

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.
WANG F, CHEN Y-Z, YOU Z-M, et al. Effect of Temperature on Organic Carbon Mineralization in Two Types of Soil at Tea Plantations [J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2016, 31 (9): 993—999.

培养温度对不同类型茶园土壤有机碳矿化的影响

王 峰¹, 陈玉真¹, 尤志明^{1*}, 吴志丹¹, 江福英¹, 张文锦¹, 王义祥²

(1. 福建省农业科学院茶叶研究所, 福建 福安 355015;

2. 福建省农业科学院农业生态研究所, 福建 福州 350013)

摘要: 室内模拟亚热带地区 2 种不同类型茶园土壤 (黄壤和高山草甸土) 在 3 种温度 (10、20 和 30℃) 下的有机碳矿化特征, 分析有机碳矿化对温度变化的响应特征。结果表明: 在 47 d 培养期间内, 土壤类型和温度对茶园有机碳矿化具有显著影响, 并且存在显著的交互作用; 相同培养温度条件下高山草甸土茶园有机碳矿化量和矿化速率常数 k 均显著高于黄壤, 但矿化比例差异不显著, 随着培养温度的增大, 有机碳累积矿化量持续增加, 增幅分别为 20.90~91.88% (黄壤) 和 48.52~113.88% (高山草甸土), 且高山草甸土有机碳 Q_{10} 值高于黄壤, 说明有机碳含量丰富的高海拔高山草甸土茶园土壤有机碳温度敏感性更高; 低温培养条件下 (<20℃) 土壤有机碳矿化的温度敏感性均显著高于高温培养条件下, 说明低温条件下有机碳矿化速率对升温更敏感, 低温条件下 (<20℃) 高山草甸土茶园土壤平均 Q_{10} 值 (2.05) 显著高于黄壤 (1.66), 但高温条件下 (>20℃), 两者之间没有显著差异; 一级动力学方程能较好地描述了 2 种茶园土壤有机碳的矿化累积动态, 土壤有机碳的潜在矿化量 (C_0) 随温度增加而增加。

关键词: 土壤有机碳矿化; 茶园土壤; 温度敏感性; Q_{10} 值

中图分类号: S 151

文献标识码: A

文章编号: 1008—0384 (2016) 09—993—07

Effect of Temperature on Organic Carbon Mineralization in Two Types of Soil at Tea Plantations

WANG Feng¹, CHEN Yu-zhen¹, YOU Zhi-ming^{1*}, WU Zhi-dan¹, JIANG Fu-ying¹,
ZHANG We-jin¹, WANG Yi-xiang²

(1. Tea Research Institute, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fu'an, Fujian 355015, China;
2. Agriculture Ecology Institute, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou, Fujian 350013, China)
Abstract: An incubation test on the yellow and alpine meadow soils collected from the tea plantations in the subtropical region was conducted at 10, 20, and 30℃ to examine the response of the soil organic carbon (SOC) mineralization due to the temperature changes. The results showed that, in a 47 d incubation, both soil type and temperature significantly affected the SOC mineralization with significant interactions between the two factors. At a same incubation temperature, the SOC mineralization accumulation and mineralization constant (k) were significantly higher in the alpine meadow than the yellow soil, but not on the mineralization rate. The cumulative SOC mineralization increased with increasing temperature by 20.90%—91.88% on the yellow soil, and 48.52%—113.88% on the alpine meadow soil. The temperature sensitivity, Q_{10} , on SOC of the alpine meadow soil was significantly higher than that of the yellow soil, suggesting a greater effect of climate warming on SOC mineralization for tea plantations at higher altitudes. In addition, Q_{10} were higher at lower temperatures (<20℃) than higher temperatures (>20℃), indicating that the mineralization was more sensitive to temperature rise at low temperatures. And, when the temperature was lower than 20℃, the sensitivity of the alpine meadow soil was significant higher than that of its counterpart. Whereas, as the temperature raised beyond 25℃, no significant difference was found between them. The dynamics of SOC mineralization appeared to fit a first-order kinetics

收稿日期: 2016—06—14 初稿; 2016—08—03 修改稿

作者简介: 王峰 (1984—), 男, 助理研究员, 研究方向: 茶树栽培与环境生态 (E-mail: 82458lin@163.com)

* 通讯作者: 尤志明 (1964—), 男, 研究员, 主要从事茶树栽培 (E-mail: 847842412@qq.com)

基金项目: 福建省自然科学基金 (2016J01120); 福建省科技计划项目——省属公益类科研院所基本科研专项 (2014R1012-10、2015R1012-5、2014R1017-3); 福建省财政专项——福建省农业科学院科技创新团队建设项目 (2014Y0048、2015S0044)

function, while the SOC mineralization potential (C_o) increased with increasing incubation temperature.

