

温度对贵州喀斯特黄色石灰土有机碳矿化、 水稻秸秆激发效应和 Q_{10} 的影响

段建军¹, 罗安焕², 李瑞东², 陈 领², 陈 佳³, 王小利², 高照良⁴

(1. 贵州大学烟草学院, 贵州省烟草品质重点实验室, 贵阳 550025; 2. 贵州大学农学院,

贵阳 550025; 3. 中科院普定喀斯特生态系统观测站, 中科院贵阳地球化学研究所,

贵阳 562100; 4. 西北农林科技大学水土保持研究所, 中科院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 为定量揭示温度和秸秆还田对贵州喀斯特黄色石灰土土壤有机碳矿化、激发效应和温度敏感性的影响。以贵州喀斯特地区典型黄色石灰土为研究对象, 采用¹³C 稳定性同位素标记的水稻秸秆和土壤培养试验研究了 15、25、35 °C 培养温度下土壤原有有机碳矿化速率、累积矿化量、激发效应和温度系数 Q_{10} 对水稻秸秆输入和温度的响应。结果表明: 15~35 °C 温度范围和 0~60 天培养时间内, 贵州喀斯特黄色石灰土土壤有机碳、总有机碳、水稻秸秆有机碳和土壤原有有机碳矿化速率均培养 1 天达到峰值, 培养 1~30 天土壤总有机碳、水稻秸秆有机碳和土壤原有有机碳矿化速率快速下降, 30~60 天逐渐趋于平缓。温度升高显著增加土壤有机碳、水稻秸秆输入土壤总有机碳、土壤原有有机碳和输入的水稻秸秆有机碳的矿化速率和累积矿化量。培养期间水稻秸秆对土壤有机碳矿化均产生显著正激发效应, 且正激发效应随温度升高而强化。培养结束时 15、25、35 °C 下其对土壤原有有机碳矿化速率激发效应表现为随温度升高激发效应升高、降低、升高和先升高后降低的温度响应规律, 因表征方法不同而不同。15、25、35 °C 培养温度下水稻秸秆对土壤总有机碳矿化速率和累积矿化量的贡献率均随培养时间延长先减小后增大再减小, 但 2 种表征方法和 3 个培养温度拐点发生时间不同; 培养 1 天时水稻秸秆对土壤总有机碳矿化速率和累积矿化量的贡献率 15、25 °C 基本相同且显著高于 35 °C, 5 天时 25、35 °C 基本相当且显著大于 15 °C, 其他时间均是 25 °C 显著大于 35 °C 和 35 °C 显著大于 15 °C。15~25 °C 和 25~35 °C 2 个温度体系中水稻秸秆不输入石灰土土壤有机碳矿化速率温度敏感系数 $Q_{10,V}$ 分别为 1.01~2.60 和 1.39~3.12, $Q_{10,F}$ 分别为 1.50~2.60 和 1.39~2.17; 水稻秸秆输入石灰土土壤总有机碳矿化速率温度敏感系数 $Q_{10,V}$ 分别为 1.09~2.18 和 1.05~1.90, $Q_{10,F}$ 分别为 1.09~1.73 和 1.05~1.49; 水稻秸秆输入抑制土壤原有有机碳矿化的温度敏感性, 水稻秸秆输入导致土壤原有有机碳矿化温度敏感性随温度升高而升高转变为总体上随温度升高而降低在一定程度上可缓冲全球变暖所致的 CO₂ 排放增加。温度对土壤有机碳矿化温度敏感性的影响因表征温度敏感性指标和培养时间长短不同而不同, 建立不同培养时间的矿化速率和累积矿化量温度敏感系数的温度函数可精确表征其对温度的响应。研究结果对贵州喀斯特农田土壤秸秆还田、土壤固碳减排、土壤有机碳管理和土壤有机碳库预测等提供参考和借鉴, 对丰富土壤有机碳激发效应和温度系数 Q_{10} 的表征和深入理解具有重要意义。

关键词: 水稻秸秆; ¹³C 稳定性同位素; 黄色石灰土; 温度; 激发效应; Q_{10}

中图分类号: S153.6

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2022)05-0265-16

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2022.05.033

Temperature Remarkably Affecting Organic Carbon Mineralization of Karst Yellow Rendzina, Priming Effect of Rice Straw, and Q_{10} in Guizhou Province

DUAN Jianjun¹, LUO Anhuan², LI Ruidong², CHEN Ling²,

CHEN Jia³, WANG Xiaoli², GAO Zhaoliang⁴

(1. College of Tobacco Science, Guizhou University, Guizhou Provincial Key Laboratory of Tobacco Quality,

Guiyang 550025; 2. College of Agriculture, Guizhou University, Guiyang 550025; 3. Puding Karst Ecosystem

收稿日期: 2022-01-20

资助项目: 国家自然科学基金项目(31860160, 41361064)

第一作者: 段建军(1976—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事土壤保育与养分管理研究。E-mail: 2501050402@qq.com

通信作者: 王小利(1979—), 女, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事耕地肥力提升与保持及土壤碳循环研究。E-mail: xlwang@gzu.edu.cn

高照良(1969—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事农业水土工程和荒漠化防治研究。E-mail: gzl@ms.iswc.ac.cn

Research Station, Chinese Academy of Sciences, Guiyang Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 562100; 4. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: This study aimed to quantitatively reveal the effect of rice straw returning and temperature on soil organic carbon mineralization, priming effect, and temperature sensitivity of karst yellow rendzina in Guizhou Province. Taking the typical karst yellow rendzina in karst region of Guizhou Province as the research object, the rice straw labeled with ^{13}C stable isotope and soil culture experiment was used to study the mineralization of rice straw added and original organic carbon, the priming effect of rice straw on soil original organic carbon, and temperature sensitivity coefficient Q_{10} of soil organic carbon at the temperature of 15, 25 and 35 °C. The results showed that the peak of mineralization rate of soil organic carbon, total organic carbon, rice straw organic carbon and soil original organic carbon occurred at the first day of the cultivation at temperature from 15 to 35 °C and 0 to 60 days. Moreover, the mineralization rates of soil total organic carbon, rice straw organic carbon and soil original organic carbon decreased fast in 1 to 30 days, and gradually flattened out during 30 to 60 days. The increase of temperature significantly increased the mineralization rate and cumulative mineralization amount of soil organic carbon, total organic carbon, original organic carbon, and rice straw organic carbon in soils. Rice straw had a significant positive priming effect on soil organic carbon mineralization during the whole cultivation period, and the positive priming effect was intensified with increasing temperature. Respectively at the end of the soil culture at 15, 25 and 35 °C, showing that the priming effect increased, decreased, increased and first increased and then decreased respectively with the increases of temperatures, which varied with different characterization methods. At the temperature of 15, 25 and 35 °C to total soil organic carbon mineralization rate and cumulative soil organic mineralization amount, respectively, which decreased first, then increased, and then decreased with the increase of culture time, but the inflection points of two characterization methods and at the three culture temperature occurred at different times. The contribution of rice straw to the mineralization rate and cumulative mineralization amount of soil organic carbon at 15 and 25 °C were of little difference yet both significantly higher than that at 35 centigrade for the first day; the contribution of rice straw to the mineralization rate and cumulative mineralization amount of soil organic carbon were basically similar at 25 and 35 °C and both significantly higher than that at 15 centigrade for the fifth day; it was that those at 25 centigrade were significantly higher than those at 35 °C, and the same for 35 °C than 15 °C for others days. The temperature sensitivity coefficients of soil organic carbon mineralization rate $Q_{10,V}$ were between 1.01 and 2.60 and between 1.39 and 3.12, respectively, and those of soil organic carbon mineralization cumulative amount $Q_{10,F}$ were between 1.50 and 2.60, and 1.39 and 2.17 for the two temperature systems of from 15 to 25 °C and 25 to 35 °C, respectively, for soil without rice straw addition. Temperature sensitivity coefficients $Q_{10,V}$ of total organic carbon mineralization rate ranged from 1.09 to 2.18 and 1.05 to 1.90, respectively, and the values temperature sensitivity coefficients of $Q_{10,F}$ of total organic carbon mineralization cumulate amount ranged from 1.09 to 1.73 and 1.05 to 1.49, respectively, for soil with rice straw addition. The fact that temperature sensitivity of soil organic carbon mineralization increasing with the increase of temperature changed to decreasing with the increase of temperature could buffer the increase of CO_2 emission caused by global warming to some extent. These results and conclusions provide reference for soil straw returning, soil carbon sequestration, soil organic carbon management, and soil organic carbon pool prediction in Karst farmland of Guizhou Province and are of great significance to enrich the characterization and in-depth understanding of soil organic carbon priming effect and temperature coefficient Q_{10} .

Keywords: rice straw; ^{13}C stable isotope; yellow rendzina; temperature; priming effect; Q_{10}

土壤有机碳库是陆地生态系统最大的有机碳分库,易受土地利用、土壤管理和升温等影响,进而影响全球碳平衡和气候变化^[1]。在全球气候变暖和大力提倡秸秆直接还田的大背景下,探讨秸秆输入和温度对土壤原有有机碳矿化及其激发效应和温度敏感性的影响,对揭示秸秆还田和气候变暖及其交互作用对精准和深入理解农田土壤肥力和有机碳库演变及全球气候变化的影响和反馈具有重要意义。

秸秆直接还田等外源有机碳输入为土壤微生物提供充足碳源和能源,改变土壤微生物生物量、群系组成和活性,影响土壤有机碳矿化的由外源有机物输入土壤引起土壤原有有机质矿化改变的现象称为激发效应^[2]。激发效应正负和大小因生态系统、植被、土壤、外源有机物性质、温度、水分以及表征方式等不同而存在显著差异。如 ^{13}C 标记凋落物对天然林地土壤有机碳矿化产生正激发效应而人工林地产生负激发效应^[3], ^{14}C 标记稻草提高了红壤土壤有机碳的矿化速率而降低了棕色石灰土土壤有机碳的矿化速率^[4],葡萄糖和黑麦草对草原土壤原有有机碳矿化产生正激发效应,且激发效应葡萄糖大于黑麦草^[5]。外源有机物对土壤有机碳矿化的激发效应还受土壤理化性质和土壤微生物对输入的外源有机物偏好等因素影响^[6]。如秸秆配施适量氮肥显著提高土壤有机碳和微生物量生物量碳含量及土壤脲酶和多酚氧化酶活性^[7],施用生物炭抑制土壤有机碳矿化^[8]。温度是影响土壤物理、化学和生物学过程的重要环境因子,显著影响土壤有机碳矿化,即土壤有机碳矿化和土壤呼吸的温度敏感性,并用温度系数 Q_{10} 表征,其含义是温度每升高 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时土壤有机碳矿化速率或矿化量增加的倍数^[9]。温度对激发效应的影响因外源物质种类、数量和土壤系统而不同。如温度影响土壤微生物对外源输入有机碳和土壤原有有机碳底物利用效率影响外源输入有机碳和土壤原有有机碳矿化,改变激发效应^[10]。葡萄糖和杉木凋落物激发效应随温度升高而降低^[11],苜蓿的激发效应随温度升高而增加^[12],温度升高不影响蔗糖的激发效应^[13]等。传统上认为 Q_{10} 是一个常数,但大量研究^[14-16]表明, Q_{10} 也随温度变化而变化。如土壤有机碳矿化 Q_{10} 随温度升高而降低、增大或保持稳定。因此不同温度状态或温度系统中土壤有机碳矿化温度系数 Q_{10} 可能具有不确定性^[17]或是温度的函数,应引入温度系数函数描述之。

贵州地处中国西南喀斯特区域中心,碳酸盐岩分布广泛,发育形成的石灰土土壤土层浅薄,生产力低

下,水土流失严重,土壤有机碳库易受人类活动与自然环境双重影响,是生态环境脆弱带和全球气候变化敏感地区之一^[18]。秸秆直接和碳化还田等资源化利用是增加土壤有机碳库储量、减缓大气 CO_2 浓度升高和培肥土壤的重要农业技术措施^[4,6-8,19-20],随着沃土工程实施和碳达峰、碳中和理念的提出和实践秸秆还田在农业生产应用中愈受关注^[21-22]。水稻是贵州省重要的粮食作物,水稻秸秆资源量大,农民素有稻草还田习惯,加之近年来贵州省年平均气温波动性上升^[23],因此,通过室内培养试验或土壤原位试验定量水稻秸秆还田后水稻秸秆矿化分解和对贵州喀斯特石灰土土壤有机碳矿化及激发效应和温度敏感性的影响及对温度的响应对沃土工程实施、耕地肥力提升、土壤有机碳库储量估算和全球变化技术措施选择均具有重要意义。本文以贵州喀斯特地区典型黄色石灰土为对象,采用室内土壤培养结合 ^{13}C 稳定性碳同位素标记技术,探讨温度和水稻秸秆碳输入对土壤原有有机碳矿化、激发效应和温度敏感性的影响,比较了激发效应不同表征形式的时间动态和温度响应,引入土壤有机碳矿化速率和累积矿化量温度敏感函数描述和表征土壤有机碳矿化的温度敏感性,并将其定义为土壤有机碳矿化速率和累积矿化量的温度函数的导数与温度敏感性函数的商,以期对贵州喀斯特农田秸秆还田、土壤固碳减排和土壤有机碳库预测等提供参考,丰富对土壤有机碳激发效应和温度系数 Q_{10} 表征和深入理解。

