中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture
中文核心期刊
中国科技核心期刊
中国精品科技期刊
百种中国杰出学术期刊
中国科学引文数据库源刊

生物炭和秸秆还田对干旱区玉米农田土壤温室气体通量的影响

程功， 刘廷玺， 李东方， 段利民， 王冠丽

引用本文:
程功, 刘廷玺, 李东方, 等. 生物炭和秸秆还田对干旱区玉米农田土壤温室气体通量的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(7): 1004−1014.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190008

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

有机物料还田对冬小麦农田土壤温室 气体排放影响的研究

Effects of organic waste application on soil greenhouse gas emissions of a winter wheat field

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(6): 815−824 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.180913

不同耕作措施下小麦−玉米轮作农田温室气体交换及其综合增温潜势

Greenhouse gas exchange and comprehensive global warming potential under different wheat−maize rotation patterns

中国生态农业学报. 2016, 24(6): 704−715 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.160261

秸秆还田与施氮对黑土区春玉米田产量、温室气体排放及土壤酶活性的影响

Effects of soil straw return and nitrogen on spring maize yield, greenhouse gas emission and soil enzyme activity in black soils

中国生态农业学报. 2016, 24(11): 1456−1463 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.160405

冬季施用鸡粪和生物炭对南方稻田土壤CO2与CH4排放的影响

Effect of chicken manure and biochar on CO2and CH4 emission in paddy fields in South China

中国生态农业学报. 2017, 25(12): 1742−1751 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.170493

不同生物质炭输入水平下旱作农田温室气体排放研究

Effect of different biochar application levels on greenhouse gas emissions in the Loess Plateau semi−arid environment in China

中国生态农业学报. 2016, 24(9): 1185−1195 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.151380

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.190008

程功, 刘廷玺, 李东方, 段利民, 王冠丽. 生物炭和秸秆还田对干旱区玉米农田土壤温室气体通量的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(7): 1004−1014
CHENG G, LIU T X, LI D F, DUAN L M, WANG G L. Effects of biochar and straw on greenhouse gas fluxes of corn fields in arid regions[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(7): 1004−1014

生物炭和秸秆还田对干旱区玉米农田土壤温室气体通量的影响*

程 功[1,3], 刘廷玺[1,2**], 李东方[1,2], 段利民[1,2], 王冠丽[1,2]

(1. 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院 呼和浩特 010018; 2. 内蒙古自治区水资源保护与利用重点实验室 呼和浩特 010018; 3. 南京市水利规划设计院股份有限公司 南京 210000)

摘 要: 为了研究生物炭及秸秆还田对干旱区玉米农田温室气体通量的影响, 以内蒙古科尔沁地区玉米农田为试验对象, 采用静态箱-气相色谱法对分别施入生物炭 0 t·hm^{-2}(CK)、15 t·hm^{-2}(C15)、30 t·hm^{-2}(C30)、45 t·hm^{-2}(C45)及秸秆还田(SNPK)的土壤进行温室气体(CO_2、CH_4和N_2O)通量的原位观测, 并估算生长季 CH_4和N_2O 的综合增温潜势(GWP)与排放强度(GHGI)。结果表明: 添加生物炭能够显著减少土壤 CO_2和N_2O 的排放量, 并促进土壤对 CH_4 的吸收作用。其中处理 C15 对 CO_2 的减排效果最好, 与对照相比 CO_2 排放量降低 21.16%。随着施入生物炭量的增加, 生物炭对 N_2O 排放的抑制作用不断增强, 处理 C45 对减排效果最好, 与对照相比 N_2O 排放量降低 86.25%。处理 C15 对土壤吸收 CH_4的促进效果最好, CH_4吸收量增加 56.62%; 处理 C45 对 CH_4的排放有促进作用, 使生长季土壤吸收 CH_4减少 81.36%。SNPK 对温室气体的减排作用接近处理 C15。添加生物炭和秸秆还田对提高玉米产量和降低农田 GWP 与 GHGI 均有显著效果, 施用生物炭及秸秆还田均有效提高了科尔沁地区的玉米产量, 且玉米产量随着施入生物炭含量的增大而提升。从 GWP 上来看, 施用 15 t·hm^{-2} 生物炭对温室气体减排的整体效果最好。从 GHGI 上来看, 施用生物炭及秸秆还田均具有一定的经济效益和减排意义, 其中施用 15 t·hm^{-2} 生物炭的综合效益最高。因此综合经济效益与环境因素, 建议科尔沁地区农田在种植玉米时添加 15 t·hm^{-2} 生物炭, 如不具备购买生物炭条件, 可以考虑秸秆还田来实现玉米增产与温室气体减排。

关键词: 生物炭; 玉米; 农田; 温室气体; 秸秆还田; 干旱区

中图分类号: S154.1

文章编号: 2096-6237(2019)07-1004-11 **开放科学码(资源服务)标识码(OSID):**

Effects of biochar and straw on greenhouse gas fluxes of corn fields in arid regions*

CHENG Gong[1,3], LIU Tingxi[1,2**], LI Dongfang[1,2], DUAN Limin[1,2], WANG Guanli[1,2]

(1. Water Conservancy and Civil Engineering College, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China; 2. Key

* 国家自然科学基金项目(51620105003, 51139002, 51769020)、内蒙古自然科学基金重点项目(2018ZD05)、教育部科技创新团队滚动发展计划(IRT_17R60)、科技部重点领域创新团队(2015RA4013)、内蒙古自治区草原英才创业创新人才团队、内蒙古农业大学寒旱区水资源利用创新团队(NDTD2010-6)和内蒙古自治区高等学校"青年科技英才支持计划"项目(NJYT-18-B11)资助

** 通信作者: 刘廷玺, 主要研究方向为生态水文。E-mail: txliu1966@163.com
程功, 研究方向为温室气体通量。E-mail: 18645979803@163.com

收稿日期: 2019-01-03 接受日期: 2019-03-14

* The study was supported by the National Natural Science Foundation of China (51620105003, 51139002 and 51769020), the Natural Science Foundation of Inner Mongolia (2018ZD05), the Innovative Research Team of Ministry of Education of China (IRT_17R60), the Innovative Research Team in Priority Areas of Ministry of Science and Technology of China (2015RA4013), the Innovative Research Team of Inner Mongolia Agricultural University (NDTD2010-6) and the Program for Young Talents of Science and Technology in Universities of Inner Mongolia Autonomous Region (NJYT-18-B11).