Key words: Soil organic carbon mineralization; tea plantation soil; temperature sensitivity; Q_{10}

土壤有机碳库是陆地生态系统中最大的碳库, 约占陆地土壤有机碳库的 67% (储量约为 1 500 PG)^[1-2], 与全球碳循环和气候变化密切相关。土壤有机碳分解释放 CO₂的过程称土壤有机碳矿化, 该过程作为土壤碳库周转过程中唯一碳输出途径, 其微小的变化足以影响 CO₂浓度的较大波动^[3], 也会影响土壤生物活性及营养元素的释放与供应等^[4]。综合前人的研究发现, 影响土壤有机碳矿化的因素很多, 包括土壤管理措施^[5-6]、环境因素^[7-8]、土壤有机碳化学组成^[9-10]、土壤理化性状^[11-13]等, 其中温度是影响土壤有机碳矿化最重要的调控因子。由于温室效应, 即使目前温室气体浓度保持恒定, 地表温度也将持续上升^[14]。由此可见, 未来气候变暖背景下, 探讨升温如何影响土壤有机碳矿化已成为全球变化和碳循环研究的热点问题。目前国内有关林地^[15]、旱地^[16]、水田^[17]及湿地^[18]的土壤有机碳矿化及其温度敏感性的研究较多, 但有关茶园土壤有机碳矿化的温度敏感性研究仅有少量报道^[19-20]。

茶园是我国南方丘陵地区主要的土地利用类型, 据统计 2015 年底我国茶园种植面积已达 289.73 万 hm²^[21], 新垦茶园面积和采摘面积保持持续增长态势。有研究表明, 茶园土壤碳密度约为 143.90 MgCha⁻²^[22], 成龄茶园 (35 a) 土壤碳密度与周围常绿林地相当, 并随着植茶年限增加有机碳密度增加。本研究以福建省武夷山市 2 种不同类

型茶园土壤 (黄壤和高山草甸土) 为研究对象, 研究温度如何影响茶园土壤有机碳的矿化过程及其温度敏感性, 以期为预测未来气候变暖背景下茶园土壤有机碳变化提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤分别取自福建省武夷山市星村镇曹墩村 (N 27°37'、E117°51') 和桐木关保护区 (N 27°47'、E117°42'), 土壤类型为黄壤和高山草甸土。于 2013 年 3 月按照多点取样法在选定的标准试验地采集上层耕作层土壤 (0~20 cm), 采样点在茶行中线位置, 6 次重复, 6 个重复混合成 1 个样品。采样结束后, 及时带回实验室风干, 需剔除凋落物、植物根系、石块等杂物。其中, 一部分过 2 mm 筛后用于培养试验; 取另一部分研磨后过 100 目筛孔, 用于土壤理化性质测定。试验地茶园基本情况和土壤基础理化性质分别见表 1 和表 2。

表 1 试验地茶园基本情况

Table 1 Basic properties of tea plantations under investigation

土壤类型	树龄 /a	茶树品种	树势	海拔 /m
黄壤	8	水仙	中	385
高山草甸土	10	本地菜茶	好	1120

表 2 供试土壤基础理化性状

Table 2 Basic agro-chemical properties of soils under study

土壤类型	有机碳/(g·kg ⁻¹)	可溶性有机碳/(mg·kg ⁻¹)	微生物量碳/(mg·kg ⁻¹)	全氮/(g·kg ⁻¹)	容重/(g·cm ⁻³)	C/N	pH	砂粒/%	粉粒/%	粘粒/%
黄壤	23.52	44.17	135.67	1.71	1.06	13.75	4.18	15.97	58.43	25.60
高山草甸土	36.60	77.89	209.32	3.46	0.92	10.58	4.52	35.00	47.65	17.35

1.2 试验设计

采用室内密闭培养、碱液吸收法测定土壤有机碳的矿化量^[23]。具体操作步骤如下: 称 150 g 过 2 mm 筛的风干土, 放入规格为 1 L 带盖白色塑料培养瓶中, 加入去离子水调节土壤含水率至田间最大持水量 (WHC) 的 60%, 在 20℃ 恒温培养箱中预培养 48 h, 以激活土壤微生物。预培养结束后, 在培养瓶内土壤表面垫一块尼龙网, 分别置于 10、20 和 30℃ 的生化培养箱中恒温好气培养 47 d。在

