

碳酸钙对黄壤有机碳矿化及其温度敏感性的影响

李瑞东, 王小利, 段建军, 罗安焕, 陈领, 陈佳

引用本文:

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.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0329>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

温度对农田黑土氮初级转化速率的影响

郎漫, 李平, 魏玮

农业环境科学学报. 2021, 40(4): 815-822 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1133>

设施耕作促进农田土壤有机碳矿化

陶宝先, 张保华, 董杰, 刘晨阳

农业环境科学学报. 2017, 36(12): 2486-2492 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1171>

不同种植模式下坡耕地红壤团聚体有机碳矿化特征

乌达木, 范茂攀, 赵吉霞, 李孝梅, 李永梅

农业环境科学学报. 2021, 40(7): 1519-1528 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1446>

不同地力玉米田土壤有机碳矿化特征

王永慧, 杨殿林, 红雨, 赵建宁, 轩青霞, 霍莉莉, 谭炳昌, 修伟明, 王丽丽

农业环境科学学报. 2019, 38(3): 590-599 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1032>

我国20种典型土壤中锌对白符跳虫的毒性阈值及其预测模型

王巍然, 林祥龙, 赵龙, 张家乐, 樊文华, 侯红

农业环境科学学报. 2021, 40(4): 766-773 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1220>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

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.

LI R D, WANG X L, DUAN J J, et al. Effects of calcium carbonate on organic carbon mineralization and its temperature sensitivity in yellow soil[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2022, 41(1): 115-122.

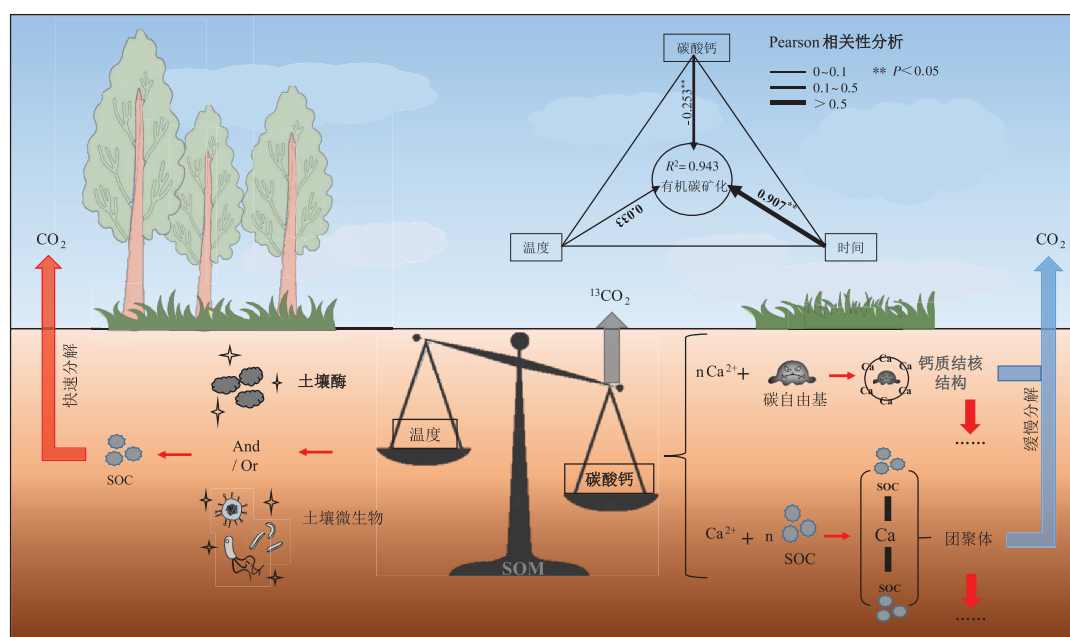


开放科学 OSID

碳酸钙对黄壤有机碳矿化及其温度敏感性的影响

李瑞东¹, 王小利^{1*}, 段建军², 罗安焕¹, 陈领¹, 陈佳³

(1. 贵州大学农学院, 贵阳 550025; 2. 贵州大学烟草学院/贵州省烟草品质研究重点实验室, 贵阳 550025; 3. 中国科学院普定喀斯特生态系统观测研究站/地球化学研究所, 贵州 普定 562100)



摘要:为研究碳酸钙和温度对土壤有机碳矿化的影响,以贵州典型黄壤为对象,通过60 d室内矿化培养试验,研究15、25℃和35℃下¹³C标记碳酸钙(30 g·kg⁻¹)对土壤有机碳矿化及其温度敏感性的影响。结果表明:不同处理的土壤CO₂释放速率均在第1 d达到峰值,随后迅速减小,在15~60 d时趋于稳定。碳酸钙抑制了土壤原有有机碳的矿化($P<0.01$),在培养前期(1~10 d)表现为强负激发效应,其负激发效应在不同温度下最强可达-81.0%(25℃)、-69.3%(35℃)和-54.0%(15℃)。土壤总CO₂累积释放在35℃下高于15℃和25℃,温度可增强土壤有机碳的矿化($P<0.05$)。¹³CO₂释放在25℃和35℃下显著高于15℃($P<0.05$),对土壤总CO₂释放量的贡献率为25℃(27.33%)>35℃(19.36%)>15℃(13.81%)。黄壤有机碳矿化温度敏感性(Q_{10})变化范围在0.90~1.69。添加碳酸钙对 Q_{10} 值无显著影响,但温度对 Q_{10} 值有显著影响,25~35℃体系下 Q_{10} 值高于15~25℃。研究表明,在15~35℃范围内,外源碳酸钙抑制了黄壤有机碳的矿化,且外源碳酸钙对黄壤有机碳矿化的影响效果显著强于温度的影响。

关键词:黄壤;碳酸钙;有机碳矿化;激发效应;温度敏感性;同位素标记

中图分类号:S153.6 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2022)01-0115-08 doi:10.11654/jaes.2021-0329

收稿日期:2021-03-18 录用日期:2021-07-23

作者简介:李瑞东(1996—),男,贵州人,硕士研究生,从事土壤碳循环研究。E-mail:ad545829028@163.com

*通信作者:王小利 E-mail:xlwang@gzu.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金项目(31860160)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(31860160)