1 材料与方法

1.1 供试材料

土壤培养试验供试土壤样品采自中国科学院普定喀斯特生态系统观测研究站($105^{\circ}44'54''\text{E}$, $26^{\circ}15'41''\text{N}$),海拔 $1\,338\text{ m}$ 。该地属中亚热带湿润性季风气候区,年平均气温 $15.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,年平均降水量 $1\,397\text{ mm}$,年平均蒸发量 920 mm ;地形属典型喀斯特山地;成土母质为石灰岩;土壤类型为石灰土;试验地种植方式为玉米—油菜轮作。采用随机采样法于2019年10月玉米收获后在样地内18个点采集0—20 cm 土层混合土壤样品,带回实验室后置于阴凉通风处风干,去除动植物残体及石粒等杂质后过2 mm 筛,充分混匀装入自封袋中备用。四分法分取过2 mm 筛土样 200.00 g 进一步研磨并全部过 0.149 mm 筛后装入自封袋备用。前者用于土壤有机碳矿化培养试验和土壤 pH、碱解氮、有效磷和速效钾等测定,后者用于土壤全氮、全磷和全钾测定。供试土壤 pH 为 6.62,有机碳、全氮、全磷和全钾含量分别为 18.74, 1.99, 0.87, 20.66 g/kg 干土,碱解氮、有效磷和速效钾含

量分别为 110.91,10.25,281.87 mg/kg 干土,风干土含水量 2.38%。供试水稻秸秆为温室通过饲喂¹³C 稳定性同位素 CO₂ 的水稻秸秆,水稻秸秆¹³C 丰度 2.79%,有机碳含量 36.24%,全 N 0.72%。水稻秸秆粉碎并全部过 2 mm 筛后混匀备用。

1.2 试验设计

土壤培养试验因素为添加水稻秸秆和培养温度。水稻秸秆添加量设置 2 个水平,即不添加和添加 1.50 g/kg 干土(按一般耕地实际还田量 4 t/hm² 换算确定)。培养温度设置 3 个水平,即 15,25,35 ℃。同时每个培养温度分别设置 1 个无土无秸秆的空白对照处理以校正环境 CO₂。试验共 9 个处理(表 1),3 次重复,共 27 组矿化培养微系统。

表 1 土壤矿化培养试验的试验处理

处理 代码	温度/ ℃	秸秆量(干重)/ (g·kg ⁻¹)	土壤量 (干重)/g
T1	15	0	0
T1L	15	0	30.00
T1LS	15	1.50	30.00
T2	25	0	0
T2L	25	0	30.00
T2LS	25	1.50	30.00
T3	35	0	0
T3L	35	0	30.00
T3LS	35	1.50	30.00

注:L 表示培养基质为石灰土;LS 表示培养基质是石灰土+1.50 g 水稻秸秆/kg 干土。下同。

称取 30.80 g(相当于 30.00 g 烘干土)风干土于 250 mL 棕色广口玻璃瓶中,用去离子水调节土壤含水量至 45%饱和含水量,将棕色广口玻璃瓶和装有去离子水的 50 mL 小烧杯放入 1 L 的广口塑料瓶中,盖紧盖子(有橡胶垫以防止漏气),置于 25 ℃恒温培养箱内避光预培养 7 天,期间每天定时用称重法保持土壤含水量恒定。预培养结束后按 1.50 g/kg 干土水稻秸秆添加量向对应处理的 250 mL 棕色广口玻璃培养瓶中加入过 2 mm 筛的水稻秸秆,充分混匀后按试验设计分别将 250 mL 棕色广口玻璃培养瓶置于 15,25,35 ℃恒温培养箱内避光培养 60 天,称重法每天定时加入适量去离子水以保持恒重。培养过程中于 1,5,10,15,30,60 天时采集气体样品测定 CO₂ 含量和¹³CO₂ 丰度。采集气体样品时,先用空气泵向培养瓶内通气 5 min,确保培养瓶内氧气充足以满足土壤微生物呼吸,然后盖紧橡皮塞子并产气 4 h 后用 30 mL 无菌注射器采集 30 mL 气体样品,保存于 10 mL 顶空瓶中,气相色谱—质谱仪联用法测定 4 h 产生的 CO₂ 量和¹³CO₂ 丰度。

1.3 测定指标与方法

气体样品中 CO₂ 含量用气相色谱仪(Agilent 7890A,美国)测定,¹³CO₂ 丰度用稳定性同位素质谱仪(Thermo Scientific MAT253,美国)测定^[24]。土壤田间持水量、pH、有机碳、全氮、全磷和全钾分别用环刀法、土壤 pH 计(水土比为 2.5:1)、重铬酸钾容量—外加热法、半微量开氏法、NaOH 熔融—钼锑抗比色法和 NaOH 熔融—火焰光度法^[25]测定。

1.4 数据计算与处理

(1) 土壤有机碳矿化速率计算公式^[26-27]为:

$$V=\frac{(C_2-C_1)\times M\times V_b\times 10^3}{W\times (1-\rho)\times MV_{\text{corr}}\times t}\tag{1}$$

式中:V 为土壤有机碳矿化速率[mg/(kg·d)];C₁ 和 C₂ 分别为无土壤空白对照处理和有土壤处理培养 4 h 后 CO₂ 的浓度(mol/mL);M 为 CO₂-C 的摩尔质量(12 g/mol);MV_{corr} 为温度校正后的分子体积(mL);V_b 为培养瓶的容积(250 mL);W 为风干土的质量(g);ρ 为风干土的质量含水量(g 水/g 干土);t 为产生 CO₂ 气体的时间(4/24 d)。其中 MV_{corr} 计算公式^[26-27]为:

$$MV_{\text{corr}}=\frac{0.02241\times (273.15+T)}{273.15}\tag{2}$$

式中:0.022 41 为 273.15 K 时理想气体的摩尔体积(L);T 为培养温度(℃)。

(2) 土壤有机碳累积矿化量计算公式^[26-27]为:

$$F=\sum_{i=1}^n\frac{V_i+V_{i+1}}{2}\times (t_{i+1}-t_i)\tag{3}$$

式中:F 为培养时间内土壤总有机碳累积矿化量(mg/kg);V_i 和 V_{i+1} 分别为培养过程中第 i 和 i+1 次气体采样的土壤有机碳矿化速率[mg/(kg·d)];t_i 和 t_{i+1} 分别为第 i 和 i+1 次气体采样的培养时间(天)。

(3) 水稻秸秆累积矿化量计算公式^[6]为:

$$F_{\text{Straw}}=F_{\text{Total}}\times\frac{\delta_{s,\text{CO}_2}^{13}\text{C}-\delta_{ns,\text{CO}_2}^{13}\text{C}}{\delta_{\text{straw}}^{13}\text{C}-\delta_{\text{soil}}^{13}\text{C}}\tag{4}$$

式中:F_{Straw} 为水稻秸秆累积矿化量(mg/kg);F_{Total} 为土壤总有机碳累积矿化量(mg/kg);δ_{s,CO₂}¹³C 和 δ_{ns,CO₂}¹³C 分别为添加和不添加水稻秸秆处理释放的 CO₂ 的¹³C 丰度;δ_{straw}¹³C 和 δ_{soil}¹³C 分别为水稻秸秆和原始土壤的¹³C 丰度。

(4) 添加水稻秸秆处理土壤原有有机碳累积矿化量计算公式^[6]为:

$$F_{\text{Soil}}=F_{\text{Total}}-F_{\text{Straw}}\tag{5}$$

式中:F_{Soil} 为土壤原有有机碳累积矿化量(mg/kg);F_{Total} 为添加水稻秸秆处理的土壤总有机碳累积矿化量(mg/kg);F_{Straw} 为水稻秸秆累积矿化量(mg/kg)。

(5) 水稻秸秆有机碳矿化的贡献率计算公式^[6]为:

$$R_{\text{straw}} = \frac{F_{\text{straw}}}{F_{\text{total}}} \times 100\% \quad (6)$$

式中: R_{straw} 水稻秸秆有机碳的矿化贡献率(%)。

(6) 水稻秸秆对土壤原有有机碳矿化速率和累积矿化量激发效应计算公式^[19]为:

$$PE_V = V_{\text{total, straw}} - V_{\text{soil}} - V_{\text{straw}} \quad (7)$$

$$PE_F = F_{\text{total, straw}} - F_{\text{soil}} - F_{\text{straw}} \quad (8)$$

式中: PE_V 为水稻秸秆对土壤原有有机碳矿化速率激发效应[$\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$]; PE_F 为水稻秸秆对土壤原有有机碳累积矿化量激发效应(mg/kg); $V_{\text{total, straw}}$ 和 V_{soil} 分别为添加和不添加水稻秸秆处理土壤总有机碳累积矿化速率[$\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$]; V_{straw} 为相同培养温度下添加水稻秸秆处理的水稻秸秆矿化速率[$\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$]; $F_{\text{total, straw}}$ 和 F_{soil} 分别为添加和不添加水稻秸秆处理土壤总有机碳累积矿化量(mg/kg); F_{straw} 为相同培养温度下添加水稻秸秆处理的水稻秸秆累积矿化量(mg/kg)。

(7) 水稻秸秆对土壤原有有机碳矿化速率和累积矿化量相对激发效应计算公式^[19]为:

$$\text{RPE}_V = \frac{V_{\text{total, straw}} - V_{\text{soil}} - V_{\text{straw}}}{V_{\text{soil}}} \times 100\% \quad (9)$$

$$\text{RPE}_F = \frac{F_{\text{total, straw}} - F_{\text{soil}} - F_{\text{straw}}}{F_{\text{soil}}} \times 100\% \quad (10)$$

式中: RPE_V 为水稻秸秆对土壤原有有机碳矿化速率相对激发效应(%); RPE_F 为水稻秸秆对土壤原有有机碳累积矿化量相对激发效应(%).

(8) 土壤有机碳矿化速率和累积矿化量温度系数 $Q_{10,V}$ 和 $Q_{10,F}$ 计算公式^[26]为:

$$Q_{10,V} = \frac{V_{Th}}{V_{Tl}} \times \frac{10}{Th - Tl} \quad (11)$$

$$Q_{10,F} = \frac{F_{Th}}{F_{Tl}} \times \frac{10}{Th - Tl} \quad (12)$$

式中: $Q_{10,V}$ 和 $Q_{10,F}$ 分别是土壤有机碳矿化速率和累积矿化量温度系数; V_{Th} 和 V_{Tl} 分别是较高和较低培养温度的土壤有机碳矿化速率[$\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$]; F_{Th} 和 F_{Tl} 分别是较高和较低培养温度的土壤有机碳累积矿化量(mg/kg); Th 和 Tl 分别是较高和较低培养温度($^{\circ}\text{C}$)。

(9) 土壤有机碳矿化速率和累积矿化量温度系数函数 $Q_{10,V}(T)$ 和 $Q_{10,F}(T)$ 构建

首先建立土壤有机碳矿化速率和累积矿化量的温度响应函数 $V(T)$ 和 $F(T)$, 分别求其一阶导函数 $dV(T)/dT$ 和 $dF(T)/dT$, 其含义分别是 T 温度时单位温度变化矿化速率的变化量[$\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d} \cdot ^{\circ}\text{C})$] 和累积矿化量的变化量[$\text{mg}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$]。因习惯上