培养的第 1、2、4、6、8、12、19、26、33 和 47 d 测定 CO₂ 释放量。测定时将盛有 20 mL 0.1 mol·L⁻¹ NaOH 溶液的小烧杯小心地放置于尼龙网上, 将塑料培养瓶加盖密封 24 h 后, 取出 NaOH 吸收液用稀盐酸滴定。非测定时间用塑料薄膜封口, 并用针头扎若干个小孔以保持好氧环境。所有处理均为 3 次重复, 同时每个温度设置 3 个空白样对照 (即不加土壤)。整个培养期间, 定期采用称重法保持含水量一致。

1.3 分析方法和指标计算

土壤基础理化性质参照鲁如坤编写的土壤农业化学分析进行^[24]; 培养过程中 CO₂ 释放量参照窦晶鑫等^[25]。

温度系数 (Q_{10}) 按以下公式计算^[26]:

$$Q_{10} = R_{t+10}/R_t \quad (1)$$

(1) 式中, R_t 和 R_{t+10} 分别为温度 t 和 $t+10$ 时刻的土壤有机碳矿化速率。

由于培养期较短, 采用一级动力学方程对不同培养温度下土壤有机碳矿化动态进行拟合^[27], 具体方程如下:

$$C_{min} = C_0 (1 - \exp -kt) \quad (2)$$

(2) 式中: C_{min} 为 t 时刻土壤有机碳累计矿化量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), C_0 为有机碳潜在矿化势 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), t 为培养天数 (d), k 为有机碳矿化常数。

1.4 数据处理

利用 SPSS 16.0 软件进行方差分析和一级动力学方程拟合, 表格制作采用 Microsoft Excel 2003 软件, 绘图采用 GraphPad Prism 5 软件。

2 结果与分析

2.1 不同培养温度下 2 种茶园土壤有机碳矿化矿化过程

图 1 为不同培养温度下 2 种茶园土壤有机碳矿化速率随培养时间的变化。各处理茶园土壤有机碳日矿化速率呈现明显的阶段性特征: 经过 48 h 的预培养后, 土壤有机碳矿化在 1 d 达到峰值, 各处理间差异显著 ($P < 0.05$); 此后迅速下降, 至培养第 8 d 时, 黄壤茶园土壤各处理有机碳的矿化速率下降了 66.44%~73.77%, 高山草甸土茶园土壤下降了 74.69%~76.36%; 随着培养时间的延长逐渐趋于稳定状态, 各处理间差异不显著 ($P > 0.05$)。同时, 2 种类型茶园土壤有机碳矿化速率均随着培养温度增加而增加, 且低温 (10℃) 时升高温度土壤有机碳矿化速率增幅要高于高温下 (20℃) 升高温度的增幅。拟合分析表明, 培养期间不同培养温度处理土壤有机碳矿化速率随培养时间的变化符合对数函数关系 (表 3), 相关系数均达到极显著水平。

