

怀豆和黑麦草绿肥残体还田对旱地 土壤温室气体排放的影响

谈光野^{1,2}, IHSAN Muhammad¹, 杨彩迪¹, 王 俊^{1,2,3}

(1. 西北大学城市与环境学院/陕西省地表系统与环境承载力重点实验室, 陕西 西安 710127; 2. 陕西省碳中和
和技术重点实验室, 陕西 西安 710127; 3. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:以怀豆和黑麦草两种绿肥为对象,分别进行了为期63 d的不同绿肥残体还田量和残体混合比例室内培养试验,其中绿肥残体还田量试验分别设0、1、2、4、6 t·hm⁻²共5个水平;残体混合比例试验设100%怀豆、25%怀豆+75%黑麦草、50%怀豆+50%黑麦草、75%怀豆+25%黑麦草和100%黑麦草共5个处理,还田量均为4 t·hm⁻²。采用气相色谱法观测了培养期间土壤温室气体(CO₂、N₂O、CH₄)通量变化。结果表明:(1)与未添加绿肥残体相比,绿肥残体还田土壤CO₂累积排放通量提高了11.3%~80.2%,土壤N₂O排放提高了15.8%~51.1%,综合增温潜势(GWP)提高了11.9%~79.4%($P<0.05$)。随绿肥残体还田量的增加,土壤CO₂排放通量和综合增温潜势(GWP)均呈线性增加,土壤CH₄吸收通量则呈线性下降趋势,而土壤N₂O排放通量呈现先增后减趋势,并在还田量约为3 t·hm⁻²时达到最大。相同还田量下添加黑麦草残体较怀豆残体具有更高的土壤CO₂排放和CH₄吸收,而添加怀豆残体较黑麦草残体显著促进了土壤N₂O排放;(2)土壤温室气体累计通量与绿肥残体混合物中黑麦草比例存在线性相关,随黑麦草添加比例的提高,土壤CO₂排放通量显著增加了5.8%~19.7%($P<0.05$),GWP显著增加了5.3%~17.7%($P<0.05$),而N₂O排放通量显著下降了11.2%~41.5%($P<0.05$),CH₄吸收通量则显著下降了13.4%~50.9%($P<0.05$)。综合来看,选择非豆科作物比例较低的绿肥残体,并以较低生物量进行还田,能在保持低GWP的同时获得生态效益。

关键词:怀豆;黑麦草;绿肥残体还田;温室气体排放;综合增温潜势

中图分类号:S142;S147.34;S152.8 **文献标志码:**A

Effects of returning green manure residues of vetch and ryegrass on greenhouse gas emission in dryland soil

TAN Guangye^{1,2}, IHSAN Muhammad¹, YANG Caidi¹, WANG Jun^{1,2,3}

(1. College of Urban and Environment Science, Northwest University, Shaanxi Key Laboratory of Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity, Xi'an, Shaanxi 710127, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Carbon Neutral Technology, Xi'an, Shaanxi 710127, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Using vetch and ryegrass residues as green manures, two 63 d incubation experiments were conducted to test the impacts of green manure application rate (0, 1, 2, 4, 6 t·hm⁻²) and the residual mix ratio (100% vetch, 75% vetch + 25% ryegrass, 50% vetch + 50% ryegrass, 25% vetch + 75% ryegrass, and 100% ryegrass at a rate of 4 t·hm⁻²) on soil CO₂, N₂O, and CH₄ emissions. Soil green gas emissions were measured using a gas chromatography. The results indicate that: (1) Compared to the control without green manure, application of green manure significantly increased the accumulative emissions of CO₂ and N₂O and global warming potential (GWP) by 11.3%~80.2%, 15.8%~51.1%, and 11.9%~79.4% ($P<0.05$), respectively. Soil CO₂ and GWP increased, but CH₄ uptake decreased linearly with the increase of application rates. However, soil N₂O emission varied in a polynomial way with the increase of application rates and peaked at the rate of around 3 t·hm⁻². At the same rate, ap-

收稿日期:2023-07-22

修回日期:2023-11-15

基金项目:国家自然科学基金(42277322,31570440);陕西省农业科技创新驱动项目(NYKJ-2021-XA-005,NYKJ-2022-XA-004)

作者简介:谈光野(1997-),男,天津人,硕士研究生,研究方向为旱地土壤温室气体排放。E-mail:645324815@qq.com

通信作者:王俊(1974-),男,河南虞城人,教授,主要从事土壤碳氮循环及温室气体排放研究。E-mail:wangj@nwu.edu.cn

plication of ryegrass residue had a greater CO_2 emission and CH_4 uptake, while a lower N_2O emission than that of vetch residue; (2) Soil greenhouse gas emissions were also correlated with the proportion of ryegrass residues in the mixture with vetch residues. Soil CO_2 emission and *GWP* increased by 5.8%~19.7% ($P<0.05$) and 5.3%~17.7% ($P<0.05$), while N_2O emission and CH_4 uptake decreased with the increases of ryegrass residues in the mixture by 11.2%~41.5% ($P<0.05$) and 13.4%~50.9% ($P<0.05$). Overall, selecting green manure residues with a lower proportion of non-leguminous crops and returning them to the field with lower biomass could achieve ecological benefits while maintaining low *GWP*.

Keywords: vetch; ryegrass; returning green manure residues; greenhouse gas emissions; global warming potential

温室气体的大量排放是引起全球气候变暖的重要原因,而土壤被认为是温室气体的主要排放源^[1]。 CO_2 、 N_2O 和 CH_4 是引起全球变暖的3种重要温室气体,占温室气体的近80%,据估计,土壤中 CO_2 、 N_2O 和 CH_4 的年排放量分别占温室气体排放总量的5%~20%、80%~90%和15%~30%^[2]。温室气体的排放深受人类活动,特别是农业实践的影响,中国农业温室气体排放约占全国排放总量的17%^[3]。绿肥种植作为一种古老的农业实践,已被证实对农业生产和生态环境有诸多益处。研究发现,种植绿肥作物能够提高土壤肥力和保水能力,减少土壤侵蚀和养分淋溶,同时还能有效降低害虫感染和抑制杂草生长,在提升土壤质量和农田固碳减排方面具有巨大潜力^[4]。

