

玉米秸秆不同还田方式下麦田温室气体排放特征

李新华¹, 朱振林¹, 董红云¹, 杨丽萍¹, 郭洪海^{2*}

(1.山东农业可持续发展研究所, 山东 济南 250100; 2.山东省农业科学院农业资源与环境研究所, 山东 济南 250100)

摘要:为了探讨玉米秸秆不同还田方式对麦田温室气体排放的影响,通过田间试验,设玉米秸秆不还田(CK)、玉米秸秆直接还田(CS)、玉米秸秆过腹还田(CGS)和玉米秸秆转化为食用菌基质,出菇后菌渣还田(CMS)4个处理,利用静态箱-气相色谱法测定了玉米秸秆不同还田方式下,麦田温室气体(CO_2 、 N_2O 和 CH_4)的排放特征。结果表明:玉米秸秆不同还田方式下,麦田温室气体通量均具有明显的季节变化,且排放量不同。在小麦生长季, CO_2 和 N_2O 均表现为排放,其排放量为 $\text{CK} > \text{CGS} > \text{CS} > \text{CMS}$;甲烷表现为吸收,其吸收量为 $\text{CS} > \text{CGS} > \text{CK} > \text{CMS}$,且不同处理间差异显著($P < 0.05$)。从温室气体综合增温潜势(GWP)来看,在20、100年和500年3个时间尺度上,仅玉米秸秆不同还田方式这一环节,GWP均表现为: $\text{CS} > \text{CGS} > \text{CK} > \text{CMS}$,也就是说秸秆直接还田,显著增加麦田温室气体的全球增温潜势,其次是玉米秸秆过腹还田方式,而秸秆-菌渣还田则降低了麦田温室气体的全球增温潜势。从减少温室气体排放角度,推荐秸秆-菌渣还田方式。该研究结果可为秸秆合理利用和温室气体减排提供基础数据。

关键词:玉米;秸秆还田;麦田;温室气体;排放通量

中图分类号:X71 文献标志码:A 文章编号:2095-6819(2016)02-0176-6

doi: 10.13254/j.jare.2015.0260

引用格式:

李新华, 朱振林, 董红云, 等. 玉米秸秆不同还田方式下麦田温室气体排放特征[J]. 农业资源与环境学报, 2016,33(2): 176-181.

LI Xin-hua, ZHU Zhen-lin, DONG Hong-yun, et al. Characteristics of Greenhouse Gas Emissions from the Wheat Fields with Different Returning Methods of Maize Straws[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2016,33(2): 176-181.

Characteristics of Greenhouse Gas Emissions from the Wheat Fields with Different Returning Methods of Maize Straws

LI Xin-hua¹, ZHU Zhen-lin¹, DONG Hong-yun¹, YANG Li-ping¹, GUO Hong-hai^{2*}

(1.Shandong Institute of Agriculture Sustainable Development, Jinan 250100, China; 2.Institute of Agricultural Resource and Environment, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Jinan 250100, China)

Abstract: In order to investigate the effect of different returning methods of maize straw on the greenhouse gas emissions from the wheat fields, we explored the greenhouse gas CO_2 , N_2O and CH_4 emissions from the wheat fields using static chamber-gas chromatograph technique from December 2013 to May 2014. The experiments set four treatments including no maize straw returning (CK), direct maize straw returning directly (CS), maize straw-rumen-cattle dung returning (CGS) and maize straw-mushroom residue returning (CMS), and the four treatments were investigated under the same watering and fertilizing conditions. The results showed that the greenhouse gas emissions from the wheat fields all had distinct seasonal variations and the cumulative emissions of greenhouse gas emissions were different. During the maize growing season, the cumulative emissions of both CO_2 and N_2O were emitted and in the order of $\text{CK} > \text{CGS} > \text{CS} > \text{CMS}$ while the cumulative absorptions of CH_4 were in the order of $\text{CS} > \text{CGS} > \text{CK} > \text{CMS}$ with the significant difference between different treatments ($P < 0.05$). The global warming potential (GWP) of greenhouse gases in three time periods (20 years, 100 years and 500 years) were all in the order of $\text{CS} > \text{CGS} > \text{CK} > \text{CMS}$ under the different returning methods of maize straw, which indicated that direct straw returning could significantly increase the global warming potential of greenhouse gases from the wheat field, followed by CGS while the straw-mushroom residue returning (CMS) could decrease the global warming potential of greenhouse gases from the wheat field. The method of straw-mushroom residue returning should be recommended from the viewpoint of reducing GWP of the greenhouse gas. In all, our study could provide the scientific foundation for the efficiency straw recycle and reducing greenhouse gas emission.