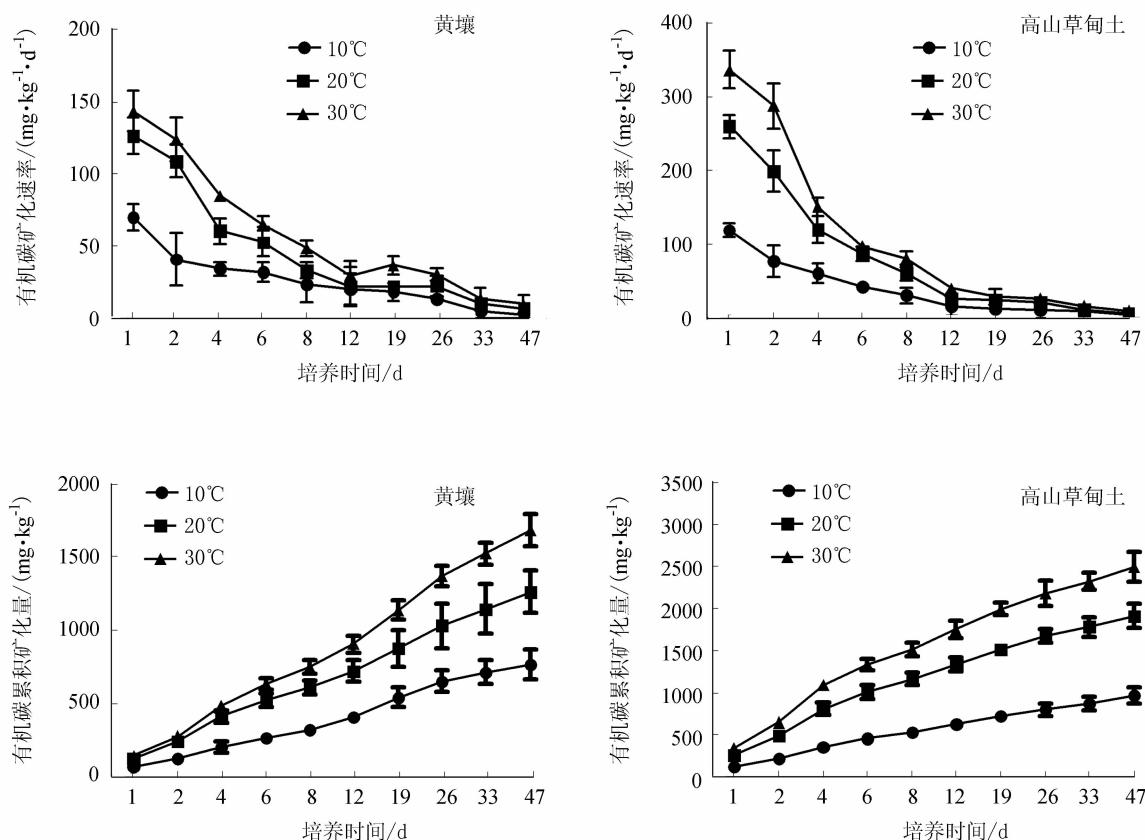


图 1 培养期间土壤有机碳矿化速率和累积矿化量的动态变化
Fig. 1 Mineralization rate and cumulative SOC mineralization during incubation

表 3 培养期间土壤有机碳矿化速率的回归分析

Table 3 Mathematic equation of SOC mineralization during incubation

土壤类型	处理 / °C	回归方程	相关系数 R ²
黄壤	10	$Y = -26.53\ln(x) + 65.98$	0.97**
	20	$Y = -55.19\ln(x) + 129.85$	0.96**
	30	$Y = -61.55\ln(x) + 151.50$	0.97**
高山草甸土	10	$Y = -50.48\ln(x) + 114.38$	0.96**
	20	$Y = -116.92\ln(x) + 258.11$	0.97**
	30	$Y = -155.72\ln(x) + 342.20$	0.98**

注: 式中 Y: $\text{CO}_2\text{-C}$ 矿化速率/(mg · kg⁻¹ · d⁻¹); x: 培养时间/d。

* * P<0.01。

2.2 不同培养温度下 2 种茶园土壤有机碳累积矿化量和矿化比例

土壤有机碳矿化量是指在一定温度下, 培养时间内土壤有机碳矿化释放的 CO_2 总量, 也是表征土壤碳矿化速率强度的指标之一^[28]。在本试验的培养周期内(47 d), 茶园黄壤 3 种培养温度下有机

碳累积矿化量分别为: 766.59、1 263.84 和 1 685.86 mg · kg⁻¹, 高山草甸土茶园各处理有机碳矿化量分别为 967.06、1 907.91 和 2 492.82 mg · kg⁻¹(图 2), 且均随着培养温度增加而增加。方差分析表明, 升温显著增加 2 种茶园土壤有机碳累积矿化量($P<0.05$), 增幅分别为 64.86%~119.91% 和 97.29%~157.77%。同时, 同一培养温度下高山草甸土茶园土壤有机碳矿化量均显著高于黄壤($P<0.05$)。

3 种培养温度下黄壤茶园土壤有机碳矿化率分别为 3.26%、5.37% 和 7.17% (图 2), 且各处理间差异显著($P<0.05$); 相同温度下高山草甸土茶园有机碳矿化率分别为 2.64%、5.21% 和 6.81%, 各处理间差异显著($P<0.05$); 黄壤茶园有机碳矿化率要高于高山草甸土, 但差异不显著($P>0.05$)。升温有利于提高茶园土壤有机碳累积矿化率, 分别提高了 2.22%~3.91% (黄壤) 和 2.57%~4.71% (高山草甸土), 说明升温对高山草甸土有机碳矿化促进效果更加明显。

