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*

葛云辉^{1,2,3} 苏以荣^{1,2} 邹冬生³ 胡乐宁^{1,2} 冯书珍^{1,2} 肖 伟^{1,2} 何寻阳^{1,2**} (1中国科学院亚热带农业生态研究所亚热带农业生态过程重点实验室,长沙410125;²中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站,广西环江547100;³湖南农业大学生物科学技术学院,长沙410128)

摘 要 为明确外源有机物质和无机碳酸盐对桂西北石灰土土壤有机碳矿化的影响,加深对土壤有机碳周转特征的认识,本文以广西环江县喀斯特地区的棕色石灰土、黑色石灰土和地带性红壤(对照)为研究对象,进行为期 100 d 的室内培养试验[对照(无外源物添加,CK)、添加¹⁴C-稻草(S)、添加 Ca¹⁴CO₃(C)],并对土壤呼吸释放的 CO₂及¹⁴C-CO₂含量进行测定。结果表明:培养 100 d 后,外源物的添加均明显促进了红壤、棕色和黑色石灰土有机碳的矿化,外源¹⁴C-稻草和 Ca¹⁴CO₃ 对上述土壤有机碳矿化的激发效应分别为 28.7%、46.2%、15.5%和 127.0%、175.3%、100.1%;土壤表观累积矿化量中外源 Ca¹⁴CO₃ 的贡献率分别为 40.4%、48.4%、19.6%;土壤类型和添加物及两者间的交互作用均对土壤有机碳矿化的激发效应、土壤表观累积矿化量中外源物的贡献、土壤有机碳的矿化速率、土壤有机碳矿化、周转规律、评估其对大气 CO₂的影响必须考虑无机碳酸盐的贡献。

关键词 喀斯特; 土壤有机碳矿化; 激发效应; 无机碳; ¹⁴C 示踪技术 中图分类号 S153.6 文献标识码 A 文章编号 1000-4890(2012)11-2748-07

Organic carbon mineralization in lime soils in Karst region of Guangxi, South China in response to exogenous organic substrate and calcium carbonate. GE Yun-hui^{1,2,3}, SU Yirong^{1,2}, ZOU Dong-sheng³, HU Le-ning^{1,2}, FENG Shu-zhen^{1,2}, XIAO Wei^{1,2}, HE Xun-yang^{1,2**} (¹Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; ²Huanjiang Observation and Research Station for Karst Ecosystems, Chinese Academy of Sciences, Huanjiang 547100, Guangxi, China; ³College of Bioscience and Biotechnology, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China). Chinese Journal of Ecology, 2012, **31**(11): 2748–2754.

Abstract: To elucidate the effects of exogenous organic substrate and calcium carbonate on the organic carbon mineralization in lime soils and to deepen the understanding of the characteristics of soil organic carbon turnover, the terra fusca, rendzina, and zonal red soil were collected from the Karst region in Huanjiang of Guangxi, and a 100-day incubation experiment was conducted, with the fluxes of CO₂ and ¹⁴C-CO₂ from the soils determined. Three treatments were installed, *i. e.*, no exogenous addition (CK), addition of ¹⁴C-labeled rice straw (S), and addition of ¹⁴C-labeled calcium carbonate (C). In treatments S and C, the mineralization of soil organic carbon was promoted obviously, and the priming effect of ¹⁴C-labeled rice straw and ¹⁴C-labeled calcium carbonate on the organic carbon mineralization in the terra fusca, rendzina, and zonal red soil after 100-day incubation was 28.7%, 46.2%, and 15.5%, and 127.0%, 175.3%, and 100.1%, respectively. In the apparent cumulative mineralization, the contribution rate of ¹⁴C-la-

^{*}中国科学院战略性先导科技专项(XDA05070403)、中国科学院西部行动计划项目(KZCX2-XB3-10)、国家自然科学基金项目(30970538 和41171246)和中国科学院亚热带农业生态研究所青年人才领域前沿项目(ISACX-LYQY-QN-1101)资助。

^{* *} 通讯作者 E-mail: hbhpjhn@163.com

beled calcium carbonate in the terra fusca, rendzina, and zonal red soil was 40.4%, 48.4%, and 19.6%, respectively. Soil type, exogenous additives, and their interaction had significant effects on the priming effect of the soil organic carbon mineralization, the contribution of the additives to the apparent cumulative mineralization, and the cumulative mineralization volume (or rate) (P < 0.01). This study indicated that the addition of exogenous organic substrate and calcium carbonate altered the characteristics of soil organic carbon mineralization, and, as for the lime soils, the contribution of inorganic carbonate should be taken into consideration in the study of the mineralization and turnover of soil organic carbon and the assessment of their effects on atmosphere CO_2 .