Keywords: maize; straw returning; wheat field; greenhouse gas; emission flux

收稿日期:2015-11-02

基金项目:“十二五”科技支撑计划(2012BAD14B07-1)

作者简介:李新华(1979—),女,博士,副研究员,主要从事环境生态与生物地球化学研究。E-mail: xinhuali_2008@163.com

*通信作者:郭洪海 E-mail: honghaig@163.com

气候变暖是当今全球性的环境问题,其主要原因是大气中温室气体浓度不断增加。 CO_2 、 N_2O 和 CH_4 被认为是最重要的温室气体。农业在温室气体排放中占有重要地位^[1-2],是温室气体排放的一个最重要源和汇^[3]。农作物秸秆作为物质、能量和养分的载体,是一种宝贵的自然资源,秸秆直接还田是当今秸秆资源利用的主渠道^[4],也是提高土壤肥力、增加作物产量的主要农艺措施之一,已得到了广泛的认可^[5-7]。但同时也带来了播种质量差、与饲料争资源及影响温室气体排放等问题^[8-10],并且秸秆还田对温室气体排放的影响也有不同的结论^[11]。例如有研究发现在稻田土壤中秸秆还田可明显降低 N_2O 排放^[12-13],但在玉米田土壤中秸秆还田可增加 N_2O 的排放^[14-15]。关于秸秆还田对温室气体排放的影响主要集中在秸秆还田量、秸秆还田后施肥、耕作等措施对温室气体排放的影响,而对秸秆不同还田方式处理下温室气体排放的比较研究还不多见^[11]。鉴于此,本研究设置秸秆不还田、秸秆直接还田、秸秆过腹还田和秸秆转化为食用菌基质,出菇后菌渣还田4种还田处理,研究秸秆不同还田方式下,小麦田温室气体的排放特征,以期对秸秆合理高效利用、农田温室气体减排提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区位于山东省农业科学院资源与环境研究所循环农业研究基地——山东省德州市平原县张华镇梨园村,本区属东亚暖温带亚湿润大陆性季风气候,冬冷夏热,雨热同期,四季分明。年平均气温 $12.1\sim 13.1\text{ }^\circ\text{C}$,极端最高气温 $40.9\text{ }^\circ\text{C}$,极端最低气温 $-22.8\text{ }^\circ\text{C}$ 。年平均降水量 $579.2\sim 633.3\text{ mm}$ 。试验基地土壤类型为壤土,是典型的黄河冲积平原,种植制度为小麦—玉米一年两熟制。试验开始时耕层土壤有机质含量 $17.8\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、有机碳含量 $10.56\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、全氮含量 $1.04\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、速效磷含量 $15.58\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、全钾含量 $20.45\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验设计

试验于2013年10月—2014年5月进行,供试作物为小麦,品种为济麦22。试验设4个处理,分别为(1)秸秆不还田处理(CK):玉米收获后,人工移除秸秆及根系;(2)秸秆直接还田处理(CS):玉米收获后,用小型秸秆粉碎机将秸秆粉碎,然后全部还田,还田量约为 $8\ 370.0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$;(3)秸秆过腹还田处理(CGS):玉米秸秆收获后,作为牛的饲料,然后牛粪用塑料薄膜密封、腐熟后还田,还田量约为 $16\ 740\text{ kg}\cdot$

hm^{-2} (牛粪的产量约为秸秆量的2倍);(4)秸秆转化为食用菌基质,基质生长蘑菇后转化为菌渣还田(CMS):菌渣来自山东省农业科学院食用菌试验示范基地,为栽培双孢菇之后产生的菌渣,菌渣通过堆沤、发酵、腐熟转化后还田,还田量约为 $1\ 841\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (玉米秸秆到菌渣的转化率约为22%)。肥料的使用量为优化的经济施肥量,具体为: N : $205\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, P_2O_5 : $124\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, K_2O : $135\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。 N 肥一半作为底肥,一半在拔节期追施,磷肥和钾肥全部作为底肥。底肥在2013年10月8日耕地时施入,追肥在2014年3月10日施加。每个小区面积为 $7\text{ m}\times 10\text{ m}=70\text{ m}^2$,每个处理3个重复,共12个小区,随机排列。每个小区间设1 m的保护间距。小麦种植期间统一进行灌溉、除草、打药等管理。2014年4月8日小麦拔节期进行了灌溉浇水。