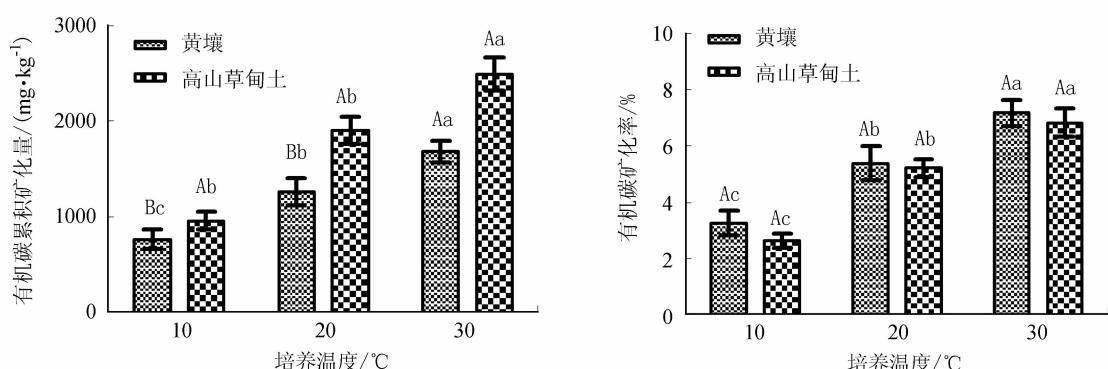


图 2 土壤有机碳累积矿化量和矿化比率

Fig. 2 Accumulative mineralization and SOC mineralization rate

注: 图中小写字母表示同一土壤类型在不同培养温度之间的差异, 大写字母表示两种土壤类型在同一培养温度之间的差异。

2.3 培养温度和土壤类型对有机碳矿化的交互作用

利用双因素方差分析法(Two-Way ANOVA), 分析了土壤温度与土壤类型对茶园土壤有机碳矿化量和矿化比例的交互作用。从表 4 可以看出, 不仅土壤类型和培养温度对土壤有机碳累积矿化量有极显著影响($P<0.01$), 而且两者的交互作用也极其显著($P<0.01$)。然而, 土壤有机碳矿化比例仅受培养温度的影响($P<0.01$), 不存在交互作用, 说明培养温度才是影响有机碳矿化比例的主要因素。

表 4 培养温度和土壤类型对有机碳矿化的影响

Table 4 Effect of temperature and soil type on SOC mineralization

因素	F 值	
	累积矿化量	矿化比例
土壤类型	138.81**	4.27
培养温度	230.55**	164.01**
土壤类型×培养温度	15.04**	0.53

注: ** 表示 $P<0.01$ 水平下差异显著。

2.4 茶园土壤有机碳矿化温度敏感系数 (Q_{10}) 和动力学方程

一般用有机碳矿化的温度系数 (Q_{10}) 来反映温度对有机碳平均矿化速率的影响状况, 其值越大表示温度敏感性越强^[29]。本研究可以看出(图3), 2种类型茶园土壤有机碳矿化的温度系数 Q_{10} 在温度较高($>20^{\circ}\text{C}$)时比地温区间($<20^{\circ}\text{C}$)时随时间的变化幅度明显。温度较高($>20^{\circ}\text{C}$)时, 黄壤和高山草甸土茶园平均 Q_{10} 值分别为 1.32 和 1.36; 温度较低($<20^{\circ}\text{C}$)时, 黄壤和高山草甸土茶园平均 Q_{10} 值分别为 1.66 和 2.05, 说明低温时升温会

大大促进土壤有机碳的矿化。同时, 高山草甸土 Q_{10} 值要高于黄壤, 表明有机碳丰富的高海拔茶园土壤对升温更敏感。

应用一级动力学方程对不同培养温度条件下, 2种茶园土壤有机碳累积矿化量进行拟合, 拟合方程的相关系数均大于 0.96(表5)。总的来看, 相同培养温度条件下, 高山草甸土有机碳的潜在矿化量 C_0 值均显著高于黄壤; 2种茶园土壤的潜在矿化量 C_0 值均随着培养温度增加, 黄壤茶园土壤的矿化速率常数 k 值以 20°C 最高, 高山草甸土的矿化速率常数 k 值则随着培养温度增加而增加。

