

玉米秸秆及其黑炭添加对黄绵土 CO₂ 和 N₂O 排放的影响

刘 娇, 袁瑞娜, 赵 英*, 张阿凤

(西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:采用二次通用旋转组合设计,在室内进行恒温(28℃)培养试验,探讨在室内培养条件下土壤水分、有机碳(秸秆、黑炭)和氮素耦合对温室气体(CO₂和N₂O)排放的影响,并建立回归模型对试验数据进行回归分析,结果表明:(1)相比施加秸秆来说,在土壤中施加黑炭具有显著的减排效果。(2)以秸秆作为碳源时,水、碳、氮三因子对土壤两种温室气体(CO₂和N₂O)累积排放量的影响大小均表现为有机碳>水分>氮素;以黑炭作为碳源时,水碳氮三因子对土壤CO₂累积排放量的影响大小表现为水分>有机碳>氮素,对土壤N₂O累积排放量的影响为有机碳>氮素>水分。(3)水碳氮交互作用对土壤CO₂累积排放量的影响表现为:施加秸秆时为碳氮>水氮>水碳,施加黑炭时为水碳=水氮>碳氮;而对N₂O累积排放量的影响而言,施加秸秆时为水碳>碳氮>水氮,施加黑炭时为水氮>碳氮>水碳。(4)研究认为,令CO₂累积排放量最小的水碳氮组合以秸秆作为碳源时为水分含量30%、不施加秸秆和氮素施用量81.9 mg·kg⁻¹,以黑炭作为碳源时为水分含量10%、不施加黑炭和氮素施用量48.4 mg·kg⁻¹;令N₂O累积排放量最小的水碳氮组合以秸秆作为碳源时为水分含量30%、不施加秸秆和氮素施用量100 mg·kg⁻¹,以黑炭作为碳源时为水分含量10%、不施加黑炭和氮素施用量100 mg·kg⁻¹。

关键词:黄绵土;水碳氮耦合;秸秆;黑炭;温室气体

中图分类号:X511 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2014)08-1659-10 doi:10.11654/jaes.2014.08.027

Coupling Effects of Water, Carbon and Nitrogen on Greenhouse Gas Emissions from Loessial Soil

LIU Jiao, YUAN Rui-na, ZHAO Ying*, ZHANG A-feng

(College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: Research has shown that direct returning of crop residues to fields may cause increases in greenhouse gas emissions from soils. This study investigated the coupling impacts of soil water content, organic carbon (maize stalk and its biochar) and nitrogen on the emissions of greenhouse gases (CO₂ and N₂O), using quadratic rotational combination design and laboratory incubation experiment (28℃). When maize stalks were directly applied to the soil, CO₂ and N₂O emissions were mainly affected by organic carbon, followed by water and nitrogen; whereas CO₂ emission was predominantly influenced by water, followed by organic carbon and nitrogen, but N₂O emission was primarily controlled by organic carbon, followed by nitrogen and water, when biochar was added to soil. Effect of pairwise interactions on CO₂ emission was in order of carbon–nitrogen>water–nitrogen>water–organic carbon when stalk was applied. When biochar was applied, however, the interactive effect on CO₂ emission was water–nitrogen=water–carbon>carbon–nitrogen. The interaction on N₂O emission was water–carbon>carbon–nitrogen>water–nitrogen when stalk was applied, but water–nitrogen>carbon–nitrogen>water–carbon when biochar was applied. For the lowest cumulative CO₂ emission, the optimal combination would be a combination of 30% water content and 81.9 mg·kg⁻¹ nitrogen without stalk addition, or 10% water content, no biochar applied and 48.4 mg·kg⁻¹ nitrogen. As for N₂O emissions, a combination of 30% water content, no stalk amendment and 100 mg·kg⁻¹ nitrogen was the better condition when the maize stalk was amended. In contrast, when biochar used, the best condition was a combination of 10% water content, no biochar added and 100 mg·kg⁻¹ nitrogen. In summary, compared to stalk, the biochar can effectively reduce soil emissions of greenhouse gases.

Keywords: loessial soil; coupling effects of soil water, organic carbon and nitrogen; stalk; biochar; greenhouse gases

收稿日期:2013-12-16

基金项目:国家自然科学基金项目(41001130);陕西省科学技术研究发展计划项目(2013KW-19-02)

作者简介:刘 娇(1988—),女,硕士研究生,研究方向为土壤碳氮转化。E-mail:liuxy0803@163.com

*通信作者:赵 英 E-mail:yzhao@nwsuaf.edu.cn

近年来由温室气体(CO_2 、 N_2O)排放增加引起的气候变暖成为全球关注的热点。大气中 CO_2 浓度在1995—2005 年以每年 1.9×10^{-6} 的速率增加^[1], N_2O 排放量虽比 CO_2 少, 但单位摩尔数的 N_2O 的增温效应是 CO_2 的 150~200 倍^[2]。张强等^[3]研究指出, 从 1980—2007 年中国农田 N_2O 排放年均增长 7.6%, 2007 年 N_2O -N 排放量达到 288.4 Gg。2007 年化学氮肥投入、有机物质投入、作物秸秆投入对农田 N_2O 直接排放的贡献份额分别为 77.64%、15.57%和 6.46%。因此, 如何减少农业生产利用中的温室气体排放、增加陆地生态系统碳汇成为当前减缓气候变化研究的热点之一^[4]。

我国农业每年产生超过 6.4 亿 t 的作物秸秆, 且随着作物单产的提高, 秸秆产量递增, 目前我国作为能源利用的秸秆大约占到秸秆总产出量的 45%, 秸秆还田不到总量的 21%^[5]。秸秆还田可使作物吸收的大部分营养元素归还土壤, 增加土壤有机质, 维持养分平衡, 而且还可以改善土壤物理结构, 增加作物产量^[6], 但秸秆大量施入土壤后会增加土壤 CO_2 和 N_2O 排放^[6]。因此, 近年来有越来越多的研究将秸秆转化为黑炭后再施入土壤^[7]。黑炭由于其稳定的结构性, 施加到土壤中后, 不仅能稳定土壤有机碳库, 保持土壤养分^[8], 而且可以提高土壤肥力, 改善土壤理化性质^[7,9]。但是, 黑炭施加对土壤 N_2O 排放的影响在国内外存在争议^[10-14], Yanai 等^[10]研究发现, 黑炭施加会减少部分土壤 N_2O 排放, 但并非所有土壤 N_2O 排放都会减少, 这主要取决于土壤有机质、氮素、水分、温度等条件。如果相较于作物秸秆, 施加黑炭能够稳定土壤碳库, 减少土壤温室气体排放, 那么在农业生产中施加黑炭可以作为一种有效的减排措施来加以推广, 因而研究探讨秸秆和黑炭施入土壤后对土壤温室气体排放的影响相当必要。

