

引用格式:

何燕, 高小叶, 张涛, 李期佳, 赵秋梅. 绿肥还土对黄壤和石灰土温室气体排放的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2022, 48(6): 699–705.

HE Y, GAO X Y, ZHANG T, LI Q J, ZHAO Q M. Effects of green manure returning soil on greenhouse gas emission from yellow soil and limestone soil[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2022, 48(6): 699–705.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



绿肥还土对黄壤和石灰土温室气体排放的影响

何燕¹, 高小叶^{1,2*}, 张涛³, 李期佳⁴, 赵秋梅³

(1.贵州民族大学生态环境工程学院, 贵州 贵阳 550025; 2.农业农村部都市农业重点实验室, 上海 200240; 3.贵州大学新农村发展研究院, 贵州 贵阳 550025; 4.贵阳市乌当区农业农村局, 贵州 贵阳 550025)

摘要: 以贵州典型黄壤和石灰土进行盆栽试验, 设置对照(不种绿肥)、光叶紫花苕、紫花苜蓿、黑麦草和油菜 5 个处理, 探究种植不同绿肥还土后贵州典型土壤 CO₂、CH₄ 排放通量特征及其与环境影响因子(温度、水分)的关系。结果表明: 与对照相比, 绿肥处理增加了土壤 CO₂ 排放, 黄壤的 CO₂ 平均排放通量和累积排放总量大于石灰土的, 而石灰土的 CH₄ 平均排放通量和总累积排放量大于黄壤的; 绿肥处理提高了全球增温潜势(GWP), 黄壤和石灰土均以黑麦草处理的 GWP 最高, 其次为油菜绿肥的, 表明非豆科绿肥对土壤 GWP 的贡献大于豆科绿肥的; 土壤类型、绿肥及其交互作用均对 CO₂ 排放通量具有显著影响, 且土壤水分为土壤 CO₂ 排放的主要驱动因子, CH₄ 排放通量仅受土壤类型影响。可见, 在黄壤和石灰土中种植绿肥还土能增加 CO₂ 排放, 对提升土壤肥力和生产力具有积极作用。

关键词: 黄壤; 石灰土; 光叶紫花苕; 紫花苜蓿; 黑麦草; 油菜; 绿肥; 二氧化碳; 甲烷; 排放通量; 全球增温潜势

中图分类号: S142; S154.1

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2022)06-0699-07

Effects of green manure returning soil on greenhouse gas emission from yellow soil and limestone soil

HE Yan¹, GAO Xiaoye^{1,2*}, ZHANG Tao³, LI Qijia⁴, ZHAO Qiumei³

(1.College of Ecological and Environmental Engineering, Guizhou Minzu University, Guiyang, Guizhou 550025, China; 2.Key Laboratory of Urban Agriculture, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai 200240, China; 3.Institute of New Rural Development, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China; 4.Agriculture and Rural Bureau of Wudang District, Guiyang, Guizhou 550025, China)

Abstract: This study was set to explore the response of CO₂ and CH₄ emission fluxes and its environmental factors (temperature and moisture) to green manure incorporation on typical yellow soil and limestone soil in Guizhou Province. We used a pot experiment with five treatments, including control(no green manure), *Vicia villosa*, *Medicago sativa*, *Lolium perenne* and *Brassica napus*. The results showed that green manure treatments increased soil CO₂ emission compared with the control treatment, and the average CO₂ flux and cumulative CO₂ emission were higher in yellow soil than those in limestone soil. While the average CH₄ flux and cumulative CH₄ emission were higher in limestone soil than those in yellow soil. Green manure treatments increased global warming potential(GWP). *Lolium perenne* treatment had

收稿日期: 2021-08-19

修回日期: 2022-11-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(31960636); 贵州省基础研究计划项目(黔科合基础[2018]1076、[2020]1Y118); 农业农村部都市农业重点实验室开放基金项目(UA201704)

作者简介: 何燕(1996—), 女, 四川乐山人, 硕士研究生, 主要从事农田养分循环研究, heyang622@163.com; *通信作者, 高小叶, 博士, 副教授, 主要从事农田养分循环研究, gaoxiaoye1220@163.com

the highest GWP in both yellow soil and limestone soil, followed by *Brassica napus* green manure treatment, indicating that the contribution of non-legume green manure to soil GWP was greater than that of legume green manure. Soil type, green manure and their interactions had significant effects on CO₂ emission flux, and soil CO₂ emission was mainly driven by soil moisture, while CH₄ emission flux was only affected by soil type. Visibility, green manure incorporation in yellow soil and limestone soil could increase CO₂ emission, which had a positive effect on improving soil fertility and productivity.