1.3 样品采集与分析

温室气体的采集采用静态箱—气相色谱法。采样箱由2.5 mm厚的有机玻璃制成,箱体四周及顶部用白色泡沫包裹以确保采样时箱内温度变化不大。采样箱采用标准式组合设计,由箱体和底座2部分组成,箱体规格为 $50\text{ cm}\times 50\text{ cm}\times 100\text{ cm}$,底座为 $50\text{ cm}\times 50\text{ cm}\times 20\text{ cm}$ 。底座上端有宽2 cm、深3 cm的密封水槽,采样时将箱体罩在底座上,各部分之间均以水密封,以防止箱体和底座的接触处漏气。采样箱内装有搅气小风扇、温度传感器、采气三通阀及气压平衡管,箱子侧面安装有电源插头和气体样品接口。

在每个处理小区内,随机选择3个点,共12个观测点。分别于小麦种植后(2013年10月11日)安装气体采样箱底座,稳定一段时间后开始采集气体样品。观测时间为2013年12月—2014年5月,每月采集2次样品,2月份受天气和野外实验条件限制,仅采集了1次。采样时间分别为2013年12月3日、12月19日、2014年1月3日、1月22日、2月20日、3月12日、3月26日、4月15日、4月29日、5月15日和5月29日。每次采集时间为上午8:00—10:00。每次罩箱时间为30 min,从采样箱密封放置到底座上,开始采集第一个气体样品,之后每间隔10 min采样1次,共采集4个气体样品。采集的气体样品置于1 L的铝塑复合气袋中(化工部大连光明化工研究所生产)。采集气体样品时同步测定气温和箱内温度。

样品采集后36 h内,在实验室用Agilent 7890A气相色谱仪进行分析。其基本原理是通过自编微机程序发出指令控制电路、气路系统和信号接收,电磁阀

通过开关量改变管线中气流流量和方向以达到对色谱自动进样、分析和清洗的目的。

温室气体排放通量采用下式进行计算:

$$F = \frac{dc}{dt} \times \frac{M}{V_0} \times \frac{P}{P_0} \times \frac{T_0}{T} \times H$$

式中: F 为气体通量($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$); dc/dt 为采样时气体体积分数随时间变化的回归曲线斜率; M 为气体的摩尔质量($\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$); P 为采样点气压(Pa); T 为采样时的绝对温度(K); V_0 、 P_0 、 T_0 分别为标准状态下的气体摩尔体积($22.41 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1}$)、空气气压(1013.25 hPa)和绝对温度(273.15 K); H 为地面以上采样箱高度(m)。

1.4 数据处理

运用 Excel 2003 进行数据处理计算, Origin7.5 进行绘图, SPSS 13.0 等软件对数据进行统计分析。

2 结果与讨论

2.1 秸秆不同还田模式下麦田温室气体排放通量特征

2.1.1 秸秆不同还田模式下 CO_2 通量特征

玉米秸秆不同还田方式下, 麦田 CO_2 排放通量变化见图 1。由图 1 可知, 在玉米秸秆不同还田方式下, 麦田 CO_2 通量均具有明显的季节排放特征, 且排放模式具有相似性, 均呈波动性变化, 但排放强度不同。2013 年 12 月至 2014 年 2 月, 不同处理间 CO_2 的排放量均较低, 且变化不大, 可能与该段时间属于小麦越冬期有关, 在此期间, 气温不断降低(图 2), 植物生长缓慢。2014 年 3 月至 5 月, 是小麦的旺盛生长和成熟期, 气温开始逐渐升高(图 2), 再加上追施 N 肥, CO_2 排放通量均增加。在 CGS 处理下, CO_2 排放通量于 2014 年 3 月下旬达到排放峰值($83.48 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$),

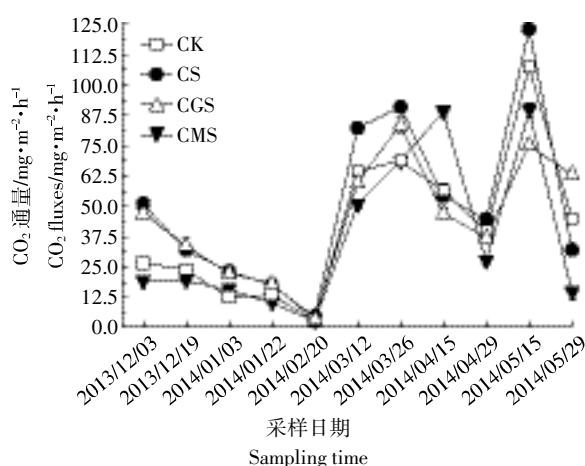


图 1 秸秆不同还田方式下 CO_2 通量特征

Figure 1 The characteristics of CO_2 flux from the wheat fields with different modes of straw returning