土壤温室气体排放与很多土壤因素有关, 其不仅取决于施入土壤中的有机物质, 也与土壤水分状况和氮素密切相关。本研究结合土壤水分和氮素条件, 探讨玉米秸秆和黑炭施加对黄绵土 CO_2 和 N_2O 排放的影响, 利用回归设计, 寻求黄绵土 CO_2 和 N_2O 累积排放量最少的水、有机质、氮素组合, 为田间实际生产施肥提供一定的理论参考依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

1.1.1 土壤

本试验土壤采自中国科学院长武农业生态实验

站。该站位于西北黄土高原丘陵沟壑区, 陕西省长武县十里铺村($31^\circ 24' \text{N}$, $119^\circ 41' \text{E}$)。试验土壤类型为熟化黄绵土, 质地均匀, 疏松多孔。

在田间 S 型取样, 每个取样点采集 0~40 cm 的土样混合, 用四分法缩取足够的土样装在塑料袋里带回实验室, 同时用环刀取原状土样测定土壤容重。混合土样去杂后, 取一部分烘干, 过 0.25 mm 筛, 测定土壤 pH (1:2.5 土水比)、CEC (盐酸-醋酸钙交换法)、有机碳含量(重铬酸钾-容量外加热法)、全 N 含量(凯氏法)。剩余土样置于 4 °C 条件下冷藏, 用于培养试验。测得土壤容重为 $1.32 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 有机碳含量 $6.49 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全氮 $0.67 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, pH 7.68, CEC $8.82 \text{ cmol}(+) \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.1.2 黑炭及秸秆

本试验所用秸秆为 2011 年大田收获的玉米秸秆, 风干粉碎后加入土壤中, 测得玉米秸秆有机碳含量 $484.37 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全氮含量 $5.61 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。黑炭为上述玉米秸秆在马弗炉中 350 °C 热解 3 h 制成, 有机碳含量 $584.64 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全氮含量 $3.81 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验设计

本研究包括土壤水分、氮素和有机碳 3 个试验因子。为保证室内培养试验结果具有代表性, 将土壤水分含量、氮素施加量和有机碳(玉米秸秆和黑炭)施加量分别根据田间实际条件设置 5 个不同的水平。本试验采用二次通用旋转组合设计^[15], 此设计可以有效减少试验处理数, 并在获得试验数据后可以对其做回归分析, 不但能够得出自变量及其交互作用对因变量的影响程度大小, 还可以求得在自变量取值范围内因变量的阈值。试验因子编码值和实际值如表 1 所示。根据二次通用旋转组合设计原理, 本试验共形成 20 个处理, 如表 2 所示。

1.3 试验方法

培养试验: 试验前先将采回冷藏的土样过 2 mm 筛, 风干至 10% 以下土壤含水量, 28 °C 预培养 7 d 以激活土壤微生物。然后称取相当于 250 g 干土重量的土壤置于培养瓶(500 mL)中, 按照二次通用旋转组合设计表(表 2), 加入一定量的秸秆(或黑炭)混匀(本研究中所加入的秸秆量和黑炭量均换算成有机碳含量, 保持加入的有机碳含量一致), 参照田间土壤容重压实, 再加入一定量蒸馏水调节到设定的水分含量, 尿素随水加入, 同时做空白试验。将处理好的土样置于 28 °C 恒温培养箱中进行培养, 整个实验期间用称重法通过加水控制土壤水分含量维持在实验水平。

表 1 试验因素及编码值水平
Table 1 Experimental factors and coding levels

编码值 Coding value	实际值 Actual values			
	X ₁ 土壤含水量/% Water content	X ₂ 秸秆施量/g·kg ⁻¹ Maize stalk rates	X ₂ 黑炭施量/g·kg ⁻¹ Biochar rates	X ₃ 氮素施量/mg·kg ⁻¹ Nitrogen rates
1.682	30	14.4	12.0	100
1	26	11.6	9.6	80
0	20	7.2	6.0	50
-1	14	2.8	2.4	20
-1.682	10	0	0	0

表 2 二次通用旋转组合设计表
Table 2 Quadratic rotational combination design

处理号 Treatment	二次通用旋转组合设计 Quadratic rotational combination design		
	X ₁ 水 Water	X ₂ 碳 Carbon	X ₃ 氮 Nitrogen
1	1	1	1
2	1	1	-1
3	1	-1	1
4	1	-1	-1
5	-1	1	1
6	-1	1	-1
7	-1	-1	1
8	-1	-1	-1
9	1.682	0	0
10	-1.682	0	0
11	0	1.682	0
12	0	-1.682	0
13	0	0	1.682
14	0	0	-1.682
15	0	0	0
16	0	0	0
17	0	0	0
18	0	0	0
19	0	0	0
20	0	0	0

气体测定:在每次取样前 24 h 关闭通气口,测样后保持通气状态。在培养的第 1、3、6、10、15、22、33、40、55、90 d 取样,每次取样用注射器(5 mL)从培养瓶中抽取 5 mL 气体,取完后立刻用橡胶塞堵住针头,每个瓶中抽取 3 个重复样品,然后用气相色谱仪(日立 663-30)测定 CO₂ 和 N₂O 浓度。测定时色谱柱温度 80 ℃,注射室温度 150 ℃,检测器温度 150 ℃。CO₂ 测定为热导检测器(TCD),色谱柱为 PQ(80~100 目),载气为高纯氮气,气体流速 35 mL·min⁻¹。N₂O 测定为电子捕获检验器(ECD),色谱柱为 PN(长度 2 m,内径 3

mm),载气为高纯氮气,气体流速 60 mL·min⁻¹。

1.4 数据分析与处理

CO₂ 和 N₂O 排放速率按照下列公式^[16]计算:

$$F=\rho \cdot \frac{dc}{dt} \cdot V \cdot \frac{273}{273+T} \cdot W^{-1}$$

式中: F 为 CO₂ 排放速率和 N₂O 排放速率,单位分别为 mg·kg⁻¹ 和 μg·kg⁻¹; ρ 为标准状态下 CO₂ 和 N₂O 气体密度,分别为 1.25、0.536 kg·m⁻³; dc/dt 为单位时间内培养瓶中气体浓度增加量,单位分别为 mg·kg⁻¹·d⁻¹ 和 μg·kg⁻¹·d⁻¹; V 是培养瓶中气体的有效空间体积,m³; W 为培养瓶中相当于烘干土的土壤重量,kg; T 为培养温度,28 ℃。