Key words: Karst; soil organic carbon mineralization; priming effect; inorganic carbon; ¹⁴C tracer technique.

土壤呼吸释放的 CO。是土壤对大气 CO。源效 应的主要途径(吴仲民等,1997),其微弱的变化就 可对大气碳库产生较大影响。我国西南喀斯特地处 亚热带季风气候条件下,可溶性的碳酸盐岩的地质 背景决定了成土速率慢、土壤富钙偏碱等特性与非 喀斯特地区明显不同,土壤中赋存的碳酸钙与土壤 有机碳的关系,直接影响到喀斯特土壤生态系统平 衡的维持(何尧启,1999)。有研究表明,土壤中 pH 和游离碳酸钙含量的升高能促进土壤有机质的分解 (李忠等,2001),对土壤有机碳的矿化起重要作用。 添加石灰能增加酸性土壤养分释放的研究已有报道 (Abichandani & Patnaik, 1961; 孟赐福和傅庆林, 1995)。外源有机物质对土壤有机碳激发效应的研 究也屡见不鲜,早在 1926 年 Löhnis 等(1926) 就观 察到新鲜有机残体输入土壤,能促进土壤有机质的 矿化, Bingeman 等(1953)称这种现象为"激发效 应"。研究表明,土壤中新输入的有机碳能促进或 阻碍土壤有机碳的矿化,引起正的或负的激发效应。 近年来关于土壤碳酸盐对土壤有机碳的转化与积累 关系的研究也逐渐成为研究热点(Bertrand et al., 2007; Oren & Steinberger, 2008; Gocke et al., 2012), 但目前对外源有机物质和碳酸盐在喀斯特土壤有机 碳矿化过程中的作用的定量研究还较少,而这对于 占全球面积 15% 的喀斯特区域土壤有机碳的积累 与周转具有实质性的研究意义。

本研究以广西典型喀斯特峰丛洼地的棕色和黑色石灰土以及邻近地带性红壤为研究对象,通过室内培养试验研究外源有机物质和碳酸钙的添加对土壤有机碳矿化的影响,以期深入认识喀斯特地区土壤有机碳矿化过程,客观评估土壤呼吸中无机碳酸盐的作用,并为合理评价喀斯特地区石灰土有机碳在全球气候变化中的作用奠定理论基础。

1 研究地区与研究方法

1.1 自然概况

研究区位于桂西北典型喀斯特峰丛洼地—广西 壮族自治区环江毛南族自治县(107°51′E—108°43′ E,24°44′N—25°33′N)。环江县地势北高南低,原 生植被为亚热带常绿阔叶林,成土母岩以砂页岩和 石灰岩为主。该地区属亚热带季风气候,雨热同季, 年平均气温 16.5 $^{\circ}$ ~ 19.9 $^{\circ}$ 、1 月平均气温 10.1 $^{\circ}$ 、7 月平均气温 28 $^{\circ}$ 、无霜期长,年平均降雨 量为 1389 ~ 1750 mm,集中于 4—9 月,占全年降雨 量的 70%,平均蒸发量为 1571.1 mm,相对湿度平 均为 70%。

1.2 研究方法

1.2.1 样品采集 于 2009 年 4 月,分别在广西环 江县肯福环境移民开发示范区(24°51′N,108°15′ E)、木论国家级自然保护区(25°09′N,108°03′E)和 明伦(25°16′N,108°22′E),海拔分别为220、442、 727 m.土壤类型分别为第四纪红色粘土发育的红 壤、白云岩和石灰岩风化物发育的棕色石灰土、白云 岩和石灰岩风化物发育的黑色石灰土,在保证生境 (植被类型均为多年生灌丛,坡位、坡度和坡向等) 基本一致的前提下,每块样地随机选择8个样点,用 四分法取各样点表层(0~15 cm)土壤,混合成一个 土样。采集的新鲜土壤除去可见动植物残体后,风 干,取代表性土样过 0.16 mm 筛,用于测定土壤基 本理化性质。剩余土样过2 mm 筛,调节土壤含水 量至 45% 饱和含水量(WHC), 置于 25 ℃、100% 空 气饱和湿度及黑暗条件下预培养7d。土壤基本理 化性质见表1。