Muhammad 等^[5]研究表明,与传统休闲方式相比,种植绿肥并将刈割所得的残体还田能够通过增加土壤有机物质输入、影响土壤呼吸和微生物活动,进而影响温室气体的排放,绿肥作物种类、生物量也会影响土壤温室气体的排放。此外,土壤温室气体排放还受到土壤温度、孔隙率和含水量等因素影响^[6]。Chirinda 等^[7]研究发现,绿肥残体的引入使土壤 CO_2 排放增加了约30%。绿肥还田可能通过增加土壤的碳输入而增加 CO_2 的排放,绿肥生物量越大,释放到土壤中的养分越多,土壤有机碳矿化和无机碳的溶解释放也就越多,因而排放更多的 CO_2 ^[8-9]。绿肥种植可以通过减少土壤水分和硝酸盐浓度导致 N_2O 排放减少,但 Mitchell 等^[10]研究表明,与硝酸盐浓度相比,施肥土壤中矿化碳的有效性对 N_2O 排放影响更大,因此,绿肥残体为土壤提供的矿化碳在很大程度上影响土壤 N_2O 排放。有研究表明,绿肥生物量越大, N_2O 的排放可能越少,这是因为绿肥作物的引入降低了土壤矿质氮含量^[5]。此外,绿肥还田也会影响土壤 CH_4 的排放和吸收。研究表明,在好氧土壤中, CH_4 被嗜甲烷细菌

氧化,对全球大气甲烷汇贡献5.8%^[11]。同时,绿肥还田可能引起土壤物理性状的改变,同时为产生 CH_4 的生物体提供底物,进而影响土壤 CH_4 的排放^[12]。土壤 CH_4 的产生是一个直接或间接受土壤氮影响的生物过程,绿肥残体作为额外的氮输入可能降低土壤的氧化能力,这是由于 NH_4^+ 的引入,使参与 CH_4 氧化过程和硝化作用的酶之间发生竞争性抑制,进而影响土壤 CH_4 的排放^[13]。

Basche 等^[14]研究表明,土壤温室气体排放也受绿肥残体碳氮比的影响。碳氮比是影响绿肥残体分解的重要因素,低碳氮比的残体分解更快,因而促进温室气体排放^[15]。有研究表明,低碳氮比的豆科作物更易被矿化,从而增加土壤 CO_2 排放^[16]。豆科作物和非豆科作物对土壤 N_2O 排放的影响不同,豆科作物能从大气中固定更多的氮,提供更多的氮源,从而提高 N_2O 排放,而非豆科作物则通过增加反硝化细菌可利用的有效碳促进 N_2O 排放^[5]。然而, Akhtar 等^[17]研究表明,非豆科作物可能减少 N_2O 的排放,因为非豆科作物能吸收更多的氮,从而降低土壤中矿质氮含量,造成 N_2O 排放量的减少。Mancinelli 等^[18]研究发现,非豆科绿肥还田或豆科绿肥与非豆科绿肥混合后还田显著提高了土壤 CH_4 的排放。可见,豆科作物和非豆科作物还田对土壤温室气体排放的影响不尽相同,但目前关于绿肥残体混合还田的研究较少,绿肥残体混合比例对土壤温室气体排放的影响尚不明确。

怀豆和黑麦草是黄土高原旱作农业区常见的绿肥作物。在休闲期种植怀豆和黑麦草,并将其作为绿肥还田,这种管理方式会增加碳和氮的输入,进而影响温室气体的排放。因此,本研究旨在探究不同绿肥残体生物量和不同绿肥残体混合比例对土壤温室气体排放的影响,为绿肥种植在我国旱作农业区的推广提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤与植物样品

试验所用土壤样品取自陕西省西安市西北大学长安校区土壤生态过程与植物光谱观测场(33°49'N,107°38'E),于 2019 年 6 月小麦收获后,利用多点取样法采集表层(0~30 cm)的新鲜土壤,充分混匀后过 2 mm 筛备用。该地属于暖温带半湿润大陆性季风气候,四季分明,年平均气温 13.6℃,年均降水量 558 mm。供试土壤属粉壤土质壤土,土质疏松,土层深厚,肥力中等。有机碳含量为 9.78 g·kg⁻¹,全氮含量为 0.76 g·kg⁻¹,速效磷含量为 5.84 mg·kg⁻¹,速效钾含量为 197 mg·kg⁻¹,土壤 pH 值为 8.3,初始含水量为 18%。

怀豆(*Vicia villosa* Roth.)和黑麦草(*Lolium perenne* L.)两种绿肥残体样品取自该观测场种植的绿肥作物,不设置施肥处理,于 2019 年 6 月小麦收获后播种,于 2019 年 9 月刈割,并将新鲜绿肥样品在 65℃烘箱中干燥 24 h,研磨过 2 mm 筛后备用。

1.2 试验设计与气体样品采集

1.2.1 不同绿肥作物残体添加量处理方法 将刈割所得的怀豆和黑麦草两种绿肥残体分别以 0.115、0.230、0.460、0.690 g 的添加量与 300 g 土壤均匀混合,以分别达到 1、2、4、6 t·hm⁻²的还田量,并放置在容积为 1 000 ml、内径为 10 cm 的广口玻璃瓶中进行为期 63 d 的培养,以不添加绿肥残体为对照,共计 9 个处理,每个处理重复 3 次。整个培养期间无光照条件,通过人工气候温室保持恒温(25℃),加水调节土壤含水量至最大持水量的 60%,通过称重法调节含水量保持恒定。在培养期的第 1、7、14、21、28、35、42、49、56、63 d 分别采集气体样品。采集气体样品时,将培养瓶顶部橡胶塞关闭,在之后的 1 h 内,使用注射器在第 0、20 min 和 40 min 这 3 个时间点抽出培养瓶顶部的气体并存于气体储存瓶,取样后打开培养瓶,静置 2 h 至足以使新鲜空气进入培养瓶,将剩余气体排出,之后继续培养。

1.2.2 不同绿肥残体混合比例处理方法 将刈割所得的怀豆和黑麦草两种绿肥残体以不同比例(100%怀豆、25%怀豆+75%黑麦草、50%怀豆+50%黑麦草、75%怀豆+25%黑麦草和 100%黑麦草)混合,将 0.460 g 的添加量与 300 g 土壤均匀混合,以达到 4 t·hm⁻²的还田量,并放置在 1 000 ml 的培养瓶中进行为期 63 d 的培养,以仅添加怀豆残体(100%怀豆)为对照,共计 5 个处理,每个处理重复 4 次。整个培养期间无光照条件,同时通过人工