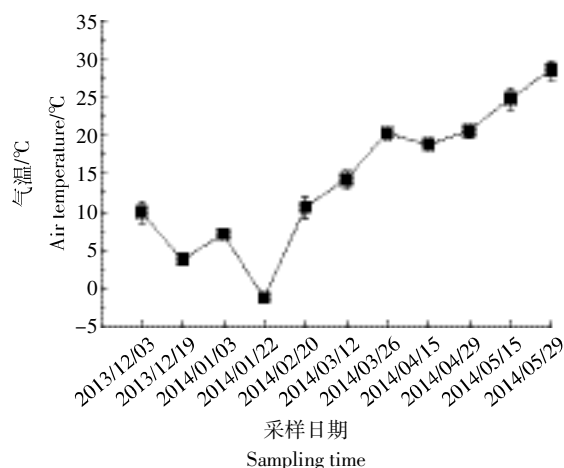


图 2 采样期间气温的变化

Figure 2 The change of air temperature during sampling

而 CK、CS 和 CMS 均于 2014 年 5 月中旬取得峰值。相关分析表明, 气温与秸秆不同还田模式下 CO_2 通量均呈正相关, 且在秸秆不还田和秸秆过腹还田模式下, 达到了显著水平($r=0.705, P<0.05$; $r=0.710, P<0.05$)。说明温度对 CO_2 排放通量具有较明显的促进作用, CO_2 排放通量随温度的增加而增加。已有的研究表明温度主要通过 2 个方面影响 CO_2 的排放: 一方面在相对较高的温度条件下, 分子扩散较快, 有利于气体的扩散排放; 另一方面, 温度升高, 土壤中微生物活性增强, 其参与的地球化学循环反应加快, 有利于气体的产生^[16]。

从整个小麦生育期来看, 在 CK 处理下, CO_2 的通量范围为 $2.87 \sim 107.40 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 均值为 $39.41 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$; 在 CS 处理下, CO_2 的通量范围为 $4.48 \sim 122.97 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 均值为 $50.76 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。在 CGS 处理下, CO_2 的通量范围为 $3.55 \sim 75.21 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 均值为 $43.06 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$; 在 CMS 处理下, CO_2 的通量范围为 $2.76 \sim 89.44 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 均值为 $36.87 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。比较 4 种处理下 CO_2 排放通量均值, 顺序为 $\text{CS} > \text{CGS} > \text{CK} > \text{CMS}$, 且差异明显($P<0.05$)。可见秸秆还田方式不同, CO_2 排放强度不同。与 CK 相比, CS 和 CGS 方式都使 CO_2 平均排放通量增加, 而 CMS 方式则使 CO_2 平均排放通量降低, 该结果与黄小林^[17]的研究结果相一致。

2.1.2 秸秆不同还田模式下 N_2O 通量特征

秸秆不同还田方式下 N_2O 排放通量变化见图 3。由图 3 可知, 在秸秆不同还田方式下, 麦田 N_2O 通量均表现为排放, 且排放模式呈单峰型变化。2013 年 12 月至 2014 年 2 月份, 不同秸秆还田处理下, N_2O 排放通量均呈降低趋势, 且排放通量较小、变化不大。2014

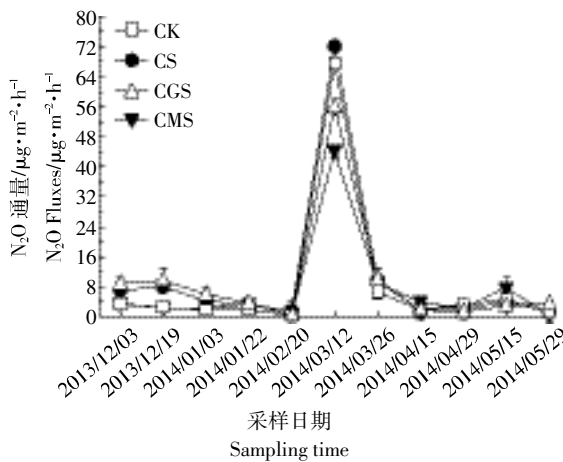
图3 不同秸秆还田方式下 N₂O 排放特征

Figure 3 The characteristics of N₂O flux from the wheat fields with different modes of straw returning