Effects of calcium carbonate on organic carbon mineralization and its temperature sensitivity in yellow soil

LI Ruidong¹, WANG Xiaoli^{1*}, DUAN Jianjun², LUO Anhuan¹, CHEN Ling¹, CHEN Jia³

(1. Agricultural College, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. College of Tobacco Science, Guizhou University / Guizhou Provincial Key Laboratory of Tobacco Quality Research, Guiyang 550025, China; 3. Chinese Academy of Sciences, Puding Karst Ecosystem Observation and Research Station/Institute of Geochemistry, Guizhou Province, Puding 562100, China)

Abstract: The study of the effects of calcium carbonate and temperature on soil organic carbon mineralization provides a theoretical basis for the objective evaluation of changes in the respiration process of yellow soil under conditions induced by global warming and lime application. In this study, a typical yellow soil in Guizhou was used as the object to study the sensitivity of ^{13}C -labeled calcium carbonate ($30\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) to soil organic carbon mineralization and temperature sensitivity at 15, 25 $^{\circ}\text{C}$, and 35 $^{\circ}\text{C}$ using a 60-day indoor mineralization culture experiment. The results showed that the CO_2 release rate from yellow soil under different treatments reached a peak on the 1st day, and then decreased rapidly, stabilizing from 15 to 60 days. The addition of calcium carbonate inhibited the mineralization of the original soil organic carbon ($P<0.01$) and showed a strong negative excitation effect at the initial stage (1~10 days). The negative excitation effect was -81.0% (25 $^{\circ}\text{C}$), -69.3% (35 $^{\circ}\text{C}$), and -54.0% (15 $^{\circ}\text{C}$) at different temperatures. The cumulative total soil CO_2 released at 35 $^{\circ}\text{C}$ was higher than that at 15 $^{\circ}\text{C}$ and 25 $^{\circ}\text{C}$. Increasing temperature enhanced the mineralization of soil organic carbon ($P<0.05$). The amount of $^{13}\text{CO}_2$ released at 25 $^{\circ}\text{C}$ and 35 $^{\circ}\text{C}$ was significantly higher than that at 15 $^{\circ}\text{C}$ ($P<0.05$), and the contribution rate to total soil CO_2 release was 25 $^{\circ}\text{C}$ (27.33%) > 35 $^{\circ}\text{C}$ (19.36%) > 15 $^{\circ}\text{C}$ (13.81%). The temperature sensitivity (Q_{10}) of organic carbon mineralization in yellow soil ranged from 0.90 to 1.69. The addition of calcium carbonate had no significant effect on the Q_{10} value, but the temperature had a significant effect, and the Q_{10} value of the 25~35 $^{\circ}\text{C}$ system was higher than that of the 15~25 $^{\circ}\text{C}$ system. The above research suggests that in the range of 15 $^{\circ}\text{C}$ to 35 $^{\circ}\text{C}$, exogenous calcium carbonate inhibits the mineralization of organic carbon in yellow soil, and the influence of exogenous calcium carbonate on the mineralization of yellow soil organic carbon is greater than that of temperature.

Keywords: yellow soil; calcium carbonate; organic carbon mineralization; priming effect; temperature sensitivity; isotopic labeling

土壤有机碳矿化作为碳循环中一个重要过程,是土壤碳库与大气碳库迁移交流的主要途径,该过程释放 CO_2 引起的温室效应一直以来都是土壤环境生态学关注的热点^[1]。贵州省的平均气温在未来会一直偏高^[2]。黄壤是贵州地带性土壤,其分布面积占全省土地总面积的 39.16%,具有酸性强、质地黏重、养分含量低等特点,石灰能促进土壤微团聚体的形成,改善土壤结构和通气性,通过施用石灰中和酸性土壤是改良土壤的主要措施之一^[3],从而能够影响土壤有机碳矿化。

土壤有机碳矿化是由微生物将有机质通过分解利用转化为无机物的过程,该过程受水分、温度、施用有机物料或无机化肥等的影响^[4]。激发效应(Priming effect)是指土壤在添加外源物质后,土壤中有机碳矿化速率短期增加(正激发效应)或降低(负激发效应)的现象^[5]。肖谋良等^[6]发现添加 $\text{Ca}^{14}\text{CO}_3$ 对石灰土和红壤的激发效应可达 43.9%~121.8%。FENG 等^[7]也发现外源 $\text{Ca}^{14}\text{CO}_3$ 对石灰土有机碳有正激发效应。黄媛^[8]发现激发效应与碳酸钙含量密切相关。温度通过改变土壤中的微生物活性或改变土壤性状(如孔隙度、水分等)而间接影响土壤有机碳的矿化^[9-10]。温度敏感性系数(Q_{10})为温度每升高 10 $^{\circ}\text{C}$ 土壤矿化增加的倍

数,常用来表征土壤有机碳矿化对温度的敏感性, Q_{10} 值越大表明土壤有机碳矿化对温度的变化越敏感^[11]。全球各种土壤生态系统中的 Q_{10} 在 1.3~3.3 之间波动^[12],研究发现 Q_{10} 具有明显的地带性, Q_{10} 变化范围在温带为 1.1~14.2,在亚热带为 1.4~4.6^[13]。由此可见, Q_{10} 并不是一个确定的常数,其会受到不同因素(水分、温度及添加的外源物)的限制^[14]。例如,魏圆云等^[15]发现农田湿地土壤受温度和外源葡萄糖的影响,其 Q_{10} 值在 1.2~1.6 之间波动。罗光强等^[16]发现羊草草原土壤 Q_{10} 受温度和水分的影响,介于 1.15~2.25 之间。