气候温室保持恒温(25℃),加水调节土壤含水量至最大持水量的 60%,通过称重法调节含水量保持恒定。气体样品采集方法同 1.2.1 节。

1.3 样品测定

气体样品中 CO₂、N₂O、CH₄ 的浓度使用搭载热导检测器(TCD)、氢火焰离子化检测器(FID)和电子捕获检测器(ECD),并以高纯氮作载气的气相色谱仪(安捷伦 7890A)测定,并用 HM 模型计算气体通量^[19]。

农田土壤综合增温潜势(*GWP*)按如下公式计算:

$$GWP = E_{CO_2} \times \frac{44}{12} + E_{CH_4} \times \frac{16 \times 28}{12} + E_{N_2O} \times \frac{44 \times 265}{28}$$

式中,*GWP* 为土壤温室气体排放综合增温潜势(kg·hm⁻²),*E*_{CO₂}、*E*_{CH₄} 和 *E*_{N₂O} 分别为试验期间土壤 CO₂、CH₄ 和 N₂O 的累积排放通量(kg·hm⁻²)。

1.4 数据处理

使用微软 Excel 对温室气体排放的初始数据进行预处理,并使用 Origin 2021 完成制图。所有的统计分析均采用 SPSS 26 进行,*P*<0.05 时认为差异显著。

2 结果与分析

2.1 不同绿肥残体添加量处理下土壤温室气体通量变化

2.1.1 CO₂排放通量 怀豆和黑麦草残体添加后土壤 CO₂ 的排放动态分别如图 1a 和 1b 所示,添加绿肥残体的土壤 CO₂ 排放通量均高于对照,排放峰值均出现在第 7 天,之后呈现减小趋势。第 14 天时,怀豆残体添加量为 1 t·hm⁻² 的土壤 CO₂ 排放通量短暂高于其余处理。第 28~42 天时,各处理的土壤 CO₂ 排放通量有所波动,之后继续减小并趋于稳定。当怀豆和黑麦草残体的添加量为 6 t·hm⁻² 时,土壤 CO₂ 排放通量最大。

从表 1 可知,绿肥残体添加量对土壤 CO₂ 累积排放通量具有显著影响。当怀豆残体添加量分别为 2、4、6 t·hm⁻² 时,土壤 CO₂ 累积排放通量较对照显著增加,其增量分别为 28.0%、54.4% 和 66.7% (*P*<0.05),而添加黑麦草残体的土壤 CO₂ 累积排放通量较对照显著增加,添加量为 1、2、4、6 t·hm⁻² 时,其增量分别为 32.5%、46.0%、66.0% 和 80.2% (*P*<0.05)。当怀豆和黑麦草残体添加量为 6 t·hm⁻² 时,土壤 CO₂ 累积排放通量最高。

从图 2a 可知,添加黑麦草残体的土壤比添加怀豆残体的土壤排放更多的 CO₂,土壤 CO₂ 累积排放通量与怀豆残体添加量和黑麦草残体添加量均呈显著正相关(怀豆:*R*²=0.88,*P*<0.01;黑麦草:*R*²=0.87,*P*<0.01)。

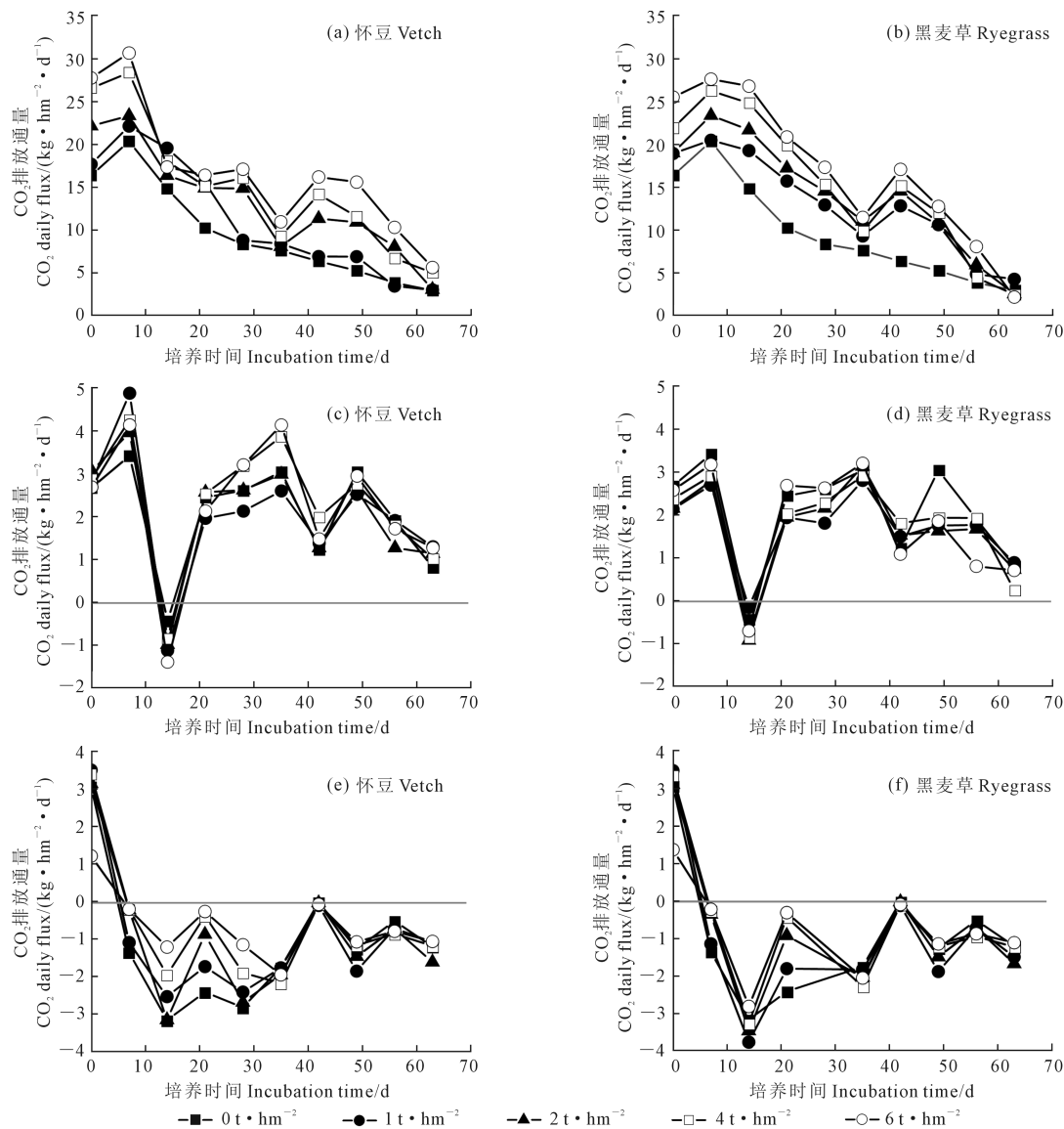


图 1 不同绿肥残体添加量处理下土壤温室气体排放通量变化
Fig.1 Soil greenhouse gas flux under different green manure residue biomass