** Corresponding author, E-mail: txliu1966@163.com

Received Jan. 3, 2019; accepted Mar. 14, 2019

Laboratory of Water Resource Protection and Utilization of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010018, China; 3. Nanjing Water Conservancy Planning Design Institute Corp. Ltd, Nanjing 210000, China)

Abstract: Biochar refers to a kind of stable and carbon-rich solid matter, generally composed of biomass and fertilizers, such as litter and crop straw, which have been pyrolyzed and carbonized under high temperatures in either a completely anaerobic or partially anoxic state. To explore the effects of biochar and straw returning on the greenhouse gas fluxes of corn fields in arid areas, an experiment was conducted on a corn field in the Horqin District, Inner Mongolia. A static chamber-gas chromatography (GC) technique was used to conduct in situ observations on greenhouse gas (CO_2, CH_4, and N_2O) fluxes under different experimental treatments. These treatments included different application rates of biochar: 0 (CK), 15 (C15), 30 (C30), and 45 $t·hm^{-2}$ (C45); and straw returning (SNPK). For the experiments, the global warming potential (GWP) and greenhouse gas intensity (GHGI) during the growing season were estimated. The results showed that the addition of biochar could significantly reduce the soil CO_2 and N_2O emissions. During the growing season, the CO_2 fluxes in the C15, C30, C45, and SNPK treatments decreased by 21.16%, 14.34%, 17.02%, and 19.93%, respectively. Among these treatments, C15 exhibited the best emission reduction effect. Compared with CK, the N_2O fluxes of C15, C30, C45, and SNPK reduced by 24.42%, 56.83%, 86.25%, and 28.28%, respectively. With the increase in biochar rates, the inhibition effect on N_2O emissions increased. Among the treatments, C45 provided the greatest reduction in emissions. Appropriate addition of biochar could promote the soil to absorb CH_4. Compared with CK, the soil CH_4 absorption of C15, C30, and SNPK increased by 56.62%, 32.05%, and 40.35%, respectively. The CH_4 absorption of C45 decreased by 81.36% compared with CK. Excessive biochar could cause less CH_4 absorption in the soil. There was a positive correlation between soil CO_2 flux, temperature, and moisture during the growing season. The CH_4 and N_2O fluxes of CK, C15, and SNPK were significantly correlated with the soil temperature and moisture during the growing season. However, the CH_4 and N_2O fluxes of C30 and C45 did not exhibit a significant correlation with the soil temperature or moisture during the growing season. The addition of biochar and straw returning to the field had a significant effect on increasing the corn yield and reducing the GWP and GHGI in the farmlands. Biochar and straw returning both effectively increased the corn yield in the Horqin District. The corn yield increased as the amount of biochar increased. From the perspective of the GWP, a biochar rate of 15 $t·hm^{-2}$ had the best overall effect on reducing greenhouse gas emissions, similar to the SNPK treatment. From the perspective of the GHGI, biochar and straw returning had certain economic benefits and significant reducing-effects of greenhouse gas emissions. Among the different treatments investigated, 15 $t·hm^{-2}$ of biochar had the highest comprehensive benefits, and the C45 and SNPK treatments were slightly inferior to C15, but higher than C30. Therefore, from the perspectives of comprehensive economic benefits and environmental factors, it was suggested that 15 $t·hm^{-2}$ of biochar should be added to the farmlands in Horqin when growing corn. If biochar was not available, straw returning can also be considered to achieve an increase in corn yields and decrease in greenhouse gas emissions.

Keywords: Biochar; Corn; Farmland; Greenhouse gas; Straw returning; Arid region

近年来, 全球温室气体浓度剧增引起海平面上升、全球温度升高等问题已经严重影响到地球生态环境, 并对人类的生存和发展造成威胁[1]。农业活动是温室气体排放的重要来源, 全球农业排放温室气体中, 有 15%左右的 CO_2、47%的 CH_4 和 84%的 N_2O 来源于土壤[2]。农业活动中施用化肥会对土壤温室气体的排放产生重要影响[3], 因此在农田的种植与施肥中寻求降低温室气体排放的途径是目前亟待解决的重要问题。

生物炭(biochar)是指枯枝落叶、作物秸秆等农林废弃物和动植物残体等生物质在完全无氧或部分缺氧的状态下经过高温热解碳化而产生的稳定且富含碳的固态物[4-5]。在土壤中添加生物炭, 可以有效增加土壤肥力并改变土壤理化性质, 如增加土壤 pH[6]、提升土壤保水持水能力[7]以及影响土壤中 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 的含量[8-9]等。有研究表明, 在施用氮肥的条件下同时施用生物炭, 可以有效抑制土壤 CO_2 和 N_2O 的排放[10-11], 促进土壤 CH_4 吸收[12], 有效减少农田温室气体排放。秸秆还田也是利用农林废弃物的一种重要方式[13], 有研究表明秸秆还田能够抑制土壤 CO_2 和 N_2O 的排放并促进土壤 CH_4 吸收[14-15], 也有研究表明添加生物炭和秸秆还田会促进农田土壤排放温室气体[16-17]。生物炭因其来源、热解温度以及试验区的土壤质地、施用量和作物的不同而对土壤温室气体通量有着不同的影响[18-21], 因此目前对施用生物炭和秸秆还田对土壤温室气体排放的影响尚未得出统一定论, 有待于进一步验证。

玉米(*Zea mays*)是内蒙古科尔沁地区农田的主要作物之一, 该地区土地干旱, 玉米产量较低, 秋收后玉米秸秆一部分打碎留待过冬喂养牛羊, 一部

分焚烧，对环境造成严重破坏。如果能在施用生物炭和秸秆还田增加产量的同时，对农田温室气体进行减排，不仅能够解决当地每年遗留玉米秸秆的焚烧问题，也能够为资源的可持续利用做出贡献。本文以玉米秸秆生物炭和秸秆还田对当地农田进行改造试验，探究生物炭和秸秆还田对干旱区雨养农田土壤温室气体(CO_2、CH_4、N_2O)排放通量的影响，估算温室气体在玉米生长季的累计排放量并计算温室气体的综合增温潜势及其排放强度，对科尔沁地区进行农业活动做出科学指导，并为农田温室气体减排研究提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验区概况

试验在位于内蒙古自治区通辽市科尔沁左翼后旗阿古拉镇的科尔沁沙地阿古拉生态水文实验站(122°39′18″E，39°18′01″N)开展，地处科尔沁沙地东南边缘，海拔 184~190 m。该区多年平均降水量 387 mm，主要集中在 6—9 月；多年平均水面蒸发量(Φ20 cm 蒸发皿)1 408 mm，主要集中在 4—9 月；多年平均相对湿度 55.7%；多年平均气温 6.9 ℃，年极端最低气温−33.9 ℃，年极端最高气温 36.2 ℃，昼夜温差大；年平均风速 3~4 m·s^{-1}。农田为草甸湿地开垦多年而成，主要作物为玉米，整个生长季无人为浇灌，玉米生长水分全部依赖于天然降水和地下水。研究区地理位置见图 1。

1.2 土壤及生物炭理化性质

采用玉米秸秆在 360 ℃下不完全燃烧 24 h 制成的生物炭，购于辽宁金和福农业开发有限公司。供试土壤及生物炭基础理化性质如表 1 所示。

1.3 研究方法

1.3.1 试验设计

试验设置如图 1(右上)所示，在农田中选取 20 m×20 m 的区域，并将样地分成 9 块 6 m×6 m(面积为 36 m^2)的试验田，每块试验田间设置 1 m 隔离带。种植玉米品种为‘先玉 1411’，行距 0.6 m，株距 0.4 m，种植密度为 65 000 株·hm^{-2}。为研究施用不同含量生物炭和秸秆还田对玉米农田温室气体通量的影响，共设置 5 个处理，每个处理均设置 3 个重复，分别为：施用 0 t·hm^{-2}(CK)、15 t·hm^{-2}(C15)、30 t·hm^{-2}(C30)、45 t·hm^{-2}(C45)生物炭，和秸秆还田(SNPK)处理。SNPK 处理为将玉米秸秆全部粉碎后与土壤混合。基肥采用尿素、磷酸二铵和硫酸钾，按照 N 200 kg·hm^{-2}、P_2O_5 52.5 kg·hm^{-2} 和 K_2O 37.5 kg·hm^{-2} 在播种同时施用。玉米于 2018 年 5 月 12—15 日播种，播种前使用旋耕机将生物炭与土壤均匀混合，混合深度为 30 cm。生育期内依照年当地田间种植管理，无灌溉，9 月下旬收割，称量并计算单位面积上的玉米产量。

