

不同温度下添加绿肥对旱作农田 土壤有机碳矿化的影响

袁胜南¹,商雨晴¹,王 俊^{1,2}

(1. 西北大学城市与环境学院,陕西 西安 710127;2. 陕西省地表系统与环境承载力重点实验室,陕西 西安 710127)

摘要:为揭示气候变暖背景下绿肥添加对旱作农田土壤有机碳矿化的影响,采用室内恒温培养法,研究了添加长武怀豆(S)、黑麦草(R)、长武怀豆与黑麦草混合(M)在5℃、15℃、25℃下的土壤有机碳矿化过程。结果表明:培养温度和绿肥种类及其二者交互作用对土壤有机碳矿化速率均具有显著影响。在15℃和25℃下有机碳矿化速率峰值均出现在培养开始后第2天,然后快速下降并分别在第17天和第22天后趋于稳定;而在5℃下有机碳矿化速率峰值则推迟至第8天出现,然后缓慢下降至第42天后趋于稳定。在为期79 d的培养期间,土壤有机碳平均矿化速率和累积矿化量均随着温度升高而增加。与不添加绿肥的对照(CK)相比,S、M和R处理土壤有机碳累积矿化量提高了10.5~11.6倍($P<0.05$),绿肥处理间变化趋势为S>M>R,与其本身含碳量相一致。与CK相比,S、M和R处理土壤温度敏感性(Q_{10})分别降低了11.0%、11.2%和11.8%。绿肥添加和增温同时还提高了土壤有机碳矿化动力学参数,其中S处理在不同温度下均较其他处理具有更高的土壤有机碳矿化速率常数。与CK相比,土壤碳素和氮素水平在培养结束后分别增加了36.0%~46.2%和39.3%~47.4%。表明添加绿肥尤其是豆科绿肥能够显著促进农田土壤有机碳矿化,改善土壤养分。

关键词:绿肥;土壤有机碳矿化;温度变化;旱作农田

中图分类号:S158;S142 **文献标志码:**A

Effects of green manure on soil organic carbon mineralization in dry land soil under different temperature

YUAN Shengnan¹, SHANG Yuqing¹, WANG Jun^{1,2}

(1. College of Urban and Environment Science, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710127, China;

2. Shaanxi Key Laboratory of Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity, Xi'an, Shaanxi 710127, China)

Abstract: In order to reveal the influence of green manure on soil organic carbon (SOC) mineralization in the context of global warming, soils with three green manures of Changwu Soybean (S), Ryegrass (R), the combination of them (M), and a control without green manure (CK) were incubated at 5°C, 15°C, and 25°C for 79 d. The SOC mineralization as indicated by CO₂ emission was measured dynamically and modeled by using a first-order kinetic model. Soil CO₂ emissions was significant for green manure species, incubation temperature, and their interaction. The SOC mineralization rate peaked at 2 d after the incubation and then decreased rapidly and stabilized after 17 d and 22 d when incubated at 15°C and 25°C, respectively. However, the mineralization rate peaked at 8 d after incubation and decreased and stabilized after 42 d when incubated at 5°C. The mean mineralization rate and cumulative SOC mineralization increased with increasing temperature. Compared to CK, treatments S, M, and R increased the cumulative mineralization by 10.5~11.6 times with a trend of S>M>R ($P<0.05$), which was in consistent to the soil C and N contents in them. The temperature sensitivities (Q_{10}) of SOC mineralization decreased by 11.0%, 11.2%, and 11.8% with S, M, and R than CK, respectively. Both green manure addition and increasing of incubation temperature improved the parameters of SOC mineralization kinetics model, especially for t that with

S. Compared to CK, treatments S, M, and R increased soil carbon and nitrogen contents by 36.0%~46.2% and 39.3%~47.4%, respectively. Overall, green manure addition, especially, legumes, could stimulate SOC mineralization and improve soil nutrient cycling in dryland cropping systems.