温度系数 Q_{10} 定义为温度变化 10°C 时有机碳矿化速率或累积矿化量增加或减小的倍数, 所以用 $10dV(T)/dT$ 和 $10dF(T)/dT$ 分别为 T 温度时温度升高或降低 10°C 土壤有机碳矿化速率和累积矿化量的增加或减小量。然后其分别与 T 温度时矿化速率和累积矿化量温度响应函数 $V(T)$ 和 $F(T)$ 加和即 $10dV(T)/dT + V(T)$ 和 $10dF(T)/dT + F(T)$ 分别为温度增加或减小 10°C 时的矿化速率和累积矿化量。最后 $10dV(T)/dT + V(T)$ 和 $10dF(T)/dT + F(T)$ 分别除以矿化速率和累积矿化量温度响应函数 $V(T)$ 和 $F(T)$ 即 $Q_{10,V}(T) = (10dV(T)/dT + V(T))/V(T)$ 和 $Q_{10,F}(T) = (10dF(T)/dT + F(T))/F(T)$ 分别为矿化速率和累积矿化量温度系数函数。例如, 分别用二次函数拟合土壤有机碳矿化速率和累积矿化量温度响应函数, 即 $V_{10,V} = a_V T^2 + b_V T + c_V$ 和 $F_{10,F} = a_F T^2 + b_F T + c_F$, 则其一阶导函数分别为 $dV_{10,V} = 2a_V T + b_V$ 和 $dF_{10,F} = 2a_F T + b_F$, 一阶导函数乘以 10 与原函数的和分别为 $V_{10,V} + dV_{10,V} = a_V T^2 + (20a_V + b_V)T + (10b_V + c_V)$ 和 $F_{10,F} + dF_{10,F} = a_F T^2 + (20a_F + b_F)T + (10b_F + c_F)$, 最终的矿化速率和累积矿化量温度系数函数分别为公式(13)和(14),

$$Q_{10,V} = (a_V T^2 + (20a_V + b_V)T + (10b_V + c_V)) / (a_V T^2 + b_V T + c_V) \quad (13)$$

$$Q_{10,F} = (a_F T^2 + (20a_F + b_F)T + (10b_F + c_F)) / (a_F T^2 + b_F T + c_F) \quad (14)$$

式中: $Q_{10,V}$ 和 $Q_{10,F}$ 分别为土壤有机碳矿化速率和累积矿化量温度系数; T 为培养温度($^{\circ}\text{C}$); a_V 、 b_V 、 c_V 、 b_F 和 a_F 为拟合方程的系数。

所有数据用 Excel 2019 软件整理、计算和绘制图表, 用 SPSS 28.0 软件进行显著性检验($p < 0.05$)、方差分析和 LSD 多重比较, 幂函数用 Excel 2019 软件拟合, 一级动力学方程用 Sigmaplot 14.0 拟合。

2 结果与分析

2.1 贵州喀斯特石灰土土壤有机碳矿化速率对水稻秸秆输入和培养温度的响应

由图 1 可知, $15, 25, 35^{\circ}\text{C}$ 培养温度下不输入水稻秸秆石灰土土壤有机碳、输入水稻秸秆石灰土土壤总有机碳、原有有机碳和水稻秸秆有机碳矿化速率总体上均随培养时间延长逐渐降低, 随培养温度升高而升高。其中 1 天时 $15, 25, 35^{\circ}\text{C}$ 培养温度下不输入水稻秸秆石灰土土壤有机碳、输入水稻秸秆石灰土土壤总有机碳、原有有机碳和水稻秸秆有机碳矿化速率依次分别为 $9.50, 24.70, 34.34 \text{ mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ 、 $110.78, 121.30, 127.85 \text{ mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ 、 $95.23, 103.57, 111.41 \text{ mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ 和 $20.61, 22.14, 19.27 \text{ mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$, 即

培养温度从 15 ℃ 上升到 25 ℃ 和从 25 ℃ 上升到 35 ℃ 时有机碳矿化速率依次分别增加 15.20, 9.64 mg/(kg · d)、10.52, 6.55 mg/(kg · d)、8.34, 7.84 mg/(kg · d) 和 1.53, -2.78 mg/(kg · d), 除从 25 ℃ 升高到 35 ℃ 时水稻秸秆有机碳矿化速率降低外, 其余均升高; 30 天有机碳矿化速率依次分别为 7.10, 7.14, 22.28 mg/(kg · d)、14.57, 20.13, 38.18 mg/(kg · d)、9.89, 14.88, 22.50 mg/(kg · d) 和 0.37, 1.37, 1.46 mg/(kg · d), 较 1 天时降幅依次分别为 25.26%, 71.09%, 35.12%、86.85%, 83.40%, 70.14%、89.61%, 85.63%, 79.80% 和 98.20%, 93.81%, 92.42%, 培养温度从 15 ℃ 上升到 25 ℃ 和从 25 ℃ 上升到 35 ℃ 有机碳矿化速率依次分别增加 0.04, 14.14 mg/(kg · d)、5.65, 18.05 mg/(kg · d)、4.99, 7.62 mg/(kg · d) 和 1.00, 0.09 mg/(kg · d), 增幅依次

分别为 0.56% 和 198.04%、38.78% 和 89.67%、50.64% 和 50.21%、270.27% 和 6.14%; 60 天培养结束时有机碳矿化速率依次分别为 5.29, 8.15, 18.18 mg/(kg · d)、9.14, 11.97, 18.56 mg/(kg · d)、11.65, 15.49, 27.71 mg/(kg · d) 和 0.21, 0.58, 0.68 mg/(kg · d), 分别较 1, 30 天降幅依次为 44.32%, 67.00%, 47.06%、91.75%, 90.13%, 85.48%、98.98%, 97.38%, 96.47% 和 98.98%, 97.38%, 96.47% 以及 25.49%, -14.14%, 18.40%、37.26%, 40.54%, 51.39%、17.80%, 4.10%, 23.16% 和 43.24%, 57.66%, 53.42%, 培养温度从 15 ℃ 上升到 25 ℃ 和从 25 ℃ 上升到 35 ℃ 有机碳矿化速率依次分别增加 2.86, 10.03 mg/(kg · d)、2.83, 6.59 mg/(kg · d)、3.84, 12.22 mg/(kg · d) 和 0.37, 0.10 mg/(kg · d), 增幅依次分别为 54.06%, 123.07%、30.96%, 55.05%、50.64%, 78.89% 和 176.19%, 17.24%。

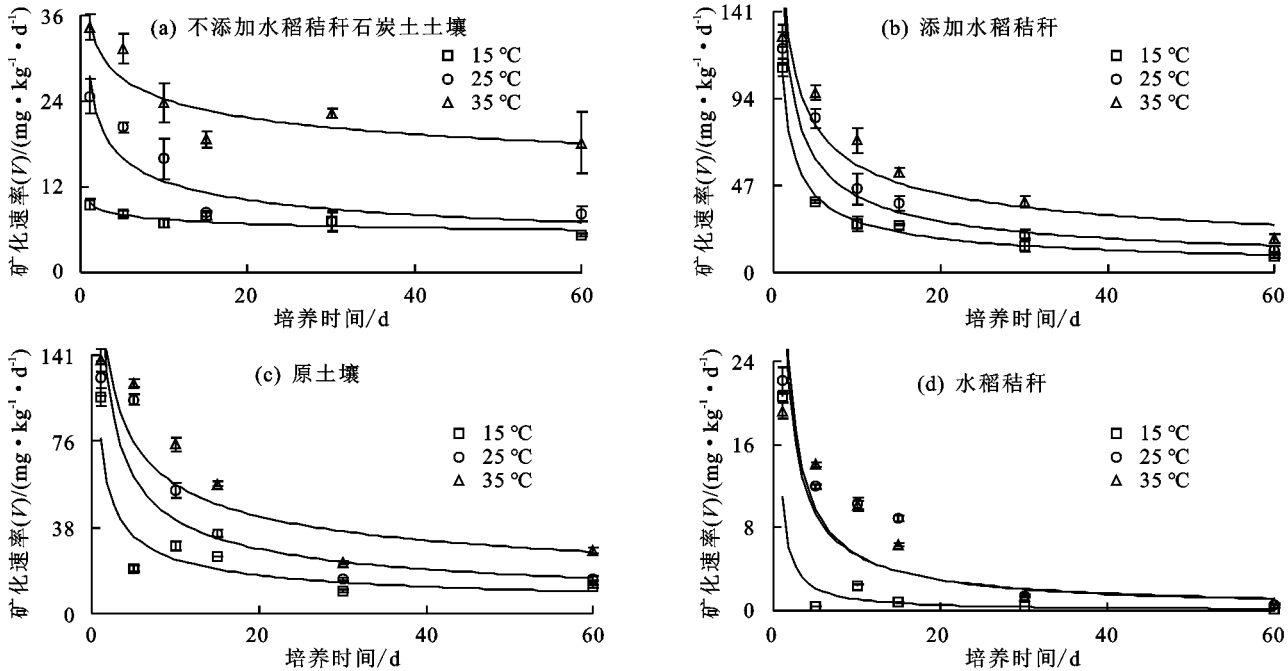


图 1 培养温度对有机碳矿化速率及拟合曲线 $V=at^{-b}$ 的影响

幂函数 $V=at^{-b}$ 可较好拟合 15, 25, 35 ℃ 培养温度下 0~60 天不添加水稻秸秆石灰土土壤有机碳、添加水稻秸秆石灰土土壤总有机碳、原有有机碳和水稻秸秆有机碳矿化速率的培养时间演变动态(表 2), 且参数 a 和 b 可分别表征有机碳最大矿化速率和时间演变速率。由表 2 可知, 15, 25, 35 ℃ 培养温度下 0~60 天培养时间内贵州喀斯特石灰土土壤有机碳、添加水稻秸秆石灰土土壤总有机碳、原有有机碳和水稻秸秆有机碳矿化速率均随培养时间呈幂函数下降。其中 15, 25, 35 ℃ 培养温度下除添加水稻秸秆石灰土水稻秸秆有机碳矿化速率函数系数(a)即理论最大矿化速率分别为 11.019 4, 40.913 4, 36.385 7 mg/(kg · d), 随温度升高呈先增大后减小规律外, 不添加水稻秸秆石灰土土壤有机碳、添加水稻秸秆石灰土土壤总有机碳和土壤原有有机碳 0~60 天表征最

大矿化速率的拟合函数参数(a)均随培养温度升高而增大, 其值依次分别为 9.813 9, 27.503 7, 35.346 7 mg/(kg · d)、108.403 1, 157.034 0, 165.905 3 mg/(kg · d) 以及 77.569 0, 144.656 9, 146.384 6 mg/(kg · d)。15, 25, 35 ℃ 培养温度下不添加水稻秸秆石灰土土壤有机碳和添加水稻秸秆石灰土土壤原有有机碳矿化速率函数参数(b)依次分别为 0.121 5, 0.333 0, 0.163 5 和 0.510 1, 0.543 5, 0.410 6, 随温度升高均先增大后减小, 表现为培养温度从 15 ℃ 升高到 25 ℃ 时有机碳矿化速率随培养时间延长减小幅度随温度升高而增大, 培养温度从 25 ℃ 升高到 35 ℃ 时有机碳矿化速率随培养时间延长减小幅度随温度升高而减小。二者不同在于不添加水稻秸秆石灰土土壤有机碳矿化速率随培养时间延长减小速率是 35 ℃ 大于 15 ℃, 添加水稻秸秆石灰土土壤原有有机碳矿

化速率随培养时间延长减小速率是 15 ℃ 大于 35 ℃。随培养温度升高添加水稻秸秆石灰土土壤总有机碳矿化速率和水稻秸秆有机碳矿化速率均随培养时间延长而减小的速率不断减小,二者 15,25,35 ℃ 培养温度下的幂函数参数(b)分别为 0.592 5,0.580 2,0.454 4和 0.999 8,0.879 4,0.836 1。

2.2 贵州喀斯特石灰土土壤有机碳累积矿化量对水稻秸秆输入和培养温度的响应

由图 2 和表 3 可知,15,25,35 ℃ 培养温度下 0~60 天培养期内不添加水稻秸秆石灰土土壤有机碳、添加水稻秸秆石灰土土壤总有机碳、水稻秸秆有机碳和土壤原有有机碳累积矿化量均随培养时间延长逐步增加且与培养时间呈一级动力学函数关系,累积矿化量培养结束时最大,并随培养温度升高而增大。其中 15,25,35 ℃ 培养温度不添加水稻秸秆石灰土 30 天时总有机碳累积矿化量分别为 237.98,383.23,725.64 mg/kg,60 天时累积矿化量分别为 423.75,612.61,1 332.57 mg/kg,前 30 天和后 30 天累积矿化量分别占 60 天累积矿化量的 56.16%,62.56%,54.45%和 43.84%,37.44%,45.55%,均表现为前 30 天>后 30 天,即累积矿化量增量和增幅均随培养时间延长逐渐减小。同时不添加水稻秸秆石灰土土壤有机碳累积矿化量随培养温度升高而增大,但表征潜在最大累积矿化量的一级动力学方程参数 a 随培养温度升高先减小后增大,对应的参数 a 分别为 1 220.602 0,729.558 6,3 052.443 7 mg/kg。拟合函数的参数 b 分别为 0.007 1,0.028 8,0.009 5,表明不添加水稻秸秆喀斯特石灰土土壤有机碳累积矿化量 25 ℃ 培养温度下随培养时间延长增加速率最低,其次是 35 ℃,15 ℃ 下累积矿化量随培养时间延长增速最快。添加水稻秸秆石灰土土壤总有机碳累积矿化量也随温度升高增大,如 30,60 天时 15,25,35 ℃ 培养温度下依次分别为 782.93,1 525.13,2 009.83 mg/kg 和 1 138.53,2 006.53,2 860.95 mg/kg。15,25,35 ℃ 培养温度下添加