1.3.2 样品采集和测定

使用静态箱-气相色谱法，于 2018 年 5—10 月内每 7 d 左右选取晴好天气的 9:00—11:00 时段，在所设立的取样点同时进行温室气体通量(CO_2、CH_4、

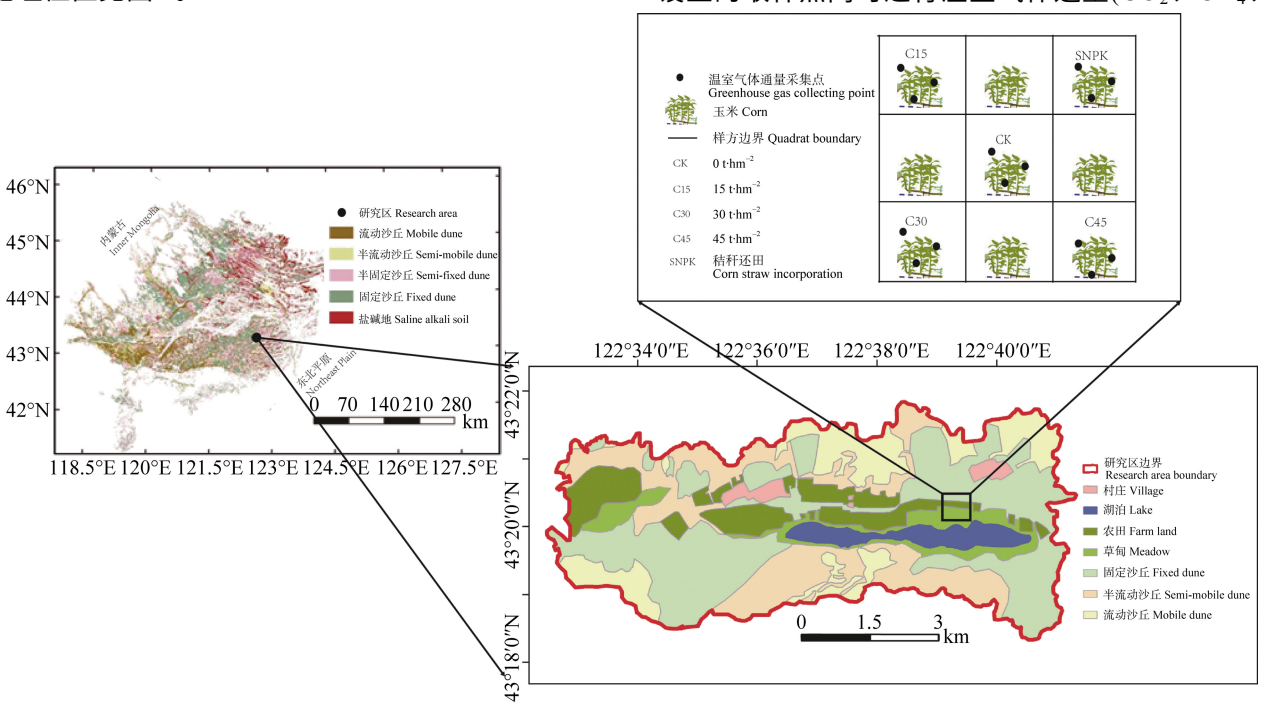

图 1 研究区地理位置与试验点布设示意图

Fig. 1 Geographic position and distribution sketch map of soil-respiration sampling sites in the research area

表 1　供试土壤及生物炭基础性质

Table 1　Chemical properties of the soil and biochar used in the experiments

参数 Parameter	土壤 Soil	生物炭 Biochar
pH	8.2	8.7
电导率 Conductivity ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	304.1	
有机质质量比 Mass ratio of organic matter ($g \cdot kg^{-1}$)	9.824	917.83
碱解氮质量比 Mass ratio of alkali-hydrolyzed nitrogen ($m \cdot kg^{-1}$)	58.47	161.27
速效磷质量比 Mass ratio of available phosphorus ($g \cdot kg^{-1}$)	4.9	396.58
速效钾质量比 Mass ratio of available potassium ($g \cdot kg^{-1}$)	176	780.25
C 含量 C content ($g \cdot kg^{-1}$)		492.9
N 含量 N content ($g \cdot kg^{-1}$)		6.9
P 含量 P content ($g \cdot kg^{-1}$)		16.0
K 含量 K content ($g \cdot kg^{-1}$)		0. 8
碳氮比 C/N (%)		714.3

N_2O)的原位观测。静态箱由厚 2.0 mm 的非透明 PVC 板制成, 包括顶箱和基座两部分, 内置小风扇和温度计。顶箱规格为 50 cm×50 cm×50 cm, 基座边缘设有水槽, 观测时上下箱体用水槽中的水密封。在试验开始 1 周前将静态箱基座插入土壤中, 并在整个试验过程中不取出或挪动基座。基座埋入深度在 5 cm 以上(实际计算通量时以地、箱高度为准)。采用 30 min 罩箱时间, 即每个采样箱分别罩箱后的 0 min、10 min、20 min 和 30 min 抽取气体样品。采样容器为 100 mL 带三通阀的医用注射器, 将注射器与箱体一侧的三通阀相连, 抽取 30~60 mL 气体样品放入气袋, 同时使用秒表记录取样时间和箱内温度计所观测的箱内气温。气样带回实验室后, 3 d 内使用安捷伦 7890B 气相色谱仪分析温室气体浓度。

1.3.3　数据采集

气温和降雨量等气象要素通过试验点附近布设的波文比-土壤环境监测系统全天候 24 h 自动采集, 气温由距地面 2 m 高处的传感器(HMP45C, Vaisala, Helsinki, Finland)测量, 降雨量通过距地面 0.7 m 高处的自记雨量计(TE525MM, Texas Electeonices, Dallas, USA)测量; 土壤温度、土壤水分通过分层位(10 cm、20 cm 等)埋在土壤中的探头(Hydra Probe Ⅱ, Stevens, USA)测量。以上数据通过数据采集器(CR1000, Campbell, Logan, USA)每 10 min 在线采集一次, 计算平均值, 自动存储。由于气象站不能辐射所有试验田, 因此每次观测同时使用 JM624 手持温度计记录 10 cm、20 cm 处土壤温度并使用铝盒法测量不同取样点的表层土壤含水率(10 cm 及 20 cm 处), 并与气象站数据相互验证。

1.3.4　气体通量的计算

通量是指单位时间通过某单位面积输送的物理量。气体交换通量(F)计算公式为[22]:

$$F = \frac{\Delta m}{(A \times \Delta t)} = \frac{(\rho \times V \times \Delta c)}{(A \times \Delta t)} = \rho \times H \frac{\Delta c}{\Delta t} \quad (1)$$

式中: ρ 为箱内气体密度; Δm 和 Δc 分别为一段时间内箱内气体质量和混合比浓度的变化; A、V、H 分别为采样箱的底面积、体积和气室高度; $\Delta c/\Delta t$ 为箱内气体浓度变化。当 F 为负值时表示吸收, F 为正值时表示排放。计算通量过程中, 通过公式中引入箱内温度和气压值, 对气体浓度进行矫正。

温室气体累计排放量(E_c)计算公式为[23]:

$$E_c = 24 \times 0.01 \times \left[\frac{F_i + F_{i+1}}{2} + \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{F_i + F_{i+1}}{2} \right) (t_{i+1} - t_i) \right] \quad (2)$$

式中: n 为生长期内观测次数; F_i、F_{i+1} 为第 i 次、第 i+1 次采集温室气体时的通量; t_{i+1}、t_i 为第 i+1 次、第 i 次采集气体的采样时间。