Keywords: green manure; soil organic carbon mineralization; temperature variation; dry land soil

土壤有机碳矿化直接影响着土壤碳库向大气的排放量,对温室效应和全球气候变化有着深远影响,是土壤碳循环的重要过程之一^[1-4]。土壤有机碳矿化受多种因素的影响,包括土壤温度、土壤理化性质、土壤微生物活性等^[5-9]。温度敏感性指标(Q_{10})表示温度变化对土壤有机碳矿化速率的影响程度, Q_{10} 越大,表明土壤有机碳矿化受温度影响就越大^[10]。而添加外源性有机物能够增加底物供应,促进有机碳矿化,改善土壤质量^[11-12]。

渭北旱塬是我国重要的旱作农业区之一,近年来,随着国家对农业绿色化生产的大力倡导,绿肥填闲种植作为一种传统的减施增效措施也日益得到重视。与施用化肥相比,绿肥作为一种外源有机物可以有效补充土壤碳库,提高土壤肥力,改善土壤物理性状^[13-14]。例如,Ghimire等^[15]通过对比豆科与非豆科作物腐解对土壤有机碳矿化的影响,表明与非豆科作物相比,豆科作物分解速率快,对土壤养分循环和后续作物生长至关重要。然而目前研究主要集中在绿肥作物腐解特征及其对温室气体的影响等方面,在气候变暖背景下,不同温度条件下添加绿肥对旱作农田土壤有机碳矿化影响的报道较少。

本文基于室内培养试验,研究了添加不同绿肥在不同温度下的土壤有机碳矿化过程,并使用一级动力学模型对有机碳矿化进行了拟合,旨在探究气候变暖背景下绿肥添加影响土壤碳循环的机理,为旱作农田生态系统应对气候变化提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况及样品采集

土壤样品采集地点位于陕西长武黄土高原农田生态系统国家野外观测台站(107°45'E,35°12'N),该地平均海拔 1 200 m,地势平坦,属于暖温带半湿润大陆性气候,年平均气温 9.1 °C,年平均降水量 579 mm,降水主要集中在 7—9 月。该地区农业生产主要依赖生育期的天然降水,属于典型的旱作农业区。境内土壤以粘壤质黑垆土为主,土质疏松,土层深厚,肥力中等^[16]。

试验地前作玉米,2018 年 10 月在玉米收获后采用“S”形采样法采集 5 个 0~20 cm 土层土样,将

采集的土样混合均匀,剔除石块、植物根系等杂物,过 2 mm 筛,部分土样放入培养瓶中进行室内培养,部分土样自然风干后用于土壤理化特性测定。取样时土壤有机碳含量为 10.31 g·kg⁻¹,全氮、硝态氮和铵态氮含量分别为 1.42 g·kg⁻¹、3.33 mg·kg⁻¹和 3.55 mg·kg⁻¹,碳氮比为 7.26。

另外在田间试验中割取长势良好的长武怀豆和黑麦草 2 种绿肥作物地上部分,洗净后烘干,研磨后过 2 mm 筛,放入牛皮纸袋中保存。各处理绿肥作物碳氮含量见表 1。

表 1 绿肥作物碳、氮含量

处理 Treatment	有机碳 Organic carbon /(g·kg ⁻¹)	全氮 Total nitrogen /(g·kg ⁻¹)	碳氮比 Carbon nitrogen ratio
长武怀豆(S) Changwu soyeam	490.41	33.87	14.48
黑麦草(R) Ryegrass	343.27	14.05	24.43
长武怀豆+黑麦草(M) Changwu soyeam+ryegrass	410.71	24.23	16.95

1.2 试验设计

试验采用绿肥添加和培养温度双因素处理,其中绿肥添加处理包括黑麦草(R)、长武怀豆(S)、长武怀豆和黑麦草混合(M)、不添加绿肥对照(CK),绿肥添加量为 6 t·hm⁻²,混合处理 2 种作物质量比为 1:1。培养温度设 3 个水平,分别为 5°C、15°C 和 25°C。每处理均重复 3 次。

试验于 2018 年 10 月开始,培养前称取过 2 mm 筛的鲜土 300 g 放置在容量为 1 L、内径为 10 cm 的广口玻璃瓶中(盖子上有 2 个通气阀,连接 2 个不同长度的聚乙烯透明通气管,一个进气管,一个出气管,保持培养瓶中氧气充足),加水调节土壤含水量至最大持水量的 60%,预培养 7 d 后添加绿肥作物,每隔 2~3 d 采用称重法调节含水量保持恒定。正式培养试验自 2018 年 11 月 2 日开始,2019 年 1 月 20 日结束,总计持续 79 d。