两次测定中间天数的 CO₂ 和 N₂O 排放量为两次浓度测定值的平均值乘以相隔天数得出,最后所有天数的排放量总和为 CO₂ 和 N₂O 累积排放量^[16]。

二次通用旋转组合设计回归分析用 SPSS 19.0 软件,绘图用 Matlab 7.0 和 Oringin 8.0。

2 结果与分析

2.1 不同碳源施加对土壤 CO₂ 和 N₂O 累积排放量的影响

秸秆和黑炭施加后土壤温室气体(CO₂ 和 N₂O)累积排放量的测定结果如图 1 所示。在相同的土壤水分条件和氮肥施用量下,施加秸秆后土壤 CO₂ 和 N₂O 累积排放量明显大于施加黑炭处理。土壤 N₂O 排放比 CO₂ 排放受土壤有机碳源类型的影响更大。与施加秸秆相比,在土壤中施加黑炭能有效减少温室气体的排放,减缓温室效应,但与对照相比,施加黑炭不一定能减少土壤 NO₂ 排放。

2.2 土壤 CO₂ 和 N₂O 累积排放量回归分析

为了进一步探讨试验因子对土壤 CO₂ 和 N₂O 累积排放量的影响,对所得试验结果进行回归分析,得出水碳氮耦合对 CO₂ 和 N₂O 累积排放量的回归方

程,如表 3 所示。

由表 3 可知:回归方程的回归系数均达到 0.7 以上,说明所建立的回归模型精度较高,可用于反映水碳氮耦合对温室气体排放的影响。在回归模拟计算过程中应用的是无量纲线性编码代换,所求得的偏回归系数已标准化,且一次项系数和交互项系数是独立的,故可以由一次项和交互项的系数绝对值大小直接反映各变量及其交互效应对因变量的影响程度。

2.2.1 水碳氮单因子对 CO₂ 和 N₂O 累积排放量的影响

2.2.1.1 对 CO₂ 累积排放量的影响

使回归方程 Y_1 和 Y_2 的其中一个因子不为零,其他两个因子为零,即可得到该因子对 CO₂ 累积排放量

的单因子效应方程(图 2)。

由回归方程 Y_1 和 Y_2 的一次项系数绝对值大小可得出:施加秸秆条件下水、碳、氮单因子对 CO₂ 累积排放量的影响表现为有机碳>水分>氮素,施加黑炭条件下水、碳、氮单因子对 CO₂ 累积排放量的影响表现为水分>有机碳>氮素。

由图 2 可知:在试验因子水平设置范围内,土壤 CO₂ 累积排放量随着秸秆加入量的增加先增加后减少,在秸秆施加量为 11.2 g·kg⁻¹ 时达到最大;随着黑炭施加量的增加而增大,在黑炭施加量为 12.0 g·kg⁻¹ 时达到最大。土壤 CO₂ 累积排放量在施加秸秆后随水分含量的增大而减小,而在施加黑炭后随着水分的增

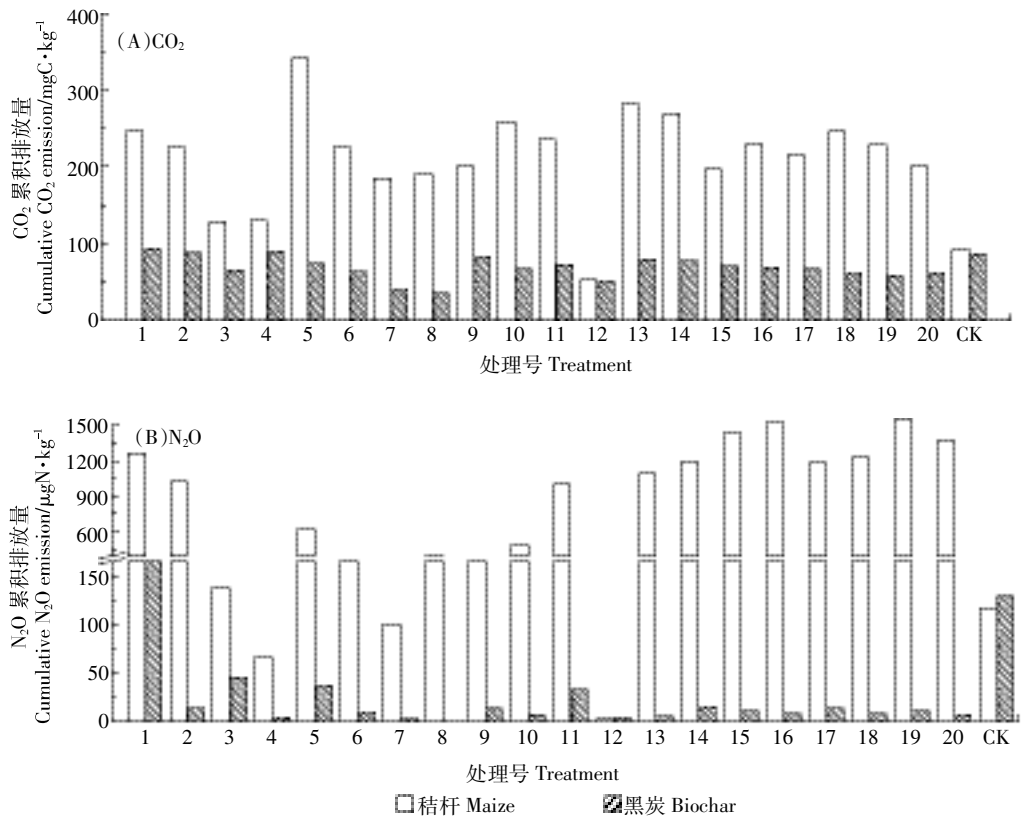


图 1 秸秆和黑炭施加对土壤温室气体(CO₂ 和 N₂O)累积排放量的影响

Figure 1 Cumulative emissions of greenhouse gases as affected by stalk and biochar applications

表 3 CO₂ 和 N₂O 累积排放量回归结果

Table 3 Quadratic regression results of cumulative CO₂ and N₂O emissions

Y	碳源 Carbon source	CO ₂ 和 N ₂ O 累积排放量回归方程 Regression equation of cumulative CO ₂ and N ₂ O emissions	R ²
CO ₂	秸秆 Stalk	$Y_1=-22.92X_1+52.32X_2+10.90X_3+2.62X_1X_2-11.41X_1X_3+17.93X_2X_3+1.58X_1^2-28.57X_2^2+18.11X_3^2+220.65$	0.94
	黑炭 Biochar	$Y_2=11.10X_1+8.97X_2-0.04X_3-4.68X_1X_2-4.68X_1X_3+4.39X_2X_3+2.87X_1^2-1.54X_2^2+4.07X_3^2+64.45$	0.84
N ₂ O	秸秆 Stalk	$Y_3=62.42X_1+302.13X_2+15.38X_3+215.45X_1X_2+27.50X_1X_3+105.58X_2X_3-382.43X_1^2-344.59X_2^2-118.24X_3^2+1389.09$	0.93
	黑炭 Biochar	$Y_4=13.73X_1+16.34X_2+15.05X_3+10.70X_1X_2+20.18X_1X_3+17.01X_2X_3+4.68X_1^2+7.77X_2^2+4.65X_3^2+8.80$	0.70