1.2.2 矿化试验 矿化试验处理设置如下:1)对照(CK),不添加任何外源物;2)添加¹⁴C-稻草

表 1 供试土壤基本理化性质

Table 1 General properties of the experimental soils

土壤类型	рН	有机碳 (g·kg ⁻¹)	粘粒含量 (%)	土壤碳酸盐 (g・kg ⁻¹)	阳离子交换量 (mmol·kg ⁻¹)	氧化物含量(g·kg ⁻¹)			土壤微生物 生物量碳		
		(g•kg)	(70)	(g·kg)	(mmoi • kg)	CaO	MnO	$\mathrm{Fe_2O_3}$	生初星版 (mg·kg ⁻¹)		
红壤	4. 21±0. 02 a	7. 08±0. 02 a	25. 1±0. 8 a	0.57±0.01 a	75. 3±6. 1 a	0. 28±0. 03 a	0. 14±0. 00 a	34. 46±0. 17 a	107±4 a		
棕色石灰土	5. $76\pm0.03~{\rm b}$	16.33±0.21 b	20.6 \pm 0.5 b	7. 13±0.06 b	131. $1\pm10.3~{\rm b}$	4.72±0.02 b	$1.98\pm0.01~{\rm b}$	63.06 \pm 0.28 b	$268\pm 8~\mathrm{b}$		
黑色石灰土	7. 33±0. 05 c	66.67±1.80 c	20.9 \pm 0.9 b	20.65 \pm 0.12 c	328. 8±12. 1 c	24. 64 \pm 0. 25 c	2.76±0.02 c	83.74±0.33 c	2450±19 c		
数值为测定值±标准误,同列不同小写字母表示3种土壤间该性质差异显著(P<0.05)。											

500 mg $C \cdot kg^{-1}$ 干土(S);3)添加 $Ca^{14}CO_3$ 粉末 50 g · kg^{-1} 干土(C)。每种处理 4 个重复,另外还设置了 6 个无土空白,共 42 组矿化培养微系统。

取各处理土壤 50 g(干重)于小烧杯中,并将其置于1 L的密闭大广口瓶中,瓶内同时放置一盛有20 mL1 mol·L⁻¹ NaOH的小广口瓶作为集气瓶,以吸收土壤呼吸释放出的 CO_2 ,大广口瓶底部加10 mL去 CO_2 水,以维持瓶内空气饱和湿度。在 25 °C 黑暗条件下,恒温培养 100 d。培养期内,每 5 d 换一次气,并及时补充瓶内水分以维持瓶中湿度。于培养后 1、5、10、30、80、100 d 取 NaOH 吸收液测定土壤呼吸释放的 CO_2 及 14 C- CO_2 含量,并更换新的 NaOH 吸收液。

另外,为检测添加 $Ca^{14}CO_3$ 粉末化学溶蚀沉积过程放出的 $^{14}C-CO_2$ 对试验结果的影响,补充设置了无土灭菌条件下(石英砂代替土壤)添加 $Ca^{14}CO_3$ 粉末(50 g·kg $^{-1}$)的培养处理(4 个重复),25 ℃密闭培养 100 d 后,检测到 14 C- CO_2 量仅为 9.07 mg·kg $^{-1}$ 。

1.2.3 测定指标及方法 土壤有机碳采用重铬酸钾容量法测定(孙向阳,2005);土壤微生物生物量碳的测定采用熏蒸提取(Wu et al.,1990)-碳自动分析仪(Phoenix 8000)测定;土壤 pH 采用风干土壤加人蒸馏水(土水比1:2.5,W/V)浸提 15 min,用 Mettler Toledo Delta 320 pH 计测定;土壤 CEC 采用乙酸钠-氯化钠交换法测定;土壤碳酸盐采用中和滴定法;土壤 Ca、Fe、Mn 矿质全量采用碱熔脱硅-原子吸收光谱法测定(中国科学院南京土壤研究所,1978);土壤含水量采用8 h 105 ℃烘干法;CO₂-C 采用 Phoenix 8000 碳-自动分析仪(TOC)测定;¹⁴C-CO₂采用 Beckman LS-6500 液体闪烁仪测定(Wu & Odonnell,1997)。