水稻秸秆石灰土土壤总有机碳累积矿化量前 30 天和后 30 天分别占 60 天累积矿化量的 68.77%,76.01%,70.25%和 31.23%,23.99%,29.75%,亦均表现为前 30 天>后30 天。添加水稻秸秆石灰土水稻秸秆有机碳和土壤原有有机碳累积矿化量随培养温度的变化规律与土壤总有机碳累积矿化量变量规律类似,亦均随培养温度升高而增大且升高增幅更大。其中 30,60 天时 15,25,35 ℃ 培养温度下水稻秸秆有机碳累积矿化量依次分别为 36.87,152.62,160.32 mg/kg 和 43.10,169.51,180.23 mg/kg。前 30 天和后 30 天累积矿化量分别占 60 天累积矿化量的 85.54%,90.04%,88.95%和 14.45%,9.96%,11.05%。30,60 天时 15,25,35 ℃ 培养温度下土壤原有有机碳累积矿化量分别为 746.07,1 372.51,1 849.51 mg/kg 和1 095.43,1 837.13,2 680.72 mg/kg,占 60 天累积矿化量百分比依次分别为 68.13%,74.71%,68.99%和 31.87%,23.29%,31.01%,亦为前 30 天>后 30 天。从一级动力学拟合方程看添加水稻秸秆石灰土土壤总有机碳、原有有机碳和水稻秸秆有机碳累积矿化量参数 a 均随培养温度升高逐渐增大,即潜在最大累积矿化量随培养温度升高而增大;添加水稻秸秆石灰土土壤总有机碳和水稻秸秆有机碳累积矿化量参数 b 均随培养温度升高先减小后增大但仍小于 15 ℃ 时,土壤原有有机碳累积矿化量一级动力学方程参数 b 与不添加水稻秸秆石灰土土壤有机碳累积矿化量一级动力学方程参数 b 类似,均随温度升高先增大后减小但仍大于 15 ℃ 时。其中 15,25,35 ℃ 培养温度下添加水稻秸秆石灰土土壤总有机碳、土壤原有有机碳和水稻秸秆有机碳累积矿化量与培养时间的一级动力学拟合方程参数 a 依次分别为 2 072.5 233,3 052.443 7,3 226.791 3 mg/kg,1 366.627 6,1 924.560 6,3 125.063 1 mg/kg 和 40.258 4,169.226 8,177.781 2 mg/kg,对应的一级动力学拟合方程参数 b 依次分别为 0.049 5,0.009 5,0.034 9、0.026 8,0.045 9,0.031 6 和 0.116 9,0.089 9,0.094 2。

表 2 不同培养温度下有机碳矿化速率拟合函数 $V=at^{-b}$ 的参数

培养 基质	矿化 速率	15 ℃			25 ℃			35 ℃		
		参数 a	参数 b	R^2	参数 a	参数 b	R^2	参数 a	参数 b	R^2
L	土壤有机碳	9.8139	0.1215	0.7897	27.5037	0.3330	0.8334	35.3467	0.1635	0.8249
	土壤总有机碳	108.4043	0.5925	0.9952	157.0340	0.5802	0.8959	165.9053	0.4544	0.8676
LS	土壤原有有机碳	77.5690	0.5101	0.9184	144.6569	0.5435	0.7316	146.3846	0.4106	0.7360
	水稻秸秆有机碳	11.0194	0.9998	0.9672	40.9134	0.8794	0.7953	36.3857	0.8361	0.7126

2.3 水稻秸秆输入对贵州喀斯特石灰土土壤有机碳矿化速率和累积矿化量贡献的演变动态及温度响应

贵州喀斯特石灰土水稻秸秆输入后土壤总有机碳和原有有机碳矿化速率和累积矿化量均显著大于无水

稻秸秆输入土壤有机碳矿化速率和累积矿化量(图 1 和图 2),其原因首先在于水稻秸秆输入土壤总有机碳含量更高,矿化速率和累积矿化量包含输入水稻秸秆有机碳矿化速率和累积矿化量。图 1d 和图 1b 数据相除或图 2d 和图 2b 数据相除即为水稻秸秆有机碳矿化对

土壤总有机碳矿化速率或累积矿化量的贡献率(图 3a 和图 3b),其中矿化速率贡献率反映水稻秸秆输入的“瞬时”贡献,累积矿化量贡献率反映培养时段内水稻秸秆输入的“平均”贡献。由图 3a 可知,水稻秸秆对土壤总有机碳矿化速率贡献率 15℃培养温度下除 1 天时较大,贡献率 18.60%外,其余时间贡献率均较小,并整体上随培养时间延长减小。25℃培养温度下矿化速率贡献率 1,5,10,15 天时均较大,贡献率依次为 18.30%,14.30%,22.80%和 23.60%,30 和 60 天时较小,贡献率分别为 6.80%和 4.80%,随培养时间延长整体上亦减小。

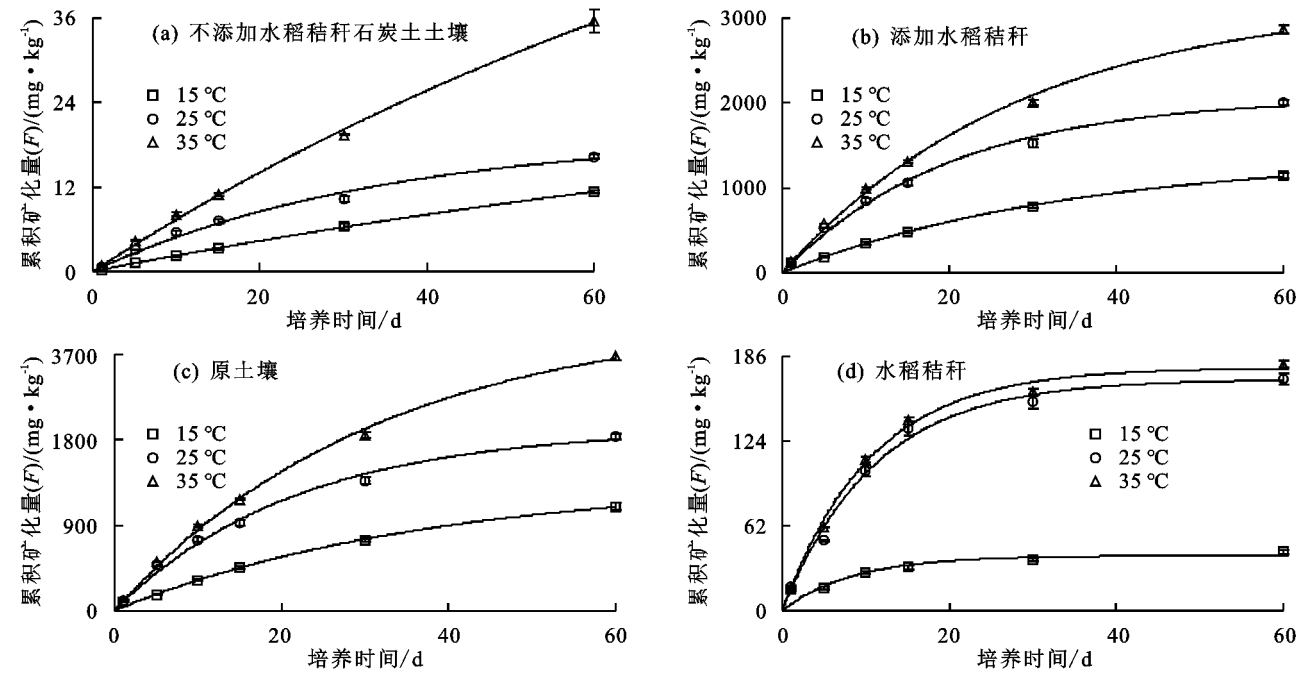


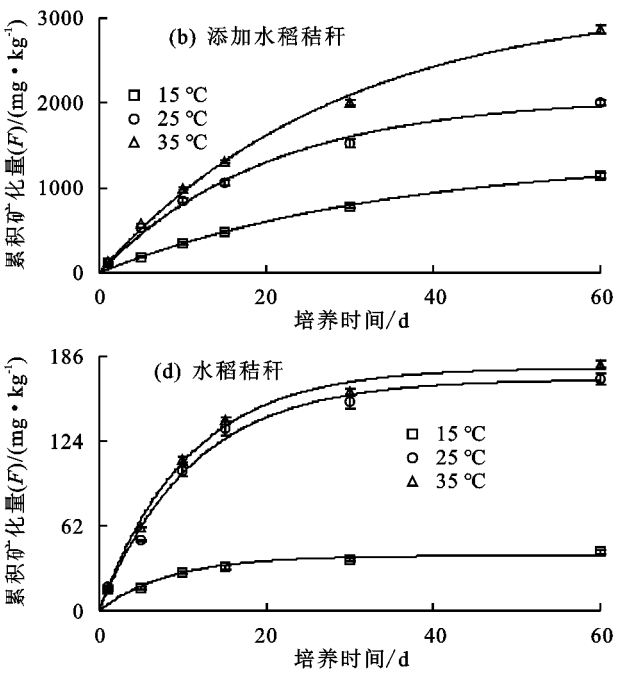
图 2 培养温度对有机碳累积矿化量及拟合函数 $F=a(1-e^{-bt})$ 的影响

表 3 不同培养温度下有机碳 0~60 天累积矿化量拟合函数 $F=a(1-e^{-bt})$ 的参数

培养 基质	累积 矿化量	15℃			25℃			35℃		
		参数 a	参数 b	R ²	参数 a	参数 b	R ²	参数 a	参数 b	R ²
L	土壤有机碳	1220.6020	0.0071	0.9999	729.5586	0.0288	0.9940	3052.4437	0.0095	0.9989
	土壤总有机碳	2072.5233	0.0495	0.9964	3052.4437	0.0095	0.9989	3226.7913	0.0349	0.9985
LS	土壤原有有机碳	1366.6276	0.0268	0.9975	1924.5606	0.0459	0.9959	3125.0631	0.0316	0.9988
	水稻秸秆有机碳	40.2584	0.1169	0.8757	169.2268	0.0899	0.9941	177.7812	0.0942	0.9968

由图 3b 可知,水稻秸秆对土壤总有机碳累积矿化量贡献随培养时间和培养温度变化情况与矿化速率贡献率类似。只是由于土壤总有机碳累积矿化量贡献率包含某次测定时整个培养过程水稻秸秆有机碳矿化贡献而除 1 天时贡献率相同外,其他时间矿化速率贡献率减小时累积矿化量贡献率亦减小,但累积矿化量贡献率>矿化速率贡献率;矿化速率贡献率增大时累积矿化量贡献率亦增大,但累积矿化量贡献率<矿化速率贡献率。具体地,15℃培养温度下 1,5,10,15,30,60 天时累积矿化量贡献率分别为 18.60%,8.46%,8.62%,7.29%,5.89%,4.92%;25℃培养温度下分别

35℃培养温度下矿化速率贡献率与 25℃时类似,即 1,5,10,15 天时较大,30,60 天时较小,贡献率依次为 15.10%,14.50%,14.20%,11.70%,3.80%和 3.70%,总体上随培养时间延长减小。从不同温度下矿化速率贡献率对比看,除 1 天时水稻秸秆矿化对土壤总有机碳矿化速率贡献率为 15℃>25℃和 35℃外,其余培养时间均为 15℃<25℃和 35℃。25℃培养温度下水稻秸秆矿化对土壤总有机碳矿化速率贡献率除 5 天时与 35℃培养温度基本相当外,其余培养时间水稻秸秆有机碳矿化速率贡献均是 25℃>35℃。



为 18.25%,15.36%,17.82%,19.07%,15.91%,13.32%;35℃培养温度下分别为 15.07%,14.61%,14.46%,13.79%,10.47%,8.81%。除 1 天时累积矿化量贡献率 15℃>25℃和 25℃>35℃外,其余采样时间均是 25℃>35℃和 35℃>15℃。