注: X_1 为水分, X_2 为有机碳, X_3 为氮素; 均为编码值。

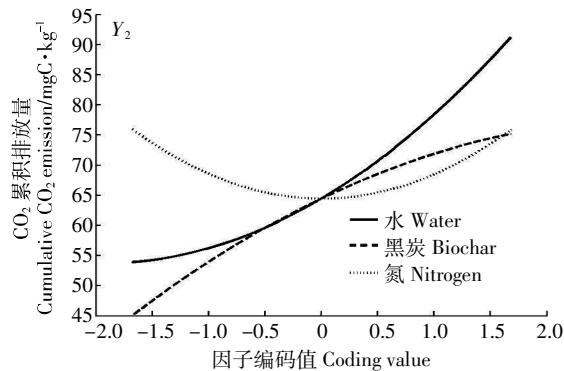
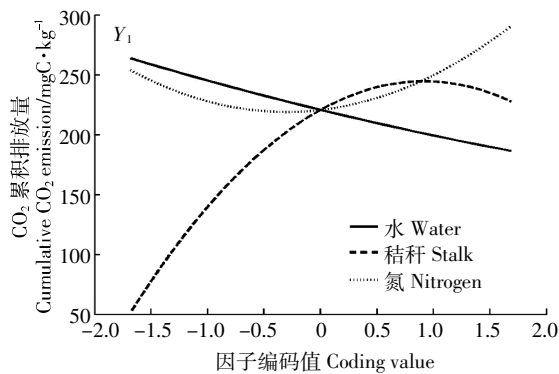
图 2 水碳氮单因子对土壤 CO₂ 累积排放量的影响

Figure 2 Effects of water, carbon and nitrogen alone on cumulative CO₂ emissions

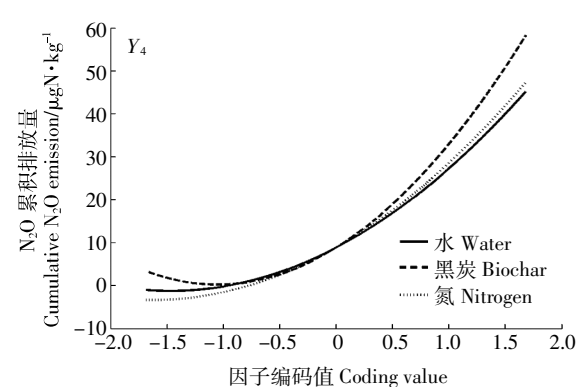
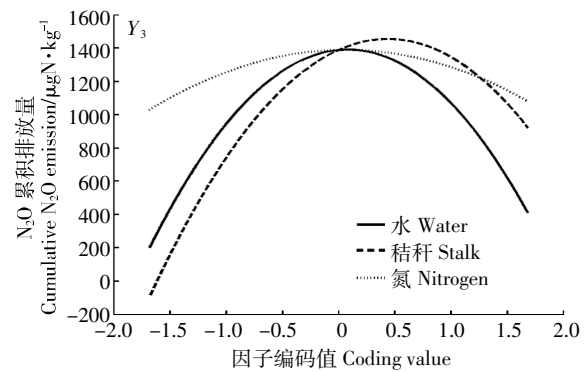
图 3 水碳氮单因子对土壤 N₂O 累积排放量的影响

Figure 3 Effects of water, carbon and nitrogen alone on cumulative N₂O emissions

大而增大。土壤 CO₂ 累积排放量随着氮素施加量的增加先减少后增加,施加秸秆和黑炭处理的氮素施加量分别在 41 mg·kg⁻¹ 和 51.5 mg·kg⁻¹ 时最小。

2.2.1.2 对 N₂O 累积排放量的影响

同样使回归方程 Y₃ 和 Y₄ 中的其中一个因子不为零,其他两个因子为零,即可得到该因子对 N₂O 累积排放量的单因子效应方程(图 3)。

由回归方程 Y₃ 和 Y₄ 的一次项系数绝对值大小得出:施加秸秆条件下,水、碳、氮单因子效应对 N₂O 累积排放量的影响表现为有机碳>水分>氮素,施加黑炭时为有机碳>氮素>水分。

由图 3 可以看出:在试验设计的水平范围内,施加秸秆条件下水、碳、氮单因子对土壤 N₂O 累积排放量的影响比施加黑炭明显,施加秸秆后 N₂O 累积排放量随着水分含量、有机碳的施加量、氮素施加量的增大而增大,分别在 20.48%、9.13 g·kg⁻¹、51.95 mg·kg⁻¹ 时最大,随后逐渐减小。施加黑炭后土壤 N₂O 累积排放量随着水分含量、黑炭施加量和氮素施加量的增加,均先减小后增大,分别在水分含量 11.24%、黑炭施加量 4.42 g·kg⁻¹、氮素施加量 2.14 mg·kg⁻¹ 时最小。

2.2.2 水碳氮交互效应对土壤 CO₂ 和 NO₂ 累积排放

量的影响

2.2.2.1 施加秸秆对土壤 CO₂ 累积排放量的影响

为了进一步探讨各个因素间的交互效应,对回归方程 Y₁ 进行降维处理,即将三因素中任意一个因素设为零,可求得其他两个因素对 CO₂ 累积排放量的影响(图 4)。

由回归方程 Y₁ 可知:在试验因子水平范围内,水、碳(秸秆)、氮三因子的交互作用对 CO₂ 累积排放量的影响表现为碳氮>水氮>水碳,且水碳和碳氮的交互效应为正效应,即两两相互促进,水氮交互效应为负效应,即相互抑制。由图 4 可以看出:在试验因子水平范围内,CO₂ 累积排放量在水碳相互作用时随着水分含量的增大而减小,随着秸秆施加量的增大而增大;在水氮相互作用时 CO₂ 累积排放量在低氮施加量时随着水分含量的增大而增大,但是在高氮施加量时反之,其随着氮素施加量的增大先减小后增大。CO₂ 累积排放量在碳氮相互作用时随着秸秆施加量的增大先增大后减小,但是随着氮素施加量的增大而先减小后增大。CO₂ 累积排放量在 X₁=1.682、X₂=-1.682、X₃=1.062(编码值)水平下取得最小值,即在实际土壤水分含量为 30%、不施加秸秆、尿素施加量为 81.9