表 1 不同绿肥残体添加量处理下培养 63 d 后土壤温室气体累积排放通量及综合增温潜势
Table 1 Accumulative emission of greenhouse gas and global warming potential incubation with different application rates of green manure residues after 63 days

处理 Treatment		CO ₂ 累积排放通量	N ₂ O 累积排放通量	CH ₄ 累积排放通量	综合增温潜势 GWP /(kg·hm ⁻²)
绿肥种类 Green manure	添加量/(t·hm ⁻²) Application rate	Accumulative emission of CO ₂ /(kg·hm ⁻²)	Accumulative emission of N ₂ O/(g·hm ⁻²)	Accumulative emission of CH ₄ /(g·hm ⁻²)	
怀豆 Vetch	0	594.44e	76.91c	-91.60bc	2208.24e
	1	662.18de	111.35b	-109.34c	2470.29de
	2	761.12d	116.23b	-92.54bc	2835.72d
	4	918.06c	110.95b	-75.46ab	3409.60c
	6	991.10c	99.68b	-68.28a	3672.98c
黑麦草 Ryegrass	1	794.54d	102.04ab	-119.27a	2951.34d
	2	868.00c	107.45a	-100.28ab	3223.67c
	4	987.03b	98.54bc	-81.17bc	3657.13b
	6	1071.35a	89.07ab	-73.83c	3962.63a

注: 同列不同字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$), 下同。
Note: Different letters in the same column indicate significant differences among treatments ($P<0.05$). The same below.

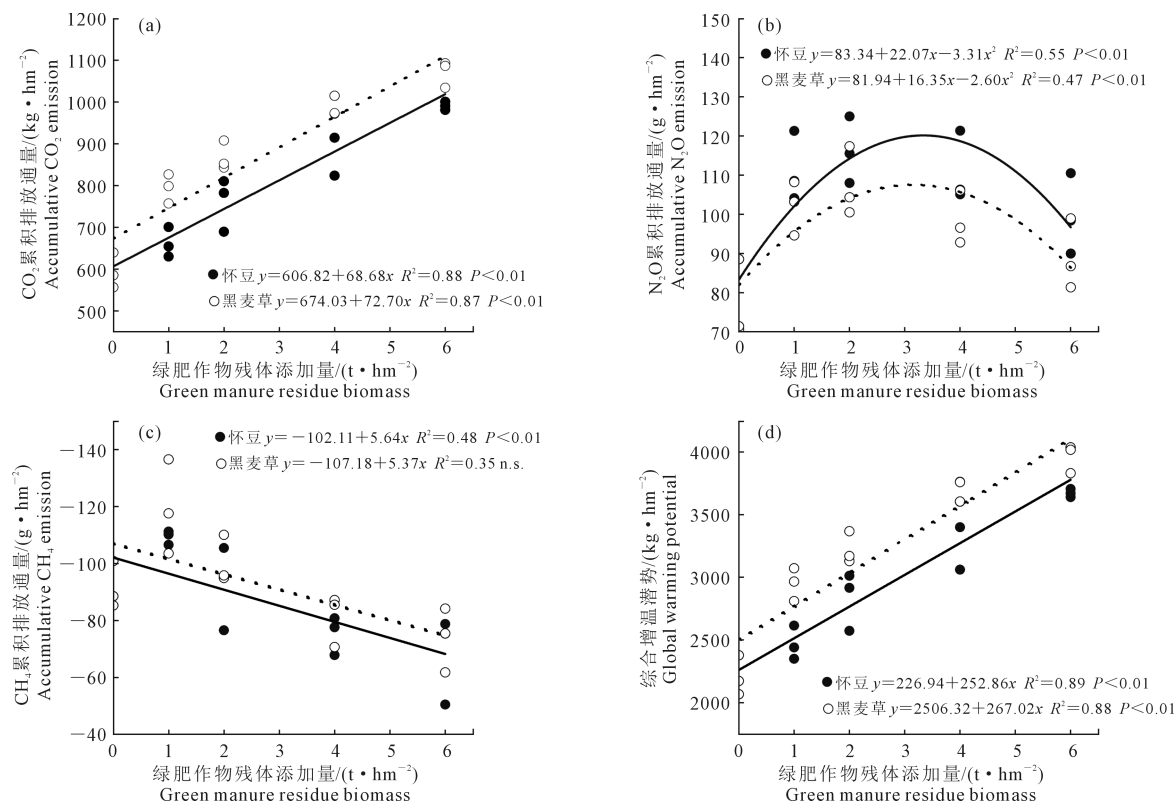


图 2 不同绿肥残体添加量与土壤温室气体排放及 GWP 的相关性分析

Fig.2 Correlation analysis between different green manure residue biomass with greenhouse gas emissions in soil and GWP

2.1.2 N_2O 排放通量 怀豆和黑麦草残体掺入土壤后土壤 N_2O 的排放动态分别如图 1c 和 1d 所示, 培养第 7 天时, 添加怀豆残体的土壤 N_2O 排放通量均高于对照组, 且达到峰值。当怀豆残体添加量为 $1 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 土壤 N_2O 排放通量最大, 之后在第 14 天时急剧下降至负值, 随后上升至 $2 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 左右并呈波动变化, 在第 48 天后又逐渐下降。而添加黑麦草残体的土壤 N_2O 排放通量在第 7 天均低于对照组, 之后在第 14 天时急剧下降至负值, 随后上升至 $2 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 左右并呈波动变化, 在第 48 天后, 添加黑麦草残体的土壤 N_2O 排放通量逐渐下降, 且低于对照组。

从表 1 可知, 绿肥残体添加量显著影响了土壤 N_2O 累积排放通量。与对照相比, 添加怀豆残体 1, 2, 4, 6 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的土壤 N_2O 累积排放通量分别显著增加了 44.8%、51.1%、44.3% 和 29.6% ($P < 0.05$)。当黑麦草残体添加量为 1、2、6 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 土壤 N_2O 累积排放通量较对照分别显著增加了 32.7%、39.7% 和 15.8% ($P < 0.05$)。当绿肥残体的添加量为 $2 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 土壤 N_2O 累积排放通量最高。