1.3 测定指标及方法

土壤有机碳矿化速率采用 LI-8100A 土壤碳通量自动测量系统进行测定,其中在第 1~18 天每天测量 1 次,在第 18~36 天每 3 d 测量 1 次,在第 36~51 天每 5 d 测量 1 次,在第 51~79 天每 7 d 测量 1 次。

土壤有机碳(SOC)和全氮测定时,收集培养结

束后土样,风干后过 2 mm 筛,称取 3 g 用 10% 稀盐酸去除土样中无机碳,过 0.15 mm 筛,使用 EA 3000 元素分析仪测定^[17]。

温度敏感性系数 Q_{10} 能够反映温度对土壤有机碳矿化的影响,采用以下公式进行计算^[12]:

$$F = a \times e^{bt} \quad (1)$$

$$Q_{10} = e^{10b} \quad (2)$$

式(1)中, F 为土壤有机碳矿化速率($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$); t 为培养温度($^{\circ}\text{C}$); a 为基质质量指数,表示 0°C 时土壤净矿化速率; b 为温度反应系数。

基于测定数据,选用以下指数模型对土壤有机碳矿化过程进行拟合^[6]:

$$C_t = C_0(1 - e^{-kt}) \quad (3)$$

式(3)中, C_t 为培养时间 t 时的累积矿化量($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$), C_0 为潜在矿化碳库($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$), k 为土壤有机碳的矿化速率常数(d^{-1}), t 为培养时间(d)。

1.4 数据处理与统计分析

使用 SPSS 20.0 软件对试验数据进行单因素方差分析(one-way ANOVA)和多重比较,并用 LSD 法进行处理间差异显著性检验,使用 Origin 9.0 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 不同处理对土壤矿化速率的影响

土壤有机碳矿化速率均随培养时间的增加呈先上升后下降的变化趋势(图 1)。在 5°C 培养条件下,各绿肥处理土壤有机碳矿化速率均在培养前期迅速增加,在第 8 天达到峰值($0.5754 \sim 0.6321 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$),而后快速降低至 42 d 后趋于稳定。而在 15°C 、 25°C 培养条件下,各绿肥处理均在第 2 天达到峰值($1.7613 \sim 3.2074 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$),然后迅速下降,其中在 15°C 下各处理在第 22 天后趋于稳定,而 25°C 下则在第 7 天后趋于平缓。

绿肥添加和温度增加均显著提高了土壤有机碳矿化速率(图 1),处理间差异主要出现在第 1~15 天,与 CK 相比,S、R 和 M 处理平均土壤矿化速率分别提高 17.2、17.9 倍和 19.1 倍(表 2)。在培养期内,不同温度下平均土壤有机碳矿化速率为 $25^{\circ}\text{C} > 15^{\circ}\text{C} > 5^{\circ}\text{C}$ 。

2.2 不同处理对土壤有机碳累积矿化量及其温度敏感性的影响

不同处理培养期内土壤有机碳累积矿化量变化如图 2 所示。各处理下土壤有机碳累积矿化量均随着培养时间的延长呈增加趋势,有机碳累积矿化量表现为 $S > M > R > \text{CK}$,绿肥添加显著提高了土壤有

机碳累积矿化量。不同温度土壤有机碳矿化累积排放量呈现 $25^{\circ}\text{C} > 15^{\circ}\text{C} > 5^{\circ}\text{C}$ 。绿肥添加和温度增加均显著提高了土壤有机碳累积矿化量(表 2)。平均来看,与 CK 相比,S、R、M 有机碳累积矿化量分别提高了 10.5、10.9 倍和 11.6 倍。绿肥与温度之间存在极显著交互作用,与 CK 相比,在 5°C 下,S、R、M 有机碳累积矿化量分别提高了 14.0、13.4 倍和 13.0 倍;在 15°C 下,分别提高了 15.1、14.2 倍和 13.8 倍;在 25°C 下,分别提高了 8.6、8.1 倍和 7.7 倍。

在整个培养周期,温度敏感性 Q_{10} 的变化范围是 1.42~1.61(图 3)。 Q_{10} 的大小表现为 $\text{CK} > \text{S} > \text{R} > \text{M}$,S 处理与 M、R 处理之间存在显著性差异($P < 0.05$),且 CK 处理显著高于其他处理。