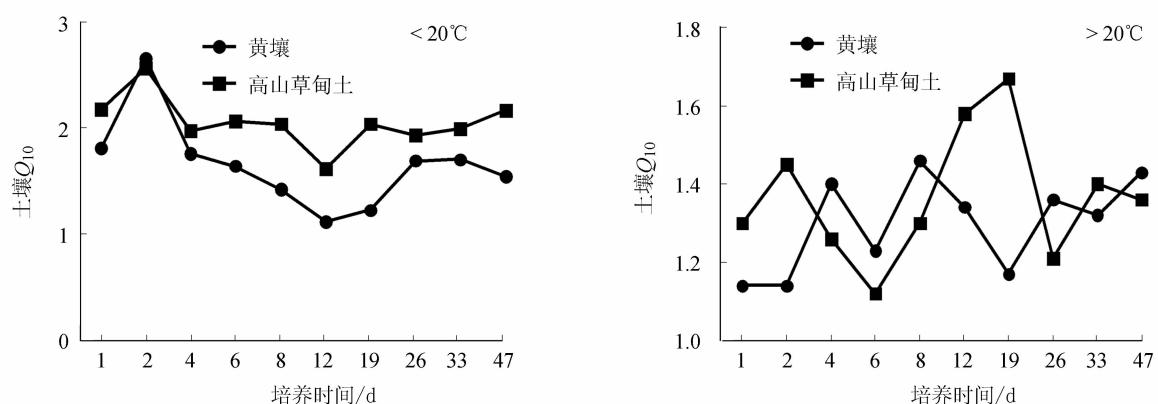


图3 不同处理培养过程中温度系数 (Q_{10}) 的变化

Fig. 3 Q_{10} of different treatments during incubation

表5 土壤有机碳矿化的一级动力学参数

Table 5 Parameters on first-order kinetics of SOC mineralization

土壤类型	处理 / °C	$C_0 / (\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$	$K (\text{d}^{-1})$	$C_0/\text{SOC} / \%$	R^2
黄壤	10	803.45c	0.063b	3.42c	0.96
	20	1217.36b	0.084c	5.18b	0.97
	30	1691.84a	0.069b	7.19a	0.98
高山草甸土	10	895.08c	0.10b	2.45c	0.99
	20	1778.43b	0.13ab	4.86b	0.98
	30	2315.99a	0.14a	6.33a	0.97

3 讨论与结论

本研究中, 2种类型茶园土壤有机碳矿化速率呈现出阶段性特征, 培养初期达到峰值后迅速下降, 后期持续下降并趋于稳定, 这与多数的研究结果一致^[6,15]。在培养前期, 土壤微生物优先分解由大部分植物残体、相当数量的微生物和周转迅速的微小动物碎片等组成的活性有机碳, 土壤有机碳矿

化速率很快达到最高峰; 随培养时间的延长, 土壤中易矿化有机碳数量逐渐消耗, 土壤微生物转而开始分解结构复杂的有机物质(纤维素和木质素)^[30], 微生物代谢相对缓和, 矿化速率随之减缓。同时, 2种类型茶园土壤有机碳矿化速率随时间的变化均符合对数方程(表3), 与陈涛等^[31]研究结果一致。高山草甸土茶园累积矿化量及矿化速率常数 k 均显著高于黄壤茶园, 这可能与2种类型茶园土壤理化性质和微生物(数量、活性及群落结构)差异有关。以往研究表明^[32], 土壤有机碳含量及组成是影响有机碳矿化的主导因素。高山草甸土茶园有机碳含量($36.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)明显高于黄壤茶园($23.52 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$), 同时可溶性有机碳和微生物量碳含量也高于黄壤茶园(表2), 参与矿化过程的微生物底物浓度较高, 因而有机碳矿化速率和矿化量较大; 而高山草甸土茶园氮含量也显著高于黄壤茶园, 氮含量的增加可以促进土壤有机碳的矿化^[33]。尽管高山草甸土茶园有机碳累积矿化量要显著高于黄壤茶园, 但两者之间有机碳矿化比例差异不显著, 这与活性有机碳占有机碳的比例基本一

致有关。

温度是影响有机碳矿化的关键因素，在一定温度范围内土壤有机碳矿化速率会随着温度升高而增加^[13,34]，其中，低温下升温会大大促进土壤有机碳的矿化，高温下升温对土壤有机碳矿化的促进作用则相对较弱^[35]。本研究中经过 47 d 的培养，10、20 和 30℃ 条件下，黄壤茶园有机碳矿化率 3.26%、5.37% 和 7.17%，高山草甸土茶园有机碳矿化率为 2.64%、5.21% 和 6.81%，并且温度间存在显著性差异，表明随着温度升高土壤有机碳矿化比例呈递增趋势，这与大多数研究的结果一致^[7,34]。在培养温度较低时，土壤微生物以及酶活性受到限制，土壤有机碳矿化速率较慢；随着培养温度的增加，参与呼吸作用的微生物数量和种类明显增加，可以促进产生更多参与碳分解的酶^[36]（如 β G 和纤维素分解酶），从而导致土壤有机碳的矿化速率加快；另外，升温有利于促进土壤缓效碳转化为活性炭，使活性炭库含量和比例增加^[37]，从而促进有机碳矿化速率。另外，本研究发现，培养温度升高山草甸土茶园有机碳矿化量增幅（97.29% ~ 157.77%）高于黄壤（64.86% ~ 119.91%），说明高山草甸土茶园有机碳矿化受温度影响更大。