从图 2b 可知, 添加怀豆残体的土壤 N_2O 累积排放通量均高于添加黑麦草残体的土壤, 土壤 N_2O

累积排放通量与怀豆残体添加量和黑麦草残体添加量均呈二次线性关系 (怀豆: $R^2 = 0.55$, $P < 0.01$; 黑麦草: $R^2 = 0.47$, $P < 0.01$), 且在还田量达到 $3 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时土壤 N_2O 排放通量最大。

2.1.3 CH_4 排放通量 怀豆和黑麦草残体掺入土壤后土壤 CH_4 的排放动态分别如图 1e 和 1f 所示。除培养开始时 CH_4 排放通量为正值外, 整个培养期间其通量均为负值, 表明供试土壤为 CH_4 的汇。第 14 ~ 28 天时, 绿肥残体添加量为 $6 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的土壤对 CH_4 的吸收最低。第 21 天时, 不添加绿肥残体的土壤对 CH_4 的吸收最高。第 42 天时, 各处理土壤 CH_4 排放通量趋于 0, 之后继续呈波动变化但逐渐趋于稳定。

从表 1 可知, 绿肥残体添加量显著影响了土壤对 CH_4 的累积吸收。与对照相比, 当怀豆残体添加量为 $6 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 土壤对 CH_4 的累积吸收显著减少了 25.5% ($P < 0.05$)。当黑麦草残体添加量为 $1 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 土壤对 CH_4 的累积吸收较对照显著增加, 其增量为 30.2% ($P < 0.05$)。

从图 2c 可知, 添加黑麦草残体的土壤对 CH_4 的累积吸收通量高于添加怀豆残体的土壤, 土壤对 CH_4 的累积吸收通量与怀豆残体添加量呈显著负相

关($R^2=0.48,P<0.01$),与黑麦草残体添加量呈负相关但不显著。

2.1.4 综合增温潜势(*GWP*) 从表 1 可知,绿肥残体添加量较对照显著影响 *GWP*。*GWP* 随绿肥残体添加量增加而增加,当怀豆残体添加量为 2、4、6 t·hm⁻² 时, *GWP* 分别显著增加了 28.4%、58.4% 和 66.3% ($P<0.05$),而添加 1、2、4、6 t·hm⁻² 黑麦草残体的土壤 *GWP* 均显著增加,其增量分别为 33.6%、45.9%、65.6% 和 79.4% ($P<0.05$)。

从图 2d 可知,添加黑麦草残体的土壤 *GWP* 高于添加怀豆残体的土壤, *GWP* 与怀豆残体添加量和黑麦草残体添加量均呈显著正相关(怀豆: $R^2=0.88,P<0.01$; 黑麦草: $R^2=0.89,P<0.01$)。

2.2 不同绿肥残体混合比例处理下土壤温室气体通量变化

2.2.1 CO₂排放通量 添加不同混合比例的绿肥残体后,土壤 CO₂的排放动态如图 3a 所示。培养期间,添加绿肥残体混合物的土壤 CO₂排放通量均高于对照,土壤 CO₂排放通量随时间呈现下降趋势并逐渐趋于稳定。

从表 2 可知,土壤 CO₂累积排放通量随绿肥残体中黑麦草比例的增加而显著增加,当黑麦草在绿肥残体混合比例中由 25%增加至 100%时(表 2),其增量分别为 5.8%、9.5%、13.8% 和 19.7% ($P<0.05$)。

由图 4a 可见,土壤 CO₂累积排放通量与绿肥残体中黑麦草的比例呈显著正相关($R^2=0.90,P<0.01$)。

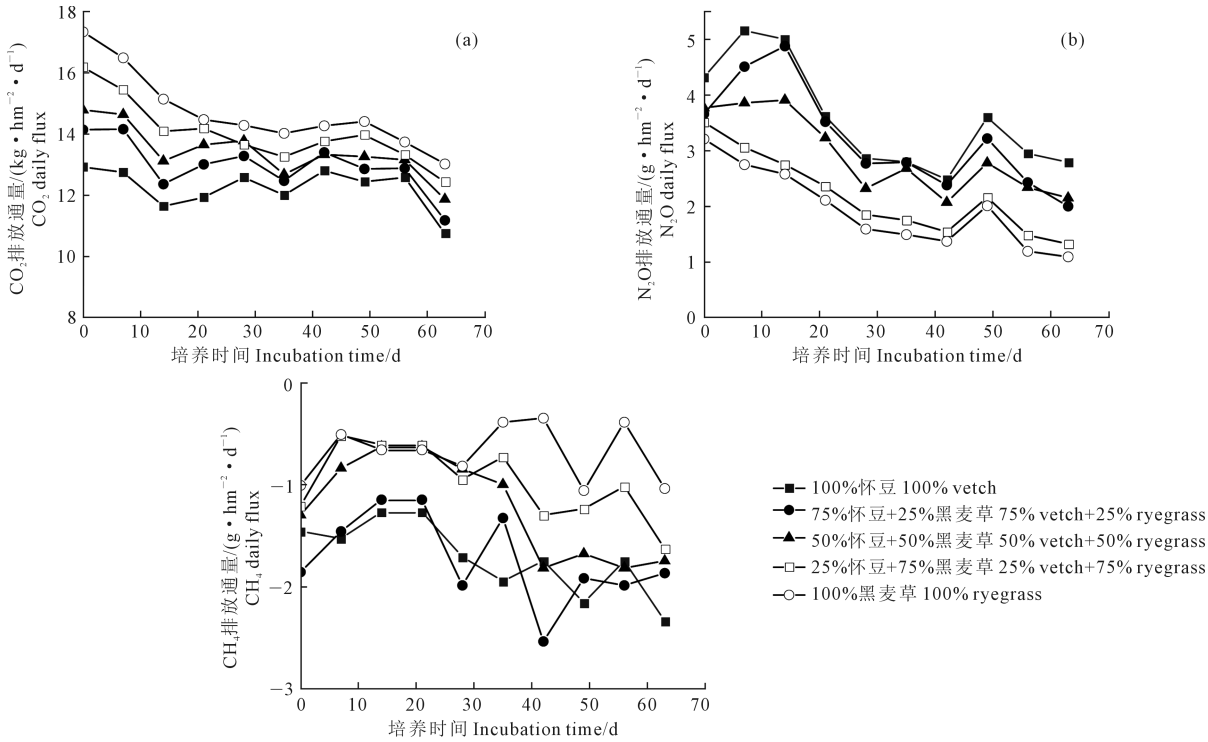


图 3 不同绿肥残体混合比例处理下土壤温室气体排放通量

Fig.3 Soil greenhouse gas emission flux under different mixing ratio of green manure residue