2.4 水稻秸秆输入对贵州喀斯特石灰土土壤原有有机碳矿化速率和累积矿化量的激发效应及温度响应

贵州喀斯特石灰土水稻秸秆输入土壤总有机碳矿化速率和累积矿化量显著增大不仅由于包含了输入水稻秸秆有机碳的矿化,即水稻秸秆有机碳矿化

对土壤总有机碳矿化速率和累积矿化量的贡献,还在于水稻秸秆输入促进土壤原有有机碳矿化,即激发效应。类似地,水稻秸秆对土壤原有有机碳矿化的激发效应也可基于土壤原有有机碳矿化速率和累

积矿化量表征,即矿化速率激发效应和累积矿化量激发效应。此外激发效应还可利用矿化速率和累积矿化量的变化量或相对变化量表示,即激发效应和相对激发效应。

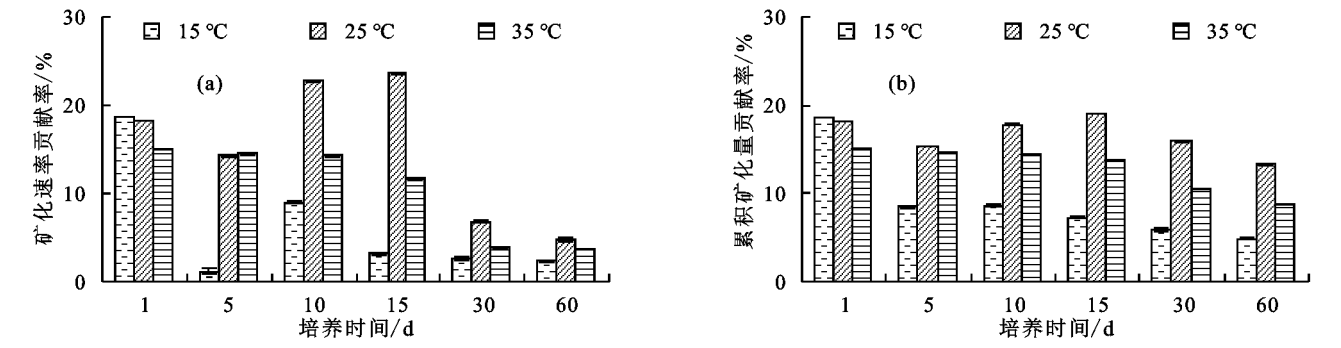


图3 水稻秸秆对土壤总有机碳矿化速率和累积矿化量的贡献及其温度响应

贵州喀斯特黄色石灰土水稻秸秆输入土壤原有有机碳矿化速率和累积矿化量远大于土壤有机碳矿化速率(图 1a、图 1c)和累积矿化量(图 2a、图 2c),即水稻秸秆输入促进贵州喀斯特黄色石灰土土壤原有有机碳矿化为正激发效应,其中矿化速率激发效应和相对激发效应表征测定时的“瞬时”激发效应(图 4a、图 4b),累积矿化量激发效应和相对激发效应表征培养开展至测定时的“平均”激发效应(图 4c、图 4d)。由图 4 可知,15,25,35 °C 培养温度下 0~60 天培养期内水稻秸秆输入对土壤原有有机碳矿化均产生强正激发效应,但不同培养时刻或时段土壤原有有机碳矿化速率激发效应(PE_V)、相对激发效应(RPE_V)和累积矿化量相对激发效应(RPE_F)均随培养时间延长减小,累积矿化量激发效应(PE_F)随培养时间延长增大。其中 15,25,35 °C 培养温度下土壤原有有机碳矿化速率激发效应(PE_V)为 0.22~85.73 mg/(kg·d)(图 4a),矿化速率相对激发效应(RPE_V)为 0.99%~902.47%;土壤原有有机碳累积矿化量激发效应(PE_F)为 77.06~1348.15 mg/kg(图 4a),累积矿化量相对激发效应(RPE_F)为 101.17%~902.36%。培养温度显著影响水稻秸秆输入的激发效应,并因激发效应表征和培养时间不同而不同。其中土壤原有有机碳矿化速率激发效应(PE_V)对培养温度的响应是 1 天时 15 °C>25 °C>35 °C,5 天时 25 °C>35 °C>15 °C,10,15,60 天时 35 °C>25 °C>15 °C,30 天时 25 °C>15 °C>35 °C,且 35 °C 的(PE_V)异常偏小。矿化速率相对激发效应(RPE_V)对培养温度的响应是 1,10,60 天时 15 °C>25 °C>35 °C,5 天时 25 °C>35 °C>15 °C,15 和 30 天时 25 °C>15 °C>35 °C,且 30 天时 35 °C 的(RPE_V)异常偏小。累积矿化量激发效应(PE_F)对培养温度的响应是 1 天时 15 °C>25 °C>35 °C,5 天时 25 °C>35 °C>15 °C,

10,15,30,60 天时 35 °C>25 °C>15 °C。累积矿化量相对激发效应(RPE_F)对培养温度的响应是 1,10,15 天时 15 °C>25 °C>35 °C,5,30,60 天时 25 °C>15 °C>35 °C。此外培养温度越低,初始矿化速率激发效应越大,随培养时间延长弱化速率也越快。

水稻秸秆输入对贵州喀斯特黄色石灰土土壤原有有机碳矿化的激发效应随培养时间延长减小或增大可用幂函数 $PE=at^b$ 拟合(图 4,表 4)。幂函数系数(a)表征 1 天时的激发效应,即理论初始激发效应,幂函数参数(b)表征激发效应随培养时间的变化速率。其中 15,25,35 °C 培养温度下水稻秸秆输入对贵州喀斯特黄色石灰土土壤原有有机碳矿化速率和累积矿化量的理论初始激发效应分别为 69.929 2, 125.729 6,160.389 3 mg/(kg·d)和 72.891 7,99.309 2, 95.940 4 mg/kg,理论初始相对激发效应分别为 712.553 7%,457.137 4%,453.760 8%和 750.880 7%, 341.262 2%,260.036 1%。土壤原有有机碳矿化速率激发效应、矿化速率相对激发效应和累积矿化量激发效应的幂函数参数 b 均<0,且相同温度下其绝对值是土壤矿化速率激发效应>矿化速率相对激发效应>累积矿化量相对激发效应,以及土壤矿化速率激发效应和相对激发效应的幂函数参数 b 的绝对值为 35 °C>15 °C>25 °C,与土壤累积矿化量相对激发效应为 15 °C>35 °C>25 °C。土壤累积矿化量激发效应的幂函数参数 b >0,表明其随培养时间延长增大,15,25,35 °C 的参数 b 分别为 0.538 6,0.671 5 和 0.713 2,即 35 °C>25 °C>15 °C,表明温度越低,激发效应随培养时间延长增加幅度越小。

2.5 贵州喀斯特黄色石灰土土壤有机碳温度系数(Q_{10})的演变动态及对水稻秸秆输入响应

温度系数(Q_{10})反映土壤有机碳矿化的温度响

应,并因土壤类型、耕作方式和培养温度系统等而不同。与水稻秸秆有机碳矿化对土壤总有机碳矿化的贡献和水稻秸秆输入对土壤原有有机碳矿化的激发效应类似,贵州喀斯特黄色石灰土水稻秸秆输入和不输入土壤有机碳矿化的温度系数(Q_{10})同样可用矿化速率温度系数($Q_{10,V}$)和累积矿化量温度系数($Q_{10,F}$)表征。由图 5 可知,贵州喀斯特黄色石灰土有机碳和水稻秸秆输入后土壤总有机碳矿化速率($Q_{10,V}$)和累积矿化量温度系数($Q_{10,F}$)均随培养时间延长呈波动性变化,其值范围分别在 1.01~3.12 和 1.01~2.60。其中 15~25、25~35 ℃ 温度体系下无水稻秸秆输入土壤有机碳矿化速率温度系数($Q_{10,V}$)值分别在 1.01~2.60、1.39~3.12,且 15~25 ℃ 温度体系下土壤有机碳矿化速率温度系数($Q_{10,V}$)随培养时间延长逐渐减小;25~35 ℃ 温度体系下随培养时间延长逐渐增大。其结果是 15~25 ℃ 温度体系下培养 1,5,10 天时无水稻秸秆输入石灰土土壤有机碳矿化速率温度系数($Q_{10,V}$)高于 25~35 ℃ 温度体系,15,30,60 天时小于 25~35 ℃ 温度体系。15~25、25~35 ℃ 培养温度体系下水稻秸秆输入石灰土土壤总有机碳矿化速率温度系数($Q_{10,V}$)值分别在 1.09~2.18 和 1.05~1.90,

其中 15~25 ℃ 温度体系下土壤总有机碳矿化速率温度系数($Q_{10,V}$)随培养时间延长先增加后逐渐减小,25~35 ℃ 温度体系下随培养时间延长先逐渐增大后减小再增大再减小。最终导致 15~25 ℃ 温度体系下培养 1,5,10,15 天时水稻秸秆输入石灰土土壤总有机碳矿化速率温度系数($Q_{10,V}$)高于 25~35 ℃ 温度体系,30,60 天时低于 25~35 ℃ 温度体系。15~25、25~35 ℃ 温度体系下无水稻秸秆输入石灰土土壤有机碳累积矿化量温度系数($Q_{10,F}$)(图 5b) 1,5,10,15,30,60 天时分别为(2.60,2.51,2.43,1.95,1.50,1.52)和(1.39,1.51,1.50,1.67,2.13,2.17),表现为低温体系下随培养时间延长逐渐减小,高温体系下随培养时间延长逐渐增大。最终结果是($Q_{10,F}$)≤15 天时低温体系>高温体系,≥30 天时高温体系>低温体系。15~25、25~35 ℃ 体系下 1,5,10,15,30,60 天时水稻秸秆输入石灰土土壤总有机碳累积矿化量温度系数($Q_{10,F}$)依次分别为(1.09,1.72,1.73,1.66,1.58,1.51)和(1.05,1.14,1.28,1.32,1.47,1.49),表现为($Q_{10,F}$)低温体系>高温体系和低温体系下($Q_{10,F}$)随培养时间延长先增大后减小,高温体系下随培养时间延长单调增大的规律。

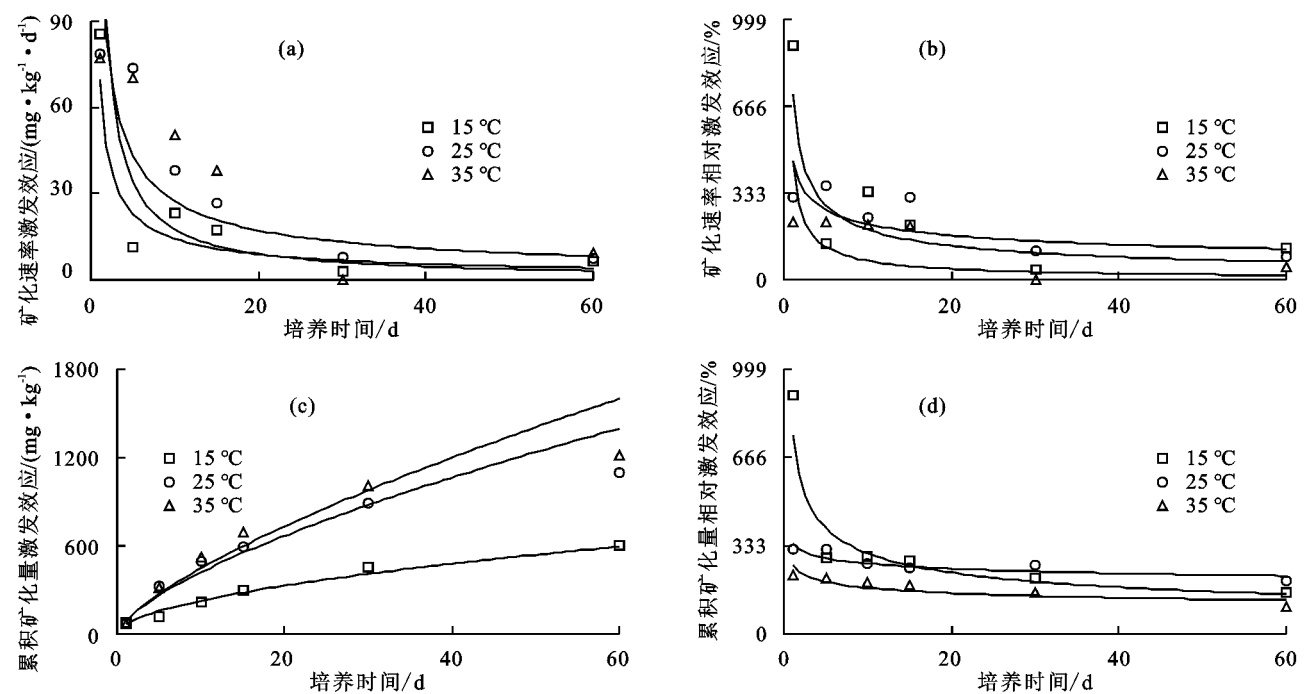
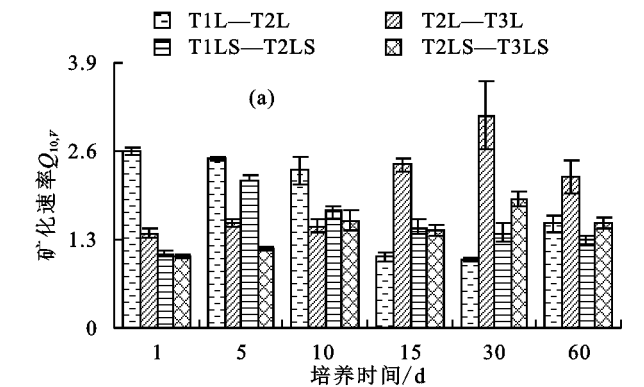