通常用 Q_{10} 来表示土壤有机碳矿化的温度敏感系数，不同植被和土壤类型之间的 Q_{10} 值差异很大，但可用比较不同研究和用于反映土壤有机碳分解对于气候变暖的响应机制。本研究中，温度较高（>20℃）时，黄壤和高山草甸土茶园平均 Q_{10} 值分别为 1.32 和 1.36，温度较低（<20℃）时，黄壤和高山草甸土茶园平均 Q_{10} 值分别为 1.66 和 2.05；说明低温条件下土壤有机碳矿化对温度的敏感性均显著高于高温条件下，这与其他地区研究结果一致^[38-39]。同时，高山草甸土茶园平均 Q_{10} 值要大于黄壤，说明有机碳含量丰富的高海拔茶园土壤有机碳温度敏感性更高。高山草甸土茶园分布于海拔 1100~1500m 高山地区，多由湿生草灌植被开垦形成，土壤草甸化作用明显，周围有大量的林地凋落物输入，冷湿气候条件下土壤有机碳氮大量积累，活性有机质含量较高，因而对升温更敏感。另外，土壤微生物的对温度的适应性对 Q_{10} 具有重要影响，低海拔地区茶园土壤温度变幅较大，土壤微生物对高温的适应可能降低土壤有机碳矿化的温度敏感性^[34]。

综合以上可以看出，相同培养温度下高山草甸土茶园有机碳矿化量和矿化速率常数 k 均显著高于

黄壤，但有机碳矿化比例差异不显著；升温均会促进两种类型茶园土壤有机碳矿化，增幅分别为 97.29% ~ 157.77% 和 64.86% ~ 119.91%，茶园土壤有机碳矿化过程同时受到培养温度和土壤类型的交互影响；低温培养条件下土壤有机碳矿化对温度的敏感性均显著高于高温培养条件下，有机碳含量丰富的高海拔地区高山草甸土茶园土壤有机碳温度敏感性更高。

参考文献：

- [1] LAL R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. Science, 2004, 304:1623—1627.
- [2] HASHIMOTO S, TANAKA N, SUZUKI M, et al. Soil respiration and soil CO₂ concentration in a tropical forest, Thailand [J]. Journal of Forest Research, 2004, 9 (1): 75—79.
- [3] 刘绍辉, 方精云. 土壤呼吸的影响因素及全球尺度下温度的影响 [J]. 生态学报, 1997, 17 (5): 469—476.
- [4] 李忠佩, 张桃林, 陈碧云. 可溶性有机碳的含量动态及其与土壤有机碳矿化的关系 [J]. 土壤学报 2004, 41 (4): 544—552.
- [5] 时秀焕, 张晓平, 梁爱珍, 等. 利用最小限制水分范围评价短期免耕对黑土有机碳矿化的影响 [J]. 中国农业科学, 2010, 43 (20): 4207—4213.
- [6] 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.
- [7] EN C I, AI-KAISI M M, WANG L, et al. Soil Organic Carbon Mineralization as Affected by Cyclical Temperature Fluctuations in a Karst Region of Southwestern China [J]. Pedosphere, 2015, 25 (4): 512—523.
- [8] ZHANG Y J, GUO S L, ZHAO M, et al. Soil moisture influence on the interannual variation in temperature sensitivity of soil organic carbon mineralization in the Loess Plateau [J]. Biogeosciences Discussions, 2015, 12 (2): 1453—1474.
- [9] ZHAO H, TONG D Q, LIN Q, et al. Effect of fires on soil organic carbon pool and mineralization in a Northeastern China wetland [J]. Geoderma, 2012, 190 (6): 532—539.
- [10] 郝瑞军, 李忠佩, 车玉萍. 苏南水稻土有机碳矿化特征及其与活性有机碳组分的关系 [J]. 长江流域资源与环境, 2010, 19 (9): 1069—1074.
- [11] 李顺姬, 邱莉萍, 张兴昌. 黄土高原土壤有机碳矿化及其与土壤理化性质的关系 [J]. 生态学报, 2010, 30 (5): 1217—1226.
- [12] WEI Z Q, SHAO-HUA W U, ZHOU S L, et al. Soil Organic Carbon Transformation and Related Properties in Urban Soil Under Impervious Surfaces [J]. Pedosphere, 2014, 24 (1): 56—64.
- [13] 任秀娥, 童成立, 孙中林, 等. 温度对不同粘粒含量稻田土壤有机碳矿化的影响 [J]. 应用生态学报, 2007, 18 (10): 2245—2250.