1.3 数据处理

土壤表观矿化量(mg·kg⁻¹)= TOC 测定值×吸收液稀释倍数×吸收液体积/土样干重

外源物的矿化量 $(mg \cdot kg^{-1}, 包括碳酸钙化学溶蚀平衡放出的^{14}C-CO_2)=(吸收液^{14}C每分钟裂变量-本底值)×吸收液体积/(土样干重×添加的^{14}C-外源物放射强度)$

土壤有机碳矿化量 $(mg \cdot kg^{-1}) = 土壤表观矿化量-外源物的"矿化"量$

土壤有机碳矿化速率 $(mg \cdot kg^{-1} \cdot d^{-1}) =$ 土壤 有机碳矿化量/培养时间

累积矿化量(mg·kg⁻¹)为从培养开始到某个时间点释放的 C-CO₂ 之和(包括土壤表观累积矿化量、土壤有机碳累积矿化量和外源物的累积矿化量)。

土壤有机碳累积矿化率(%)=土壤有机碳累积矿化量/土壤有机碳量×100%

土壤表观累积矿化量中外源物的贡献率(%)=外源物的累积矿化量/土壤表观累积矿化量×100%

累积矿化量净增加率(%)=(土壤表观累积矿化量-外源物的累积矿化量-CK 累积矿化量)/CK 累积矿化量 \times 100%(Hamer & Marschner,2005)。

采用 Excel 2003 对数据进行整理, SPSS(16.0) 统计软件对数据进行统计分析, 利用双因素方差分析外源添加物和土壤类型对土壤有机碳矿化指标的影响, 处理间的多重比较采用 Duncan 法(显著性水平设为 0.05)。

2 结果与分析

2.1 土壤有机碳矿化的激发效应

外源物质对土壤有机碳矿化的激发效应用累积矿化量净增加率表示。添加¹⁴C-稻草(图 1a)对黑色石灰土有机碳矿化的激发效应除了在培养初期及80 d时出现轻微的负激发外,在培养中期及后期都表现出正激发;对棕色石灰土和红壤有机碳矿化始终起促进作用。添加¹⁴C-CaCO₃(图 1b)在培养初期抑制了棕色石灰土和黑色石灰土有机碳的矿化起促进随着培养时间的进行对石灰土有机碳的矿化起促进

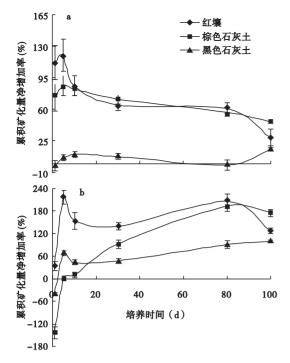


图 1 添加¹⁴ C-稻草 (a) 和¹⁴ C-CaCO₃ (b) 后土壤有机碳矿化 的激发效应

Fig. 1 Priming effects of soil organic carbon after ¹⁴C-labeled straw (a) and ¹⁴C-labeled calcium carbonate (b) addition

作用。培养初期,外源物对红壤有机碳矿化的激发效应要显著大于石灰土(P<0.05)。100 d 后¹⁴C-稻草对红壤、棕色石灰土、黑色石灰土3种土壤有机碳矿化的激发效应为28.7%、46.2%、15.5%;而¹⁴C-CaCO₃对3种土壤有机碳矿化的激发效应为127.0%、175.3%、100.1%。

2.2 土壤表观累积矿化量中外源碳酸钙和有机物质的贡献

添加¹⁴C-CaCO₃(图 2b)后,对土壤表观累积矿化量(包含碳酸盐贡献的 C-CO₂)产生了较大的影响,随着培养时间的延长影响逐渐减小,80 d 后趋于平缓。培养100 d 后,来源¹⁴C-CaCO₃ 的 CO₂ 对红壤、棕色石灰土、黑色石灰土 3 种土壤表观累积矿化量的贡献率分别为 40.4%、48.4%、19.6%;添加¹⁴C-稻草(图 2a)对红壤和棕色石灰土表观累积矿化量出现先增后减的趋势;来源¹⁴C-稻草的 CO₂ 对红壤、棕色石灰土、黑色石灰土 3 种土壤表观累积矿化量的贡献率分别为 4.2%、5.0%、1.2%。在 100 d 的培养期内外源碳酸钙和有机物质对土壤表观累积矿化量的贡献率大小依次为:棕色石灰土>红壤>黑色石灰土(P<0.05)。