Keywords: yellow soil; limestone soil; *Vicia villosa*; *Medicago sativa*; *Lolium perenne*; *Brassica napus*; green manure; carbon dioxide; methane; emission flux; global warming potential

CO₂ 是最主要的温室气体, 对温室效应贡献率达 56%, 而 100 年尺度上单位质量 CH₄ 的全球增温潜势(GWP)是 CO₂ 的 28 倍^[1-2]。GWP 的实质是将某种温室气体在一定时间范围内产生的增温效应折换成等效的 CO₂, 其作为一种相对性的指标, 可定量评估温室气体对全球变暖的长期贡献。大气中每年有 5%~20% 的 CO₂、15%~30% 的 CH₄ 来源于农田土壤^[3], 耕作、施肥、种植方式等对农业温室气体排放具有显著影响^[4-5]。绿肥作为养分丰富的优质生物肥源, 可提高土壤养分含量, 并在化肥减施条件下提高后茬作物产量^[6], 具有替代部分化肥的潜力^[7]; 另一方面, 绿肥还田可改变土壤理化性质, 进而影响土壤 CO₂ 和 CH₄ 的排放^[8]。

目前, 有关绿肥还田对土壤温室气体排放的影响开展了广泛研究。与不施绿肥相比, 翻压光叶苕子(*Vicia villosa*)和黑麦草(*Lolium perenne*)可显著提高紫色土 CO₂ 排放, 且存在种间显著差异, 豆科绿肥比禾本科绿肥排放量高 8.87%~10.85%^[2]。与夏闲田相比, 种植长武怀豆(*Changwu soybean*)和黑麦草能增加黄土高原旱作雨养农业区黏壤质黑垆土 CO₂ 排放, 但对土壤 CH₄ 通量无显著影响^[9]。与休耕处理相比, 种植翻压大麦(*Barley*)和毛叶苕子(*Hairy vetch*)能显著增加旱地壤土 CO₂ 排放, 降低净全球增温潜势, 而对 CH₄ 累积排放无显著影响^[10]。种植紫花苜蓿后, 黄土高原雨养农业区黄绵土总体表现为 CO₂ 排放和 CH₄ 的吸收, 随苜蓿种植年限的增加 GWP 呈现出降低的趋势^[11]。与不施绿肥秸秆相比, 添加绿肥秸秆能显著增加旱地红壤 CO₂ 排放, 促进 CH₄ 吸收^[12]。绿肥还田后, 因土壤类型不同, CO₂、CH₄ 排放响应不同。农田系统中黄壤的 CO₂ 排放量最大, 红壤的次之, 盐碱化土的最小^[13]。森林系统中土壤类型对 CH₄ 排放影响显著, CH₄ 平均排放量表现为黑土、棕壤、其他土壤的依次减少^[14], 而不同耕作管理系统中土壤类型对 CH₄ 排放无显著影响^[15]。由此

可见, 因研究区域、绿肥类型、土地利用与管理方式等复杂多样, 绿肥还田对温室气体排放的影响尚不明确, 缺少对区域土壤类型间不同绿肥类型还田下 CO₂、CH₄ 等温室气体响应的研究。

贵州石漠化现象严重, 土壤养分含量低, 耕性不强, 易水土流失, 保水保肥能力相对较差, 导致作物产量不高^[16]。冬闲种植绿肥还田可有效改善土壤质量, 减少养分淋溶。本研究中, 选择贵州典型黄壤和石灰土种植绿肥还土, 通过盆栽试验, 探究不同绿肥处理下土壤 CO₂ 和 CH₄ 的排放通量情况及其与环境因子之间的关系, 以期为该地区黄壤与石灰土土壤资源有效利用及培肥提供依据。

1 试验区概况与方法

1.1 试验区概况

试验地位于贵州省贵阳市花溪区贵州大学试验场(106°66' E、26°45' N), 海拔高度 1153.24 m。该地区属于亚热带高原季风湿润气候^[17], 无霜期长, 雨量充沛, 年均气温为 15.3℃, 年均降水量为 1178.1 mm, 年均相对湿度为 77%。

1.2 试验设计

试验于 2019 年 11 月至 2020 年 8 月进行。采用盆栽试验, 盆栽容器为内径 20 cm, 高 10 cm 的带底塑料盆, 装土深度为 7 cm。试验共设 5 个处理, 分别为不种绿肥的对照和分别种植光叶紫花苕(*Vicia villosa*)、紫花苜蓿(*Medicago sativa*)、黑麦草(*Lolium perenne*)、油菜(*Brassica napus*)的处理。每个处理 4 个重复, 共 20 盆, 随机排列。绿肥于 2019 年 11 月采用撒播方式播种。光叶紫花苕、紫花苜蓿、黑麦草、油菜播种量分别为 8.0、2.7、3.0、3.0 g/m²。绿肥种植至 2020 年 4 月末还土, 还土前将绿肥地上部剪成小于 2 cm 的碎条, 再与整盆土壤充分混合。供试土壤类型为贵州典型黄壤和石灰土。