- [14] XIUCANG L I, TONG JIANG, QINGCHEN CHAO, et al. The Core Conclusions and Interpretation of Working Group II Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [J]. Chinese Journal of Urban & Environmental Studies, 2015, 3 (1): 1–10.
- [15] 马昕昕, 许明祥, 杨凯. 黄土丘陵区刺槐林深层土壤有机碳矿化特征初探 [J]. 环境科学, 2012, 33 (11): 3893–3900.
- [16] 王媛华, 苏以荣, 李杨, 等. 稻草还田条件下水田和旱地土壤有机碳矿化特征与差异 [J]. 土壤学报, 2011, 48 (5): 979–987.
- [17] ZHENG J, LI L, PAN G, et al. Potential aerobic C mineralization of a red earth paddy soil and its temperature dependence under long-term fertilizer treatments [J]. Soil Use Management, 2012, 28 (2): 185–193.
- [18] BORKEN W, MATZNER E. Reappraisal of drying and wetting effects on C and N mineralization and fluxes in soils [J]. Global Change Biology, 2009, 15 (15): 808–824.
- [19] 李玮. 茶园土壤有机碳动态及其矿化特征研究 [D]. 雅安: 四川农业大学, 2015.
- [20] 邬建红, 潘剑君, 葛序娟, 等. 不同土地利用方式下土壤有机碳矿化及其温度敏感性 [J]. 水土保持学报, 2015 (3): 130–135.
- [21] <http://tea.ahnw.gov.cn/news/showzx.asp?id=/65101>. 农业部发布 2015 年中国茶叶种植生产情况 [P/OL].
- [22] 李世玉. 中国茶园生态系统碳平衡研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2010; 61–63.
- [23] 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, (1): 8–16.
- [24] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000; 147–161.
- [25] 窦晶鑫, 刘景双, 王洋, 等. 三江平原草甸湿地土壤有机碳矿化对 C/N 的响应 [J]. 地理科学, 2009, 29(5): 773–778.
- [26] REICHSTEIN M, BEDNORZ F, BROLL G, et al. Temperature dependence of carbon mineralisation: conclusions from a long-term incubation of subalpine soil samples [J]. Soil Biology Biochemistry, 2000, 32 (7): 947–958.
- [27] HYVÖNEN R, ÅGREN G I, DALIAS P. Analysing temperature response of decomposition of organic matter [J]. Global Change Biology, 2005, 11 (5): 770–778.
- [28] 黄宗胜, 喻理飞, 符裕红. 喀斯特森林植被自然恢复过程中土壤可矿化碳库特征 [J]. 应用生态学报, 2012, 23 (8): 2165–2170.
- [29] ZHENG Z M, YU G R, FU Y L, et al. Temperature sensitivity of soil respiration is affected by prevailing climatic conditions and soil organic carbon content: A trans-China based case study [J]. Soil Biology Biochemistry, 2009, 41 (7): 1531–1540.
- [30] 吴健利, 刘梦云, 赵国庆, 等. 黄土台塬土地利用方式对土壤有机碳矿化及温室气体排放的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2016, 35 (5): 1006–1015.
- [31] 陈涛, 郝晓晖, 杜丽君, 等. 长期施肥对水稻土土壤有机碳矿化的影响 [J]. 应用生态学报, 2008, 19 (7): 1494–1500.
- [32] 王清奎, 汪思龙, 于小军, 等. 常绿阔叶林与杉木林的土壤碳矿化潜力及其对土壤活性有机碳的影响 [J]. 生态学杂志, 2007, 26 (12): 1918–1923.
- [33] 李英臣, 宋长春, 侯翠翠, 等. 氮可利用性对东北不同类型湿地土壤有机碳矿化的影响 [J]. 地理科学, 2011, 31 (12): 1480–1486.
- [34] 邱曦, 吕茂奎, 黄锦学, 等. 不同培养温度下严重侵蚀红壤的有机碳矿化特征 [J]. 植物生态学报, 2016, 40 (3): 236–245.
- [35] 黄耀, 刘世梁, 沈其荣, 等. 环境因子对农业土壤有机碳分解的影响 [J]. 应用生态学报, 2002, 13 (6): 709–714.
- [36] 樊金娟, 李丹丹, 张心昱, 等. 北方温带森林不同海拔梯度土壤碳矿化速率及酶动力学参数温度敏感性 [J]. 应用生态学报, 2016 (1): 17–24.
- [37] 高菲, 姜航, 崔晓阳. 小兴安岭两种森林类型土壤有机碳库及周转 [J]. 应用生态学报, 2015, 26 (7): 1913–1920.
- [38] LEIFELD J, FUHRER J. The Temperature Response of CO₂ Production from Bulk Soils and Soil Fractions is Related to Soil Organic Matter Quality [J]. Biogeochemistry, 2005, 75 (3): 433–453.
- [39] 徐汝民, 李忠佩, 车玉萍, 等. 土地利用方式转变后灰色森林土有机碳矿化的温度响应特征 [J]. 应用生态学报, 2009, 20 (5): 1020–1025.

(责任编辑: 黄爱萍)