 29-29.
- [12] 邢英, 李心清, 王兵, 周志红, 程红光, 程建中, 房彬. 生物炭对黄壤中氮淋溶影响: 室内土柱模拟. *生态学杂志*, 2011, 30(11): 2483-2488.
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [14] ICPP. Climate Change 2001: The Scientific Basis, Summary for Policymakers. New York: Cambridge University Press, 2011.
- [15] 武文明, 杨光明, 沙丽清. 西双版纳地区稻田 CO₂ 排放通量. *生态学报*, 2009, 29(9): 4983-4992.
- [16] Karhu K, Mattila T, Bergström I, Regina K. Biochar addition to agricultural soil increased CH₄ uptake and water holding capacity - results from a short-term pilot field study. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2011, 140(1/2): 309-313.
- [17] Knoblauch C, Maarifat A A, Pfeiffer E M, Haefele S M. 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.
- [18] Zhang A F, Liu Y M, Pan G X, Hussain Q, Li L Q, Zheng J W, Zhang X H. 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.
- [19] Le Mer J, Roger P. Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: a review. *European Journal of Soil Biology*, 2001, 37(1): 25-50.
- [20] 张中杰, 朱波, 江长胜, 韩广轩, 高美荣. 川中丘陵区旱地小麦生态系统 CO₂、N₂O 和 CH₄ 排放特征. *生态学杂志*, 2005, 24(2): 131-135.
- [21] Hutsch B W. Methane oxidation in soils of two long-term fertilization experiments in Germany. *Soil Biology & Biochemistry*, 1996, 28(6): 773-782.
- [22] Rondon M A, Molina D, Hurtado M, Ramirez J, Lehmann J, Major J, Amezquita E. Enhancing the productivity of crops and grasses while reducing greenhouse gas emissions through biochar amendments to unfertile tropical soils // *Proceedings of the 18th World Congress of Soil Science*. Philadelphia, PA, 2006: 138-168.
- [23] Renner R. Rethinking biochar. *Environment Science and Technology*, 2007, 41(17): 5932-5933.
- [24] Rondon M, Ramirez J A, Lehmann J. Charcoal additions reduce net emissions of greenhouse gases to the atmosphere // *Proceedings of the 3rd USDA Symposium on Greenhouse Gases and Carbon Sequestration in Agriculture and Forestry*. Baltimore, USA, 2005: 208-208.
- [25] Spokas K A, Koskinen W C, Baker J M, Reicosky D C. Impacts of woodchip biochar additions on greenhouse gas production and sorption/degradation of two herbicides in a Minnesota soil. *Chemosphere*, 2009, 77(4): 574-581.
- [26] Feng Y Z, Xu Y P, Yu Y C, Xie Z B, Lin X G. Mechanisms of biochar decreasing methane emission from Chinese paddy soils. *Soil Biology & Biochemistry*, 2012, 46(3): 80-88.
- [27] Zhang A F, Cui L Q, Pan G X, Li L Q, Hussain Q, Zhang X H, Zheng J W, Crowley D. Effect of biochar amendment on yield and methane and nitrous oxide emissions from a rice paddy from Tai Lake Plain, China. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2010, 139(4): 469-475.
- [28] Spokas K. Observed Ethylene Production from Biochar Additions. 2010. <http://www.biorenew.iastate.edu/fileadmin/www.biorenew.iastate.edu/biochar2010/Presentations/SPokas.pdf>.
- [29] 张玉铭, 胡春胜, 董文旭, 陈德立, 张佳宝. 农田土壤 N₂O 生成与排放影响因素及 N₂O 总量估算的研究. *中国生态农业学报*, 2004, 12(3): 119-123.
- [30] 王重阳, 郑靖, 顾江新, 王绍斌, 史奕, 陈欣. 下辽河平原几种旱作农田 N₂O 排放通量及相关影响因素的研究. *农业环境科学学报*, 2006, 25(3): 657-663.
- [31] Zwieten L V, Kimber S, Morris S, Downie A, Berger E, Rust J, Scheer C. Influence of biochars on flux of N₂O and CO₂ from Ferrosol. *Australian Journal of Soil Research*, 2010, 48(7): 555-568.
- [32] 张斌, 刘晓雨, 潘根兴, 郑聚锋, 池忠志, 李恋卿, 张旭辉, 郑金伟. 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.
- [33] Zhang A F, Bian R J, Pan G X, Cui L Q, Hussain Q, Li L Q, Zheng J W, Zheng J F, Zhang X H, Han X J, Yu X Y. 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. *Field Crops Research*, 2012, 127(2): 153-160.
- [34] 张广斌, 马静, 马二登, 徐华, 蔡祖聪. 尿素施用对稻田土壤甲烷产生、氧化及排放的影响. *土壤*, 2010, 42(2): 178-183.
- [35] Antal M J Jr, Gronli M. The art, science and technology of charcoal production. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2003, 42(8): 1619-1640.
- [36] Swift R S. Sequestration of carbon by soil. *Soil Science*, 2001, 166(11): 858-871.
- [37] Harder B. Smoldered-earth policy: created by ancient Amazonian natives, fertile, dark soils retain abundant carbon. *Science News*, 2006, 169(9): 133-133.
- [38] Marris E. Putting the carbon back: Black is the new green. *Nature*, 2006, 442(7103): 624-626.
- [39] Shindo H. Elementary composition, humus composition, and decomposition in soil of charred grassland plants. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1991, 37(4): 651-657.
- [40] Kuzyakov Y, Subbotina I, Chen H Q, Bogomolova I, Xu X L. Black carbon decomposition and incorporation into soil microbial biomass estimated by 14C labeling. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(2): 210-219.
- [41] 李飞跃, 梁媛, 汪建飞, 赵玲. 生物炭固碳减排作用的研究进展. *核农学报*, 2013, 27(5): 681-686.