黄壤取自贵安新区马场镇玉米地 0~20 cm 耕层土壤, 其成土母质为砂页岩; 石灰土取自贵阳市花溪区孟关镇玉米地 0~20 cm 耕层土壤, 其成土母质为石灰岩。土壤基本理化性质: 黄壤 pH 5.21, 有机质、全氮、全磷分别为 36.53、1.51、0.91 g/kg, 速效磷 7.36 mg/kg; 石灰土 pH 7.59, 有机质、全氮、全磷分别为 25.63、1.81、0.82 g/kg, 速效磷 7.77 mg/kg。

1.3 气体监测

使用 LGR 便携式温室气体分析仪(LGR-UGGA, ABB)测定土壤 CO₂ 和 CH₄ 排放通量, 同时使用仪器自带的温湿度探针测定深度 5 cm 处土壤的温度和体积含水量, 分别在 6、7、8 月进行气体监测, 每月测定 2~3 次, 大概每 10 d 测定 1 次, 遇强降雨天气则推迟测定, 实际监测日期为 6 月 4、16、26 日, 7 月 6、17 日, 8 月 4、14、24 日, 测定时间为 09:00~11:00。采用插值法^[18]计算温室气体累积排放量, 其中, GWP 按照 100 年时间尺度上单位质量 CH₄ 的 GWP 为 CO₂ 的 28 倍计算^[2]。

1.4 数据处理与分析

运用 R 软件, 采用最小显著差数检验法(LSD

法)和 *t* 检验进行处理间多重比较和不同土壤类型间的比较; 运用 SPSS 26.0, 采用双因素方差分析土壤、绿肥类型及其交互作用对 CO₂、CH₄ 通量的影响及采用皮尔逊相关性分析 CO₂、CH₄ 通量与深度 5 cm 处土壤温度和体积含水量的相关性; 运用 Excel 2019 绘图。

2 结果与分析

2.1 供试土壤 CO₂ 和 CH₄ 排放通量

从表 1 可知, 黄壤和石灰土 CO₂ 排放通量随绿肥还土时间的变化趋势相似, 整体均呈现下降趋势, CO₂ 排放通量最大值均出现在 6 月; 黄壤各处理 CO₂ 排放通量变化范围为 0.18~9.86 μmol/(m²·s); 石灰土各处理 CO₂ 排放通量变化范围为 0.11~3.39 μmol/(m²·s)。绿肥还土后黄壤和石灰土 CH₄ 排放通量变化平缓; 黄壤各处理 CH₄ 排放通量无明显规律, 排放通量变化范围为 -0.19~0.14 nmol/(m²·s); 石灰土各处理 CH₄ 排放通量变化范围为 -0.01~0.67 nmol/(m²·s), 除对照和光叶紫花苕外, CH₄ 排放通量最大值出现在 7 月下旬, 黑麦草处理的最高, 为 0.67 nmol/(m²·s)。

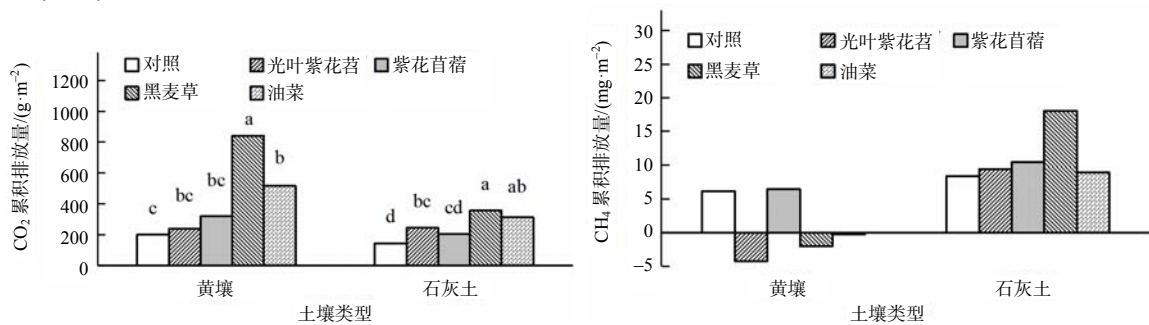
表 1 绿肥还土后黄壤和石灰土 CO₂ 和 CH₄ 的排放通量

Table 1 CO₂ and CH₄ emission fluxes of yellow soil and limestone soil after green manure returning soil