综合增温潜势(GWP)是将各类温室气体的增温潜势转化为 CO_2 的排放当量, 100 年时间尺度下的 GWP 计算公式为[23]:

$$GWP = E_{c(CO_2)} + 295E_{c(CO_2)} + 28E_{c(CH_4)} \quad (3)$$

式中: $E_{c(CO_2)}$、$E_{c(N_2O)}$、$E_{c(CH_4)}$ 分别代表 CO_2、N_2O 和 CH_4 的累计排放量。

温室气体排放强度(GHGI)是单位经济产出的 CO_2 排放当量, 其计算公式为[23]:

$$GHGI = GWP/Y \quad (4)$$

式中: Y 为单位面积产量。

1.4　数据分析

利用 Office Excel 2013 对原始数据进行整理,

采用 SPSS 19.0 的 one-way ANONA 进行差异性处理, 差异性水平选择 $P<0.05$; Person 相关系数分析温室气体通量与影响因素之间的相关性。图中数据均为 3 个重复测定的平均值±标准误差。

2 结果与分析

2.1 试验区玉米生长季大气、土壤水热变化

2018 年 4—10 月研究区累计降雨 369.9 mm, 主要集中在 7、8 月份; 平均气温为 7.1 ℃, 生长季气温呈单峰型曲线, 在 7、8 月份达到较高值(图 2a)。生长季玉米农田土壤温度与气温大致趋势相同, 均呈单峰型, 并在 7 月中下旬达到最大值。土壤含水率由于冬季冰冻融化等原因, 在生长季初期较高并呈下降趋势, 整个生长季过程土壤含水率随降雨波动, 并在生长季末期大幅度下降, 20 cm 土壤含水率明显高于 10 cm 土壤含水率(图 2b)。

2.2 施用生物炭后玉米农田的 CO_2 通量特征

5 个处理的玉米田 CO_2 通量在整个生长季均呈现明显的双峰型(图 3)。试验初期温度较低, CO_2 通量也处于较低的水平; 且之后土壤水分下降, CO_2 通量随之下降; 5 月 12—15 日玉米农田进行翻耕、种植后 CO_2 通量出现明显的上升趋势, 并在 7 月初和 8 月初分别出现排放峰值, 随后呈现明显的下降趋势。在生长季初期添加生物炭各处理的 CO_2 通量明

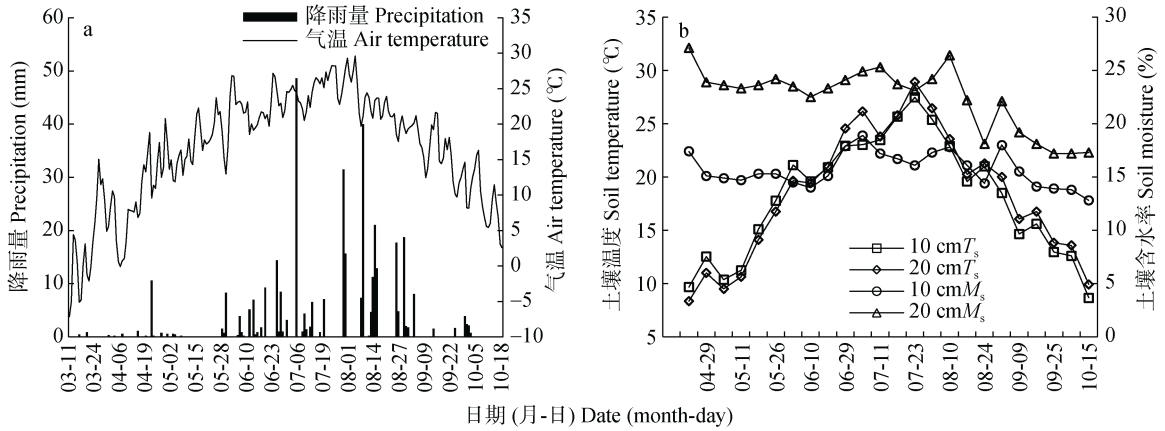

图 2 2018 年玉米农田生长季气温、降雨量(a)和土壤温、湿度(b)的变化

Fig. 2 Changes in air temperature and rainfall (a), and soil temperature and moisture (b) of corn field during the growing season in 2018

图 b 中 M_s 为土壤含水率, T_s 为土壤温度。In figure b, M_s means soil moisture, T_s means soil temperature.

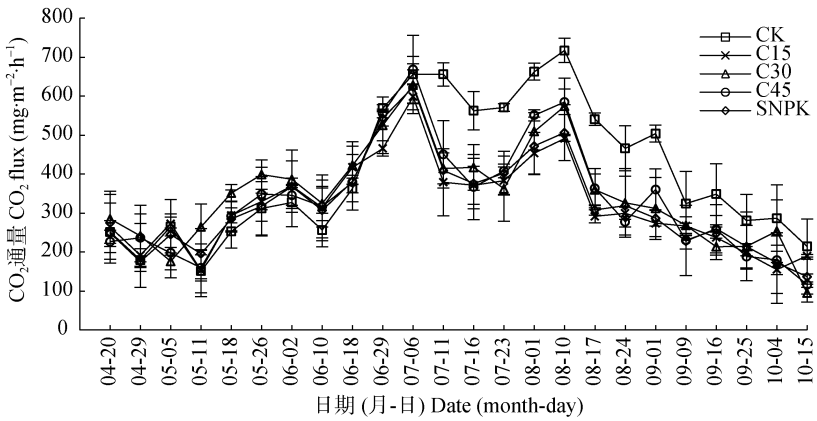

图 3 不同生物炭处理土壤 CO_2 通量季节动态变化

Fig. 3 Seasonal variation of soil CO_2 fluxes under different treatments of biochar application

CK 为空白对照; C15、C30 和 C45 为施用生物炭处理, 施用量分别为 15 t·hm^{-2}、30 t·hm^{-2} 和 45 t·hm^{-2}; SNPK 为秸秆还田处理。CK is the control; C15, C30 and C45 are biochar application treatments with biochar rate of 15 t·hm^{-2}, 30 t·hm^{-2}and 45 t·hm^{-2}, respectively; SNPK is treatment of corn straw incorporation.

显高于 CK, 但在生长中后期添加生物炭的各处理 CO_2 通量低于 CK, 说明添加生物炭在生长季初期对 CO_2 的排放具有促进作用, 而在生长中后期则有抑制作用。处理 CK、C15、C30、C45、SNPK 生长季 CO_2 平均通量分别为: 405.15 mg·m^{-2}·h^{-1}、319.40 mg·m^{-2}·h^{-1}、347.03 mg·m^{-2}·h^{-1}、336.16 mg·m^{-2}·h^{-1}、323.39 mg·m^{-2}·h^{-1}, 与对照 CK 相比, 处理 C15、C30、C45 及 SNPK 分别降低 21.16%、

14.34%、17.02%和 19.93%, 不同生物炭处理间差异显著(P<0.05)。从生长季整体来看, 添加生物炭有效抑制了土壤 CO_2 的排放, 其中处理 C15 和 SNPK 抑制效果较好。Person 相关分析结果表明, 玉米生长季 CO_2 通量与土壤温度和湿度均呈显著(P<0.01)正相关(表 2)。

表 2　不同生物炭处理玉米生长季土壤 CO_2、CH_4 和 N_2O 通量与 10 cm 处土壤温湿度相关性

Table 2　Relationship between soil CO_2, CH_4 and N_2O fluxes and soil temperature and moisture in the growing season of corn under different treatments of biochar application