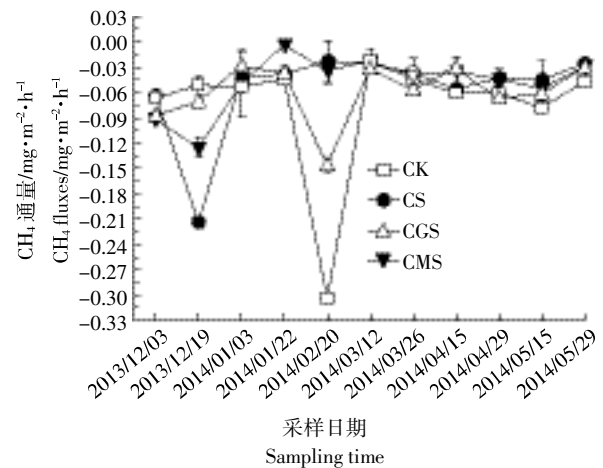
图4 不同秸秆还田方式下 CH₄ 排放特征

Figure 4 The characteristics of CH₄ flux from the wheat fields with different modes of straw returning

年3月12日取得排放通量最大值。高的 N₂O 排放可能与施肥活动有关,在2014年3月10日,每个处理均追施了氮肥。气温与 N₂O 排放通量的相关分析表明,二者之间相关性不大,这也验证了 N₂O 排放主要与施肥活动有关, N₂O 排放量与氮肥用量之间存在线性关系^[18]。在小麦生育期内,4种秸秆还田处理下, N₂O 的排放通量也不同。其中 CK 处理下, N₂O 的通量范围为 0.43~67.65 μg·m⁻²·h⁻¹,均值为 8.25 μg·m⁻²·h⁻¹。在 CS 处理下, N₂O 的通量范围为 1.64~72.13 μg·m⁻²·h⁻¹,均值为 9.95 μg·m⁻²·h⁻¹。在 CGS 处理下, N₂O 的通量范围为 0.49~55.96 μg·m⁻²·h⁻¹,均值为 9.20 μg·m⁻²·h⁻¹。在 CMS 处理下, N₂O 的通量范围为 0.83~44.19 μg·m⁻²·h⁻¹,均值为 7.30 μg·m⁻²·h⁻¹。4种处理下 N₂O 的排放均值与 CO₂ 的排放均值相一致,也表现为 CS>CGS>CK>CMS,且不同处理间差异明显($P<0.05$)。也就是说,和 CK 相比,在 CS 和 CGS 方式下, N₂O 排放通量均增加,而在 CMS 方式下, N₂O 排放通量则表现为降低。李新华等^[19]在研究玉米田温室气体排放的试验中,也得到了类似结论,即秸秆-菌渣还田可以降低 N₂O 排放通量。

2.1.3 秸秆不同还田模式下 CH₄ 排放特征

秸秆不同还田方式下小麦田 CH₄ 通量变化见图4。由图4可知,在秸秆不同还田方式下, CH₄ 通量均表现为吸收,呈波动性变化,但不同处理间变化模式不同。在 CK 处理下, CH₄ 的通量范围为 -0.30~-0.023 mg·m⁻²·h⁻¹,均值为 -0.076 mg·m⁻²·h⁻¹,2014年2月, CH₄ 通量出现吸收峰值,3月中上旬,吸收值最小。在 CS 处理下, CH₄ 的通量范围为 -0.21~-0.023 mg·m⁻²·h⁻¹,均值为 -0.056 mg·m⁻²·h⁻¹,2013年12月中旬, CH₄ 通量出现吸收峰值,其他月份间排放通量变化范围不大。在 CGS 处理下, CH₄ 的通量范围为 -0.15~-0.029 mg·m⁻²·h⁻¹,均值为 -0.059 mg·m⁻²·h⁻¹,和 CK 处理相一致, CH₄ 通量在2014年2月份出现吸收峰值。在 CMS 处理下, CH₄ 的通量范围为 -0.12~-0.003 mg·m⁻²·h⁻¹,均值为 -0.048 mg·m⁻²·h⁻¹,和 CS 处理相类似,在2013年12月中旬, CH₄ 通量出现吸收峰值。比较4种处理下 CH₄ 通量的均值可知, CH₄ 通量的均值表现为 CK>CGS>CS>CMS。也就是说秸秆还田处理降低了甲烷的吸收通量,田慎重等^[20]在华北地区麦地的观测研究也得到了类似的结论,即秸秆还田后 CH₄ 的吸收通量降低。