处理	土壤类型	CO ₂ 排放通量/(μmol·m ⁻² ·s ⁻¹)								均值
		06-04	06-16	06-26	07-06	07-17	08-04	08-14	08-24	
对照	黄壤	(1.41±0.52)b	(1.59±0.50)b	(0.50±0.04)c	(0.49±0.02)Ab	(0.41±0.03)Ab	(0.35±0.03)Ab	(0.46±0.09)b	(0.27±0.01)Ab	(0.66±0.08)c
	石灰土	(0.86±0.15)b	(1.16±0.43)b	(0.39±0.07)c	(0.30±0.04)Bc	(0.25±0.01)Bb	(0.14±0.05)Bb	0.74±0.17	(0.11±0.01)Bb	(0.47±0.05)c
光叶紫花苕	黄壤	(2.10±0.61)ab	(1.68±0.32)b	(0.64±0.06)c	(0.59±0.02)b	(0.52±0.10)b	(0.39±0.05)Ab	(0.65±0.25)b	(0.27±0.03)b	(0.82±0.14)c
	石灰土	(1.71±0.26)ab	(2.29±0.48)ab	(0.75±0.12)bc	(0.61±0.04)ab	(0.35±0.04)b	(0.17±0.03)Bb	0.78±0.27	(0.15±0.05)b	(0.81±0.05)b
紫花苜蓿	黄壤	(2.34±0.89)ab	(3.71±1.11)b	(0.74±0.09)bc	(0.63±0.10)b	(0.35±0.06)b	(0.23±0.03)b	(0.64±0.29)b	(0.18±0.02)b	(1.04±0.25)bc
	石灰土	(2.10±0.39)ab	(1.35±0.36)b	(0.68±0.08)bc	(0.46±0.04)bc	(0.28±0.04)b	(0.18±0.01)b	1.11±0.35	(0.16±0.02)b	(0.72±0.09)bc
黑麦草	黄壤	(4.21±1.36)a	(9.86±4.07)a	(1.59±0.17)Aa	(1.43±0.06)Aa	(1.15±0.12)a	(0.84±0.08)Aa	(2.37±1.10)a	(0.48±0.03)Aa	(2.58±0.59)a
	石灰土	(1.55±0.31)ab	(3.39±0.82)a	(0.98±0.11)Bab	(0.78±0.07)Ba	(0.91±0.37)b	(0.33±0.07)Ba	1.18±0.08	(0.17±0.02)Bb	(1.12±0.06)a
油菜	黄壤	(4.29±0.96)a	(3.64±1.09)b	(0.99±0.09)b	(1.36±0.20)Aa	(1.34±0.18)a	(0.74±0.16)Aa	(1.83±0.45)ab	(0.52±0.06)Aa	(1.78±0.07)Aab
	石灰土	(2.40±0.80)a	(1.45±0.16)b	(1.23±0.46)a	(0.65±0.19)Bab	(1.70±0.42)a	(0.17±0.03)Bb	1.20±0.49	(0.26±0.02)Ba	(1.14±0.19)Ba
处理	土壤类型	CH ₄ 排放通量/(nmol·m ⁻² ·s ⁻¹)								均值
		06-04	06-16	06-26	07-06	07-17	08-04	08-14	08-24	
对照	黄壤	0.02±0.08	(0.07±0.05)ab	0.06±0.02	0.00±0.04	0.06±0.05	0.11±0.04	0.00±0.05	0.03±0.03	0.04±0.01
	石灰土	0.04±0.06	0.11±0.04	0.09±0.03	0.08±0.03	0.04±0.11	0.05±0.06	0.08±0.03	0.09±0.03	0.07±0.02
光叶紫花苕	黄壤	0.03±0.09	(-0.03±0.06)ab	-0.07±0.12	-0.10±0.11	-0.08±0.09	0.07±0.06	-0.19±0.18	0.02±0.03	-0.05±0.08
	石灰土	0.07±0.02	0.04±0.04	0.06±0.03	0.22±0.14	0.11±0.05	0.04±0.07	0.11±0.03	0.03±0.03	0.09±0.03
紫花苜蓿	黄壤	0.10±0.07	(0.14±0.08)a	0.00±0.06	0.08±0.06	0.03±0.09	0.03±0.05	0.04±0.08	0.04±0.04	0.06±0.03
	石灰土	0.06±0.03	0.13±0.04	0.15±0.03	0.07±0.03	0.10±0.07	0.09±0.07	0.08±0.05	0.01±0.03	0.09±0.01
黑麦草	黄壤	0.02±0.10	(-0.12±0.08)b	-0.05±0.10	0.00±0.11	-0.05±0.10	0.08±0.05	0.02±0.08	-0.06±0.09	-0.02±0.07
	石灰土	0.05±0.04	0.08±0.01	0.13±0.05	0.24±0.10	0.67±0.66	0.01±0.05	0.08±0.04	-0.01±0.04	0.19±0.12
油菜	黄壤	0.12±0.08	(-0.01±0.06)ab	0.06±0.07	-0.12±0.13	-0.07±0.09	0.08±0.05	-0.04±0.15	-0.02±0.07	-0.01±0.05
	石灰土	0.06±0.03	0.06±0.02	0.11±0.02	0.04±0.05	0.22±0.14	0.03±0.05	0.06±0.04	0.05±0.03	0.08±0.03