2.3 土壤有机碳的矿化速率、累积矿化量与累积矿 化率

外源物质对 3 种土壤有机碳矿化速率的影响可分为两个阶段(图 3):0~10 d 快速分解阶段,矿化速率变化显著(P<0.05);10~100 d 缓慢分解阶段,矿化速率保持恒定(P>0.05)。土壤有机碳累积矿化量为土壤表观累积矿化量与外源添加物累积矿化

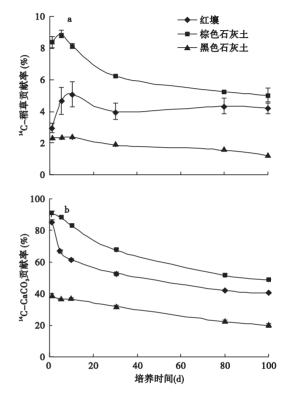


图 2 ¹⁴ C-稻草(a) 和¹⁴ C-CaCO₃(b) 对土壤表观累积矿化量的贡献率(%)

Fig. 2 Contribution rate (%) of apparent cumulative mineralization amount in the soil after ¹⁴C-labeled straw (a) and ¹⁴C-labeled calcium carbonate (b) addition

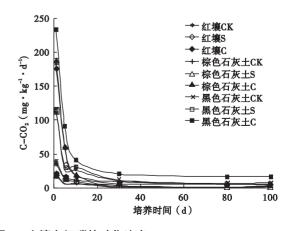


图 3 土壤有机碳的矿化速率

Fig. 3 Mineralization rate of soil organic carbon S、C 分别代表添加 ^{14}C -稻草和 ^{14}C -CaCO $_3$ $_\circ$

量的差值。培养结束时,添加¹⁴ C-稻草和¹⁴ C-CaCO₃ 都明显促进了 3 种土壤有机碳的矿化(图 4a),且不同处理方式下黑色石灰土的有机碳累积矿化量(CK: 1088.2 mg·kg⁻¹、S: 1255.1 mg·kg⁻¹、C: 1649.6 mg·kg⁻¹)要显著高于红壤(CK: 273.9 mg·kg⁻¹、S: 350.6 mg·kg⁻¹、C: 612.3 mg·kg⁻¹)和棕色石灰土(CK: 234.0 mg·kg⁻¹、S: 342.2 mg·kg⁻¹、C: 635.5 mg·kg⁻¹)。外源物的添加均对红壤、棕色石灰土、黑色石灰土 3 种土壤有机碳累积矿化率影响显著(图 4b),且 Ca¹⁴ CO₃ 对其影响最大,大小依次为 8.7%、3.9%、2.5%。不同处理方式下红壤有机碳累积矿化率要显著高于石灰土。

2.4 外源物的添加和土壤类型及其交互作用对矿 化影响

外源添加物(¹⁴ C-稻草和¹⁴ C-CaCO₃)与土壤类型(红壤、棕色石灰土、黑色石灰土)及两者间的交互作用均对土壤有机碳激发效应、土壤表观累积矿化量中外源物的贡献率、土壤有机碳矿化速率、土壤有机碳累积矿化量/率有显著影响(表 2)。

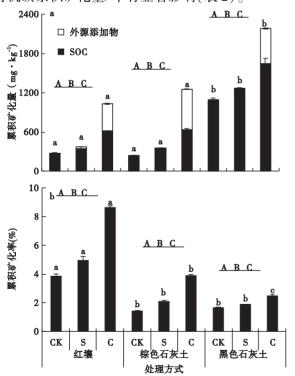


图 4 培养 100 d 后的土壤有机碳累积矿化量(a)与累积矿化率(b)

Fig. 4 Cumulative mineralization amount (a) and cumulative mineralization rate (b) of SOC after 100 d incubation 不同小写字母代表不同土壤同种处理方式下 SOC 累积矿化量/率存在显著差异(P<0.05);不同大写字母代表同种土壤不同处理方式下 SOC 累积矿化量/率存在显著差异(P<0.05)。S、C 分别代表添加¹⁴ C-稻草和¹⁴ C-CaCO₃。

表 2 培养 100 d 后不同因素对有机碳矿化影响的方差分析 Table 2 ANOVA of effects of different factors on the mineralization of organic carbon after 100 d incubation