h⁻¹,均值为 -0.056 mg·m⁻²·h⁻¹,2013年12月中旬, CH₄ 通量出现吸收峰值,其他月份间排放通量变化范围不大。在 CGS 处理下, CH₄ 的通量范围为 -0.15~-0.029 mg·m⁻²·h⁻¹,均值为 -0.059 mg·m⁻²·h⁻¹,和 CK 处理相一致, CH₄ 通量在2014年2月份出现吸收峰值。在 CMS 处理下, CH₄ 的通量范围为 -0.12~-0.003 mg·m⁻²·h⁻¹,均值为 -0.048 mg·m⁻²·h⁻¹,和 CS 处理相类似,在2013年12月中旬, CH₄ 通量出现吸收峰值。比较4种处理下 CH₄ 通量的均值可知, CH₄ 通量的均值表现为 CK>CGS>CS>CMS。也就是说秸秆还田处理降低了甲烷的吸收通量,田慎重等^[20]在华北地区麦地的观测研究也得到了类似的结论,即秸秆还田后 CH₄ 的吸收通量降低。

2.2 不同秸秆还田模式下温室气体排放量及综合增温潜势估算

根据每月 CO₂、CH₄ 和 N₂O 排放通量的实测数据,通过数值积分法^[21]估算出玉米秸秆不同还田处理下,整个小麦生长季温室气体的排放总量(表1)。由表1可知,玉米秸秆不同还田处理下,小麦生态系统表现为 CO₂ 和 N₂O 的排放源、CH₄ 的汇,而且在秸秆还田不同处理下,温室气体的排放量均不同,且不同处理间差异显著($P<0.05$)。其中 CH₄ 表现为吸收,其吸收量为:CK>CGS>CS>CMS;CO₂ 和 N₂O 表现为排放,其排放量均为:CS>CGS>CK>CMS。

全球增温潜势(Global warming potential, GWP)是基于充分混合的温室气体辐射特征的一个指数,用于衡量相对于 CO₂ 的在所选定时间内进行积分的,当前大气中某个给定的充分混合的温室气体单位质量的

表 1 秸秆不同还田方式下小麦生长季温室气体
累计排放量估算值($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)

Table 1 The cumulative emissions of greenhouse gases from the wheat fields with different models of straw returning($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)

处理/Treatments	CH ₄	N ₂ O	CO ₂
CK	-4.88d	0.40c	2 187.58c
CS	-3.38b	0.52a	2 815.18a
CGS	-3.93c	0.50b	2 501.20b
CMS	-3.22a	0.35d	1 905.45d

注:表中不同小写字母分别表示各处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

辐射强迫潜力^[22],用于定量衡量不同温室气体对全球变暖的相对影响,是各种温室气体相对的增温效应的简单度量^[23-24]。在 20 年时间尺度上,单位质量 N₂O 的全球增温潜势为 CO₂ 的 289 倍,单位质量 CH₄ 的全球增温潜势为 CO₂ 的 72 倍;100 年时间尺度上,单位质量 N₂O 的全球增温潜势为 CO₂ 的 298 倍,单位质量 CH₄ 的全球增温潜势为 CO₂ 的 25 倍;500 年时间尺度上,单位质量 N₂O 的全球增温潜势为 CO₂ 的 153 倍,单位质量 CH₄ 的全球增温潜势为 CO₂ 的 7.6 倍^[22]。据此,计算出玉米秸秆不同还田方式下小麦生长季温室气体的综合增温潜势(GWP)见表 2。由表 2 可知,玉米秸秆不同还田方式下,仅由秸秆不同方式还田这一环节产生的温室气体综合增温潜势在 20、100 年和 500 年 3 个时间尺度上,均表现为:CS>CGS>CK>CMS,且不同处理间差异显著($P<0.05$)。也就是说和 CK 相比,CS 方式显著增加麦田温室气体的全球增温潜势,其次是 CGS 方式,而 CMS 方式则降低了麦田温室气体的全球增温潜势。

表 2 玉米秸秆不同还田方式下麦田温室气体
增温潜势估算($\text{mg CO}_2\cdot\text{m}^{-2}$)

Table 2 Estimated GWP of greenhouse gases from the wheat fields with different models of straw returning($\text{mg CO}_2\cdot\text{m}^{-2}$)