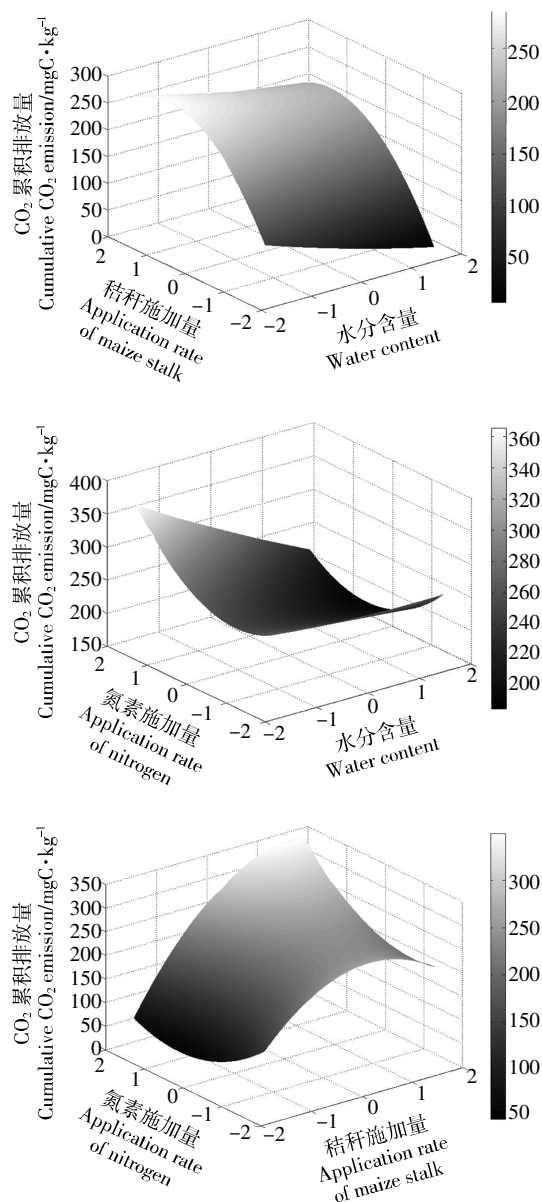


图4 水碳(秸秆)氮两两交互作用对CO₂累积排放量的影响

Figure 4 Pairwise interactions of water, carbon and nitrogen on cumulative CO₂ emissions in soil applied with maize stalk

mg·kg⁻¹时CO₂累积排放量最小。

2.2.2.2 施加黑炭对土壤CO₂累积排放量的影响

同样对回归方程Y₂进行降维处理,结果如图5所示。

由方程Y₂可得出:在试验因子水平范围内,水碳(黑炭)氮三因子的交互作用对CO₂累积排放量的影响表现为水碳=水碳>碳氮,且水碳和水氮的交互效应为负效应,即两两相互抑制,碳氮交互效应为正效应,即相互促进。由图5可看出:在试验因子水平范围内,CO₂累积排放量在水碳相互作用时随着水分含量

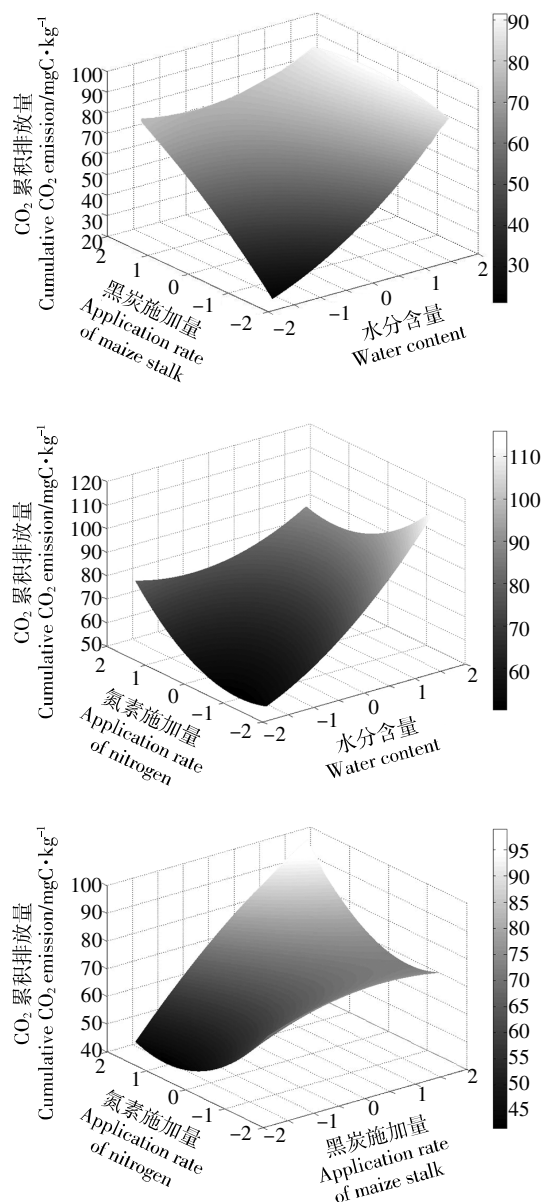


图5 水碳(黑炭)氮两两交互作用对CO₂累积排放量的影响

Figure 5 Pairwise interactions of water, carbon and nitrogen on cumulative CO₂ emissions in soil applied with biochar

和黑炭施加量的增大而增大。在水氮相互作用时CO₂累积排放量随着水分含量的增大而增大,且增加量在低氮量下大于高氮量;其在低水分含量条件下,随着氮素施加量的增大而增大,但在高水分含量条件下反之。CO₂累积排放量在碳氮相互作用时随着黑炭施加量的增大而增大,且增加量高氮量大于低氮量;其随着氮素施加量的增大而增大,在黑炭施加量较小时增加量不明显,但是在黑炭施加量增大时CO₂累积排放量的增加量逐渐增大。CO₂累积排放量在X₁=-1.682、X₂=-1.682、X₃=-0.055(编码值)水平下取得最小值,即

在实际土壤水分含量为 10%、不施加黑炭、尿素施加量为 $48.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时 CO₂ 累积排放量最小。

2.2.2.3 施加秸秆对 N₂O 累积排放量的影响

对回归方程 Y_3 降维处理,绘图如图 6 所示。

由 Y_3 和图 6 可知:在试验设计的水平范围内,水碳(秸秆)氮三因子的交互作用对 N₂O 累积排放量的影响表现为水碳>碳氮>水氮,水碳、水氮和碳氮的交互效应均为正效应,两两相互促进。在试验因子水平范围内,水碳、水氮、碳氮耦合对 N₂O 累积排放量的影响趋势均一致,都是随着水分、氮素、秸秆施加量的增大而先增大后减小。在试验因子水平范围内,施加秸