2.3 不同绿肥处理土壤有机碳矿化的动力学特征

运用一级动力学方程对不同绿肥残余处理不同温度下土壤有机碳累积矿化量进行拟合。结果表明绿肥种类和培养温度均显著改变了土壤有机碳矿化的动力学参数(表 3)。与 CK 相比,绿肥添加显著提高了 C_0 ,且表现出 $S > M > R$ 。另外,随着培养温度的升高 C_0 也呈增大趋势。 C_0/SOC 是表示土壤有机碳矿化能力和固存能力的重要指标^[6],其在绿肥和温度间的变化规律与 C_0 相同。有机碳矿化速率常数 k 在不同温度条件下均为 S 处理最大。

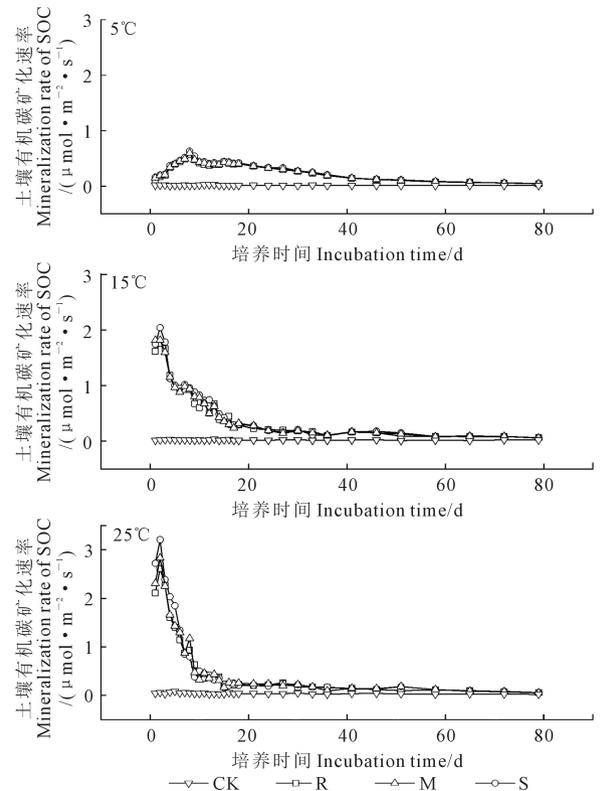


图 1 培养期内土壤有机碳矿化速率变化
Fig. 1 Dynamic of soil mineralization rate during the incubation period

表 2 绿肥添加和温度对土壤有机碳矿化的作用

Table 2 Effect of green manure and temperature on soil organic carbon mineralization

处理 Treatment	温度 Temperature /°C	土壤有机碳 矿化速率 Mineralization rate of SOC /($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	土壤有机碳 累积矿化量 Cumulative mineralization of SOC/($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)
CK	5	0.0157	1.189
	15	0.0212	1.592
	25	0.0408	2.932
R	5	0.2916	16.66
	15	0.5385	23.64
	25	0.5865	25.45
M	5	0.3012	17.14
	15	0.5496	24.22
	25	0.6145	26.72
S	5	0.3149	17.85
	15	0.5860	25.65
	25	0.6592	28.26
LSD(0.05)		0.0036	0.1305
绿肥 Green manure(G)		**	**
显著性 Significance			
温度 Temperature(T)		**	**
绿肥×温度 G×T		**	**

注: ** 表示差异显著 ($P < 0.05$)。不同小写字母表示不同绿肥处理下不同温度处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: ** indicates significant correlation ($P < 0.05$). Different lowercase letters indicate significant differences ($P < 0.05$) between different temperatures under different green manure.