综上所述,对于外源碳酸钙对土壤有机碳矿化影响的研究集中在石灰土、红壤等土壤类型上,且对于 Q_{10} 影响因素的研究集中于外源有机物质上,目前外源无机碳酸钙和温度及两者复合作用对土壤有机碳矿化和 Q_{10} 的影响并不明确。贵州省作为西南亚热带喀斯特区一大分区,其土壤中赋存的游离碳酸钙含量会影响喀斯特土壤生态系统中碳循环平衡的维持^[17]。因此,在贵州气候不断变暖的背景下,探究碳酸钙和温度对黄壤有机碳矿化的影响,能够加深理解贵州喀斯特土壤无机碳酸盐在土壤呼吸中的贡献,以及进一步明确黄壤有机碳矿化的影响因素及不同因子的作用强度,对客观评价贵州省黄壤有机碳矿化在土壤固

碳减排中的影响具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 样品采集

供试土壤样品于2019年10月采自贵州省普定县董家坝(105.747 8°~105.748 2°E, 26.261 8°~26.262 6°N, 海拔1 288~1 302 m)。该地属于中亚热带季风湿润气候,年均降雨量1 336 mm,年均气温14.2℃。种植方式均为地瓜-玉米轮作。在典型黄壤旱地上选择5块5 m×5 m的样地,在每个样地上用多点采样法采集表层(0~20 cm)混合土壤样品,去除可见的动植物残体及砾石等杂质,根据土壤pH,选取1个典型的黄壤样品作为供试土壤,其基础性质为:pH 4.62,有机碳含量12.55 g·kg⁻¹,全氮含量1.67 g·kg⁻¹,全磷含量0.95 g·kg⁻¹,全钾含量14.99 g·kg⁻¹,碳酸盐含量0.54 g·kg⁻¹。

同位素标记Ca¹³CO₃和无标记的CaCO₃采购自上海化工研究院有限公司,纯度≥98.0%。将Ca¹³CO₃与CaCO₃按1:14的比例混合均匀,过0.125 mm筛,得到δ¹³C值为6.61的碳酸钙粉末。

1.2 试验设计

以黄壤作为供试土壤,设置3个培养温度(15、25℃和35℃)及添加(C,添加量为30 g·kg⁻¹,以干土计)和不添加碳酸钙粉末(CK)处理,分别记为15℃-C、25℃-C、35℃-C、15℃-CK、25℃-CK和35℃-CK,共计6个处理,每个处理重复3次,另设置无土无添加物的9个空白对照(检测空气中的CO₂),共27个培养装置。

称取供试黄壤540 g,调节含水量为土壤饱和含水量(WHC)的45%,放入25℃恒温培养箱中预培养7 d,用称质量的方法保持含水量。预培养结束后,取270 g黄壤与配制好的9 g碳酸钙粉末混匀,平均分装入9个250 mL棕色玻璃广口瓶;另取270 g黄壤,平均分装入9个250 mL棕色玻璃广口瓶。调节土壤含水量为45%WHC,分别放入1 L黑色塑料培养瓶中,同时放入盛有50 mL蒸馏水与10 mL 0.1 mol·L⁻¹ NaOH溶液的小烧杯,密闭瓶口,置于15、25℃和35℃恒温培养箱中培养60 d。

在培养的第1、5、10、15、30 d和60 d用注射器从培养瓶中采集CO₂气体样品用于测定总CO₂的浓度和CO₂的δ¹³C值。具体操作为先将装有不同处理土壤的玻璃广口瓶取出,用带有开关阀的橡胶瓶塞紧密塞住瓶口,利用真空抽气泵将瓶中的气体排出,每个装置

排气5 min后关闭开关阀,然后统一置于室外并打开开关阀通入自然空气5 min,再关闭开关阀,分别置于3个培养温度中培养产气4~5 h,之后用30 mL气密型注射器采集30 mL气体样品保存在12 mL真空瓶中,每个矿化装置均采集两份CO₂气体样品。

1.3 测定项目和方法

土壤基本理化指标的测定方法:土壤饱和含水量采用环刀法测定;土壤pH使用酸度计(水土比为2.5:1)测定;土壤有机碳使用K₂Cr₂O₇容量法-外加热法测定;土壤全氮使用半微量开氏定氮法测定;土壤全磷使用NaOH熔融-钼锑抗比色法测定;土壤全钾使用NaOH熔融-火焰光度法测定;土壤碳酸盐含量使用中和滴定法测定。

CO₂和¹³CO₂气体样品:采用气相色谱仪(Agilent GC 6890, USA)测定CO₂的浓度,采用稳定性同位素质谱仪(MAT-253)测定CO₂的δ¹³C值。

1.4 数据处理

(1) 土壤总CO₂释放速率^[18]

$$F = C \times 44 \times (V/22.4) \times [273/(273+T)] / (m \times t)$$

式中: F 为土壤CO₂释放速率,mg·kg⁻¹·d⁻¹; C 为密闭培养瓶中CO₂浓度,μmol·mol⁻¹; 44为CO₂分子量,g·mol⁻¹; V 为玻璃瓶的体积,L; 22.4为1个大气压、273 K时理想气体的摩尔体积,L·mol⁻¹; T 为培养温度,℃; m 为土壤质量,g; t 为密闭产气时间,4~5 h。

(2) 总CO₂累积释放量

$$M = \sum [(F_{i+1} + F_1)/2] \times (t_{i+1} - t_i)$$

式中: M 为总CO₂累积释放量,mg·kg⁻¹; F 为总CO₂释放速率,mg·kg⁻¹·d⁻¹; i 为采样次数; t 为采样时间,d。

(3) 来自碳酸钙的CO₂累积释放量

$$M_{Ca} = M \times (\delta - \delta_s) / (\delta_{Ca} - \delta_s)$$

式中: M_{Ca} 为源于碳酸钙的CO₂累积释放量,mg·kg⁻¹; M 为总CO₂累积释放量,mg·kg⁻¹; δ 为瓶中添加碳酸钙的土壤释放CO₂的δ¹³C值; δ_s 为无添加物的土壤释放CO₂的δ¹³C值; δ_{Ca} 为碳酸钙样品的δ¹³C值。