同一处理不同大写字母示土壤类型间的差异有统计学意义($P<0.05$); 同一土壤类型不同小写字母示处理间的差异有统计学意义($P<0.05$)。

从表1还可知,与对照相比,所有绿肥处理均提高了土壤CO₂平均排放通量;黄壤中,黑麦草、油菜、紫花苜蓿、光叶紫花苜、对照处理的平均CO₂排放通量依次减小,绿肥处理较对照分别提高291%、170%、58%、24%,且黑麦草和油菜处理的显著($P<0.05$)高于对照的;石灰土中,除紫花苜蓿处理外,其他绿肥处理的CO₂平均排放通量均显著($P<0.05$)高于对照的;油菜、黑麦草、光叶紫花苜、紫花苜蓿、对照处理的CO₂平均排放通量依次减小,绿肥处理较对照分别提高143%、138%、72%、53%。2种土壤类型CO₂平均排放通量均表现为非豆科绿肥的大于豆科绿肥的。各绿肥处理CH₄平均排放通量与对照间的差异均无统计学意义($P>0.05$);CH₄平均排放通量以石灰土黑麦草的最大,为0.19 nmol/(m²·s),以黄壤光叶紫花苜吸收的最多,为-0.05 nmol/(m²·s)。



同一土壤类型图柱上不同小写字母示处理间的差异有统计学意义($P<0.05$)。

图1 绿肥还土后黄壤和石灰土的CO₂和CH₄累积排放量

Fig.1 Cumulative CO₂ and CH₄ emissions of yellow soil and limestone soil after green manure returning soil

从表2可知,绿肥处理均提高了土壤GWP;黄壤中,黑麦草、油菜、紫花苜蓿、光叶紫花苜、对照处理的GWP依次减小,绿肥处理分别是对照的4.20、2.57、1.59、1.19倍,其中,黑麦草和油菜处理显著($P<0.05$)高于对照处理的;石灰土中,

表2 绿肥还土后黄壤和石灰土的全球增温潜势

处理	全球增温潜势	
	黄壤	石灰土
对照	(2007.14±221.30)c	(1444.05±199.06)d
光叶紫花苜	(2384.45±375.62)bc	(2444.55±165.25)bc
紫花苜蓿	(3191.57±726.67)bc	(2045.27±244.94)cd
黑麦草	(8420.26±2017.64)a	(3570.02±300.66)a
油菜	(5165.15±334.72)b	(3123.40±406.98)ab

同列不同小写字母示处理间的差异有统计意义($P<0.05$)。

2.2 CO₂和CH₄的累积排放量和全球增温潜势

从图1可知,与对照相比,黄壤和石灰土中各绿肥处理均增加了土壤CO₂累积排放量,其中,黄壤中黑麦草和油菜绿肥处理的显著($P<0.05$)增加CO₂累积排放量,石灰土中除紫花苜蓿处理外,其余绿肥处理均显著($P<0.05$)增加CO₂累积排放量;除石灰土的油菜处理外,黄壤和石灰土黑麦草处理CO₂累积排放量显著高于其他处理的。各处理CH₄累积排放量间的差异均无统计学意义($P>0.05$);除黄壤的光叶紫花苜、黑麦草、油菜处理表现为CH₄吸收外,其余黄壤的处理和石灰土的处理均表现为CH₄排放;黄壤的光叶紫花苜绿肥处理比其他绿肥处理吸收了更多的CH₄,但与其他处理间的差异均无统计学意义($P>0.05$)。

黑麦草、油菜、光叶紫花苜、紫花苜蓿、对照处理的GWP依次减小,绿肥处理分别是对照的2.47、2.16、1.69、1.42倍,除紫花苜蓿处理外,其他绿肥处理的GWP均显著($P<0.05$)高于对照的;黄壤和石灰土中,均以黑麦草处理下产生的GWP最高,其次是油菜处理的,非豆科绿肥对土壤GWP贡献大于豆科绿肥的。

2.3 CO₂和CH₄排放的影响因子

从表3可知,土壤类型和绿肥及其交互作用均对CO₂排放有显著影响($P<0.05$),这表明绿肥对CO₂排放的影响与土壤类型密切相关;土壤和绿肥类型的交互作用对CH₄排放无显著影响($P>0.05$),但土壤类型对CH₄排放影响显著($P<0.01$),即不同土壤类型的CH₄排放通量间的差异有统计学意义。

表 3 土壤和绿肥类型及其交互作用的双因素方差分析结果

方差来源	CO ₂ 排放通量方差分析结果			CH ₄ 排放通量方差分析结果		
	df	F	P	df	F	P
土壤类型	1	13.98	<0.01	1	7.899	<0.01
绿肥	4	11.36	<0.01	4	0.380	0.82
土壤类型×绿肥	4	3.32	0.02	4	0.959	0.44