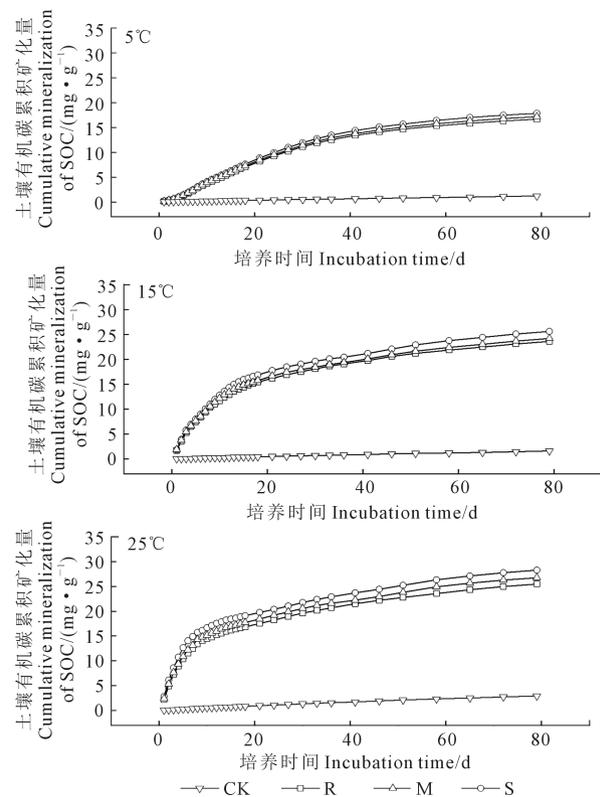
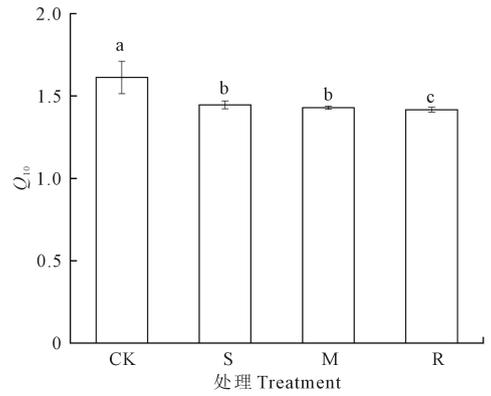


图 2 培养期内土壤有机碳累积矿化量

Fig.2 Cumulative mineralization of soil organic carbon during incubation period



注:不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences ($P < 0.05$) among treatments.

图 3 不同处理土壤有机碳矿化的温度敏感性 (Q_{10})Fig.3 Temperature sensitivity (Q_{10}) of soil organic carbon mineralization under different treatments

2.4 不同处理对土壤有机碳和全氮含量的影响

培养后各处理土壤有机碳和全氮含量如表 4。添加绿肥均显著提高了土壤有机碳、全氮含量。与 CK 相比, S、M 和 R 处理土壤有机碳平均提高了 36.0%、39.8% 和 46.2%, 全氮平均提高了 46.7%、40.2% 和 39.3%。增温显著促进有机碳矿化, 降低土壤有机碳含量, 与 5°C 相比, 15°C 和 25°C 有机碳平均降低了 2.2% 和 5.4%。

3 讨论

本文中土壤有机碳矿化速率表现出前期快后期趋于稳定的趋势, 这与前人的研究结果一致^[3,7]。这主要是由于培养前期易分解有机碳含量高, 促进有机碳矿化速率, 故提高了土壤有机碳矿化量^[18-19]。而随着培养时间的延长, 易分解有机物减少, 土壤有机碳矿化量逐渐降低。与 CK 相比, 绿肥作物的添加显著增加了土壤有机碳累积矿化量^[9,15]。这主要由于外源有机物质的输入为微生物提供养分, 从而促进有机碳矿化。另外, S 和 M 处理土壤有机碳矿化速率和累积矿化量均高于 R 处理。这主要是因为 S、M 处理中含有豆科作物, 其植物体内氮素水平较非豆科作物高, 提高了土壤氮含量, 降低土壤起始碳氮比, 从而增强微生物活性, 促进土壤有机碳矿化。R 处理土壤碳氮比较高, 微生物活动受到限制, 从而降低土壤有机碳矿化速率, 这与杜威等^[20]研究结果一致。

随着培养时间的延长, 各温度下土壤有机碳矿化速率差异性减小(图 1), 表明随培养时间的延长温度对土壤有机碳矿化的影响减弱。同一绿肥添加处理下土壤有机碳累积矿化量均表现为 25°C > 15°C

表 3 不同绿肥处理不同温度下有机碳矿化潜势及矿化速率

Table 3 Mineralization potential and mineralization rate of organic carbon in different green fertilizer at different temperatures