(4) 外源物对土壤有机碳矿化的激发效应^[15]

$$PE = (M_{SOC} - M_{CK}) / M_{CK} \times 100\%$$

式中: PE 为激发作用,%; M_{SOC} 为外源添加物处理中原土土壤有机碳矿化量(需扣除来自CaCO₃的CO₂释放量),mg·kg⁻¹; M_{CK} 为无添加外源物的土壤有机碳矿化量,mg·kg⁻¹。

(5) 土壤有机碳矿化温度敏感性系数 Q_{10} ^[19]

$$Q_{10} = R_{(T+10)} / R_T$$

式中: $R_{(T+10)}$ 为温度为 $(T+10)$ ℃时土壤有机碳的矿化

速率, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$; R_T 为温度为 T °C 时土壤有机碳的矿化速率, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

采用 Excel 2016 软件对数据进行整理与制图, 利用 SPSS 软件分析碳酸钙、温度、培养时间及其交互作用对黄壤有机碳矿化速率、累积释放量和温度敏感性的影响, 处理间的多重比较采用邓肯 (Duncan) 法 ($P < 0.05$ 表示处理间差异显著)。

2 结果与分析

2.1 碳酸钙在不同温度下对土壤有机碳矿化的影响

由图 1 可知, 不同处理下土壤总 CO_2 释放速率的规律基本一致, 第 1~5 d 迅速减小, 5~15 d 有轻微增加后又迅速减小, 15~60 d 逐渐减小并趋于稳定。在培养的第 1 d, 各处理均达到峰值, 为 $125.01 \sim 149.84 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, 在培养的 5~60 d, 土壤总 CO_2 释放速率表现为不添加碳酸钙的处理大于添加处理。整体上可知, 添加外源碳酸钙可降低土壤总 CO_2 释放速率。

如图 2 所示, 不同处理下黄壤总 CO_2 释放量在整个培养期间都呈上升趋势。添加碳酸钙降低了土壤总 CO_2 释放量。在培养结束时 (第 60 d), 不添加碳酸钙土壤总 CO_2 累积释放量为 $3788.5 \sim 4192.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 添加碳酸钙后在 15、25 °C 和 35 °C 下土壤总 CO_2 累积释放量相应降低了 47.62%、42.54% 和 46.77%。在第 60 d 时, 土壤总 CO_2 累积释放量均在 35 °C 下最高, 不添加碳酸钙时为 $4192.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 比 15 °C 和 25 °C 时分别增加了 5.95% 和 10.66%; 添加碳酸钙时为 $2231.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 比 15 °C 和 25 °C 时分别增加了 7.67% 和 2.51%。

添加外源碳酸钙的土壤中 $^{13}\text{CO}_2$ 累积释放量如图 3 所示。 $^{13}\text{CO}_2$ 累积释放量在 1~15 d 呈快速上升趋势, 15~60 d 逐渐趋于稳定, 其中在培养的第 15 d, $^{13}\text{CO}_2$ 累积释放量基本达到平衡。在培养的第 60 d, 25 °C 和

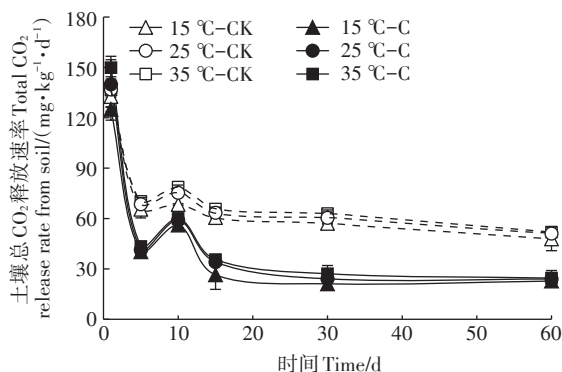


图1 土壤总 CO_2 释放速率

Figure 1 The total CO_2 release rate from soil

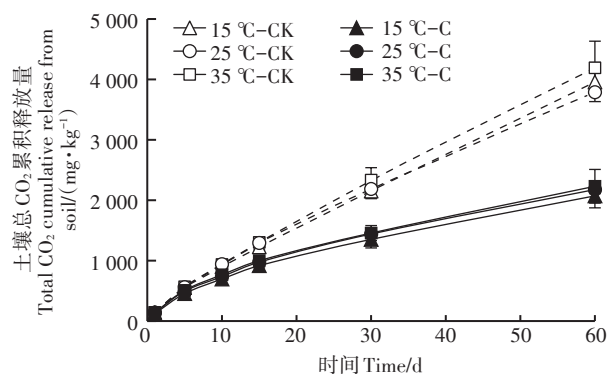


图2 土壤总 CO_2 累积释放量

Figure 2 The total CO_2 cumulative release from soil

35 °C 下的 $^{13}\text{CO}_2$ 累积释放量比 15 °C 下的分别增加了 63.1% 和 52.0%。受温度的影响, 添加外源碳酸钙的土壤中 $^{13}\text{CO}_2$ 累积释放量的变化与土壤总 CO_2 释放量类似。

如图 4 所示, 在培养第 60 d, 添加碳酸钙的土壤有机碳累积矿化量 (15 °C-C: $1786.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 25 °C-C: $1712.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 35 °C-C: $1799.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 显著低于不添加碳酸钙的处理 (15 °C-CK: $3956.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 25 °C-CK: $3788.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 35 °C-CK: $4192.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) ($P < 0.05$)。在第 60 d, 来自外源碳酸钙的 $^{13}\text{CO}_2$ 释放量在 25 °C 和 35 °C 下显著大于 15 °C ($P < 0.05$), 占总 CO_2 释放量的比例依次为 27.33%、19.36% 和 13.81%。

2.2 碳酸钙在不同温度下对土壤有机碳矿化的激发效应

激发效应是外源物质添加引起土壤有机碳发生短期的强烈周转改变的现象。如图 5 所示, 在整个培养期间, 碳酸钙对黄壤有机碳矿化有负激发效应, 1~15 d 逐渐减弱, 15~60 d 又有轻微增强。其中 25 °C