从表 4 可知,黄壤和石灰土 CO₂ 排放通量与土壤温度呈正相关关系($P>0.05$),与土壤含水量呈显著($P<0.05$)正相关关系,表明 CO₂ 排放通量主要受土壤含水量的影响,且随土壤含水量的增加而增加;黄壤 CH₄ 排放通量与土壤温度呈正相关($P>0.05$),与土壤含水量呈显著($P<0.05$)负相关关系,而石灰土 CH₄ 排放通量与土壤温度和土壤含水量均无显著($P>0.05$)相关关系。

表 4 绿肥还土后黄壤和石灰土的 CO₂ 和 CH₄ 排放通量与深度 5 cm 处土壤的温度和含水量的相关系数

排放通量	相关系数			
	黄壤温度	黄壤含水量	石灰土温度	石灰土含水量
CO ₂	0.27	0.77*	0.06	0.45*
CH ₄	0.34	-0.45*	-0.09	0.35

“*”示显著($P<0.05$)相关性。

3 结论与讨论

绿肥富含碳、氮养分,还田腐解后可为土壤微生物提供充足的碳、氮源,为土壤微生物异养呼吸提供更多底物,增强土壤微生物活性,进而促进土壤 CO₂ 排放^[19]。本研究中,绿肥还土促进旱地土壤 CO₂ 排放,与黄土高原旱作雨养农业区^[20]、渭北旱塬区^[21]的绿肥还田对旱地土壤 CO₂ 排放影响研究的结论一致。杨世梅等^[22]研究发现,玉米秸秆作绿肥覆盖还土有促进 CO₂ 累积排放趋势。田亚男等^[23]研究发现,外源碳的输入显著促进土壤 CO₂ 累积排放量。外源碳的输入量取决于绿肥生物量和养分含量。与冬闲处理相比,绿肥处理拥有较高的生物量,绿肥生物量越大,释放到土壤中的养分越多^[24]。绿肥施入土壤后 CO₂ 排放量增加,其主要源于土壤有机碳的矿化和无机碳的溶解释放^[25]。本研究中,非豆科绿肥 CO₂ 平均排放通量、累积排放量和 GWP

均大于豆科绿肥的,而张学良等^[2]和 LEE 等^[10]研究发现,豆科绿肥 CO₂ 累积排放量大于禾本科绿肥的,其原因可能是低 C/N 比豆科绿肥(光叶紫花苕和紫花苜蓿)前期腐解通量较快,CO₂ 排放提前,而非豆科绿肥黑麦草和油菜腐解较慢所致。

黄壤中,除紫花苜蓿处理外,各绿肥处理均表现为 CH₄ 吸收,而石灰土绿肥处理均促进土壤 CH₄ 排放,但各绿肥处理间土壤的 CH₄ 排放差异无统计学意义($P>0.05$),与 SANZ-COBENA 等^[19]、LEE 等^[10]的研究结果一致。LEE 等^[26]研究发现,绿肥施用显著增加 CH₄ 排放。谭英爱等^[24]研究发现,与施化肥相比,施用绿肥 CH₄ 排放量增加 5.8 倍;而 10 d 以上的绿肥需氧预消化可减少 60% 以上的 CH₄ 季节排放量^[27]。可见,绿肥还田对 CH₄ 排放的影响存在差异:绿肥还田后土壤中易降解有机质增加,随绿肥快速分解,田间氧化还原电位下降加快,并直接导致 CH₄ 产生和排放通量增加^[28];绿肥还田能增加产甲烷菌和甲烷氧化菌的丰度^[29],促进甲烷氧化还原过程,对 CH₄ 排放有促进作用;绿肥还田腐解后期,低氮量促进了土壤 CH₄ 氧化,强化了土壤对 CH₄ 的吸收通量^[30],从而降低 CH₄ 排放。

本研究中,CO₂ 排放通量与土壤温度和含水量呈正相关关系,这与前人^[31]的研究结果一致。土壤温度和含水量是影响土壤碳排放的主要因素,主要通过影响土壤微生物活性和数量,改变土壤微生物代谢和土壤有机碳分解^[32]及气体在土壤中的扩散通量来影响土壤 CO₂ 排放^[33]。黄壤 CH₄ 排放通量主要受土壤含水量影响,而石灰土 CH₄ 与土壤温度和含水量无显著相关性。土壤温度和含水量对 CH₄ 通量的影响主要通过气体的扩散影响甲烷和氧对微生物的供应,并通过影响微生物的活性进而影响甲烷氧化^[32]。