温室气体 Greenhouse gas	CK		C15		C30		C45		SNPK	
	土壤温度 Soil temperature	土壤含水率 Soil moisture	土壤温度 Soil temperature	土壤含水率 Soil moisture	土壤温度 Soil temperature	土壤含水率 Soil moisture	土壤温度 Soil temperature	土壤含水率 Soil moisture	土壤温度 Soil temperature	土壤含水率 Soil moisture
CO_2	0.841**	0.784**	0.792**	0.761**	0.793**	0.763**	0.819**	0.800**	0.749**	0.824**
CH_4	−0.836**	−0.686**	−0.886**	−0.501*	−0.733**	−0.294	−0.638**	−0.071	−0.853**	−0.462*
N_2O	0.842**	0.471*	0.761**	0.461*	0.478*	0.376	−0.281	−0.140	0.770**	0.535**

*: P<0.05; **: P<0.01. CK 为空白对照; C15、C30 和 C45 为施用生物炭处理, 施用量分别为 15 t·hm^{-2}、30 t·hm^{-2}和 45 t·hm^{-2}; SNPK 为秸秆还田处理。CK is the control; C15, C30 and C45 are biochar application treatments with biochar rate of 15 t·hm^{-2}, 30 t·hm^{-2}and 45 t·hm^{-2}, respectively; SNPK is treatment of corn straw incorporation.

2.3　施用生物炭后玉米农田的 CH_4 通量特征

试验期间玉米农田 CH_4 通量如图 4 所示, 其正值代表土壤排放 CH_4, 负值代表土壤吸收 CH_4。播种前农田土壤 CH_4 吸收值逐渐增大。5 月 12—15 日玉米农田翻耕、种植后土壤 CH_4 通量发生较大变化, 其中处理 C45 由 CH_4 的吸收转为排放, 其余处理 CH_4 吸收值均大于 CK。6—8 月玉米生长盛季, CH_4 吸收较强且波动较大, 生长季后期处理 C45 重新转变为 CH_4 的吸收, 其他处理也逐渐接近 CK。处理 CK、C15、C30、C45、SNPK 生长季 CH_4 平均通量分别为: −44.03 μg·m^{-2}·h^{-1}、−68.96 μg·m^{-2}·h^{-1}、−58.14 μg·m^{-2}·h^{-1}、−8.20 μg·m^{-2}·h^{-1}、−61.79 μg·m^{-2}·h^{-1}。与 CK 相比, 处理 C15、C30 及 SNPK 的 CH_4 吸收值分别增加 56.62%、32.05%和 40.35%, 处理 C45 的 CH_4 吸收值与 CK 相比降低 81.36%, 不同生物炭处理间差异显著(P<0.05)。其中处理 C15、C30 和 SNPK 显著促进了 CH_4 的吸收, 而处理 C45 显著增加了 CH_4 的排放。土壤中添加适量生物炭有助于促进土壤对 CH_4 的吸收, 其中处理 C15 和 SNPK 对 CH_4 的减排效果较好。Person 相关分析结果(表 2)表明, 各处理的 CH_4 通量与土壤温度均显著相关(P<0.01); 处理 C30 及 C45 的 CH_4 通量与土壤含水率均无显著相关, 而处理 C15、SNPK 的 CH_4 通量与土壤含水率呈显著(P<0.05)负相关。

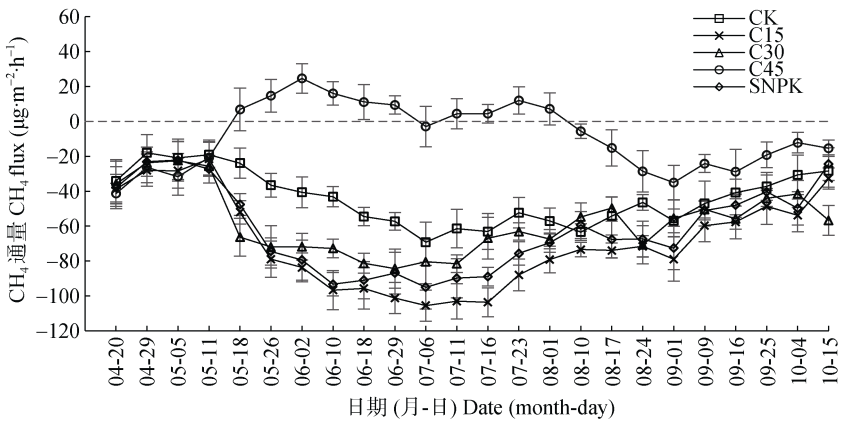

图 4　不同生物炭处理土壤 CH_4 通量季节动态变化

Fig. 4　Seasonal variation of soil CH_4 fluxes under different treatments of biochar application

CK 为空白对照; C15、C30 和 C45 为施用生物炭处理, 施用量分别为 15 t·hm^{-2}、30 t·hm^{-2}和 45 t·hm^{-2}; SNPK 为秸秆还田处理。CK is the control; C15, C30 and C45 are biochar application treatments with biochar rate of 15 t·hm^{-2}, 30 t·hm^{-2}and 45 t·hm^{-2}, respectively; SNPK is treatment of corn straw incorporation.

2.4　施用生物炭后玉米农田的 N_2O 通量特征

图 5 所示为试验期间玉米农田 N_2O 通量变化, 其正值代表土壤进行 N_2O 排放, 负值代表土壤吸收 N_2O。生长季初期 N_2O 通量逐渐增大。5 月 12—15 日农田种植玉米后土壤 N_2O 通量产生巨大差异, 其中处理 C45 的 N_2O 通量出现明显的负值, 各处理

N_2O 通量均低于 CK。生长季末期处理 C45 的土壤 N_2O 通量重新由吸收转为排放。处理 CK、C15、C30、C45、SNPK 生长季 CH_4 平均通量分别为: 9.23 $\mu g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$、6.98 $\mu g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$、3.99 $\mu g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$、1.27 $\mu g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$、6.62 $\mu g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$, 与 CK 相比, 处理 C15、C30、C45 及 SNPK 的 N_2O 通量分别降低 24.42%、56.83%、86.25%和 28.28%, 不同生物炭处理间差异显著(P<0.05)。添加生物炭明显抑制了土壤 N_2O 的排放, 其对土壤 N_2O 排放的抑制效果随生物炭施用量而逐渐提升, 各添加生物炭处理对土壤 N_2O 排放的抑制均在前期较强, 而后期较弱, 这可能是因为前期玉米生长过程中根系、土壤微生物等活动旺盛, 对土壤中的生物炭响应更强烈所致。Person 相关分析结果(表 2)表明, 除处理 C45, 其他处理的 N_2O 通量与土壤温度均显著(P<0.05)或极显著(P<0.01)相关; C30 及 C45 的 N_2O 通量与土壤含水率均无显著相关, 而处理 C15、SNPK 的 N_2O 通量与土壤含水率呈显著(P<0.05)或极显著(P<0.01)负相关。