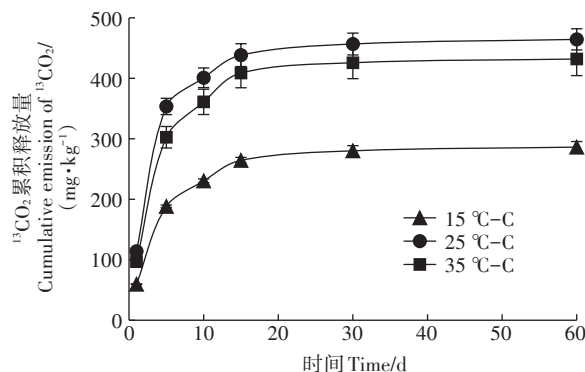
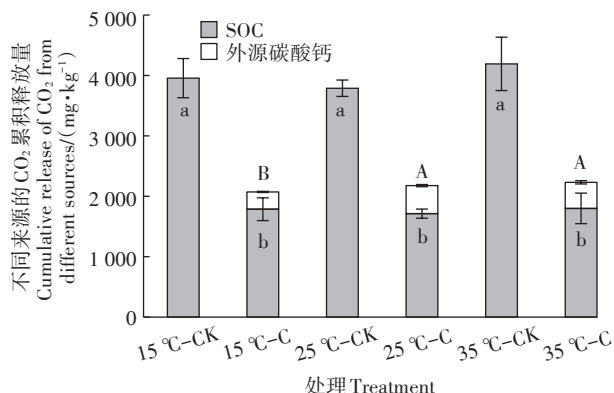


图3 来自碳酸钙的 $^{13}\text{CO}_2$ 累积释放量

Figure 3 The $^{13}\text{CO}_2$ cumulative release from CaCO_3



不同小写字母表示碳酸钙与温度交互效应影响下土壤有机碳累积矿化量差异显著 ($P<0.05$), 不同大写字母表示不同温度下来自外源碳酸钙的 CO_2 累积释放量差异显著 ($P<0.05$)

Different lowercase letters indicate significant differences among soil organic carbon accumulation mineralization quantities under the interaction effect of calcium carbonate and temperature ($P<0.05$); different capital letters indicate significant differences among cumulative release quantities of CO_2 from exogenous calcium carbonate at different temperatures ($P<0.05$)

图4 培养60 d后不同来源的 CO_2 累积释放量

Figure 4 CO_2 cumulative release from different sources after 60 days

与35 °C下的负激发效应在第1 d表现最强, 分别为-81.0%和-69.3%, 而15 °C下的激发效应在第1 d与第60 d均表现最强, 均为-54.0%; 15 °C与35 °C下的激发效应在第15 d表现最弱, 为-46.8%和-54.5%, 而25 °C下碳酸钙对黄壤有机碳矿化的负激发效应在第60 d表现最弱。总体上, 外源碳酸钙在前期(1~10 d)对黄壤有机碳矿化的负激发效应更强, 且负激发效应在25 °C下比15 °C和35 °C下的更强。

2.3 碳酸钙对土壤有机碳矿化 Q_{10} 的影响

如图6所示, 培养过程中, 黄壤有机碳矿化的温度敏感性系数 (Q_{10}) 随时间延长呈波动变化趋势, 变

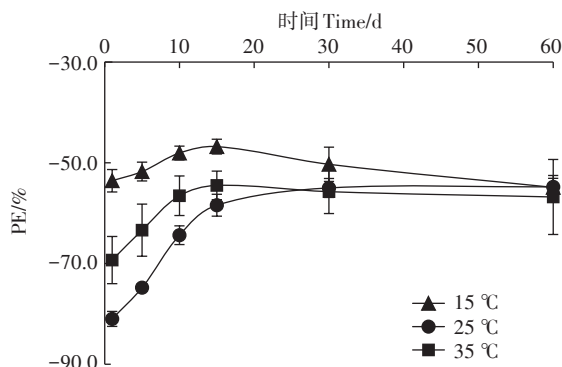


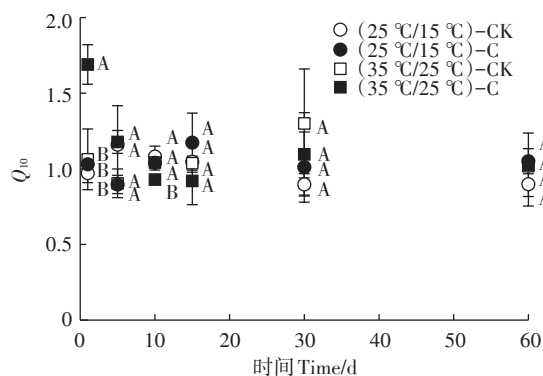
图5 不同温度下的激发效应

Figure 5 Priming effect at different temperatures

化范围为0.90~1.69。在15~25 °C温度体系中, 添加碳酸钙与不添加碳酸钙处理有机碳矿化 Q_{10} 平均值分别为 (1.03 ± 0.09) 和 (1.01 ± 0.11) , 在25~35 °C温度体系中, 两个处理 Q_{10} 平均值分别为 (1.14 ± 0.29) 和 (1.06 ± 0.13) 。其中(35 °C/25 °C)-C处理下的 Q_{10} 值相对于其他处理在第1 d显著增大, 而在第10 d显著减小 ($P<0.05$)。添加碳酸钙处理下黄壤有机碳 Q_{10} 值略有增加。温度升高也会影响黄壤有机碳矿化温度敏感性, 25~35 °C体系下的黄壤 Q_{10} 值与15~25 °C下的相比, 不添加碳酸钙与添加碳酸钙的处理 Q_{10} 值分别增加了5.10%和10.30%。说明黄壤有机碳矿化 Q_{10} 值随温度的升高有所增大, 黄壤中的有机碳在培养前期对温度的升高表现更敏感。

2.4 碳酸钙、温度和时间及其交互作用对 CO_2 释放速率、 CO_2 累积释放量、SOC 矿化量和 Q_{10} 值的方差分析

方差分析结果显示(表1), 温度、碳酸钙、时间、碳酸钙与时间的交互作用对土壤总 CO_2 释放速率、累积释放量和SOC矿化量有显著影响。温度对SOC矿化 Q_{10} 值影响显著, 但碳酸钙对 Q_{10} 值影响不显著。外源碳酸钙的添加会在短期内显著降低土壤SOC矿化 ($P<0.01$), 温度提升能够促进SOC的矿化 ($P<0.05$),