影响因素	F 值									
	SOC 激发	土壤表观	SOC 矿化	SOC 累积	SOC 累积					
	效应	累积矿化	速率	矿化量	矿化率					
		量中外源								
		物的贡献率								
土壤类型	34. 5 * *	462. 5 * *	90.4 * *	932. 4 * *	935. 4 * *					
添加物	391.9**	5150. 2 * *	108. 2 * *	165. 3 * *	423.6 * *					
土壤类型×添加物	6.3 * *	270. 2 * *	29. 5 * *	3.7*	78. 2 * *					
* P<0. 05; * * P<0. 01 _o										

3 讨论

3.1 外源物质对土壤有机碳矿化的影响

土壤中加入外源有机物质后引起土壤原有有机 碳分解速率发生改变的现象称为激发效应。Bingeman(1953)将14C标记的有机物料加入到土壤中,首 次区分了外源物质分解的碳和土壤有机质分解的 碳,并量化了激发效应的大小。本研究中(图 1b), 添加¹⁴C-CaCO₃后棕色石灰土和黑色石灰土在培养 初期出现了负激发效应,而随着培养时间的进行又 变为正激发,这可能是钙加入到土壤中后,与易氧化 的有机碳主要以钙键合态有机碳的形式积累于土壤 中.限制土壤碳与可降解的土壤微生物及土壤酶接 触,从而使土壤碳免遭微生物的降解。而与钙键结 合的有机碳主要是被物理保护的活性有机碳部分, 其化学稳定性较差(周萍等,2009),随着培养时间 的进行,这部分碳易被微生物分解,这时微生物迅速 繁殖,其为分解复杂的有机化合物而分泌大量的胞 外酶,当微生物因能源、养分缺乏而数量减少后,这 一部分酶仍存在于土壤中,有助于土壤有机质的降 解,进而产生正激发效应(Kuzyakov & Bol, 2006)。 Chouliaras 和 Jacquin (1976) 研究表明,土壤中的游 离碳酸钙在有机物质的不同分解阶段作用不同:一 方面能提高微生物的活性,有利于新鲜有机物质的 分解:另一方面钙离子能饱和腐殖化有机质中的自 由基,并在其表面覆盖一层碳酸钙结壳,因而抑制了 腐殖化有机质的分解。而外源物质对红壤有机碳矿 化的激发效应在培养初期要高于石灰土,这可能是 红壤中有机碳等养分含量较低,钙对土壤有机碳的 保护作用相对较小。Falchini 等(2003)研究表明, 营养元素缺乏的土壤比营养元素丰富的土壤受激发 效应的影响大。所以红壤较易受外源物的影响,培 养初期激发效应较大。100 d后,3 种供试土壤中,

黑色石灰土有机碳矿化的激发效应最小,说明黑色石灰土最有利于土壤有机碳的积累。也有研究表明,石灰土较稳定,不易受到外源物质的影响(胡乐宁等,2011)。

¹⁴C-CaCO₃ 对红壤、棕色石灰土、黑色石灰土 3 种土壤有机碳矿化的激发效应(127.0%、175.3%、100.1%)较高。这可能是游离碳酸钙的存在,有利于土壤微团聚体的形成、改善了土壤结构和通气性从而加速了有机物质的分解(Pinck et al.,1950; Edwards & Bremner,1967)。已有的报道表明,在不含碳酸钙的供试土壤中加入 2.6% 的碳酸钙后,稻草的分解速率均加快,其腐殖化系数较未加碳酸钙处理者要低 1/4~1/3,两者差异达极显著水平;在含有少量碳酸钙的供试土壤中再加入碳酸钙,对稻草分解的影响程度,则视供试土壤中碳酸钙含量多少而异(林心雄和文启孝,1991)。