图 4 培养温度对水稻秸秆的激发效应及拟合曲线的影响

表 4 不同培养温度下水稻秸秆激发效应拟合函数的参数

激发 效应	15 ℃			25 ℃			35 ℃		
	参数 a	参数 b	R ²	参数 a	参数 b	R ²	参数 a	参数 b	R ²
PE _V	69.9292	-0.6898	0.9299	125.7296	-0.6638	0.6664	160.3893	-0.9607	0.4812
RPE _V	712.5537	-0.5683	0.8748	457.1374	-0.3308	0.4423	453.7608	-0.7972	0.2584
PE _F	72.8917	0.5386	0.9835	99.3092	0.6715	0.9480	95.9404	0.7132	0.9257
RPE _F	750.8807	-0.3920	0.9345	341.2622	-0.1079	0.7761	260.0361	-0.1732	0.7173

从水稻秸秆输入对(Q_{10})的影响看,15~25℃温度体系下水稻秸秆输入使1,5,10,60天时土壤有机碳矿化速率温度系数($Q_{10,V}$)降低,且随培养时间延长降低幅度逐渐减小,15,30天时使($Q_{10,V}$)增大。25~35℃温度体系下除5天外水稻秸秆输入均使土壤有机碳

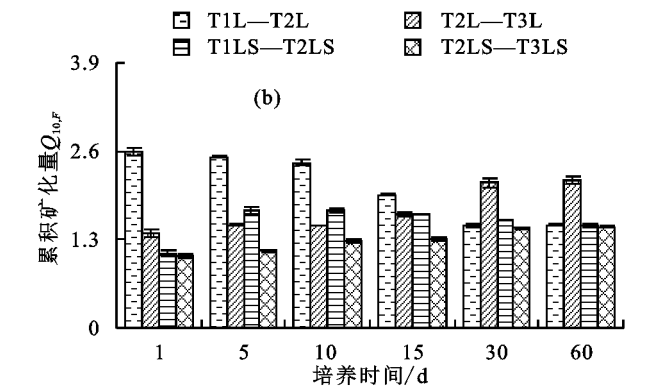


注:T1、T2和T3分别表示培养温度为15、25、35℃;L和LS分别表示培养基质为石灰土和石灰土+1.50g水稻秸秆/kg干土。

图5 温度对土壤总有机碳矿化速率温度系数($Q_{10,V}$)和累积矿化量温度系数($Q_{10,F}$)的影响

以上分析表明,无水稻秸秆输入石灰土土壤有机碳和水稻秸秆输入石灰土土壤总有机碳矿化速率温度系数($Q_{10,V}$)和累积矿化量温度系数($Q_{10,F}$)均随升温体系不同而不同,即($Q_{10,V}$)和($Q_{10,F}$)均是温度的函数,因此可构建土壤有机碳矿化速率和累计矿化量温度系数函数($Q_{10,V}$)(T)和($Q_{10,F}$)(T)更精准地描述($Q_{10,V}$)和($Q_{10,F}$)的温度响应。本文以二次函数拟合无和有水稻秸秆输入时贵州喀斯特石灰土土壤总有机碳矿化速率(V)的温度响应函数 $V(T)$ (图6a,图6b、表5)和累积矿化量(F)的温度响应函数 $F(T)$ (图6c,图6d、表5)为例,构建其矿化速率温度系数函数($Q_{10,V}$)(T)(图6e,图6f、表5)和累积矿化量温度系数函数($Q_{10,F}$)(T)(图6g,图6h、表5)并进行分析。结果表明,1,5,10天时无水稻秸秆输入石灰土土壤有机碳矿化速率(V)随培养温度升高而升高,且拟合的二次曲线开口向下;15,30,60天时矿化速率 V 随培养温度升高先降低后升高,二次曲线开口向上,拐点温度分别为19.66,19.97,15.99℃(图6a、表5)。相应地1,5,10天时贵州喀斯特黄色石灰土无水稻秸秆输入土壤有机碳矿化速率温度系数($Q_{10,V}$)在15~35℃范围内均随培养温度升高而降低,且随培养时间延长降低幅度逐渐减小;15,30,60天时随培养温度升高先快速升高后缓慢降低(图6e、表5)。15~35℃温度范围内1天时贵州喀斯特黄色石灰土水稻秸秆输入土壤总有机碳矿化速率随培养温度升高而升高,5天时随培养温度升高矿化速率先升高后降低,拐点温度为34.45℃,二者拟合的二次曲线开口均向下;30天时随培养温度升高先降低后升高,拐点

矿化速率温度系数($Q_{10,V}$)降低。15~25,25~35℃温度体系下水稻秸秆输入均使土壤总有机碳累积矿化量温度系数($Q_{10,F}$)降低,且15~25℃温度体系下培养早期降低幅度大于后期,25~35℃温度体系下随培养时间延长降低幅度逐渐增大。



温度为15.54℃;10,15,60天时均随培养温度升高而升高;10,15,30,60天时拟合的二次曲线开口均向上。相应地,1,5,10,15天时贵州喀斯特黄色石灰土水稻秸秆输入土壤总有机碳矿化速率温度系数($Q_{10,V}$)随培养温度升高而降低,且随培养时间延长降低幅度逐渐减少;30,60天时随配温度升高先升高后降低(图6f、表5)。

贵州喀斯特黄色石灰土无水稻秸秆输入土壤有机碳累积矿化量(F)1,5,10,15天时均随培养温度升高而升高,且二次曲线除15天时开口向上外,其他培养时间时开口均向下;30,60天时随培养温度升高先降低后升高,拐点温度分别为15.82,15.90℃,二次曲线开口均向上(图6c、表6)。相应地,土壤有机碳矿化速率温度系数($Q_{10,V}$)除30,60天时随培养温度升高而升高外,其他培养时间均随培养温度升高而降低,且5天时降低速率最快(图6g、表6)。水稻秸秆输入土壤总有机碳累积矿化量均随培养温度升高而升高,其中1,5,10,15天时二次曲线开口向下,即二次项系数 $b<0$;30,60天时二次曲线开口向上,即二次项系数 $b>0$ (图6d、表6)。所有培养时间土壤总有机碳累积矿化量温度系数($Q_{10,F}$)均随培养温度升高而降低(图6h、表6)。

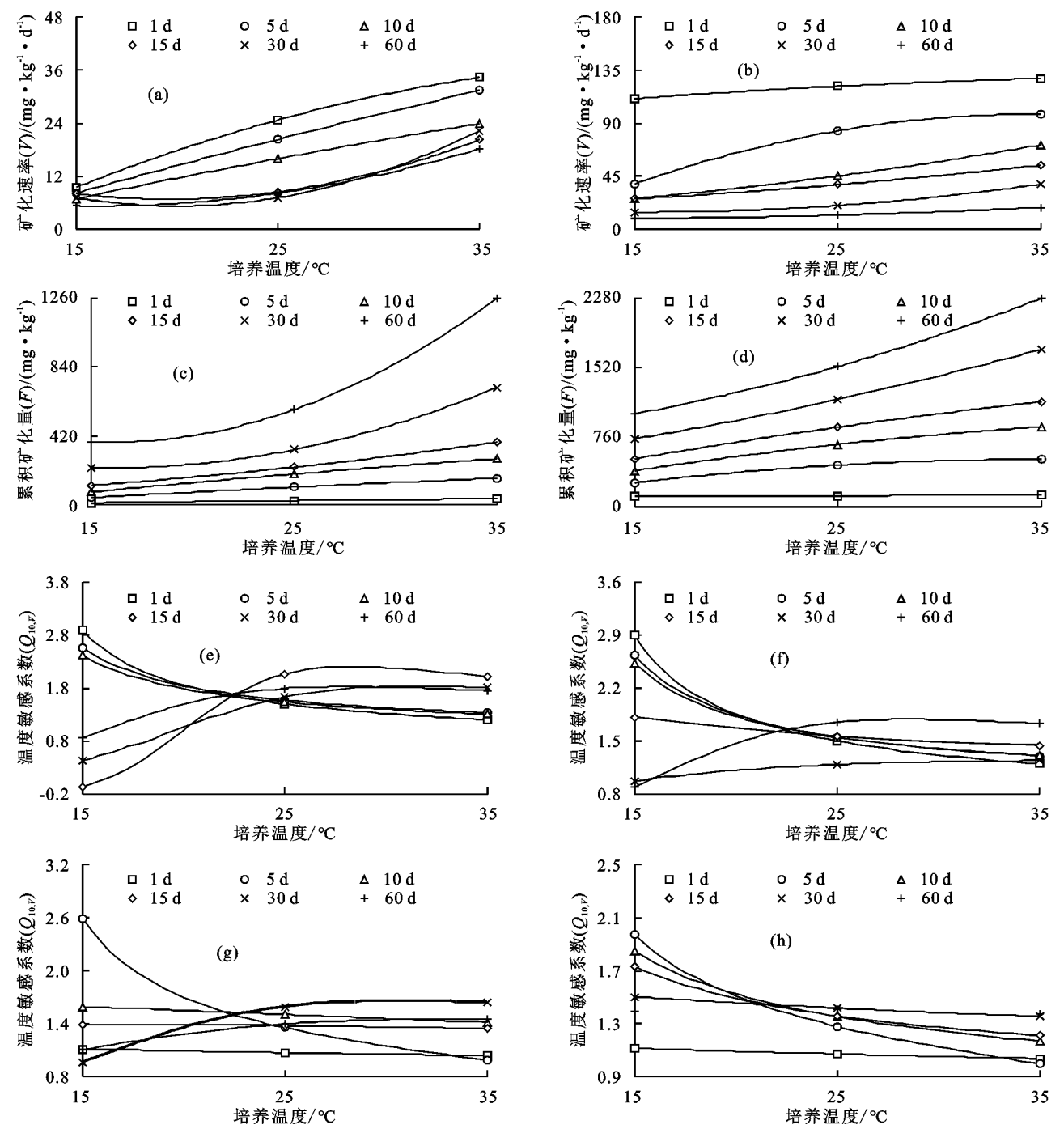
3 讨论

3.1 水稻秸秆输入和温度升高显著促进贵州喀斯特黄色石灰土土壤和水稻秸秆有机碳矿化

土壤有机碳矿化是土壤微生物满足自身能源、碳源和营养需求,分解土壤有机碳并释放 CO_2 的过程,是土壤有机碳输出的主要途径,对土壤—大气碳循环起重要作用^[28]。本试验发现,水稻秸秆不输入石灰

土土壤有机碳及水稻秸秆输入石灰土土壤总有机碳、原有有机碳和水稻秸秆有机碳矿化速率最大值均出现在培养 1 天时,且 1~30 天时矿化速率较高,随培养时间延长降低速率也较快;之后矿化速率虽亦随培养时间延长逐渐降低但降低速率趋于平缓。无外源有机碳输入情况下培养初期土壤活性有机碳如易氧化分解的糖类和蛋白质类等物质较多,能较好满足土壤微生物的碳源和能源需求,短期内极大促进土壤微