温度 Temperature/°C	处理 Treatment	$C_0/(mg \cdot g^{-1})$	C_0/SOC	$k/(d^{-1})$	R^2
5	CK	3.54±0.28Bc	0.34±0.03Bc	0.005±0.0004Cd	0.999
	R	20.97±0.01Bb	2.03±0.01Bb	0.022±0.0005Cc	0.986
	M	21.37±0.14Bb	2.07±0.02Bb	0.023±0.0003Cb	0.988
	S	22.13±0.09Ba	2.15±0.01Ba	0.023±0.0001Ca	0.988
15	CK	4.39±0.41Bc	0.43±0.05Bc	0.006±0.0001Bd	0.999
	R	21.76±0.13Bb	2.11±0.02Bb	0.072±0.0003Bc	0.980
	M	22.18±0.02Bb	2.15±0.01Bb	0.074±0.0005Bb	0.977
	S	23.50±0.02Ba	2.28±0.01Ba	0.075±0.0010Ba	0.978
25	CK	5.58±2.62Ac	0.54±0.32Ac	0.009±0.0051Ad	0.999
	R	22.49±0.08Ab	2.18±0.01Ab	0.095±0.0007Ac	0.934
	M	23.52±0.03Ab	2.28±0.01Ab	0.097±0.0006Ab	0.929
	S	24.54±0.02Aa	2.38±0.01Aa	0.109±0.0006Aa	0.911

注:不同大写字母表示同一绿肥添加方式下不同温度间差异显著,不同小写字母表示同一温度下不同绿肥添加间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Different uppercase letters indicate significant differences among different temperatures under the same green manure. Different lowercase letters indicate significant differences among different green manure treatments at the same temperature ($P<0.05$). The same below.

表 4 绿肥与温度对土壤有机碳和全氮含量的影响/($g \cdot kg^{-1}$)

Table 4 Effect of green manure and temperature on soil organic carbon and total nitrogen contents

指标 Parameter	处理 Treatment	5°C	15°C	25°C
有机碳 Organic carbon	CK	8.60±0.10Ac	8.52±0.05Ac	8.36±0.17Bc
	R	12.71±0.15Aa	12.43±0.06Aa	12.09±0.02Ba
	M	12.18±0.16Ab	11.85±0.47Ab	11.58±0.10Bb
	S	11.98±0.45Ab	11.69±0.11Ab	10.99±0.39Bb
全氮 Total nitrogen	CK	1.20±0.02Bc	1.16±0.03ABc	1.29±0.05Ac
	R	1.67±0.01Bb	1.71±0.01ABb	1.72±0.02Ab
	M	1.69±0.01Bb	1.74±0.02ABb	1.70±0.04Ab
	S	1.73±0.02Ba	1.81±0.02ABa	1.84±0.01Aa

>5°C,这与前人研究结果一致^[9,21-23]。由于温度的升高,提高了微生物和酶的活性,进而促进土壤有机碳矿化^[24-25]。与增温相比,绿肥添加对土壤有机碳矿化作用更突出。马天娥等^[24]通过研究长期不同施肥措施下旱作农田土壤有机碳矿化特征,表明土壤有机碳矿化的 Q_{10} 介于 1.19~1.57 之间。本研究中,在 79 d 培养试验 Q_{10} 介于 1.42~1.61 之间,且呈现出 CK 处理大于其他处理的趋势,这可能是由于培养后期开始分解难分解有机物质,会降低 Q_{10} ,已有研究表明难分解物质对温度不敏感^[26]。绿肥残余的添加能够降低温度敏感性,表明在未来气候持续变暖的条件下,农田施加绿肥可能减缓 CO_2 释放的潜力。目前研究仍存在不确定性,需要进一步研究底物的质量和供应以及酶活性等,以阐明绿肥添加对土壤有机碳矿化的温度敏感性影响机理^[27-28]。