3.2 外源物质降解对土壤表观累积矿化量的贡献

我国桂西北喀斯特地区土壤的形成和熟化是在 碳物质循环及富钙的环境下进行的,所以碳酸钙成为 影响土壤呼吸的重要因子之一。本研究中,14 C-Ca-CO, 对红壤、棕色石灰土、黑色石灰土3种土壤表观 累积矿化量(包含碳酸盐贡献的 C-CO₂)的贡献率分 别达到了 40.4%、48.4%、19.6%(图 2b)。Bertrand 等(2007)研究也表明,土壤中的碳酸钙含量对土壤 呼吸释放的 CO, 具有重要影响(其贡献可达呼吸总 量的35.0%)。本研究证实,在无土灭菌条件下, Ca¹⁴CO, 粉末溶蚀沉积过程放出的¹⁴C-CO₂量仅为 9.1 mg·kg⁻¹。这可能是碳酸钙的施入为土壤微生 物生长提供了所需的环境条件,增加了土壤腐质层 微生物的活性和数量,微生物参与了14C-CaCO,化 学溶蚀平衡中碳的频繁互换,从而大大改变了化学 溶蚀过程。Zavarzin(2002)的研究表明,细菌介导的 生物学反应特征及微生物活性能推动钙的地球化学 循环,这对于无机碳酸钙中碳的转移具有重要意义。 也有研究表明,林冠下丰富的土壤微生物在新陈代 谢过程中所产生的无机酸和有机酸会溶解部分 CaCO3, 且 Ca2+ 的交换能力很强(Rietz & Haynes, 2003),因此 CaCO, 易因不稳定而吸收或释放 CO,, 从而改变了土壤呼吸的大小(Raj et al., 2010)。

3.3 外源物质对土壤有机碳的矿化速率、累积矿化量和累积矿化率的影响

大量研究表明(李玲等,2007; Gocke & Kuzyakov,2011; 胡乐宁等,2011), 在控制温度和湿度的实

验室培养条件下,土壤有机碳矿化量反映了不同类 型土壤中易被利用的有机碳有效性及土壤环境因素 的差异。在本研究中(图 3a),100 d 后不同处理方 式下黑色石灰土有机碳累积矿化量是红壤和棕色石 灰土的2倍多,这可能是黑色石灰土土壤结构良好, 土壤中所含有机碳、CEC、MBC 等含量较高(表1), 微生物所需的营养物质充足,活性较高,从而具有较 高的土壤有机碳矿化速率, 所以 100 d 培养期内土 壤累积矿化量较高。Sato 和 Seto(1999)研究结果也 说明,土壤可矿化的碳与微生物生物量碳和土壤有 机碳有着很好的相关性。本研究中,外源物的添加 均对3种土壤有机碳累积矿化率影响显著,且 Ca¹⁴CO₃对其影响最大(图 3b),这说明外源物的添 加特别是 Ca14 CO, 的添加能加快土壤有机碳的分 解,对喀斯特土壤碳的周转起到重要作用。黑色石 灰土有机碳累积矿化率要显著低于红壤,与其较高 的累积矿化量相反,这与黑色石灰土较高的有机碳 含量有关。说明黑色石灰土相对稳定性好,有利于 土壤有机碳的储存。

4 结 语

研究证实,外源有机物质和碳酸钙的添加能改变桂西北石灰土土壤有机碳的矿化特征,黑色石灰土比较稳定,有利于土壤有机碳的积累。对于含碳酸盐的喀斯特土壤,研究土壤有机碳矿化、周转规律,评估其对大气 CO₂ 的影响必须考虑其中无机碳酸盐的贡献。研究结果为客观评价喀斯特地区土壤呼吸中无机碳酸盐的作用提供科学依据和理论基础,并为挖掘土壤固碳新技术和区域生态功能转移奠定基础。但是,对碳酸钙和外源有机物质添加促进喀斯特地区石灰土有机碳矿化的机制不够深入,未来应该研究无机碳酸盐影响土壤有机碳矿化的微生物学机理和定量无机碳酸盐对大气 CO₂ 源的贡献。

致谢 感谢中国科学院亚热带农业生态研究所谢永宏研究员帮助修改英文摘要。

参考文献

何尧启. 1999. 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. 贵州师范大学学报(自然科学版), **17**(1): 12-19.

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

- 李 忠, 孙 波, 林心雄. 2001. 我国东部土壤有机碳的密度及转化的控制因素. 地理科学, **21**(4): 301-307.
- 李 玲, 肖和艾, 吴金水. 2007. 红壤旱地和稻田土壤中有 机底物的分解与转化研究. 土壤学报, **44**(4): 669-674.
- 林心雄, 文启孝. 1991. 枯秆利用对土壤肥力的影响// 中国土壤科学的现状与展望. 南京: 江苏科学技术出版社.
- 孟赐福, 傅庆林. 1995. 施石灰石粉后红壤化学性质的变化. 土壤学报, **32**(3): 300-307.
- 孙向阳. 2005. 土壤学. 北京: 中国林业出版社.
- 吴仲民,曾庆波,李意德,等. 1997. 尖峰岭热带森林土壤 C 储量和 CO_2 排放量的初步研究. 植物生态学报, **21** (5): 25-32.
- 中国科学院南京土壤研究所. 1978. 土壤理化分析. 上海: 上海科学技术出版社.
- 周 萍, 宋国菡, 潘根兴, 等. 2009. 三种南方典型水稻土长期试验下有机碳积累机制研究. 土壤学报, **46**(2): 263-273.
- Oren A, Steinberger Y. 2008. Coping with artifacts induced by CaCO₃-CO₂-H₂O equilibria in substrate utilization profiling of calcareous soils. *Soil Biology & Biochemistry*, **40**: 2569-2577.
- Abichandani CT, Patnaik S. 1961. Effect of lime application on nitrogen availability and rice yields in waterlogged soils.