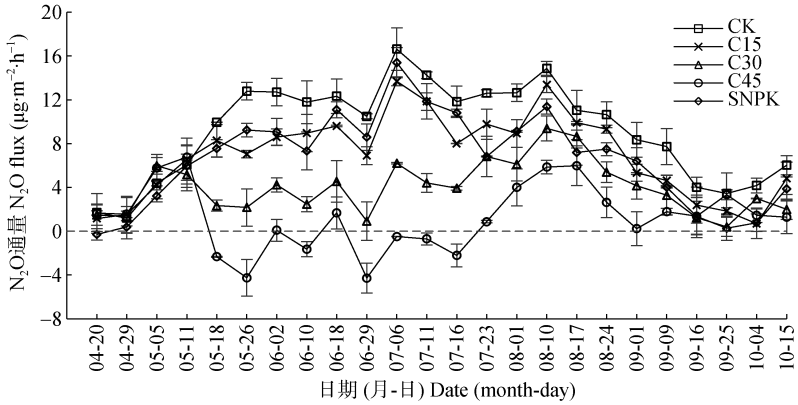

图 5 不同生物炭处理土壤 **N_2O** 通量季节动态变化

Fig. 5 Seasonal variation of soil N_2O fluxes under different treatments of biochar application

CK 为空白对照; C15、C30 和 C45 为施用生物炭处理, 施用量分别为 15 $t \cdot hm^{-2}$、30 $t \cdot hm^{-2}$ 和 45 $t \cdot hm^{-2}$; SNPK 为秸秆还田处理。CK is the control; C15, C30 and C45 are biochar application treatments with biochar rate of 15 $t \cdot hm^{-2}$, 30 $t \cdot hm^{-2}$and 45 $t \cdot hm^{-2}$, respectively; SNPK is treatment of corn straw incorporation.

2.5 生物炭对玉米农田土壤温室气体综合排放的影响

与 CK 相比, 处理 C15、C30、C45 和 SNPK 分别增加玉米产量 4.41%、5.07%、9.20%和 4.28%, 且不同生物炭及秸秆处理间及其与 CK 间差异显著(P<0.05), 随生物炭施入量增加玉米产量显著提高, 处理 C45 的玉米产量最高, 处理 C15 与 SNPK 相近。与 CK 相比, 处理 C15、C30、C45 和 SNPK 的玉米生长季 CO_2 累积排放量分别减少 21.18%、13.86%、16.61%和 19.76%, N_2O 累积排放量分别减少 25.44%、57.43%、86.40%和 29.22%, 且差异显著(P<0.05), 说明施用一定量的生物炭对土壤 CO_2 和 N_2O 的排放具有抑制作用(表 3)。处理 C15、C30 和 SNPK 的 CH_4 累计吸收量比 CK 分别增加 57.43%、32.76%和 41.10%, 处理 C45 则降低 83.04%, 且差异显著(P<0.05)。玉米生长季 CH_4 通量表现为负值, 即为土壤对 CH_4 进行吸收, 处理 C15、C30 和 SNPK 对土壤 CH_4 的吸收具有一定促进作用, 而处理 C45 则抑制了土壤对 CH_4 的吸收, 因此说明适量施用生物炭对土壤吸收 CH_4 具有显著促进效果(表 3)。整个生长季处理 C15 与 SNPK 温室气体通量变化相近。施入生物炭显著降低了玉米农田的 GWP 和 GHGI, 其中 C15 对降低 GWP 和 GHGI 贡献最大, 处理 SNPK 与处理 C15 相近。作为重要的温室气体, 在 100 年尺度上 CH_4 和 N_2O 的全球增温潜势分别是 CO_2 的 25 倍和 298 倍。本研究表明施入生物炭有效降低了温室气体的 GWP, 其中处理 C15 的 GHGI 最小。

3 讨论

本文研究发现在土壤中添加生物炭及秸秆还田均会抑制土壤 CO_2 的累积排放, 这个结果与非干旱区小麦-玉米轮作农田规律相反[22], 与内蒙古河套区玉米农田结果相同[23]。本研究区为干旱区, 土壤含水率较低, 微生物活性对土壤含水率的变化较为敏感[24], 因此生长季 CO_2 通量与土壤含水率呈显著正相关, 同时较低的土壤含水率会限制微生物对生物炭的分解利用能力[21]。有研究表明当施入生物炭较多时, 反而会降低生物炭中不稳定碳组分被微生物降解的表观呼吸率[25], 从而使施入生物炭对干旱区与非干旱地区土壤 CO_2 通量产生不同的影响。生长季初期(播种后)各处理 CO_2 排放均高于对照 CK, 其原因可能是由于生物炭中含有大量易被微生物吸收利用的有机质, 促进了土壤中微生物的呼吸作用[26],

表 3　不同生物炭处理下温室气体通量累积排放量、玉米产量、综合增温潜势(GWP)及温室的气体排放强度(GHGI)
Table 3　Cumulative emissions of greenhouse gases, corn yield, comprehensive warming potential (GWP) and greenhouse gas intensity (GHGI) under different treatments of biochar application

处理 Treatment	玉米产量 Corn yield ($t \cdot hm^{-2}$)	温室气体累积排放量 Cumulative greenhouse gas emission ($kg \cdot hm^{-2}$)			GWP ($CO_2+CH_4+N_2O$) ($kg \cdot hm^{-2}$)	GHGI ($kg \cdot t^{-1}$)
		CO_2	CH_4	N_2O		
CK	12.809a	17 479.61a	–1.905a	0.397a	17 543.57a	1 369.628
C15	13.374b	13 777.62b	–2.999b	0.296b	13 781.17b	1 030.445
C30	13.458c	15 056.21c	–2.529c	0.169c	15 035.49c	1 117.215
C45	13.988d	14 575.99d	–0.323d	0.054d	14 582.94d	1 042.532
SNPK	13.357b	14 024.67b	–2.688b	0.281b	14 032.44e	1 050.568

CK 为空白对照; C15、C30 和 C45 为施用生物炭处理, 施用量分别为 15 $t \cdot hm^{-2}$、30 $t \cdot hm^{-2}$ 和 45 $t \cdot hm^{-2}$; SNPK 为秸秆还田处理。同列不同小写字母表示不同处理间在 0.05 水平差异显著。CK is the control; C15, C30 and C45 are biochar application treatments with biochar rate of 15 $t \cdot hm^{-2}$, 30 $t \cdot hm^{-2}$and 45 $t \cdot hm^{-2}$, respectively; SNPK is treatment of corn straw incorporation. Different lowercase letters indicate significant differences among treatments at 0.05 level.

且生物炭的裂解温度较低时会产生较多转化不完全的糖类物质, 从而使土壤微生物活性增强, 降低了土壤的固碳能力[27]。7 月 6 日后 CK 的 CO_2 排放明显高于其他处理, 此时生物炭对土壤 CO_2 通量表现为明显的抑制作用, 并在生长季整体体现为对 CO_2 排放的抑制, 是因为农田中微生物和玉米经过一段时间的生长发育后, 简单易吸收的有机质已经被吸收殆尽, 并且生物炭会促进土壤中难以被微生物分解吸收的大分子物质(腐殖质、芳烃及碳水化合物等)的形成[28], 从而降低了微生物对土壤中碳的吸收和利用[29], 减小土壤碳的矿化速度[30], 最终呈现出对土壤 CO_2 排放的抑制。生物炭对农田土壤 CO_2 通量的影响是贯穿整个生长季的长期过程, 添加生物炭对土壤理化性质有所改变进而影响 CO_2 通量[31]。