生物数量和活性及有机碳矿化^[29]。随着培养时间延长,土壤易分解有机碳因土壤微生物消耗且无外源输入而逐渐减少,土壤微生物生物量和活性因缺少速效碳源而降低,并从以活性有机碳为碳源的群系向以惰性有机碳为碳源的群系演变,矿化速率随培养时间延长逐渐降低^[30]。杨芳等^[31]研究表明,贵州喀斯特黑色石灰土土壤有机碳矿化速率随培养时间延长降低,累积矿化量随培养时间延长升高,与本文结果一致。



注:a、c、e、g 为不添加水稻秸秆石灰土;b、d、f、h 为添加水稻秸秆石灰土。

图 6 温度对土壤有机碳矿化速率和累积矿化量及温度系数($Q_{10,V}$ 和 $Q_{10,F}$)的影响

水稻秸秆输入土壤总有机碳和原有有机碳矿化速率均较水稻秸秆不输入土壤有机碳矿化速率大幅增加的原因在于水稻秸秆输入增加了土壤总有机碳

和活性有机碳含量及其正激发效应。陈晨等^[20]研究表明,羊粪分别使轻度和中度碱化土土壤 DOC 含量增加 20.66%和 74.10%,土壤有机碳矿化显著增强。

徐学池等^[6]发现,玉米秸秆显著增加了棕色石灰土土壤 DOC 含量、土壤总 PLFAs、细菌和真菌 PLFA 摩尔质量浓度和革兰氏阳性菌比例,具有显著正激发效应。升温 and 添加葡萄糖显著促进农田和湿地土壤有机碳矿化,且农田土壤有机碳矿化速率和累积矿化量显著高于湿地土壤^[26]。本研究中水稻秸秆不输入石灰土土壤有机碳矿化速率和累积矿化量及水稻秸秆输入石灰土土壤总有机碳矿化速率和累积矿化量均随培养温度升高而升高,并可用二次函数较好地拟

合,与杨芳等^[31]、林杉等^[32]和陈晓芬等^[33]研究结果类似。温度升高增强土壤微生物和土壤酶活性,促进土壤有机碳矿化^[34]。本研究结果还表明,水稻秸秆对贵州喀斯特黄色石灰土土壤总有机碳矿化速率和累积矿化量贡献率亦受温度显著影响,除 1 天时外均以 25 ℃ 培养温度下最高,其次是 35,15 ℃ 下最低,表明温度不仅显著影响贵州喀斯特黄色石灰土土壤有机碳矿化,温度升高也显著促进输入的水稻秸秆有机碳矿化,这与葛云辉等^[19]的研究结果类似。

表 5 不同培养时间土壤有机碳矿化速率的温度响应函数及矿化速率温度系数函数

培养 基质	培养 时间/天	矿化速率(V)	矿化速率温度系数 ($Q_{10,V}$)
L	1	$V=-0.0278T^2+2.6320T-23.7250$	$Q_{10,V}=(-0.0278T^2+2.0760T+2.2950)/(-0.0278T^2+2.6320T-23.7250)$
	5	$V=-0.0055T^2+1.4360T-12.1113$	$Q_{10,V}=(-0.0055T^2+1.3260T+2.2487)/(-0.0055T^2+1.4360T-12.1113)$
	10	$V=-0.0059T^2+1.1470T-9.0062$	$Q_{10,V}=(-0.0059T^2+1.0290T+2.4638)/(-0.0059T^2+1.1470T-9.0062)$
	15	$V=0.0570T^2-2.2410T+28.8087$	$Q_{10,V}=(0.0570T^2-1.1010T+17.7987)/(0.0570T^2-2.2410T+28.8087)$
	30	$V=0.0755T^2-3.0160T+35.3525$	$Q_{10,V}=(0.0755T^2-1.5060T+5.1925)/(0.0755T^2-3.0160T+35.3525)$
	60	$V=0.0359T^2-1.1480T+14.4438$	$Q_{10,V}=(0.0359T^2-0.4300T+2.9638)/(0.0359T^2-1.1480T+14.4438)$
LS	1	$V=-0.0198T^2+1.8460T+87.5562$	$Q_{10,V}=(-0.0198T^2+1.4500T+106.0162)/(-0.0198T^2+1.8460T+87.5562)$
	5	$V=-0.1563T^2+10.7690T-88.0575$	$Q_{10,V}=(-0.1563T^2+7.6700T+19.6325)/(-0.1563T^2+10.7690T-88.0575)$
	10	$V=0.0359T^2+0.4680T+11.0012$	$Q_{10,V}=(0.0359T^2+1.1860T+22.8612)/(0.0359T^2+0.4680T+11.0012)$
	15	$V=0.0222T^2+0.3200T+15.9063$	$Q_{10,V}=(0.0222T^2+0.7640T+19.1063)/(0.0222T^2+0.3200T+15.9063)$
	30	$V=0.0625T^2-1.9420T+29.6488$	$Q_{10,V}=(0.0625T^2-0.6920T+10.2288)/(0.0625T^2-1.9420T+29.6488)$
	60	$V=0.0188T^2-0.4690T+11.9450$	$Q_{10,V}=(0.0188T^2-0.0930T+6.3250)/(0.0188T^2-0.4690T+11.9450)$

表 6 不同培养时间土壤有机碳累积矿化量的温度响应函数及累计矿化量温度系数函数

培养 基质	培养 时间/d	累积矿化量(F)	累积矿化量温度系数($Q_{10,F}$)
L	1	$F=-0.0278T^2+2.6320T-23.7250$	$Q_{10,F}=(-0.0278T^2+2.0742T+2.5950)/(-0.0278T^2+2.6320T-23.7250)$
	5	$F=-0.0500T^2+8.3760T-72.1700$	$Q_{10,F}=(-0.0500T^2+7.3760T+1.5900)/(-0.0500T^2+8.3760T-72.1700)$
	10	$F=-0.0797T^2+14.1110T-117.2013$	$Q_{10,F}=(-0.0797T^2+12.5170T+23.9087)/(-0.0797T^2+14.1110T-117.2013)$
	15	$F=0.2055T^2+2.9060T+26.8425$	$Q_{10,F}=(0.2055T^2+7.0160T+55.9025)/(0.2055T^2+2.9060T+26.8425)$
	30	$F=1.3380T^2-42.3340T+557.1300$	$Q_{10,F}=(1.3380T^2-289.5500T+133.7900)/(1.3380T^2-42.3340T+557.1300)$
	60	$F=2.4135T^2-76.7740T+990.4425$	$Q_{10,F}=(2.4135T^2-28.5040T+222.7025)/(2.4135T^2-76.7740T+990.4425)$
LS	1	$F=-0.0198T^2+1.8460T+87.5562$	$Q_{10,F}=(-0.0198T^2+1.4500T+106.0162)/(-0.0198T^2+1.8460T+87.5562)$
	5	$F=-0.6450T^2+44.9220T-264.6738$	$Q_{10,F}=(-0.6450T^2+32.0220T+184.5462)/(-0.6450T^2+44.9220T-264.6738)$
	10	$F=-0.4653T^2+47.2620T-209.6675$	$Q_{10,F}=(-0.4653T^2+37.9560T+262.9525)/(-0.4653T^2+47.2620T-209.6675)$
	15	$F=-0.3545T^2+48.8620T-130.1363$	$Q_{10,F}=(-0.3545T^2+41.7720T+358.4837)/(-0.3545T^2+48.8620T-130.1363)$
	30	$F=0.5822T^2+19.7320T+314.5950$	$Q_{10,F}=(0.5822T^2+31.3760T+511.9150)/(0.5822T^2+19.7320T+314.5950)$
	60	$F=1.1462T^2+5.6620T+672.9450$	$Q_{10,F}=(1.1462T^2+28.5860T+729.5650)/(1.1462T^2+5.6620T+672.9450)$

3.2 水稻秸秆输入显著影响贵州喀斯特黄色石灰土土壤有机碳的温度系数(Q_{10})

土壤有机碳温度系数(Q_{10})是土壤温度升高 10 ℃ 时土壤有机碳矿化速率或累积矿化量增加的倍数,可表征土壤有机碳矿化对温度变化的响应,其值越大表明土壤有机碳对温度变化越敏感^[35]。但不同文献

或使用矿化速率温度系数,或使用累积矿化量温度系数,并都用(Q_{10})表示,造成不同文献结果和结论间比较的困难和不精确性。本研究同时使用矿化速率温度系数和累积矿化量温度系数并分别用符号 $Q_{10,V}$ 和 $Q_{10,F}$ 表示,在此基础上构建了矿化速率温度系数函数($Q_{10,V}$)(T)和累积矿化量温度系数函数($Q_{10,F}$)

(T)描述温度系数对温度的响应。本研究发现,水稻秸秆不输入石灰土土壤有机碳($Q_{10,V}$)和($Q_{10,F}$)分别在 1.01~3.12和 1.39~2.60,水稻秸秆输入石灰土土壤总有机碳($Q_{10,V}$)和($Q_{10,F}$)分别在 1.05~2.18和 1.05~1.78,二者间存在明显差异,即水稻秸秆输入显著降低了石灰土土壤有机碳温度系数($Q_{10,V}$)和($Q_{10,F}$),二者变幅均较大且($Q_{10,V}$)变幅大于($Q_{10,F}$),以及水稻秸秆不输入石灰土土壤有机碳矿化($Q_{10,V}$)和($Q_{10,F}$)变幅均大于水稻秸秆输入石灰土。林杉等^[32]研究表明,湖南长期施肥水稻土土壤($Q_{10,V}$)范围在 1.01~1.53;魏圆云等^[26]发现,华北平原农田和湿地土壤($Q_{10,V}$)值在 1.2~1.6,且添加葡萄糖对农田和湿地土壤有机碳温度敏感系数($Q_{10,V}$)影响不显著。还有研究^[33]指出,不同施肥处理水稻土土壤有机碳矿化温度系数($Q_{10,V}$)为 1.31~1.75,施肥提高了土壤有机碳矿化的温度敏感性。Creamer 等^[36]研究表明,外源有机碳输入提高了土壤有机碳矿化温度敏感性,并因外源碳输入改变土壤微生物群落结构所致。这些结果之间土壤有机碳矿化温度系数($Q_{10,V}$)差异亦较大,且对外源有机碳输入响应不同,其原因可能是因为所研究土壤不同且来自不同生态系统,并与土壤有机碳特别是活性有机碳的数量、质量和组成有关。中国各生态系统土壤呼吸(Q_{10})范围在 1.3~4.8,其值因生态系统类型和植被类型而不同^[9]。本研究发现,($Q_{10,V}$)和($Q_{10,F}$)随培养温度升高而变化的规律因有水稻秸秆输入和培养时间不同而不同。如本研究中水稻秸秆不输入石灰土土壤有机碳矿化速率温度系数($Q_{10,V}$)培养 1~10 天随培养温度升高降低,15~60 天随培养温度升高升高;而水稻秸秆输入石灰土土壤总有机碳矿化速率温度系数($Q_{10,V}$)培养 1~15 天随培养温度升高降低,30~60 天随培养温度升高升高。葛序娟等^[37]的 50 天室内培养试验表明,三峡库区水稻土土壤($Q_{10,V}$)范围为 1.48~2.88,且随培养温度升高和随培养时间延长降低,与本文结果较一致。王峰等^[38]也指出,<20℃的低温条件下土壤有机碳矿化对升温敏感性更强。但本文结果还表明,温度对土壤有机碳矿化的温度系数($Q_{10,V}$)的影响因培养时间不同而变化,也因水稻秸秆输入对培养时间和培养温度响应不同。此外,本文还提出并以土壤有机碳矿化速率和累积矿化量温度响应函数二次曲线拟合为例,构建了不同培养时间和水稻秸秆输入和不输入土壤有机碳矿化速率和累积矿化量温度系数函数($Q_{10,V}$)(T)和($Q_{10,F}$)(T),可更好展示和表征土壤有机碳温度系数的温度响应。