本研究中,CO₂ 平均排放通量和累积排放量均表现为黄壤大于石灰土,这与刘芳等^[33]对黔中黄壤和石灰土 CO₂ 的释放特征研究的结果一致。土壤

CO₂排放与土壤有机质含量具有正相关关系^[34],即有机质含量增加,为土壤微生物呼吸提供更多底物,进而促进土壤CO₂排放。田亚男等^[23]研究发现,土壤CO₂排放为高有机碳含量的黄棕壤高于低有机碳含量的紫色土;ZHANG等^[18]研究发现,高有机质沼泽草甸土高于低有机质高寒草甸土。本研究的供试黄壤有机质质量分数(36.53 g/kg)高于石灰土的(25.63 g/kg),从而黄壤CO₂平均排放通量和累积排放量均大于石灰土的。

黄科瑞等^[35]以喀斯特地区黄壤和石灰土为研究对象,探究不同土地利用方式对CH₄排放影响发现,旱地石灰土CH₄年均排放通量明显高于黄壤的,且石灰土土壤最大CH₄氧化速率值是黄壤的2倍以上,具有更高的氧化潜力。本研究中,绿肥还土后石灰土的CH₄平均排放通量和总累积排放量均高于黄壤的,这可能与土壤初始pH和有机质含量相关。土壤pH主要通过影响产甲烷菌和甲烷氧化菌活性而影响CH₄排放。研究发现,产甲烷菌受土壤pH变化影响显著,通常在pH 6~8的土壤中更活跃^[36],而甲烷氧化菌对土壤pH的敏感性低于产甲烷菌,其对酸性条件(pH 5.0~6.5)更为敏感^[37];CH₄是有机质厌氧分解的最终产物,有机质含量较高的土壤CH₄排放较低^[38]。这是由于土壤有机质可为甲烷氧化菌提供碳源,同时可通过改变土壤的透气性、含水量等因素间接促进土壤CH₄的吸收^[39]。

本研究结果表明,土壤类型、绿肥及其交互作用均对CO₂排放通量具有显著影响,而CH₄排放通量仅受土壤类型影响。CO₂排放的增加,是土壤肥力与生产力提高的标志。绿肥还土为土壤带来新鲜有机物料,对提升贵州黄壤和石灰土微生物活性和土壤质量具有积极作用,有助于耕地保持健康的生产能力。

参考文献:

- [1] 翟胜,高宝玉,王巨媛,等. 农田土壤温室气体产生机制及影响因素研究进展[J]. 生态环境, 2008, 17(6): 2488-2493.
- [2] 张学良,张宇亭,刘瑞,等. 绿肥不同还田方式对土壤温室气体排放的影响[J]. 草业学报, 2021, 30(5): 25-33.
- [3] MELILLO J M, STEUDLER P A, ABER J D, et al. Soil warming and carbon-cycle feedbacks to the climate system[J]. Science, 2002, 298: 2173-2176.
- [4] 马晓玲,吴洪生,杨光耀,等. 种植方式对玉米田温室气体排放及产量的影响[J]. 环境科学与技术, 2020, 43(1): 71-77.
- [5] 张黛静,胡晓,马建辉,等. 耕作和培肥对豫中区小麦-玉米轮作系统土壤氮平衡和温室气体排放的影响[J]. 应用生态学报, 2021, 32(5): 1753-1760.
- [6] 张树杰,陈灿,张红升,等. 绿肥油菜研究进展[J]. 安徽农业科学, 2020, 48(15): 24-27.
- [7] 李虹桥,李梦颖,杨云飞,等. 豆科绿肥覆盖还田对春玉米产量和氮素吸收利用的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2019, 45(3): 243-247.
- [8] MANCINELLI R, MARINARI S, FELICE V D, et al. Soil property, CO₂ emission and aridity index as agroecological indicators to assess the mineralization of cover crop green manure in a Mediterranean environment[J]. Ecological Indicators, 2013, 34: 31-40.
- [9] 张祺. 填闲种植对冬小麦田夏闲期土壤水分、温室气体排放及碳氮收支的影响[D]. 西安: 西北大学, 2018.
- [10] LEE H H, KIM S U, HAN H R, et al. Mitigation of global warming potential and greenhouse gas intensity in arable soil with green manure as source of nitrogen[J]. Environmental Pollution, 2021, 288(2): 117724.
- [11] 张耀全,邓长芳,罗珠珠,等. 黄土高原不同种植年限苜蓿地土壤温室气体排放特征[J]. 草业科学, 2020, 37(1): 30-40.
- [12] 伍玉鹏,刘田,彭其安,等. 氮肥配施下不同C/N作物残渣还田对红壤温室气体排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(10): 2053-2062.
- [13] 李寒冰,金晓斌,杨绪红,等. 不同农田管理措施对土壤碳排放强度影响的Meta分析[J]. 资源科学, 2019, 41(9): 1630-1640.
- [14] MORISHITA T, SAKATA T, TAKAHASHI M, et al. Methane uptake and nitrous oxide emission in Japanese forest soils and their relationship to soil and vegetation types[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2007, 53(5): 678-691.
- [15] MAUCIERI C, TOLOMIO M, MCDANIEL M D, et al. No-tillage effects on soil CH₄ fluxes: a meta-analysis[J]. Soil and Tillage Research, 2021, 212: 105042.
- [16] 魏全全,张萌,陈龙,等. 黄壤旱地豆科绿肥养分释放特征[J]. 草业科学, 2021, 38(1): 63-69.
- [17] 杨世梅,张涛,赵秋梅,等. 贵阳市不同栽培草地生态系统呼吸特征及其影响因子[J]. 草业科学, 2020, 37(11): 2211-2222.
- [18] ZHANG T, WANG G X, YANG Y, et al. Non-growing season soil CO₂ flux and its contribution to annual soil CO₂ emissions in two typical grasslands in the permafrost region of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. European Journal of Soil Biology, 2015, 71: 45-52.
- [19] SANZ-COBENAA, GARCIA-MARCO S, QUEMADA M, et al. Do cover crops enhance N₂O, CO₂ or CH₄