土壤中含有产 CH_4 菌与 CH_4 氧化菌[32], 生长季农田土壤 CH_4 在二者的共同作用下表现为吸收。从整个生长季来看, 处理 C15、C30 和 SNPK 明显促进了土壤对 CH_4 的吸收, 这与其他研究者在垆土、辣椒(*Capsicum annuum*)田和芬兰小麦(*Triticum aestivum*)田的试验结果相同[12,33], 但本研究区内施入生物炭后土壤对 CH_4 吸收的促进作用相对较弱。其原因是本研究区内土壤干旱, 土壤含水率较低会使 CH_4 氧化菌的活性受到抑制, 从而导致干旱区施入生物炭后土壤对 CH_4 吸收的促进作用没有其他地区强。生物炭的比表面积极大, 添加到土壤中后使土壤孔隙度增加, 改善了土壤的通气程度和持水保水能力[34], 使土壤中氧气含量增加, 进而抑制了厌氧的产 CH_4 菌的活性。同时使 CH_4 氧化菌得到了充足的能源, 促使了 CH_4 的吸收[35]。处理 C45 则明显促进了土壤中 CH_4 的产生, 有研究表明较高量的外部碳源会改变微生物群落的活性, 降低 CH_4 氧化的速率从而减小土壤 CH_4 的吸收, 甚至导致土壤 CH_4 的排放, 这与研究者在华中平原的研究相同[36], 但与陕西杨凌垆土试验规律不同[37], 这说明生物炭对土壤 CH_4 通量的影响在不同生物炭、土壤类型和土地利用模式下, 其规律也呈现出较大的差异性。随着施用生物炭量的增大, 土壤中 C/N 逐渐提升, 微生物与作物之间竞争养分的激化会导致土壤微生物的活性被抑制, 且大量生物炭的施入导致土壤中铵态氮含量增加, 铵和 CH_4 都能竞争参与 CH_4 氧化的关键酶(CH_4 单氧化酶)的活性结合点, 铵可以将 CH_4 从活性结合点上驱逐下来, 从而使 CH_4 氧化量减小, 土壤中 CH_4 总体排放量增加[38]。

本研究发现在农田土壤中添加生物炭对土壤 N_2O 排放有抑制作用, 这与大量研究结果相同[36-37,39]。经相关分析表明(表 2), 处理 CK、C15 和 SNPK 生长季土壤 N_2O 通量与浅层土壤温湿度呈显著正相关($P<0.05$), 而处理 C30 和 C45 土壤 N_2O 通量与表层土壤温湿度(10 cm 处)无显著相关性, 其原因可能是由于本试验区生长季土壤温度均处于硝化反应和反硝化反应的适宜温度, 也有可能是由于土壤 N_2O 通量的影响掩盖了土壤含水率对土壤 N_2O 通量的影响所致。本研究发现随着施入生物炭量的增加, 生物炭对土壤 N_2O 排放的抑制效果逐渐增强, 这与其他地区的研究结果相同[40-42]。一方面生物炭会大量吸收土壤中的 N_2O[40], 另一方面生物炭对土壤氮素转化具有一定影响作用[25], 且生物炭本身具有较高的 C/N 比, 随着大量生物炭的施入, 土壤的通透性和保水持水能力得到了增强, 对硝化作用和反硝化作用起到了一定程度上的抑制, 从而增加了土壤的固氮作用[41,43]。本文中处理 SNPK 与 C15 效果相近, 均对生长季土壤 N_2O 的排放具有一定的抑制作用, 这与山东小麦-玉米轮作模式下秸秆还田的规律不同[22], 这可能是由于土地利用方式、气候差异以及土壤理

化性质的不同造成的。

屈忠义等[23]、李露等[42]和李秀云等[44]发现施入生物炭后整体提升了玉米产量, 这与本文研究结果一致, 生物炭施入土壤后有效改善土壤理化性质并提升作物对营养物质的吸收利用, 从而提升作物产量。但本研究施入生物炭后玉米产量的提升与其他研究者得出的结果相比较低, 可能是本研究区作为干旱区降水较少, 对玉米的生长有一定程度上的限制作用[24]。

4 结论

添加生物炭有效降低了科尔沁地区玉米生长季农田土壤 CO_2 和 N_2O 的累计排放量, 并对土壤吸收 CH_4 有一定的促进作用, 其中施用 15 $t·hm^{-2}$ 生物炭对 CO_2 和 CH_4 的减排效果最好; 过多添加生物炭(45 $t·hm^{-2}$)抑制了整个生长季土壤对 CH_4 的吸收, 说明只有适量地施入生物炭才能够有效减排。随着施入生物炭含量的增大, 生物炭对土壤 N_2O 的减排效果逐渐提升, 其中施用 45 $t·hm^{-2}$ 生物炭 N_2O 的减排效果最好。秸秆还田与施用 15 $t·hm^{-2}$ 生物炭的效果相近, 对 CO_2、CH_4 和 N_2O 均有减排效果。从 GWP 上来看, 施用 15 $t·hm^{-2}$ 生物炭对温室气体减排的整体效果最好。施用生物炭及秸秆还田均有效提高了科尔沁地区的玉米产量, 且玉米产量随着施入生物炭含量的增大而提升。从 GHGI 来看, 施用生物炭及秸秆还田均具有一定的经济效益和减排意义, 其中施用 15 $t·hm^{-2}$ 生物炭的综合效益最高。因此综合经济效益与环境因素, 建议科尔沁地区农田在种植玉米时添加 15 $t·hm^{-2}$ 生物炭, 并在不具备购买生物炭条件时可以考虑以秸秆还田作为对废弃秸秆的处理手段。

参考文献 References

[1] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis[M]. Contribution of Working Group Ⅰ to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013

[2] IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis[M]. Contribution of Working Group Ⅰ to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007

[3] 吕贝贝, 张贵云, 张丽萍, 等. 生物炭在农业上的应用进展[J]. 山西农业科学, 2018, 46(12): 2118–2121
LYU B B, ZHANG G Y, ZHANG L P, et al. Application progress of biochar in agriculture[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2018, 46(12): 2118–2121

[4] MARRIS E. Putting the carbon back: Black is the new green[J]. Nature, 2006, 442(7103): 624–626

[5] BRENNAN L, OWENDE P. Biofuels from microalgae — A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010, 14(2): 557–577

[6] VAN ZWIETEN L, KIMBER S, MORRIS S, et al. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility[J]. Plant and Soil, 2010, 327(1/2): 235–246

[7] 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[J]. Field Crops Research, 2009, 111(1/2): 81–84

[8] DING Y, LIU Y X, WU W X, et al. Evaluation of biochar effects on nitrogen retention and leaching in multi-layered soil columns[J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2010, 213(1/4): 47–55

[9] 罗煜, 赵小蓉, 李贵桐, 等. 生物质炭对不同 pH 值土壤矿质氮含量的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(19): 166–173
LUO Y, ZHAO X R, LI G T, et al. Effect of biochar on mineral nitrogen content in soils with different pH values[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(19): 166–173

[10] 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

[11] SHENBAGAVALLI S, MAHIMAIRAJA S. Characterization and effect of biochar on nitrogen and carbon dynamics in soil[J]. International Journal of Advanced Biological Research, 2012, 2(2): 249–255

[12] 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[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2011, 140(1/2): 309–313

[13] 成功, 张阿凤, 王旭东, 等. 运用"碳足迹"的方法评估小麦秸秆及其生物质炭添加对农田生态系统净碳汇的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(3): 604–612
CHENG G, ZHANG A F, WANG X D, et al. Assessment of wheat straw and its biochar effects on carbon sink in agricultural ecosystems using "carbon footprint" method[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2016, 35(3): 604–612

[14] NASER H M, NAGATA O, TAMURA S, et al. Methane emissions from five paddy fields with different amounts of rice straw application in central Hokkaido, Japan[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2007, 53(1): 95–101

[15] MA J, LI X L, XU H, et al. Effects of nitrogen fertiliser and wheat straw application on CH_4 and N_2O emissions from a paddy rice field[J]. Australian Journal of Soil Research, 2007, 45(5): 359–367