潜在可矿化有机碳 C_0 反映不同处理下土壤微生物对碳源的利用能力^[24]。本文研究中,与 CK 处理相比,绿肥添加显著提高了 C_0 ,这主要是由于绿肥添加显著增加了土壤有机碳矿化的底物供给。已有研究表明,绿肥作物添加为土壤微生物提供营养物质,促进微生物活动,从而提高对土壤碳库的利用。 C_0/SOC 越大则土壤有机碳矿化能力就越强,土壤有机碳的固存量就相对较少^[6]。本文结果表明, C_0/SOC 变化范围为 0.34~2.38,不同绿肥处理间呈现出 $S>M>R$,表明与豆科作物相比,非豆科作物固碳能力更突出。另外, C_0/SOC 表现出随着温度升高而增加的趋势,温度的升高促进了土壤有机碳矿化,降低了土壤有机碳固存能力。有机碳矿化速率常数 k 也具有相同趋势,这主要是由于豆科作物碳氮比较低,更易被分解利用。

绿肥添加增加了外源碳的输入,能够显著提高土壤有机碳含量^[29],且 R 处理较 S 与 M 处理优势更为突出。这主要由于植物残体本身含有丰富的有机质,腐解过程向土壤输入了碳氮,促进土壤碳固持^[18]。与非豆科作物相比,豆科作物分解速率快,促进土壤碳输出^[20]。随着温度增加,土壤有机碳含量呈递减趋势。随着温度升高,分解作用增加,促进土壤碳排放,土壤有机碳含量下降,不利于有机碳固存。研究表明,土壤温度、土壤有机质含量是影响土壤有机碳矿化的重要因素^[30-31]。本文研究结果表明,豆科作物能够有效补充土壤碳库和氮库,因而 S、M 处理较 R 处理能够更有效促进土壤

有机碳矿化,与前人研究结果一致^[15]。土壤全氮反映出土壤氮素储备状况。植物残体的加入有效提高土壤全氮含量,与辛国荣等^[32]研究结果一致。这主要是由于外源有机物有效地补充土壤氮库,并且豆科作物也具有固氮作用,这都利于促进土壤氮素循环。

4 结 论

本文基于室内培养试验表明,绿肥添加和增温共同影响着旱作农田土壤有机碳的矿化过程。绿肥添加显著提高土壤有机碳矿化速率和累积矿化量,但显著降低了土壤有机碳矿化的温度敏感性。一级动力学模型能较好地反映土壤有机碳矿化特征,绿肥添加和温度升高均显著提高了模型相关参数,且豆科绿肥较非豆科绿肥提高幅度更大。同时,绿肥添加通过提高外源碳输入能够有效补充土壤碳、氮库。综合来看,在气候变暖背景下,旱作农田施用绿肥能够促进土壤有机碳矿化和养分循环,有利于土壤碳固持。

参 考 文 献:

- [1] Song K, Yang J J, Xue Y, et al. Influence of tillage practices and straw incorporation on soil aggregates, organic carbon, and crop yields in a rice-wheat rotation system [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6 (1):36602.
- [2] 李蓉蓉,王俊,毛海兰,等. 秸秆覆盖对冬小麦农田土壤有机碳及其组分的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(3):187-192.
- [3] 张旭博,徐明岚,张文菊,等. 添加有机物后红壤 CO₂ 释放特征与微生物量动态[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(24):5013-5020.
- [4] Kanecze-e-Batool N, Shahzad T, Mahmood F, et al. Carbon mineralization in response to nitrogen and litter addition in surface and subsoils in an agroecosystem [J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2016, 62(9):1285-1292.
- [5] 董星丰,陈强,臧淑英,等. 温度和水分对大兴安岭多年冻土区森林土壤有机碳矿化的影响[J]. *环境科学学报*, 2019, 39(12):4269-4275.
- [6] 卢韦,王小利,郭磊,等. 长期施肥条件下黄壤有机碳矿化对温度变化的响应[J]. *中国农学通报*, 2019, 35(25):101-107.
- [7] 朱文玲,李秀双,田霄鸿,等. 小麦与秋豆秸秆配施对土壤有机碳固持的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(9):1952-1960.
- [8] 张丁辰,蔡典雄,代快,等. 旱作农田不同耕作土壤呼吸及其对水热因子的响应[J]. *生态学报*, 2013, 33(6):1916-1925.
- [9] 陈立新,李刚,刘云超,等. 外源有机物与温度耦合作用对红松阔叶混交林土壤有机碳的激发效应[J]. *林业科学研究*, 2017, 30(5):797-804.
- [10] 王峰,王义祥,陈玉真,等. 不同温度及化肥绿肥施用比例对果园土壤有机碳矿化的影响[J]. *南方农业学报*, 2012, 43(12):1991-1996.
- [11] 李彬彬,武兰芳. 土壤温室气体排放对 C/N 的响应[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(9):2067-2078.
- [12] 林杉,陈涛,赵劲松,等. 不同培养温度下长期施肥水稻土的有机碳矿化特征[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(5):1340-1348.
- [13] 赵娜,赵护兵,曹群虎,等. 渭北旱区夏闲期豆科绿肥对土壤肥力性状的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2011, 29(2):124-128.
- [14] 李增强,王建红,张贤. 绿肥腐解及养分释放过程研究进展[J]. *中国土壤与肥料*, 2017, (4):11-19.
- [15] Ghimire B, Ghimire R, Van Leeuwen D, et al. Cover crop residue amount and quality effects on soil organic carbon mineralization [J]. *Sustainability*, 2017, 9(12):2136.
- [16] 付鑫,王俊,张祺,等. 秸秆和地膜覆盖对渭北旱作玉米农田土壤氮组分与产量的影响[J]. *生态学报*, 2018, 38(19):129-137.
- [17] 孙馨宇,张泉,张鹏,等. 温度、水分及有机物对苹果园土壤有机碳转化和微生物群落多样性的影响[J]. *土壤通报*, 2018, 49(4):72-83.
- [18] Han T F, Huang W J, Liu J X, et al. Different soil respiration responses to litter manipulation in three subtropical successional forests [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5:18166.
- [19] 李志鹏,王俊,商雨晴,等. 填闲作物腐解过程及其对后茬冬小麦产量的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2019, 37(4):75-82.
- [20] 杜威,王紫泉,和文祥,等. 豆科绿肥对渭北旱塬土壤养分及生态化学计量学特征影响[J]. *土壤学报*, 2017, 54(4):999-1008.
- [21] 葛序娟,潘剑君,郭建红,等. 培养温度对水稻土有机碳矿化参数的影响研究[J]. *土壤通报*, 2015, 46(3):562-569.
- [22] 杨继松,刘景双,孙丽娜. 温度、水分对湿地土壤有机碳矿化的影响[J]. *生态学杂志*, 2008, 27(1):38-42.
- [23] 代景忠,王若梦,徐丽,等. 青藏高原高寒草地土壤碳矿化及其温度敏感性[J]. *植物生态学报*, 2013, 37(11):988-997.
- [24] 马天娥,魏艳春,杨宪龙,等. 长期施肥措施下土壤有机碳矿化特征研究[J]. *中国生态农业学报*, 2016, 24(1):8-16.
- [25] 高人,唐英平,杨玉盛,等. 杉木人工林和水稻田土壤呼吸 Q₁₀ 值的影响因素初探[J]. *亚热带资源与环境学报*, 2007, 2(4):9-14.
- [26] 杨庆朋,徐明,刘洪升,等. 土壤呼吸温度敏感性的影响因素和不确定性[J]. *生态学报*, 2011, 31(8):253-263.
- [27] Sun Y N, Yu X C, Shan H. Long-term organic amendment reduces the temperature sensitivity of organic carbon decomposition in an upland soil of subtropical China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 39(3):185-189.
- [28] 张东久,包兴国,胡志桥,等. 绿肥与化肥配施对小麦产量和土壤肥力的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2011, 29(6):125-129.
- [29] 刘玉槐,严员英,张艳杰,等. 不同温度条件下亚热带森林土壤碳矿化对氮磷添加的响应[J]. *生态学报*, 2017, 37(23):7994-8004.
- [30] 韩广轩,周广胜. 土壤呼吸作用时空动态变化及其影响机制研究与展望[J]. *植物生态学报*, 2009, 33(1):197-205.
- [31] 潘福霞,鲁剑巍,刘威,等. 不同种类绿肥翻压对土壤肥力的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(6):1359-1364.
- [32] 辛国荣,杨中艺. “黑麦草-水稻”草田轮作系统研究Ⅶ黑麦草残留物的田间分解及营养元素的释放动态[J]. *草业学报*, 2004, 13(3):80-84.