- emissions from soil in Mediterranean arable systems?[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 466/467: 164–174.
- [20] 薄晶晶. 长武怀豆和黑麦草绿肥腐解过程及其对农田土壤温室气体排放的影响[D]. 西安: 西北大学, 2018.
- [21] 李志鹏. 渭北旱塬填闲作物腐解过程及其对农田土壤碳收支的影响[D]. 西安: 西北大学, 2019.
- [22] 杨世梅, 何腾兵, 杨丽, 等. 秸秆与生物炭覆盖对土壤养分及温室气体排放的影响[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2022, 48(1): 75–81.
- [23] 田亚男, 张水清, 林杉, 等. 外加碳氮对不同有机碳土壤 N₂O 和 CO₂ 排放的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34(12): 2410–2417.
- [24] 谭英爱, 赵秋, 田秀平, 等. 冬绿肥覆盖翻压对土壤碳、氮含量的影响[J]. *河南农业科学*, 2020, 49(5): 81–87.
- [25] 于伟家, 李雪松, 陈竹君, 等. 氮肥对不同无机碳含量土壤二氧化碳释放的影响[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(8): 2493–2500.
- [26] LEE C H, PARK K D, JUNG K Y, et al. Effect of Chinese milk vetch(*Astragalus sinicus* L.) as a green manure on rice productivity and methane emission in paddy soil[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2010, 138(3/4): 343–347.
- [27] LEE J H, PARK M H, SONG H J, et al. Unexpected high reduction of methane emission via short-term aerobic pre-digestion of green manured soils before flooding in rice paddy[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 711: 134641.
- [28] 刘威. 冬种绿肥和稻草还田对水稻生长、土壤性质及周年温室气体排放影响的研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2015.
- [29] BAO Q L, XIAO K Q, CHEN Z, et al. Methane production and methanogenic archaeal communities in two types of paddy soil amended with different amounts of rice straw[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2014, 88(2): 372–385.
- [30] 宋利娜, 张玉铭, 胡春胜, 等. 华北平原高产农区冬小麦农田土壤温室气体排放及其综合温室效应[J]. *中国生态农业学报*, 2013, 21(3): 297–307.
- [31] 张宇, 张海林, 陈继康, 等. 耕作措施对华北农田 CO₂ 排放影响及水热关系分析[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(4): 47–53.
- [32] 谢立勇, 叶丹丹, 张贺, 等. 旱地土壤温室气体排放影响因子及减排增汇措施分析[J]. *中国农业气象*, 2011, 32(4): 481–487.
- [33] 刘芳, 刘丛强, 王仕禄, 等. 黔中土壤 CO₂ 的释放特征及其影响因素[J]. *生态环境*, 2008, 17(3): 1120–1124.
- [34] 秦越, 李彬彬, 武兰芳. 不同耕作措施下秸秆还田土壤 CO₂ 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.
- [35] 黄科瑞, 刘芳, 李自尊, 等. 转变土地利用方式对桂西喀斯特地区土壤氧化 CH₄ 的影响[J]. *地球与环境*, 2018, 46(6): 534–541.
- [36] 顾航, 肖凡书, 贺志理, 等. 湿地微生物介导的甲烷排放机制[J]. *微生物学报*, 2018, 58(4): 618–632.
- [37] 陈槐, 周舜, 吴宁, 等. 湿地甲烷的产生、氧化及排放通量研究进展[J]. *应用与环境生物学报*, 2006, 12(5): 726–733.
- [38] WANG Z P, LINDAU C W, DELAUNE R D, et al. Methane emission and entrapment in flooded rice soils as affected by soil properties[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1993, 16(3): 163–168.
- [39] BÁRCENA T G, D'IMPERIO L, GUNDERSEN P, et al. Conversion of cropland to forest increases soil CH₄ oxidation and abundance of CH₄ oxidizing bacteria with stand age[J]. *Applied Soil Ecology*, 2014, 79: 49–58.

责任编辑: 邹慧玲
英文编辑: 柳正