(25 °C/15 °C)-CK 表示不添加碳酸钙处理温度由15 °C升高到25 °C, (35 °C/25 °C)-CK 表示不添加碳酸钙处理温度由25 °C升高到35 °C, (25 °C/15 °C)-C 表示添加碳酸钙处理温度由15 °C升高到25 °C, (35 °C/25 °C)-C 表示添加碳酸钙处理温度由25 °C升高到35 °C。

不同字母代表同一时间下 Q_{10} 差异显著 ($P<0.05$)

(25 °C/15 °C)-CK means that the treatment without calcium carbonate, temperature increases from 15 °C to 25 °C; (35 °C/25 °C)-CK means that the treatment without calcium carbonate, temperature increases from 25 °C to 35 °C; (25 °C/15 °C)-C means that the treatment with calcium carbonate, temperature increases from 15 °C to 25 °C; (35 °C/25 °C)-C means that the treatment with calcium carbonate, temperature increases from 25 °C to 35 °C. Different letters indicate significant differences of Q_{10} values at the same time ($P<0.05$)

图6 黄壤有机碳矿化的温度敏感性

Figure 6 The temperature sensitivity of organic carbon mineralization of yellow soil

表1 碳酸钙、温度、时间及其交互作用对CO₂释放速率、释放量、SOC矿化量与Q₁₀值的方差分析(F值)Table 1 ANOVA of temperature, calcium carbonate, time, and their interactions on CO₂ release rate, release quantities, SOC cumulative mineralization quantities, and Q₁₀ value

影响因素 Factor	总CO ₂ 释放速率 Total CO ₂ release rate	总CO ₂ 累积释放量 Total CO ₂ cumulative release	SOC累积矿化量 SOC cumulative mineralization	Q ₁₀ 值 Q ₁₀ value
温度 Temperature(T)	3.37*	4.35*	3.52*	4.98*
碳酸钙 Calcium carbonate(C)	356.45**	476.93**	1 256.42**	2.17
培养时间 Incubation time(I)	525.48**	1 242.75**	1 214.39**	2.38
T×C	0.61	0.84	2.64	0.55
T×I	0.96	0.87	0.82	4.98**
C×I	12.09**	132.30**	171.91**	3.05*
T×C×I	1.39	0.56	0.65	5.13**

注:*代表显著($P<0.05$);**代表极显著($P<0.01$)。Note:* indicates significance($P<0.05$);** indicates extreme significance($P<0.01$).

两者的交互作用对SOC矿化无显著影响,但碳酸钙引起SOC矿化的负激发效应相对于温度引起的正激发效应更为强烈。

3 讨论

3.1 碳酸钙与温度对土壤有机碳矿化的影响

本研究结果表明,碳酸钙在不同温度下对黄壤有机碳矿化均有负激发效应($P<0.01$),且在培养前期负激发效应更强,这与本课题组前期研究发现25℃下碳酸钙对黄壤和石灰土有负激发效应的结果一致^[20]。有研究指出碳酸钙对土壤有机碳矿化速率的影响与其添加量有关^[6,8]。例如黄媛^[8]在研究中发现,当碳酸钙添加量为5~20 g·kg⁻¹时对红壤有负激发效应,当含量为30~100 g·kg⁻¹时有正激发效应;葛云辉等^[21]的研究发现碳酸钙添加量为50 g·kg⁻¹时,对红壤有机碳矿化有正激发效应。本文中外源碳酸钙的添加量为30 g·kg⁻¹时对黄壤有负激发效应,与上述研究结果不一致。这主要是因为少量碳酸钙加入土壤时,易与土壤有机碳结合成稳定的团聚体,从而减缓土壤有机碳矿化分解,表现为负激发效应,而大量碳酸钙加入土壤会提高土壤微生物活性,使得土壤有机质快速分解释放出CO₂,产生正激发效应^[8]。钙离子在不同土壤类型中的迁移速率有所差异^[22],因此在相同的碳酸钙添加量下,不同土壤类型中的有机碳与钙离子结合成团聚体的速度不同,从而表现出不同的激发效应。另外,本研究认为碳酸钙对土壤有机碳矿化的影响主要受到钙离子的控制。如曹彬彬等^[23]和董静超等^[24]发现施用氧化钙和氯化钙后土壤有机碳矿化量均显著减少。钙离子通过结合土壤腐殖化活性有机质中的自由基,在其表面覆盖一层钙壳,限制了有机质与

微生物及酶的接触,从而降低了有机碳的分解速率^[25]。

在整个培养期间,温度显著促进黄壤有机碳矿化($P<0.05$),这与袁淑芬等^[26]和葛序娟等^[27]的研究结果类似。这是由于温度的升高会提升土壤中酶的活性,使得有机碳矿化速率增加^[26]。在培养的第60 d,不添加碳酸钙的处理在25℃下有机碳累积矿化量略低于15℃,可能是由于普定县年均气温在14.6℃,且黄壤是贵州地带性土壤,所以接近年均气温的15℃较适合于黄壤有机碳矿化。添加碳酸钙后25℃下的CO₂释放量略高于15℃,可能是因为碳酸钙改善了土壤的结构和通气性而使有机碳矿化速率增快^[3,8]。添加碳酸钙的土壤释放¹³CO₂的量在25℃与35℃下显著大于15℃,而25℃与35℃下的¹³CO₂释放量无显著差异($P>0.05$),这与徐学池等^[28]和王忠媛等^[29]的研究结果类似。这是土壤中碳酸钙溶解产生的钙离子与胡敏酸结合成为新的腐殖质的过程受温度影响所致^[28]。