[16] 秦越, 李彬彬, 武兰芳. 不同耕作措施下秸秆还田土壤 CO_2 排放与溶解性有机碳的动态变化及其关系[J]. 农业环

境科学学报, 2014, 33(7): 1442–1449
QIN Y, LI B B, WU L F. Dynamics and interrelationship of CO_2 emissions and dissolved organic carbon in soils with crop residue retention under different tillage practices[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, 33(7): 1442–1449

[17] 吴震, 董玉兵, 熊正琴. 生物炭施用 3 年后对稻麦轮作系统 CH_4 和 N_2O 综合温室效应的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(1): 141–148
WU Z, DONG Y B, XIONG Z Q. Effects of biochar application three-years ago on global warming potentials of CH_4 and N_2O in a rice-wheat rotation system[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(1): 141–148

[18] SAARNIO S, HEIMONEN K, KETTUNEN R. Biochar addition indirectly affects N_2O emissions via soil moisture and plant N uptake[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2013, 58: 99–106

[19] EL-MAHROUKY M, EL-NAGGAR A H, USMAN A R, et al. Dynamics of CO_2 emission and biochemical properties of a sandy calcareous soil amended with *Conocarpus* waste and biochar[J]. Pedosphere, 2015, 25(1): 46–56

[20] LIU Y X, YANG M, WU Y M, et al. Reducing CH_4 and CO_2 emissions from waterlogged paddy soil with biochar[J]. Journal of Soils and Sediments, 2011, 11(6): 930–939

[21] 高德才, 张蕾, 刘强, 等. 生物黑炭对旱地土壤 CO_2、CH_4、N_2O 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 CO_2, CH_4, N_2O emission and its environmental benefits in dryland soil[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(11): 3615–3624

[22] 刘杏认, 张星, 张晴雯, 等. 施用生物炭和秸秆还田对华北农田 CO_2、N_2O 排放的影响[J]. 生态学报, 2017, 37(20): 6700–6711
LIU X R, ZHANG X, ZHANG Q W, et al. Effects of biochar and straw return on CO_2 and N_2O emissions from farmland in the North China Plain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(20): 6700–6711

[23] 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

[24] 寇太记, 朱建国, 谢祖彬, 等. 大气 CO_2 体积分数升高环境温度与土壤水分对农田土壤呼吸的影响[J]. 生态环境, 2008, 17(3): 950–956
KOU T J, ZHU J G, XIE Z B, et al. The effects of temperature and soil moisture on soil respiration in the cropland under elevated pCO_2[J]. Ecology and Environment, 2008, 17(3): 950–956

[25] 陈浩天, 张地方, 张宝莉, 等. 园林废弃物不同处理方式的环境影响及其产物还田效应[J]. 农业工程学报, 2018, 34(21): 239–244
CHEN H T, ZHANG D F, ZHANG B L, et al. Environmental impacts and returning effects of garden wastes under different disposal methods[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(21): 239–244

[26] JONES D L, MURPHY D V, KHALID M, et al. Short-term biochar-induced increase in soil CO_2 release is both biotically and abiotically mediated[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2011, 43(8): 1723–1731

[27] LIU G T, XIE M P, ZHANG S Y. Effect of organic fraction of municipal solid waste (OFMSW)-based biochar on organic carbon mineralization in a dry land soil[J]. Journal of Material Cycles and Waste Management, 2017, 19(1): 473–482

[28] CROSS A, SOHI S P. The priming potential of biochar products in relation to labile carbon contents and soil organic matter status[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2011, 43(10): 2127–2134

[29] 郭碧林, 陈效民, 景峰, 等. 生物质炭添加对重金属污染稻田土壤理化性状及微生物量的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(4): 279–284
GUO B L, CHEN X M, JING F, et al. Effects of biochar addition on physicochemical properties and microbial biomass of the red paddy soil polluted by heavy metals[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(4): 279–284

[30] SMITH J L, COLLINS H P, BAILEY V L. The effect of young biochar on soil respiration[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2010, 42(12): 2345–2347

[31] 李新华, 朱振林, 董红云, 等. 秸秆不同还田模式对玉米田温室气体排放和碳固定的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(11): 2228–2235
LI X H, ZHU Z L, DONG H Y, et al. Effects of different return modes of wheat straws on greenhouse gas emissions and carbon sequestration of maize fields[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2015, 34(11): 2228–2235

[32] 祁乐, 高明, 郭晓敏, 等. 生物炭施用量对紫色水稻土温室气体排放的影响[J]. 环境科学, 2018, 39(5): 2351–2359
QI L, GAO M, GUO X M, et al. Effects of biochar application rates on greenhouse gas emissions in the purple paddy soil[J]. Environmental Science, 2018, 39(5): 2351–2359

[33] 王月玲, 耿增超, 王强, 等. 生物炭对搂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

[34] FENG Y Z, XU Y P, YU Y C, et al. Mechanisms of biochar decreasing methane emission from Chinese paddy soils[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2012, 46: 80–88

[35] 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

[36] 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[J]. Plant and Soil, 2012, 351(1/2): 263–275

[37] 周凤, 许晨阳, 王月玲, 等. 生物炭对搂土 CH_4、N_2O 排放的影响[J]. 环境科学, 2017, 38(9): 3831–3839
ZHOU F, XU C Y, WANG Y L, et al. Effect of biochar on

CH_4 and N_2O emissions from Lou soil[J]. Environmental Science, 2017, 38(9): 3831–3839

[38] 勾芒芒, 屈忠义, 王凡, 等. 生物炭施用对农业生产与环境效应影响研究进展分析[J]. 农业机械学报, 2018, 49(7): 1–12
GOU M M, QU Z Y, WANG F, et al. Progress in research on biochar affecting soil-water environment and carbon sequestration-mitigating emissions in agricultural fields[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(7): 1–12

[39] AMELOOT N, DE NEVE S, JEGAJEEVAGAN K, et al. Short-term CO_2 and N_2O emissions and microbial properties of biochar amended sandy loam soils[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2013, 57: 401–410

[40] CORNELISSEN G W, RUTHERFORD D H, ARP H P H, et al. Sorption of pure N_2O to biochars and other organic and inorganic materials under anhydrous conditions[J]. Environmental Science & Technology, 2013, 47(14): 7704–7712

[41] LIU X Y, QU J J, LI L Q, et al. Can biochar amendment be an ecological engineering technology to depress N_2O emission in rice paddies? — A cross site field experiment from South China[J]. Ecological Engineering, 2012, 42: 168–173

[42] 李露, 周自强, 潘晓健, 等. 氮肥与生物炭施用对稻麦轮作系统甲烷和氧化亚氮排放的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(5): 1095–1103
LI L, ZHOU Z Q, PAN X J, et al. Combined effects of nitrogen fertilization and biochar incorporation on methane and nitrous oxide emissions from paddy fields in rice-wheat annual rotation system[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21(5): 1095–1103

[43] CASE S D C, MCNAMARA N P, REAY D S, et al. The effect of biochar addition on N_2O and CO_2 emissions from a sandy loam soil — The role of soil aeration[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2012, 51: 125–134

[44] 李秀云, 张洪培, 沈玉芳, 等. 生物炭与氮肥对旱作春玉米农田 CO_2 和 CH_4 排放特征的影响[J]. 西北植物学报, 2016, 36(6): 1216–1224
LI X Y, ZHANG H P, SHEN Y F, et al. Effect of biochar and fertilizer on CO_2 and CH_4 emission from spring maize dryland[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2016, 36(6): 1216–1224