表 2 不同绿肥残体混合比例处理下培养 63 d 后土壤温室气体累积排放通量及综合增温潜势

Table 2 Accumulative emission of greenhouse gas and global warming potential incubation with different mixture ratio of green manure residues after 63 days

绿肥残体混合比例 Mixing ratio of green manure residues	CO ₂ 累积排放通量 Accumulative emission flux of CO ₂ /(kg·hm ⁻²)	N ₂ O 累积排放通量 Accumulative emission flux of N ₂ O/(g·hm ⁻²)	CH ₄ 累积排放通量 Accumulative emission flux of CH ₄ /(g·hm ⁻²)	综合增温潜势 Global warming potential /(kg·hm ⁻²)
100% 怀豆 100% vetch	755.14d	183.76e	-104.88d	2856.37d
75% 怀豆+25% 黑麦草 75% vetch+25% ryegrass	798.61c	163.27d	-97.38cd	3008.65c
50% 怀豆+50% 黑麦草 50% vetch+50% ryegrass	827.13c	147.84c	-90.87c	3103.70c
25% 怀豆+75% 黑麦草 25% vetch+75% ryegrass	859.41b	123.93b	-68.99b	3204.45b
100% 黑麦草 100% ryegrass	903.93a	107.45a	-51.50a	3361.50a

2.2.2 N₂O 排放通量 添加不同混合比例的绿肥残体后,土壤 N₂O 排放动态如图 3b 所示。培养期间,添加绿肥残体混合物的土壤 N₂O 排放通量均低于对照。对照组的土壤 N₂O 排放通量峰值出现在培养开始后的第 7 天,之后逐渐下降;添加 75% 怀豆+25% 黑麦草的组分则峰值出现在第 14 天,之后逐渐下降;添加 50% 怀豆+50% 黑麦草的组分,其土壤 N₂O 排放通量在培养前 14 天有微弱上升,之后持续下降,在第 28~49 天里波动变化。而其余组分土壤 N₂O 排放通量仅在第 49 天时有所上升,其他时间均呈下降趋势并逐渐趋于稳定。

从表 2 可知,随绿肥残体中黑麦草比例由 25% 增加至 100%,土壤 N₂O 累积排放通量分别显著减小了 11.2%、19.5%、32.6% 和 41.5% ($P<0.05$)。

由图 4b 可见,土壤 N₂O 累积排放通量与绿肥残体中黑麦草的比例呈显著负相关 ($R^2=0.96, P<0.01$)。

2.2.3 CH₄ 排放通量 添加不同混合比例的绿肥残体后,土壤 CH₄ 排放动态如图 3c 所示,整个培养期间各处理土壤均为 CH₄ 的汇。第 7~21 天时,土壤对 CH₄ 的吸收较为稳定,之后呈波动变化。培养结束时,各处理土壤对 CH₄ 的吸收均小于对照。

从表 2 可知,土壤对 CH₄ 的累积吸收通量随绿肥残体中黑麦草比例的增加而减小,当混合比例为 50% 怀豆 + 50% 黑麦草, 25% 怀豆 + 75% 黑麦草, 100% 黑麦草时变化显著,其减小量分别为 13.4%、34.2% 和 50.9% ($P<0.05$)。

由图 4c 可见,土壤对 CH₄ 的累积吸收通量与绿肥残体中黑麦草的比例呈显著负相关 ($R^2=0.86, P<0.01$)。

2.2.4 综合增温潜势 (GWP) 从表 2 可知, GWP 随绿肥残体中黑麦草占比的增加而显著增加,随黑麦草混合比例由 25% 增加至 100%,其增量分别为 5.3%、8.7%、12.2% 和 17.7% ($P<0.05$)。

由图 4d 可见, GWP 与绿肥残体中黑麦草的比例呈显著正相关 ($R^2=0.90, P<0.01$)。

3 讨论

研究表明,供试土壤为 CO₂ 的排放源。与对照相比,添加怀豆与黑麦草两种绿肥残体均增加土壤 CO₂ 排放通量,这与 Mccourty 等人^[20] 研究结果一致。Sanz-Cobena 等^[21] 发现与无绿肥作物相比,绿肥作物能增强土壤微生物的代谢活动和呼吸作用,从而增加土壤 CO₂ 排放。随着绿肥残体添加量的增