目前关于外源有机物和温度的交互效应对土壤有机碳矿化的影响研究较多,而无机物和温度的交互效应对土壤有机碳矿化的交互影响研究较少。本研究结果表明外源碳酸钙极显著减少黄壤有机碳矿化量($P<0.01$),而温度提升显著增加有机碳矿化量($P>0.05$),由此可见外源碳酸钙对土壤有机碳矿化的影响强于温度。这与GHEE等^[30]和HOPKINS等^[31]对5~30℃下添加蔗糖对土壤有机碳的激发效应的研究结果类似。因此,无论是外源有机物还是无机物,其与温度对有机碳矿化的复合影响是相似的,即影响有机碳矿化的主要因素并非温度,而是外源物质。

3.2 碳酸钙与温度对土壤有机碳矿化Q₁₀值的影响

本研究中,碳酸钙添加下土壤有机碳矿化Q₁₀值

略有增加,但差异并不显著。有研究指出,短期矿化培养试验中所观测的土壤 CO_2 释放以活性碳组分分解为主,而惰性碳组分会对土壤的温度敏感性有一定干扰作用^[15]。一些早期研究认为,外源碳的输入会导致土壤有机碳底物结构发生变化,从而影响土壤有机碳矿化 Q_{10} 值^[14-15,32]。土壤有机碳矿化 Q_{10} 值的变化更多是由于外源碳输入间接影响了土壤微生物对有机碳底物的分解利用过程^[33]。当外源碳酸钙加入土壤后,更多游离钙离子与土壤有机碳结合成团聚体,团聚体的增加改变了土壤有机碳底物的结构,从而影响微生物对有机碳的分解利用,导致土壤有机碳矿化 Q_{10} 值发生变化^[8]。

温度升高也会改变土壤有机碳矿化的 Q_{10} 值^[32,34]。本研究发现 Q_{10} 随着温度升高而有所增加,且影响达到显著水平,这与YUAN等^[34]的研究结果相似。因为温度的变化会改变土壤底物的有效性、酶与底物的亲和力和最大反应速率等,进而影响土壤有机碳矿化的 Q_{10} 值^[14]。

4 结论与展望

(1)外源碳酸钙对贵州黄壤有机碳矿化有抑制作用,而温度提升有促进作用,两个因素的共同作用表现为碳酸钙对黄壤有机碳矿化的负激发效应强于温度的正激发效应。

(2)外源碳酸钙的输入和温度升高均能影响黄壤有机碳矿化温度敏感性。随着培养时间延长,温度的升高会逐渐增强黄壤有机碳矿化温度敏感性,而碳酸钙对温度敏感性影响逐渐变弱,进一步说明气候变暖会长期影响黄壤有机碳的矿化,使黄壤有机碳分解加快,从而导致黄壤越发贫瘠。

(3)需要根据碳酸钙与温度及其交互作用对黄壤有机碳矿化的影响情况,合理调控土壤温度和施用石灰等管理措施,以利于积累黄壤的有机质和减少土壤 CO_2 的排放。土壤中碳酸盐存在溶蚀与沉积平衡,在今后的研究中,需进一步考虑无机碳酸盐分解释放的 CO_2 在喀斯特区土壤有机碳矿化过程中的贡献,以便深入理解土壤无机碳矿化与大气碳库之间的联系,明确土壤无机碳和有机碳在喀斯特区碳库中的实际影响。

参考文献:

- [1] ALLISON S D, WALLENSTEIN M D, BRADFORD M A. Soil-carbon response to warming dependent on microbial physiology[J]. *Nature Geoscience*, 2010, 3(5):336-340.
- [2] 张娇艳,李扬,吴战平,等.贵州省未来气候变化(2018—2050年)预