秆时 N₂O 累积排放量 $X_1=1.682$ 、 $X_2=-1.682$ 、 $X_3=1.682$ (编码值) 水平下取得最小值,即在实际水分含量为 30%、不施加秸秆、氮素 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时最小。

2.2.2.4 施加黑炭对 N₂O 累积排放量的影响

对回归方程 Y_4 进行降维处理,绘图如图 7 所示。

由 Y_4 和图 7 可得出:在试验因子水平范围内,水碳(黑炭)氮三因子的交互作用对 N₂O 累积排放量的影响表现为水氮>碳氮>水碳,且水碳、水氮和碳氮的交互效应均为正效应。在试验因子水平范围内,水碳氮对 N₂O 累积排放量的影响在水碳相互作用、水氮相互作用和碳氮相互作用时均相互促进。在试验因子水平范围

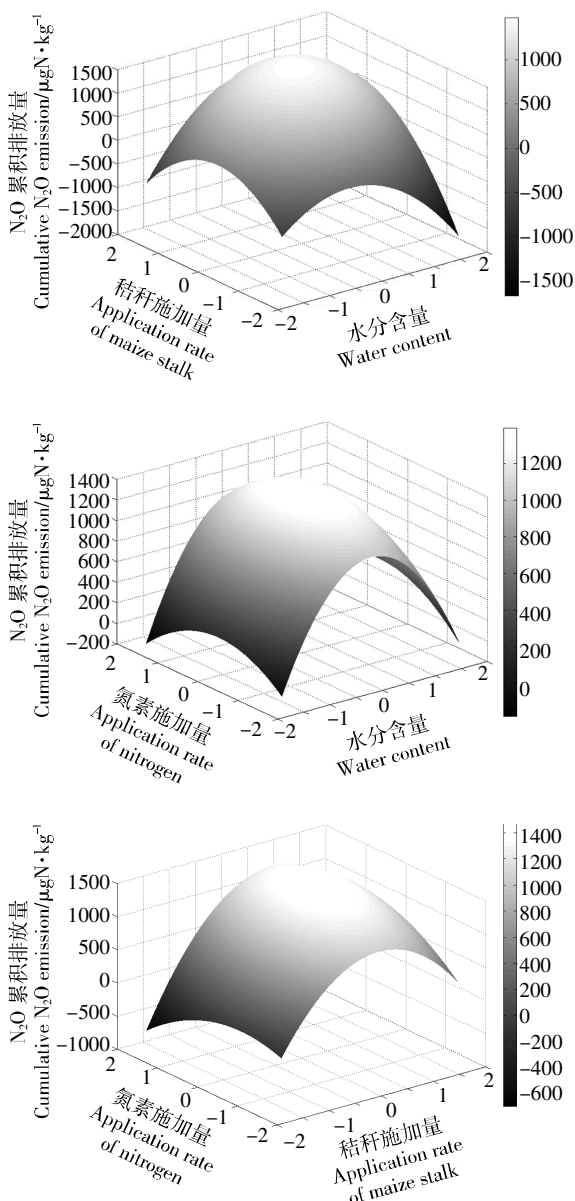


图 6 水碳(秸秆)氮两两交互作用对 N₂O 累积排放量的影响

Figure 6 Pairwise interactions of water, carbon and nitrogen on cumulative N₂O emissions in soil applied with maize stalk

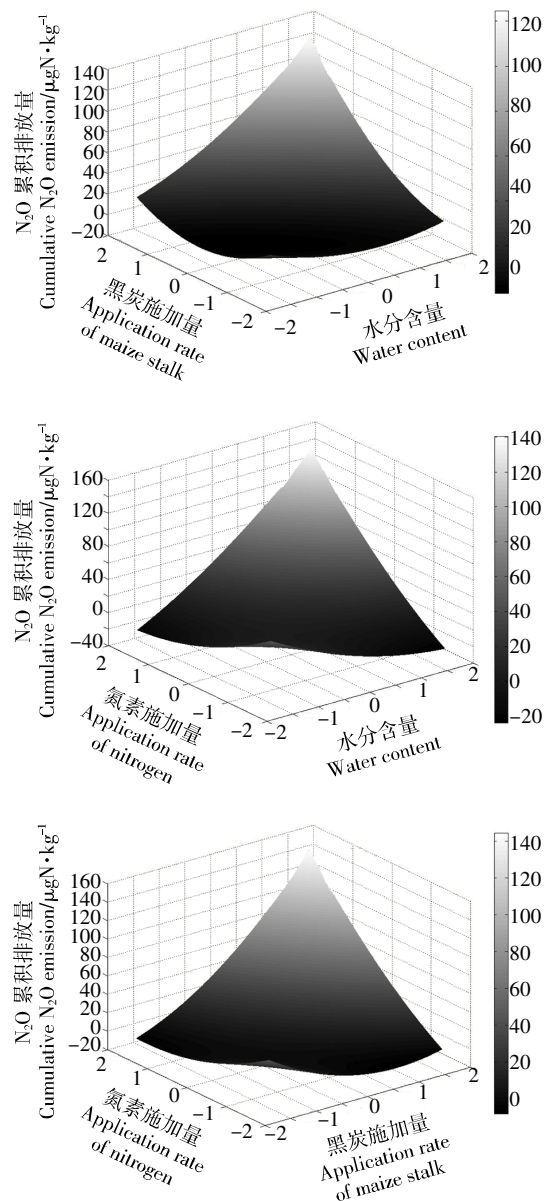


图 7 水碳(黑炭)氮两两交互作用对 N₂O 累积排放量的影响

Figure 7 Pairwise interactions of water, carbon and nitrogen on cumulative N₂O emissions in soil applied with biochar

内, N_2O 累积排放量在 $X_1=-1.682$ 、 $X_2=-1.682$ 、 $X_3=1.682$ (编码值) 时取得最小值, 即在水分含量为 10%、不施加黑炭、氮素施加量 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时 N_2O 累积排放量最小。

3 讨论

3.1 黑炭施加对土壤 CO_2 和 N_2O 排放的影响剖析

由两组试验结果对比可知, 相对于施用秸秆, 土壤中施用黑炭可明显减少温室气体排放(图 1)。本试验充分证明, 在相同的土壤水分和施氮量条件下, 施加相同有机碳含量的玉米秸秆和黑炭, 土壤中 CO_2 累积排放量至少相差 3 倍, 土壤 N_2O 累积排放量相差 10 倍左右, 主要是由于黑炭的特殊结构和性质造成的。黑炭是一种多孔结构物质, 施入土壤后可使土壤孔隙度增加, 容重减小, 改善土壤通气状况, 同时黑炭对 NH_3 和 NO_3^- 具有相当强的吸附特性^[17-18], 影响土壤硝化和反硝化过程, 从而减少 N_2O 排放。黑炭具有超强的生物稳定性, 难以被微生物所降解^[9], 因此可减少 CO_2 排放。