 *Journal of the Indian Society of Soil Science, 9: 55-62.
- Bertrand I, Delfosse O, Mary B. 2007. Carbon and nitrogen mineralization in acidic, limed and calcareous agricultural soils: Apparent and actual effects. Soil Biology & Biochemistry, 39: 276–288.
- Bingeman CW, Varner JE, Martin WP. 1953. The Effect of the addition of organic materials on the decomposition of an organic soil. Soil Science Society of America Proceedings, 17: 34-38.
- Chouliaras N, Jacquin F. 1976. Biodegradation and humification. II. Organic matter development in a rendzina and in an acid mull enriched or non enriched in CaCO₃. Bulletin de l' Ecole Nationale Superieure d' Agronomie et des Industries Alimentaires, Nancy, 18: 71–79.
- Edwards AP, Bremner JM. 1967. Microaggregates in Soils. Journal of Soil Science, 18: 64-73.
- Falchini L, Naumova N, Kuikman PJ, et al. 2003. CO₂ evolution and denaturing gradient gel electrophoresis profiles of bacterial communities in soil following addition of low molecular weight substrates to simulate root exudation. Soil Biology & Biochemistry, 35: 775-782.
- Gocke M, Kuzyakov Y. 2011. Effect of temperature and rhizo-

- sphere processes on pedogenic carbonate recrystallization: Relevance for paleoenvironmental applications. *Geoderma*, **166**: 57–65.
- Gocke M, Pustovoytov K, Kuzyakov Y. 2012. Pedogenic carbonate formation: Recrystallization versus migration Process rates and periods assessed by ¹⁴C labeling. Global Biogeochemical Cycles, 26: 1–12.
- Hamer U, Marschner B. 2005. Priming effects in different soil types induced by fructose, alanine, oxalic acid and catechol additions. Soil Biology & Biochemistry, 37: 445 – 454.
- Kuzyakov Y, Bol R. 2006. Sources and mechanisms of priming effect induced in two grassland soils amended with slurry and sugar. Soil Biology & Biochemistry, 38: 747-758.
- Löhnis F. 1926. Nitrogen availability of green manures. *Soil Science*, **22**: 253–290.
- Pinck LA, Allison FE, Sherman MS. 1950. Maintenance of soil organic matter. II. Losses of carbon and nitrogen from young and mature plant materials during decomposition in soil. Soil Science, 69: 391-402.
- Raj S, Petra M, Jeff B, et al. 2010. Is CO₂ evolution in saline soils affected by an osmotic effect and calcium carbonate? Biology and Fertility of Soils, 46: 781-792.
- Rietz DN, Haynes RJ. 2003. Effects of irrigation-induced salinity and sodicity on soil microbial activity. *Soil Biology & Biochemistry*, **35**: 845–854.
- Sato A, Seto M. 1999. Relationship between rate of carbon dioxide evolution, microbial biomass carbon, and amount of dissolved organic carbon as affected by temperature and water content of a forest and an arable soil. *Communica*tions in Soil Science and Plant Analysis, 30: 2593-2605.
- Wu J, Joergensen RG, Pommerening B, et al. 1990. Measurement of soil microbial biomass C by fumigation extraction: An automated procedure. Soil Biology & Biochemistry, 22: 1167–1169.
- Wu J, Odonnell AG. 1997. Procedure for the simultaneous analysis of total and radioactive carbon in soil and plant materials. Soil Biology & Biochemistry, 29: 199-202.
- Zavarzin GA. 2002. Microbial geochemical calcium cycle. Microbiology, 71: 1-17.

作者简介 葛云辉,女,1987 年生,硕士研究生,主要从事土壤生态学研究,发表论文 2 篇。E-mail: geyunhui713@126.com

责任编辑 魏中青