时间尺度/年	CK	CS	CGS	CMS
20	1 950.78 c	2 721.72a	2 362.50b	1 775.10d
100	2 183.71c	2 885.45a	2 551.91b	1 929.57d
500	2 211.15c	2 868.98a	2 547.84b	1 934.69d

3 结论

(1)玉米秸秆不同还田方式下,麦田温室气体排放通量均具有明显的季节特征,但排放强度不同。其中 CO₂ 和 N₂O 通量均表现为排放,其平均排放通量为 CS>CGS>CK>CMS;CH₄ 通量表现吸收,其平均排

放通量为 CK>CGS>CS>CMS。

(2)玉米秸秆不同还田方式下,小麦生长季温室气体的排放总量也不同,且不同处理间差异显著($P<0.05$)。其中 CH₄ 的吸收总量为 CK>CGS>CS>CMS;CO₂ 和 N₂O 排放总量均为 CS>CGS>CK>CMS。

(3)从温室气体综合增温潜势(GWP)来看,由秸秆不同还田方式仅还田环节产生的 GWP 在 20、100 年和 500 年 3 个时间尺度上,均表现为:CS>CGS>CK>CMS,也就是说秸秆直接还田,显著增加麦田温室气体对全球增温潜势(GWP)的影响,其次是玉米秸秆过腹还田方式,而秸秆-菌渣还田则降低了麦田对全球增温潜势的影响。从减少农田温室气体排放和综合增温潜势出发,推荐秸秆-菌渣还田模式,在该模式下,麦田温室气体的 GWP 最小。

参考文献:

- [1] Flessa H, Ruser R, Dörsch P, et al. Integrated evaluation of greenhouse gas emissions (CO₂, CH₄, N₂O) from two farming systems in southern Germany[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2002, 91: 175-189.
- [2] Ball B C, Scott A, Parker J P. Field N₂O, CO₂ and CH₄ fluxes in relation to tillage, compaction and soil quality in Scotland[J]. *Soil & Tillage Research*, 1999, 53: 29-39.
- [3] 贺京,李涵茂,方丽,等. 秸秆还田对中国农田土壤温室气体排放的影响[J]. 中国农学通报, 2011, 27(20): 246-250.
HE Jing, LI Han-mao, FANG Li, et al. Influence of straw application on agricultural greenhouse gas emissions in China[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(20): 246-250. (in Chinese)
- [4] 路文涛,贾志宽,张鹏,等. 秸秆还田对宁夏旱作农田土壤活性有机碳及酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(3): 522-528.
LU Wen-tao, JIA Zhi-kuan, ZHANG Peng, et al. Effects of straw returning on soil labile organic carbon and enzyme activity in semi-arid areas of southern Ningxia, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(3): 522-528. (in Chinese)
- [5] 唐海明,汤文光,肖小平,等. 中国农田固碳减排发展现状及其战略对策[J]. 生态环境学报, 2010, 19(7): 1755-1759.
TANG Hai-ming, TANG Wen-guang, XIAO Xiao-ping, et al. Current situation and countermeasures of China's C sequestration and mitigation[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(7): 1755-1759. (in Chinese)
- [6] 赵鹏,陈阜. 秸秆还田配施化学氮肥对冬小麦氮效率和产量的影响[J]. 作物学报, 2008, 34(6): 1014-1018.
ZHAO Peng, CHEN Fu. Effects of straw mulching plus nitrogen fertilizer on nitrogen efficiency and grain yield in winter wheat[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2008, 34(6): 1014-1018. (in Chinese)
- [7] 慕平,张恩和,王汉宁,等. 连续多年秸秆还田对玉米耕层土壤理化性状及微生物量的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(5): 81-85.
MU Ping, ZHANG En-he, WANG Han-ning, et al. Effects of continuous returning straw to maize tillth soil on chemical character and microbial