- 估分析[J]. *气象科技*, 2018, 46(6):1165-1171. ZHANG J Y, LI Y, WU Z P, et al. Projected climate change in Guizhou during 2018—2050[J]. *Meteorological Science and Technology*, 2018, 46(6):1165-1171.
- [3] 苗其硕. 贵州黄壤的利用改良和综合治理[J]. *贵州农业科学*, 1982(5):11-15. MIAO Q S. Utilization, improvement, and comprehensive control of yellow soil in Guizhou[J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 1982(5):11-15.
- [4] 肖巧琳,罗建新. 土壤有机质及其矿化影响因子研究进展[J]. *湖南农业科学*, 2009(2):74-77. XIAO Q L, LUO J X. Advance in soil organic matter and influence factor of nitrogen mineralization[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2009(2):74-77.
- [5] YAKOV K, ROLAND B. Sources and mechanisms of priming effect induced in two grassland soils amended with slurry and sugar[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 38(4):747-758.
- [6] 肖谋良,陈香碧,李杨,等. 棕色石灰土和红壤碳释放对添加矿物质($\text{Fe}(\text{OH})_3$ 和 CaCO_3)的响应[J]. *生态学杂志*, 2013, 33(11):2936-2942. XIAO M L, CHEN X B, LI Y, et al. Carbon release from brown limestone and red soils in response to addition of $\text{Fe}(\text{OH})_3$ and CaCO_3 [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 33(11):2936-2942.
- [7] FENG S, HUANG Y, GE Y, et al. Variations in the patterns of soil organic carbon mineralization and microbial communities in response to exogenous application of rice straw and calcium carbonate[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 571(15):615-623.
- [8] 黄媛. 桂西北典型土壤有机碳矿化对碳酸钙、水分及温度的响应[D]. 桂林:广西师范大学,2013. HUANG Y. The response of north-west Guangxi typical soil organic carbon mineralization to calcium carbonate, water content and temperature[D]. Guilin:Guangxi Normal University, 2013.
- [9] 胡亚林,汪思龙,颜绍旭. 影响土壤微生物活性与群落结构因素研究进展[J]. *土壤通报*, 2006, 37(1):170-176. HU Y L, WANG S L, YAN S K. Research advances on the factors influencing the activity and community structure of soil microorganism[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37(1):170-176.
- [10] VOGEL J G, VALENTINE D W. Soil and root respiration in mature Alaskan black spruce forests that vary in soil organic decomposition rates[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2005, 35(1):161-174.
- [11] 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. HUANG J X, XIONG D C, LIU X F, et al. Effects of warming on soil organic carbon mineralization: A review[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(1):12-24.
- [12] RAICH J W, POTTER C S. Global patterns of carbon oxide emissions from soils[J]. *Biogeochemical Cycles*, 1995, 9(1):23-36.
- [13] CHEN H, HARMON M E, GRIFFITHS R P, et al. Effects of temperature and moisture on carbon respired from decomposing woody roots [J]. *Forest Ecology and Management*, 2000, 138(1/2/3):51-64.
- [14] 刘洪升,刘华杰,王智平,等. 土壤呼吸的温度敏感性[J]. *地理科学进展*, 2008, 27(4):51-60. LIU H S, LIU H J, WANG Z P, et al. The temperature sensitivity of soil respiration[J]. *Progress in Geography*, 2008, 27(4):51-60.
- [15] 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, 2019, 27(10):1463-1471. WEI Y Y, CUI L J, ZHANG M Y, et al. Effects of exogenous carbon input on soil organic carbon mineralization and temperature sensitivity of cropland and wetland in the North China Plain[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2019, 27(10):1463-1471.
- [16] 罗光强, 耿元波. 温度和水分对羊草草原土壤呼吸温度敏感性的影响[J]. 生态环境学报, 2009, 18(5):1938-1943. LUO G Q, GENG Y B. Effect of temperature and moisture on temperature sensitivity of soil respiration of *Leymus chinensis* steppe[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(5):1938-1943.
- [17] 何尧启. 主成分分析在喀斯特土壤环境退化研究中的初步运用——以贵州麻山地区紫云县宗地乡为例[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 1999(1):14-21. HE Y Q. The tentative application of the method of main ingredient analysis in the research of retrogradation of karst soil environment: With special reference to Zongdi Township Ziyun County in Guizhou Province[J]. *Journal of Guizhou Normal University(Natural Sciences)*, 1999(1):14-21.
- [18] 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.
- [19] REICHSTEIN M, BEDNORZ F, BROLL G, et al. Temperature dependence of carbon mineralization: Conclusions from a long-term incubation of subalpine soil samples[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(7):947-958.
- [20] 陈领, 王小利, 张青伟, 等. 外源碳酸钙对黔中喀斯特地区土壤有机碳矿化的影响[J]. 山地农业生物学报, 2021, 40(1):6-13. CHEN L, WANG X L, ZHANG Q W, et al. Effect of exogenous calcium carbonate on mineralization of soil organic carbon in Karst area of central Guizhou[J]. *Journal of Mountain Agriculture and Biology*, 2021, 40(1):6-13.
- [21] 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. GE Y H, SU Y R, ZOU D S, et al. Organic carbon mineralization in lime soils in Karst region of Guangxi, south China in response to exogenous organic substrate and calcium carbonate[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(11):2748-2754.
- [22] 苏有健, 廖万有, 王辉军, 等. 茶园土壤中钙迁移行为的土柱模拟研究[J]. 水土保持学报, 2014, 28(1):26-30, 35. SU Y J, LIAO W Y, WANG Y J, et al. Modeling vertical migration behavior of calcium in tea garden by soil columns leaching[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(1):26-30, 35.
- [23] 曹彬彬, 朱熠辉, 姜禹含, 等. 添加石灰和秸秆对壤土有机碳固持的影响[J]. 中国农业科学, 2020, 53(20):4215-4225. CAO B B, ZHU Y H, JIANG Y H, et al. Effects of lime and straw addition on SOC sequestration in Tier soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(20):4215-4225.
- [24] 董静超, 栗杰, 董越, 等. 外源氯化钙对土壤有机碳积累的影响[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2020, 40(1):122-128. DONG J C, LI J, DONG Y, et al. Effects of exogenous calcium chloride on soil organic carbon accumulation[J]. *Journal of Shanxi Agricultural University(Natural Science Edition)*, 2020, 40(1):122-128.
- [25] CHOULIARAS N, JACQUIN F. Biodegradation and humification. II. Organic matter development in a rendzina and in an acid mull enriched or non-enriched in CaCO_3 [J]. *Bulletin de l'Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie et des Industries Alimentaires, Nancy*, 1976, 18(1/2):71-79.
- [26] 袁淑芬, 汪思龙, 张伟东. 外源有机碳和温度对土壤有机碳分解的影响[J]. 土壤通报, 2015, 46(4):916-922. YUAN S F, WANG S L, ZHANG W D. Effect of external organic carbon and temperature on SOC decomposition[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2015, 46(4):916-922.
- [27] 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. GE X J, PAN J J, WU J H, et al. Effects of incubation temperature on parameters of organic carbon mineralization in paddy soils[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2015, 46(3):562-569.
- [28] 徐学池, 黄媛, 何寻阳, 等. 土壤水分和温度对西南喀斯特棕色石灰土无机碳释放的影响[J]. 环境科学, 2019, 40(4):1965-1972. XU X C, HUANG Y, HE X Y, et al. Effect of soil moisture and temperature on the soil inorganic carbon release of brown limestone soil in the Karst region of southwestern China[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(4):1965-1972.
- [29] 王忠媛, 谢江波, 王玉刚, 等. 温度对盐土和碱土土壤无机 CO_2 通量的影响[J]. 生态学杂志, 2013, 32(10):2525-2531. WANG Z Y, XIE J B, WANG Y G, et al. Effects of temperature on inorganic CO_2 flux of saline soil and alkaline soil[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(10):2525-2531.
- [30] GHEE C, NEILSON R, HALLETT P D, et al. Priming of soil organic matter mineralization is intrinsically insensitive to temperature[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 66:20-28.
- [31] HOPKINS F M, FILLEY T R, GLEIXNER G, et al. Increased below-ground carbon inputs and warming promote loss of soil organic carbon through complementary microbial responses[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 76(1):57-69.
- [32] 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. LI A M, LI H, PEI J B, et al. Effects of maize straw application on organic carbon's priming effect and temperature sensitivity in brown earth[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(12):2788-2796.
- [33] 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.
- [34] YUAN C X, ZHU G Q, YANG S N, et al. Soil warming increases soil temperature sensitivity in subtropical forests of SW China[J]. *PeerJ*, 2019, 7:7721.