3.2 水碳氮单因子对土壤 CO_2 和 N_2O 累积排放量的影响

土壤 CO_2 累积排放量在施加秸秆后主要受有机碳施加量的影响, 而在施加黑炭后主要受土壤水分含量的影响, 其受氮素施加量的影响均最小。这可能是因为玉米秸秆的施加为土壤微生物提供了大量可分解利用的有机碳, 而黑炭所含有机碳较稳定, 可供微生物矿化分解的较少, 因此施加黑炭后有机碳施加量对土壤 CO_2 累积排放量主要受水分含量的影响。土壤 N_2O 累积排放量无论是施加秸秆还是黑炭, 都主要受有机碳的影响, 在施加秸秆后受氮素的影响最小, 而在施加黑炭后受水分的影响最小。研究表明, 土壤反硝化作用与土壤有效碳含量密切相关^[19]。秸秆和黑炭施入后, 可溶性有机碳的增加为微生物提供了能源和碳源, 同时土壤中高含量的易分解有机物质激活了土壤微生物的呼吸作用, 加快土壤氧消耗和厌氧环境的形成, 间接增强了土壤生物反硝化作用, 结果导致 N_2O 排放增加^[5]。这与邹国元等^[20]、潘志勇等^[21]研究结果一致。

土壤 CO_2 累积排放量在施加秸秆后随着水分含量的增加而减少, 在施加黑炭后随着水分含量的增加而增加。土壤 N_2O 累积排放量在施加秸秆后随着水分含量的增加先增大后减小, 而在施加黑炭后随着水分含量的增加而增加。这可能是由于秸秆和黑炭本身的结构差异造成的, 黑炭是一种多孔性物质, 而秸秆不具有这种特性, 因此秸秆和黑炭施加对 CO_2 和 N_2O

累积排放量的影响会产生差异。土壤水分通过改变土壤透气性、微生物活性以及土壤中温室气体向大气扩散速率等来影响温室气体的产生与排放^[16]。土壤水分的增加阻碍土壤气体通道, 改变土壤透气性, 一方面影响土壤中温室气体向大气扩散速率, 另一方面影响土壤中微生物的活性, 有机质矿化分解变慢, 最终导致 CO_2 累积排放量减少。水分可以通过控制土壤中氧气的扩散来间接影响氮矿化和好氧微生物的活性^[22]。一般而言, 水分含量较小时, 可促进硝化过程进行; 然而, 当水分进一步增加时, 会导致通气性变差, 促进反硝化过程而减弱硝化过程。故当土壤水分含量既能促进硝化也能促进反硝化作用时, 会导致大量的 N_2O 生成与排放^[23]。

土壤 CO_2 累积排放量在施加秸秆和黑炭后随着有机碳和氮素施加量的变化趋势一致, 均随着秸秆和黑炭加入量的增加先增加后减少, 随着氮素施加量的增加先减少后增加; 土壤 N_2O 累积排放量在施加黑炭和秸秆后随着有机碳和氮素施加量的增加变化趋势不一致。这可能是由于秸秆在土壤中易分解, 可供土壤微生物利用的有机碳多, 而黑炭在土壤中较难分解。可利用性碳、氮基质数量的增加, 激发了土壤微生物活性, 导致 CO_2 排放增加; 秸秆和黑炭本身 C/N 较大, 由于一般土壤微生物适宜的有机质为 (25~30)/1, 若 C/N 大于 25/1, 则有机质分解慢, 微生物活性变弱^[5]。因此, 当施加过多的秸秆和黑炭后, 会导致土壤 CO_2 排放量减少。少量氮素的施入降低了 C/N 值, 促进了土壤微生物繁殖和呼吸, 加快了土壤中氧气消耗, 因此一定程度上减弱了有机碳的矿化; 当氮素施加量增大到一定程度后, 微生物活性增强, 有机质分解加速, 因此土壤 CO_2 排放量增大。这与潘志勇等研究结果一致^[24]。土壤 N_2O 气体的排放与土壤氮肥的增施量呈明显的线性关系^[25], 氮肥的施用对农田土壤 N_2O 的排放有明显的促进作用^[26], 这可能是由于施加氮肥使土壤中微生物可利用的氮源增加而导致 N_2O 排放量增大。

3.3 水碳氮耦合对土壤 CO_2 和 N_2O 排放的影响

无论是以秸秆还是黑炭作为碳源, 水氮耦合对土壤 CO_2 累积排放量均为负效应, 碳氮耦合则为正效应。施加秸秆时土壤水碳耦合对土壤 CO_2 累积排放量为正效应, 但是施加黑炭时表现为负效应, 估计是由于黑炭性质较为稳定, 可供微生物分解利用的较少, 水分含量的增加又降低了土壤通气性, 导致微生物对土壤有机质的矿化作用减弱; 另外水分增加影响土壤

中 O₂ 和 CO₂ 的迁移,最终导致水碳耦合对 CO₂ 累积排放量表现为负效应。无论是以秸秆还是黑炭作为碳源,水碳、水氮、碳氮交互作用对土壤 N₂O 累积排放量都具有明显的正效应。

当水分含量较低时,增加水分可激活土壤微生物,增加土壤中有机质和氮的矿化速率,水分还影响土壤中碳、氮和气体的扩散。秸秆和黑炭施入后作为碳源提供了微生物矿化分解的底物,少量氮肥投入则会引起土壤有机质矿化的激发效应,促进有机碳降解释放出较多的 CO₂,以及可供作物吸收利用的矿质态氮^[27]。因此,氮素施入后使原本受到氮素营养限制的土壤微生物活性增强,土壤有机碳的矿化速率加快。

4 结论

在试验因子水平范围内,在黄绵土中施加黑炭比施加秸秆能更为显著地减少 CO₂ 和 N₂O 的排放。秸秆和黑炭施加对黄绵土温室气体排放的影响与土壤水分含量和氮素含量有密切关系。

由于土壤温室气体的排放与土壤环境、作物生长等有很大的关系,本试验控制温度为 28℃,且土壤中无作物生长,而长武小麦生长期土壤温度大部分时间低于 28℃。因此本试验结果与田间实际情况有一定的差异,需进行进一步的田间试验验证。

参考文献:

- [1] Forster P, Ramaswamy V, Artaxo P, et al. Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing[M] // Solomon S, Qin D, Manning M, et al. 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, 2007: 129–234.
- [2] Rodhe H. A comparison of the contribution of various gases to the greenhouse gases[J]. *Science*, 1990, 248(6): 1217–1219.
- [3] 张 强, 巨晓棠, 张福锁. 应用修正的 IPCC 2006 方法对中国农田 N₂O 排放量重新估算[J]. *中国生态农业学报*, 2010, 18(1): 7–13.
ZHANG Qiang, JU Xiao-tang, ZHANG Fu-suo. Re-estimation of direct nitrous oxide emission from agricultural soils of China via revised IPCC 2006 guideline method[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(1): 7–13.
- [4] 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-feng, PAN Gen-xing, LI Lian-qing. 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.
- [5] 韩鲁佳, 闫巧娟, 刘向阳, 等. 中国农作物秸秆资源及其利用现状[J]. *农业工程学报*, 2002, 18(3): 87–91.
HAN Lu-jia, YAN Qiao-juan, LIU Xiang-yang, et al. Stalk resources and their utilization in China[J]. *Transactions of the CSAE*, 2002, 18(3): 87–91.
- [6] Huang Y, Zou J W, Zheng X H, et al. Nitrous oxide emissions as influenced by amendment of plant residues with different C:N ratios[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36(6): 973–981.
- [7] 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.
- [8] Tenenbaum D J. Carbon mitigation from the ground up[J]. *Environmental Health Perspectives*, 2009, 117(2): A70–A73.
- [9] Lehmann J, da Silva J P, Steiner C, et al. Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: Fertilizer, manure and charcoal amendments[J]. *Plant and Soil*, 2003, 249(2): 343–357.
- [10] Yanai Y, Toyota K, Okazaki M. Effects of charcoal addition on N₂O emissions from soil resulting from rewetting air-dried soil in short-term laboratory experiment[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2007, 53(2): 181–188.
- [11] Clough T J, Bertram J E, Ray J L, et al. Unweathered wood biochar impact on nitrous oxide emissions from a bovine-urine-amended pasture soil[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2010, 74(3): 852–860.
- [12] Singh B P, Hatton B J, Singh B, et al. A Influence of biochar on nitrous oxide emission and nitrogen leaching from two contrasting soils[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2010, 39(4): 1224–1235.
- [13] Castaldi S, Riondino 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.
- [14] Wang J Y, Zhang M, Xiong Z Q, et al. Effects of biochar addition on N₂O and CO₂ emissions from two paddy soils[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2011, 47(8): 887–896.
- [15] 刘作新, 郑昭佩, 王 建. 辽西半干旱区小麦、玉米水肥耦合效应研究[J]. *应用生态学报*, 2000, 11(4): 540–544.
LIU Zuo-xin, ZHENG Zhao-pei, WANG Jian. Effect of interaction between water and fertilizer on wheat and maize semiarid region of Western Liaoning[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(4): 540–544.
- [16] 郎 漫, 李 平, 张小川. 土地利用方式和培养温度对土壤氮转化及温室气体排放的影响[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(10): 2670–2676.
LANG Man, LI Ping, ZHANG Xiao-chuan. Effects of land use type and incubation temperature on soil nitrogen transformation and greenhouse gas emission[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(10): 2670–2676.
- [17] Kei M, Toshitatsu M, Yasuo H, et al. Removal of nitrate nitrogen from drinking water using bamboo powder charcoal[J]. *Bio Resource Technology*, 2004, 95(14): 255–257.
- [18] Iyobe T, Asada T, Kawat K, et al. Comparison of removal efficiencies for ammonia and amine gases between woody charcoal and activated carbon[J]. *Journal of Health Science*, 2004, 50(2): 148–153.

- [19] 封克, 殷士学. 影响氧化亚氮形成与排放的土壤因素[J]. 土壤学进展, 1995, 23(6): 35-40.
FENG Ke, YIN Shi-xue. Soil factors that affect the formation of nitrous oxide emissions[J]. *Progress in Soil Science*, 1995, 23(6): 35-40.
- [20] 邹国元, 张福锁, 陈新平, 等. 秸秆还田对旱地土壤反硝化的影响[J]. 中国农业科技导报, 2001, 3(6): 47-50.
ZOU Guo-yuan, ZHANG Fu-suo, CHEN Xin-ping, et al. Effect of stalk addition on denitrification in upland soil[J]. *Review of China Agricultural Science and Technology*, 2001, 3(6): 47-50.
- [21] 潘志勇, 吴文良, 刘光栋, 等. 不同秸秆还田模式与氮肥施用量对土壤 N_2O 排放的影响[J]. 土壤肥料, 2004(5): 6-8.
PAN Zhi-yong, WU Wen-liang, LIU Guang-dong, et al. Effect of stalk return and nitrogen fertilizer application on the N_2O emission of soil[J]. *Soil Fertilizer*, 2004(5): 6-8.
- [22] 张金波, 宋长春. 土壤氮素转化研究进展[J]. 吉林农业科学, 2004, 29(1): 38-43, 46.
ZHANG Jin-bo, SONG Chang-chun. Research progress of soil nitrogen[J]. *Journal of Jilin Agricultural Sciences*, 2004, 29(1): 38-43, 46.
- [23] 焦燕, 黄耀. 影响农田氧化亚氮排放过程的土壤因素[J]. 气候与环境研究, 2003, 8(4): 457-466.
JIAO Yan, HUANG Yao. Influence of soil properties on N_2O emissions from farmland[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2003, 8(4): 457-466.
- [24] 潘志勇, 吴文良, 牟子平, 等. 不同秸秆还田模式和施氮量对农田 CO_2 排放的影响[J]. 土壤肥料, 2006(1): 14-16, 65.
PAN Zhi-yong, WU Wen-Liang, MOU Zi-ping, et al. Effect of stalk-return and nitrogen fertilizer application on the CO_2 emission in farmland[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2006(1): 14-16, 65.
- [25] Gregoriche G, Rochette P, Vandenbygart A J, et al. Greenhouse gas contributions of agricultural soils and potential mitigation practices in Eastern Canada[J]. *Soil and Tillage Research*, 2005, 83(1): 53-72.
- [26] Dobbie K E, Mc Taggart I P, Smith K A. Nitrous oxide emissions from intensive agricultural systems: Variations between crops and seasons, key driving variables and mean emission factors[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104(D21): 26891-26899.
- [27] 巴奇, 李科, 姬洪刚, 等. 土壤中有机碳和氮素的变化过程研究概况[J]. 环境保护与循环经济, 2008(11): 77-84.
BA Qi, LI Ke, JI Hong-gang, et al. Changes in soil organic carbon and nitrogen profile[J]. *Environmental Protection and Circular Economy*, 2008(11): 77-84.