3.3 温度显著影响水稻秸秆碳输入对贵州喀斯特石灰土土壤原有有机碳矿化的激发效应

Wu 等^[5]认为,外源物质输入对土壤有机碳矿化的激发效应有 2 种机制,外源有机物质输入加速土壤微生物生物量碳周转,提高单位微生物生物量的碳转化速率,和底物浓度增加提高土壤微生物生物量,进而提高微生物生物量的碳转化总量。本研究中水稻秸秆输入大幅提高了培养过程中不同培养时间土壤原有有机碳矿化速率和累积矿化量,表现出强正激发效应。本研究还发现,表征激发效应的指标和方法不同,外源物质对土壤原有有机碳激发效应的大小、量纲单位、随培养时间演变和温度响应皆不相同,这可能是不同文献间关于外源物质对土壤有机碳矿化激发效应结论不同的主要原因或原因之一。魏圆云等^[26]研究表明,培养过程中葡萄糖对华北平原农田和湿地土壤有机碳矿化的激发效应持续增长,培养前 14 天增长较快,之后逐渐平缓,其所采用的激发效应是累积矿化量激发效应,并用添加葡萄糖处理的土壤总有机碳累积矿化量与不添加葡萄糖的对照处理的土壤有机碳累积矿化量差减计算,未剔除添加的葡萄糖矿化的贡献。徐学池等^[6]对广西河池喀斯特长期施肥定位试验中不施肥、单施无机肥和秸秆与无机肥配施处理土样室内培养试验表明,添加玉米秸秆对单施秸秆处理土壤累积矿化量激发效应在 838.8~1 587.1 mg/kg,且显著高于单施无机肥和秸秆与无机肥配施处理土壤,其所采用的激发效应亦是累积矿化量激发效应,亦基于添加秸秆后土壤有机碳总矿化量计算。冷雪梅等^[39]发现,添加玉米秸秆对江苏如皋高砂土优化施肥基础上牛粪替代 20%化学氮肥处理土壤有机碳矿化产生负激发效应,对如皋高砂土不施肥、农民习惯施肥和优化施肥处理和溧阳白土不施肥、农民习惯施肥、优化施肥处理和优化施肥基础上牛粪替代 20%化学氮肥处理产生正激发效应,且随培养时间延长逐渐降低,其所采用的激发效应则是矿化速率相对激发效应。张天霖等^[40]发现,3 种林木非正常凋落物输入对土壤有机碳矿化的激发效应分 3 个阶段,0~7 天均引起土壤有机碳强烈负激发效应并短期内达到峰值,峰值分别为-50.05%,-117.72%和-124.08%;7~35 天负激发效应强度逐步下降,且先快速下降后速率转慢;35~110 天激发效应较为平稳,其中黧蒴锥和浙江润楠非正常凋落物输入对土壤有机碳的激发效应逐渐转为正值,马尾松非正常凋落物维持负激发效应并缓慢下降至消失,其所采用的激发效应是土壤原有有机碳矿化速率相对激发效应。李瑞东等^[24]发现,培养前期(1~10

天) CaCO_3 添加表现为强烈负激发效应, 15, 25, 35 $^{\circ}\text{C}$ 培养温度最强可分别达 -54.0%, -81.0% 和 -69.3%, 其所采用的激发效应是土壤原有有机碳累积矿化量相对激发效应。因此在进行文献对比分析如 Meta 分析和文献参考引用时应注意其所采用的激发效应表征形式、方法和指标。本研究还发现, 温度对激发效应的影响因培养时间、表征激发效应的指标不同而不同, 亦即温度亦影响添加水稻秸秆的激发效应的强弱, 与李瑞东等^[24]的结果类似, 其原因可能是土壤有机碳和水稻秸秆有机碳矿化随温度升高而增加可为土壤微生物提供更多碳源和能源^[41]; 同时作为响应土壤微生物生物量亦增加^[6]并释放更多胞外酶进入土壤, 进一步促进土壤有机碳的矿化, 形成正反馈系统, 从而影响激发效应^[42]。李赟等^[43]研究表明, 培养温度和 50% 及 200% 微生物生物量碳当量葡萄糖添加显著影响葡萄糖对土壤原有有机碳的激发效应, 与本文结果较为一致。

4 结 论

15~35 $^{\circ}\text{C}$ 温度范围和 0~60 天培养时间内, 温度升高显著增加了贵州喀斯特黄色石灰土土壤有机碳、水稻秸秆输入土壤总有机碳、土壤原有有机碳和输入的水稻秸秆有机碳的矿化速率和累积矿化量。水稻秸秆输入对土壤原有有机碳矿化产生显著正激发效应, 且正激发效应随温度升高而强化。水稻秸秆对土壤有机碳矿化速率和累积矿化量的贡献除 1 天外均是 25 $^{\circ}\text{C}$ 最大, 其次是 35 $^{\circ}\text{C}$, 15 $^{\circ}\text{C}$ 最小。添加水稻秸秆明显降低贵州喀斯特黄色石灰土土壤有机碳矿化的温度敏感性。温度影响土壤有机碳矿化的温度敏感性, 并因表征温度敏感性的指标和培养时间长短不同而不同, 建立不同培养时间的矿化速率和累积矿化量温度敏感系数的温度函数可精确表征其对温度的响应。培养试验结果表明, 水稻秸秆还田或气候变暖均可增加贵州喀斯特黄色石灰土农田土壤 CO_2 温室气体的排放强度和排放量, 但水稻秸秆还田可以减缓全球变暖所致的 CO_2 排放潜力。研究结果对贵州喀斯特农田土壤秸秆还田、土壤固碳减排、土壤有机碳管理和土壤有机碳库预测等提供参考和借鉴, 对丰富土壤有机碳激发效应和温度系数(Q_{10})的表征和深入理解具有重要意义。

参考文献:

[1] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security [J]. *Science*, 2004, 304 (5677):1623-1627.

[2] Chen R R, Senbayram M, Blagodatsky S, et al. Soil C and N availability determine the priming effect: Micro-

bial N mining and stoichiometric decomposition theories [J]. *Global Change Biology*, 2014, 20(7):2356-2367.

[3] Lyu M K, Xie J S, Matthew A, et al. Simulated leaf litter addition causes opposite priming effects on natural forest and plantation soils [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2018, 54(8):1103-1104.

[4] 胡乐宁, 苏以荣, 何寻阳, 等. 添加¹⁴C 标记稻草对喀斯特典型土壤有机碳矿化的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(11):2368-2373.

[5] Wu J, Brookes P C, Jenkinson D S. Formation and destruction of microbial biomass during the decomposition of glucose and ryegrass in soil [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1993, 25(10):1435-1441.

[6] 徐学池, 苏以荣, 王桂红, 等. 秸秆还田配施氮肥对喀斯特农田微生物群落及有机碳矿化的影响[J]. *环境科学*, 2019, 40(6):2912-2919.

[7] 周孟棕, 高焕平, 刘世亮, 等. 秸秆与氮肥配施对潮土微生物活性及团聚体分布的影响[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(1):340-345.

[8] 郭琴波, 王小利, 段建军, 等. 氮肥减量配施生物炭对稻田有机碳矿化及酶活性影响[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(5):369-374, 383.

[9] 黄锦学, 熊德成, 刘小飞, 等. 增温对土壤有机碳矿化的影响研究综述[J]. *生态学报*, 2017, 37(1):12-24.

[10] Li Q R, Tian Y Q, Zhang X Y, et al. Labile carbon and nitrogen additions affect soil organic matter decomposition more strongly than temperature [J]. *Applied Soil Ecology*, 2017, 114:152-160.

[11] Zhang W D, Wang X F, Wang S L. Addition of external organic carbon and native soil organic carbon decomposition: A meta-analysis [J]. *PLoS One*, 2013, 8 (2):e54779.

[12] Frøseth R B, Bleken M A. Effect of low temperature and soil type on the decomposition rate of soil organic carbon and clover leaves, and related priming effect [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 80:156-166.

[13] Hopkins F M, Filley T R, Gleixner G, et al. Increased belowground carbon inputs and warming promote loss of soil organic carbon through complementary microbial responses [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 76(1):57-69.

[14] Luo Y Q, Wan S Q, Hui D F, et al. Acclimatization of soil respiration to warming in a tall grass prairie [J]. *Nature*, 2001, 413(6856):622-625.

[15] Sjögersten S, Wookey P. Climatic and resource quality controls on soil respiration across a forest-tundra ecotone in Swedish Lap-land [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34(11):1633-1646.

[16] Bekku Y S, Nakatsubo T, Kume A, et al. Effect of

- warming on the temperature dependence of soil respiration rate in arctic, temperate and tropical soils [J]. *Applied Soil Ecology*, 2003, 22(3): 205-210.
- [17] 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): 2301-2311.
- [18] 陈起伟, 熊康宁, 但文红, 等. 典型喀斯特区生态与贫困耦合特征分析: 以贵州省 9000 个省级贫困村为例[J]. *生态学报*, 2021, 41(8): 2968-2982.
- [19] 葛云辉, 苏以荣, 邹冬生, 等. 桂西北石灰土土壤有机碳矿化对外源有机物质和碳酸钙的响应[J]. *生态学杂志*, 2012, 31(11): 2748-2754.
- [20] 陈晨, 红梅, 张月鲜, 等. 有机物料添加对内蒙古河套灌区碱化土壤可溶性有机碳的影响[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(6): 331-336.
- [21] 祝贞科, 肖谋良, 魏亮, 等. 稻田土壤固碳关键过程的生物地球化学机制及其碳中和对策[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2022, 30(4): 592-602.
- [22] 王玉英, 胡春胜, 董文旭, 等. 华北平原小麦—玉米轮作系统碳中和潜力及固碳措施[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2022, 30(4): 651-657.
- [23] 朱大运, 熊康宁, 董晓超. 贵州 1960—2016 年气温时空变化特征[J]. *水土保持研究*, 2018, 25(4): 168-173, 180.
- [24] 李瑞东, 王小利, 段建军, 等. 碳酸钙对黄壤有机碳矿化及其温度敏感性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2022, 41(1): 115-122.
- [25] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2015.
- [26] 魏圆云, 崔丽娟, 张曼胤, 等. 外源碳输入对华北平原农田和湿地土壤有机碳矿化及其温度敏感性的影响[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2019, 27(10): 1463-1471.
- [27] Lu W W, Ding W X, Zhang J H, et al. Biochar suppressed the decomposition of organic carbon in a cultivated sandy loam soil: A negative priming effect [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 76: 12-21.
- [28] Bradford M, Wieder W, Bonan G, et al. Managing uncertainty in soil carbon feedbacks to climate change [J]. *Natural Climate Change*, 2016, 6(8): 751-758.
- [29] El-naggar A H, Usman A R A, Al-omran A, et al. Carbon mineralization and nutrient availability in calcareous sandy soils amended with woody waste biochar [J]. *Chemosphere*, 2015, 138(12): 67-73.
- [30] 李艾蒙, 李慧, 裴久渤, 等. 玉米秸秆施用对棕壤有机碳激发效应及温度敏感性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(12): 2788-2796.
- [31] 杨芳, 段惠敏, 段建军, 等. 温度对黑色石灰土原土及不同粒径土壤颗粒有机碳矿化的影响[J]. *河南农业科学*, 2019, 48(2): 68-76.
- [32] 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.
- [33] 陈晓芬, 吴萌, 江春玉, 等. 不同培养温度下长期施肥红壤水稻土有机碳矿化特征研究[J]. *土壤*, 2019, 51(5): 864-870.
- [34] 王丹, 吕瑜良, 徐丽, 等. 水分和温度对若尔盖湿地和草甸土壤碳矿化的影响[J]. *生态学报*, 2013, 33(20): 6436-6443.
- [35] Xu X, Zhou Y, Ruan H H, et al. Temperature sensitivity increases with soil organic carbon recalcitrance along an elevational gradient in the Wuyi Mountains, China [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42(10): 1811-1815.
- [36] Creamer C A, de Menezes A B, Krull E S, et al. Microbial community structure mediates response of soil C decomposition to litter addition and warming [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 80: 175-188.
- [37] 葛序娟, 潘剑君, 邬建红, 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.
- [38] 王峰, 陈玉真, 尤志明, 等. 培养温度对不同类型茶园土壤有机碳矿化的影响[J]. *福建农业学报*, 2016, 31(9): 993-999.
- [39] 冷雪梅, 钱九盛, 张旭辉, 等. 添加外源有机物对长期不同施肥处理水稻土有机碳矿化的影响[J]. *南京农业大学学报*, 2022, 45(1): 103-112.
- [40] 张天霖, 蔡章林, 赵厚本, 等. ¹³C 脉冲标记法研究非正常凋落物对土壤有机碳的激发效应[J]. *生态环境学报*, 2021, 30(9): 1797-1804.
- [41] Mikan C J, Schimel J P, Doyle A P. Temperature controls of microbial respiration in arctic tundra soils above and below freezing [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34(11): 1785-1795.
- [42] Wagai R, Kishimoto-Mo A W, Yonemura S, et al. Linking temperature sensitivity of soil organic matter decomposition to its molecular structure, accessibility, and microbial physiology [J]. *Global Change Biology*, 2013, 19(4): 1114-1125.
- [43] 李赞, 王春梅, 高士杰, 等. 模拟增温和氮沉降的耦合作用对高寒泥炭湿地土壤碳激发效应的影响[J]. *环境化学*, 2021, 40(8): 2430-2438.