- biomass[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(5):81–85. (in Chinese)
- [8] Jacinthe P A, Lal R, Kimble J M. Carbon budget and seasonal carbon dioxide emission from a central Ohio Luvisol as influenced by wheat residue amendment[J]. *Soil and Tillage Research*, 2002, 67:147–157.
- [9] 李成芳, 寇志奎, 张枝盛, 等. 秸秆还田对免耕稻田温室气体排放及土壤有机碳固定的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(11):2362–2367.
- LI Cheng-fang, KOU Zhi-kui, ZHANG Zhi-sheng, et al. Effects of rape residue mulch on greenhouse gas emissions and carbon sequestration from no-tillage rice fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(11):2362–2367. (in Chinese)
- [10] 孟 梦, 吕成文, 李玉娥, 等. 添加生物炭对华南稻田 CH_4 和 N_2O 排放的影响[J]. 中国农业气象, 2013, 34(4):396–402.
- MENG Meng, LV Cheng-wen, LI Yu-e, et al. Effect of biochar on CH_4 and N_2O emissions from early rice field in south China[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2013, 34(4):396–402. (in Chinese)
- [11] 杨 旭, 兰 宇, 孟 军, 等. 秸秆不同还田方式对旱地棕壤 CO_2 排放和土壤碳库管理指数的影响[J]. 生态学报, 2015, 34(3):805–809.
- YANG Xu, LAN Yu, MENG Jun, et al. Effects of different stover-incorporation ways on CO_2 emission in dry land brown soil and soil carbon pool management index[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(3):805–809. (in Chinese)
- [12] Ma J, Li X L, Xu H, et al. Effects of nitrogen fertilizer 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.
- [13] 蒋静艳, 黄 耀, 宗良纲. 水分管理与秸秆施用对稻田 CH_4 和 N_2O 排放的影响[J]. 中国环境科学, 2003, 23(5):552–556.
- JIANG Jing-yan, HUANG Yao, ZONG Liang-gang. Influence of water controlling and straw application on CH_4 and N_2O emissions from rice field[J]. *China Environmental Science*, 2003, 23(5):552–556. (in Chinese)
- [14] 王改玲, 郝明德, 陈德立. 秸秆还田对灌溉玉米田土壤反硝化及 N_2O 排放的影响[J]. 植物营养与肥科学报, 2006, 12(6):840–844.
- WANG Gai-ling, HAO Ming-de, CHEN De-li. Effect of stubble incorporation and nitrogen fertilization on denitrification and nitrous oxide emission in an irrigated maize soil[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(6):840–844. (in Chinese)
- [15] 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 straw addition on denitrification in upland soil[J]. *Review of China Agricultural Science and Technology*, 2001, 3(6):47–50. (in Chinese)
- [16] Singh S N, Kulshreshtha K, Agnihotri S. Seasonal dynamics of methane emission from wetlands[J]. *Chemosphere-Global Change Science*, 2000, 2(1):39–46.
- [17] 黄小林. 菌渣还田对农田温室气体排放的影响研究[D]. 成都:四川农业大学, 2012:17–38.
- HUANG Xiao-lin. Effects of mushroom residues on GHS emissions from soils under rice-wheat rotation[D]. Chengdu:Sichuan Agricultural University, 2012:17–38. (in Chinese)
- [18] Zou J W, Huang Y, Lu Y Y, et al. Direct emission factor for N_2O from rice-winter wheat rotation systems in southeast China[J]. *Atmospheric Environment*, 2005, 39:4755–4765.
- [19] 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):2208–2214.
- LI Xin-hua, ZHU Zhen-lin, DONG Hong-yun, et al. Effects of different returning methods of straws on greenhouse gas emissions and carbon sequestration from maize fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(11):2208–2214. (in Chinese)
- [20] 田慎重, 宁堂原, 李增嘉. 不同耕作措施对华北地区麦田 CH_4 吸收通量的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(2):541–548.
- TIAN Shen-zhong, NING Tang-yuan, LI Zeng-jia. Effect of CH_4 uptake flux under different tillage systems in wheat field in the North China Plain[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(2):541–548. (in Chinese)
- [21] 谢义琴, 张建峰, 姜慧敏, 等. 不同施肥措施对稻田土壤温室气体排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(3):578–584.
- XIE Yi-qin, ZHANG Jian-feng, JIANG Hui-min, et al. Effects of different fertilization practices on greenhouse gas emissions from paddy soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(3):578–584. (in Chinese)
- [22] IPCC. Changes in atmospheric constituents and in radioactive forcing[C]//Climate change:The physical science basis. 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, 2007.
- [23] 于贵瑞. 全球变化与陆地生态系统碳循环和碳蓄积[M]. 北京:气象出版社, 2003.
- YU Gui-rui. Global change, carbon cycle and storage in terrestrial ecosystem[M]. Beijing:Meteorological Press, 2003. (in Chinese)
- [24] 展 茗, 曹凑贵, 汪金平, 等. 复合稻田生态系统温室气体交换及其综合增温潜势[J]. 生态学报, 2008, 28(11):5461–5468.
- ZHAN Ming, CAO Cou-gui, WANG Jin-ping, et al. Greenhouse gases exchange of integrated paddy field and their comprehensive global warming potentials[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(11):5461–5468. (in Chinese)