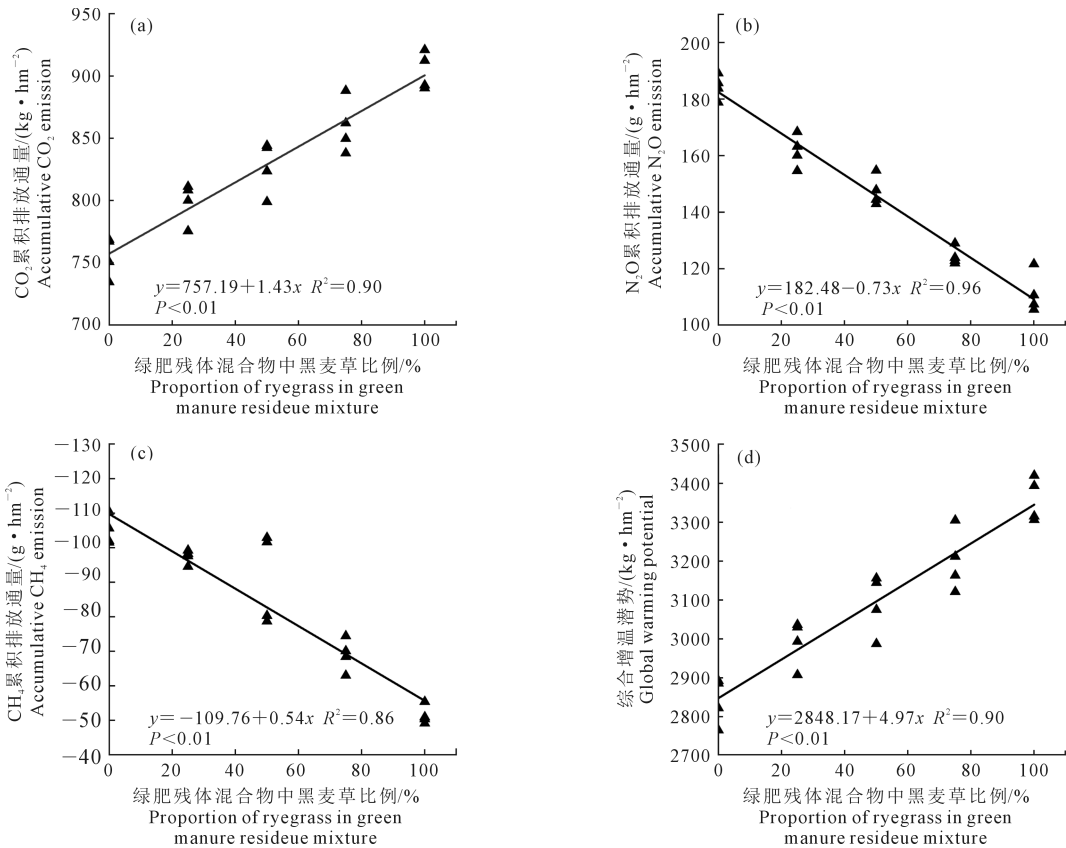


图 4 不同绿肥残体混合比例与土壤温室气体排放及 GWP 的相关性分析
Fig.4 Correlation analysis between different mixing ratio of green manure residue with greenhouse gas emissions in soil and GWP

加,土壤 CO₂排放通量增加,其原因可能是绿肥残体添加量的增加导致碳输入的增加,从而提高土壤中有效碳含量和微生物活性,进而增强土壤呼吸,导致土壤 CO₂的排放通量增加^[22]。Cai 等^[23]研究表明,绿肥残体输入增加土壤不稳定碳含量,为土壤中 CO₂的生产提供了底物,从而导致土壤 CO₂排放的增加。同时,掺入黑麦草占比较高的绿肥残体混合物的土壤 CO₂排放通量更高,这可能是由于黑麦草的碳氮比较高,其残体中可溶性有机碳含量更大,可以为反硝化细菌提供更多的能量,进而促进土壤 CO₂排放^[7]。而 Fontaine 等^[16]研究显示,低碳氮比的豆科绿肥残体比非豆科残体具有更高的矿化率,从而导致更高的 CO₂排放。也有研究认为,低碳氮比的绿肥残体分解速率更快,这也可能在短时间内造成土壤 CO₂的排放增加。此外,绿肥作物残体还能够通过改变土壤有机质、孔隙率、含水量和后茬作物的根系生长,间接增加土壤 CO₂排放^[6]。

供试土壤也为 N₂O 的排放源。添加豆科绿肥残体的土壤比非豆科绿肥的 N₂O 排放通量更高,且均高于对照,这可能是由于绿肥残体的分解增加了微生物活动的氮源和底物,促进了硝化和反硝化作用,进而增加了土壤 N₂O 排放^[24]。豆科绿肥作物与非豆科绿肥作物相比能从大气中固定更多的氮,并供给土壤,随着土壤氮含量的增加,微生物活性增强,因此掺入豆科绿肥残体的土壤 N₂O 排放通量更高^[25]。随着绿肥残体生物量的增加,土壤 N₂O 排放通量先增后减,这是由于可矿化碳输入增加促进部分 N₂O 在未释放前还原为 N₂,因此土壤 N₂O 排放通量降低^[26]。而在不同混合比例的绿肥残体处理下,黑麦草比例较低的绿肥残体混合物分解更快,同时供给土壤更多的氮,因而排放更多的 N₂O^[15]。

与 CO₂和 N₂O 不同的是,供试土壤为 CH₄的汇,这与罗晓琦等^[27]研究结果一致。CH₄的产生和氧化是直接或间接受土壤有效氮影响的生物过程,将绿肥作物作为生物肥料输入土壤会改变土壤理化性质,从而抑制甲烷氧化和硝化的酶促过程,并减少土壤对 CH₄的吸收^[7]。本研究结果显示,除添加量为 1 t·hm⁻²外,其余各添加量下土壤对 CH₄的吸收通量均较对照有所减少。添加怀豆残体的土壤对 CH₄的吸收通量低于添加黑麦草残体的土壤,这是由于豆科绿肥残体分解时会产生 NH₄⁺或氨化合物,降低土壤氧化能力,因而影响土壤对 CH₄的吸收。而土壤对 CH₄的吸收通量随绿肥残体混合物中黑麦草比例的增加而降低,这可能是由于黑麦草比例较高的绿肥残体混合物会向土壤输入更多的碳,

为产甲烷菌提供了更多的碳源,因此造成了土壤对 CH₄的累积吸收减少^[28]。单玉华等^[29]在培养中发现,氮素的供应在醋酸盐转化为甲烷中起关键作用,进而影响土壤对 CH₄的吸收。而 Cai 等^[23]研究表明更高的碳氮比会使 NH₄⁺更稳定,而黑麦草残体的碳氮比高于怀豆残体,并因此降低土壤对 CH₄的吸收能力。

本研究中,添加绿肥残体的土壤较对照显著增加了土壤 GWP,这与常丹娜等^[30]在河南信阳进行的大田试验取得的结果一致,这可能与绿肥残体所带来的碳输入有关。GWP_{soil}是通过对土壤 CO₂、N₂O 和 CH₄排放通量的计算得出,土壤 CO₂对 GWP 起关键作用,其次是 N₂O,而 CH₄对 GWP 的贡献为负。

虽然本研究中绿肥还田对环境产生了负面影响,但绿肥还田不仅能增加作物产量,还能减少化学肥料的投入,减小农业生产过程中的环境代价。Sant’ Anna 等^[31]研究表明,虽然绿肥增加了土壤 N₂O 的排放,但显著提高了后茬粮食作物产量,最终单位产量的土壤 N₂O 排放更低。Fungo 等^[32]研究发现以绿肥还田形式向土壤投入氮素时,N₂O 排放量低于施用氮肥的土壤,这表明绿肥还田能更有效地避免氮损失,对环境的负面影响更小。而豆科绿肥还田虽然增加了温室气体的排放,但由于其固氮功能,还田后可向后茬作物提供氮素。同时,非豆科绿肥能有效防止氮淋溶,还田后还可提升有机碳储量^[33]。

4 结 论

- 1) 供试旱地土壤为 CO₂和 N₂O 的排放源,CH₄的吸收汇。
- 2) 与对照相比,随绿肥残体添加量的增加,土壤 CO₂累积排放通量和 GWP 均增加,其增量分别为 11.3%~80.2%和 11.9%~79.4%,N₂O 累积排放通量呈现先增后减趋势,但较对照增加了 15.8%~51.1%,而 CH₄累积吸收通量随绿肥残体添加量增加而减少。
- 3) 随绿肥残体混合物中黑麦草比例增加,土壤 CO₂排放通量和 GWP 显著增加,其增量分别为 5.8%~19.7%和 5.3%~17.3%,而 N₂O 排放通量和 CH₄吸收通量则分别减少了 11.2%~41.5%和 7.1%~50.9%。
- 4) 选择非豆科绿肥如黑麦草比例较低的混合比例,并以较低生物量还田,能在保持低 GWP 的同时获得生态效益。实际生产中,绿肥种类的选择应结合 GWP 及后茬作物产量综合考虑,以实现经济效益和生态效益最大化。

参考文献:

- [1] 郭怡婷, 罗晓琦, 王锐, 等. 生物可降解地膜覆盖对关中地区小麦-玉米农田温室气体排放的影响[J]. 环境科学, 2022, 43(5): 2788-2801.
- GUO Y T, LUO X Q, WANG R, et al. Effects of biodegradable plastic film mulching on greenhouse gas emissions under wheat-maize rotation system in the Guanzhong Plain[J]. Environmental Science, 2022, 43(5): 2788-2801.
- [2] YANG G R, HAO X Y, LI C L, et al. Effects of greenhouse intensive cultivation and organic amendments on greenhouse gas emission according to a soil incubation study[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2015, 61(1): 89-103.
- [3] 王晓云, 蔡焕杰, 李亮, 等. 亏缺灌溉对冬小麦农田温室气体排放的影响[J]. 环境科学, 2019, 40(5): 2413-2425.
- WANG X Y, CAI H J, LI L, et al. Effects of water deficit on greenhouse gas emission in wheat field in different periods[J]. Environmental Science, 2019, 40(5): 2413-2425.
- [4] DARYANTO S, FU B J, WANG L X, et al. Quantitative synthesis on the ecosystem services of cover crops[J]. Earth-Science Reviews, 2018, 185: 357-373.
- [5] MUHAMMAD I, SAINJU U M, ZHAO F Z, et al. Regulation of soil CO₂ and N₂O emissions by cover crops: A meta-analysis[J]. Soil and Tillage Research, 2019, 192: 103-112.
- [6] PARKIN T B, KASPAR T C, JAYNES D B, et al. Rye cover crop effects on direct and indirect nitrous oxide emissions[J]. Soil Science Society of America Journal, 2016, 80(6): 1551-1559.
- [7] CHIRINDA N, OLESEN J E, PORTER J R, et al. Soil properties, crop production and greenhouse gas emissions from organic and inorganic fertilizer-based arable cropping systems[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2010, 139(4): 584-594.
- [8] 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.
- TAN Y A, ZHAO Q, TIAN X P, et al. Effect of winter green manure overturning on soil carbon and nitrogen content[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2020, 49(5): 81-87.
- [9] 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.
- YU W J, LI X S, CHEN Z J, et al. Effects of nitrogen fertilizer application on carbon dioxide emissions from soils with different inorganic carbon contents[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(8): 2493-2500.
- [10] MITCHELL D C, CASTELLANO M J, SAWYER J E, et al. Cover crop effects on nitrous oxide emissions: role of mineralizable carbon[J]. Soil Science Society of America Journal, 2013, 77(5): 1765-1773.
- [11] SMITH K A, BALL T, CONEN F K, et al. Exchange of greenhouse gases between soil and atmosphere: interactions of soil physical factors and biological processes[J]. European Journal of Soil Science, 2003, 54(4): 779-791.
- [12] DAS S, ADHYA T K. Effect of combine application of organic manure and inorganic fertilizer on methane and nitrous oxide emissions from a tropical flooded soil planted to rice[J]. Geoderma, 2014, 213: 185-192.
- [13] LE MER J, ROGER P. Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: a review[J]. European Journal of Soil Biology, 2001, 37(1): 25-50.
- [14] BASCHE A D, MIGUEZ F E, KASPAR T C, et al. Do cover crops increase or decrease nitrous oxide emissions? A meta-analysis[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 69(6): 471-482.
- [15] LYNCH M J, MULVANEY M J, HODGES S C, et al. Decomposition, nitrogen and carbon mineralization from food and cover crop residues in the central plateau of Haiti[J]. Springer Plus, 2016, 5(1): 973.
- [16] FONTAINE S, BARDOUX G, ABBADIE L, et al. Carbon input to soil may decrease soil carbon content[J]. Ecology Letters, 2004, 7(4): 314-320.
- [17] AKHTAR K, WANG W, KHAN A, et al. Wheat straw mulching with fertilizer nitrogen: An approach for improving soil water storage and maize crop productivity[J]. Plant Soil and Environment, 2018, 64(7): 330-337.
- [18] MANCINELLI R, MARINARI S, DI FELICE V, 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.
- [19] 戈小荣, 王俊, 张祺, 等. 不同降水格局下填闲种植对旱作冬小麦农田夏闲期土壤温室气体排放的影响[J]. 草业学报, 2018, 27(5): 27-38.
- GE X R, WANG J, ZHANG Q, et al. Effect of cover cropping on soil greenhouse gas emissions during summer fallow under manipulated rainfall[J]. Acta prataculturae Sinica, 2018, 27(5): 27-38.
- [20] MCCOURTY M A, GYAWALI A J, STEWART R D. Of macropores and tillage: influence of biomass incorporation on cover crop decomposition and soil respiration[J]. Soil Use and Management, 2018, 34(1): 101-110.
- [21] SANZ-COBENA A, GARCÍA-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.
- [22] POEPLAU C, DON A. Carbon sequestration in agricultural soils via cultivation of cover crops-a meta-analysis[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2015, 200: 33-41.
- [23] CAI Z C, SHAN Y H, XU H. Effects of nitrogen fertilization on CH₄ emissions from rice fields[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2007, 53(4): 353-361.
- [24] 王楷, 史雷, 马龙, 等. 有机无机配施下西北旱区麦田土壤 N₂O 的排放特征及微生物特性[J]. 环境科学, 2021, 42(12): 6038-6046.
- WANG K, SHI L, MA L, et al. Effects of manure combined chemical fertilizers on soil N₂O emission and microbial characteristics of wheat crop system in northwest arid[J]. Environmental Science, 2021, 42(12): 6038-6046.
- [25] MCSWINEY C P, SNAPP S S, GENTRY L E. Use of N immobilization to tighten the N cycle in conventional agroecosystems[J]. Ecological Applications, 2010, 20(3): 648-662.