

# 外源碳酸钙和稻草对喀斯特地区土壤活性有机碳的影响

葛云辉<sup>1,2,3</sup>, 邹冬生<sup>1\*</sup>, 苏以荣<sup>2,3</sup>, 何寻阳<sup>2,3</sup>

(1.湖南农业大学 生物科学技术学院, 湖南 长沙 410128; 2.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, 湖南 长沙 410125; 3.中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站, 广西 环江 547100)

**摘 要:** 为了解喀斯特土壤活性有机碳在土壤有机碳周转中的特征, 设置在干土中添加  $^{14}\text{C}$ -稻草(每 1 g 干土添加 500  $\mu\text{g C}$ )、 $^{14}\text{C}$ - $\text{CaCO}_3$  粉末(每 1 kg 干土添加 50 g C)和不添加任何外源物(CK)3 种处理, 对广西环江县 2 种典型类型土壤棕色石灰土、黑色石灰土和地带性红壤进行为期 100 d 的室内培养试验。结果表明, 添加  $^{14}\text{C}$ -稻草和  $^{14}\text{C}$ - $\text{CaCO}_3$  后 5 d, 红壤、棕色和黑色石灰土中土壤总微生物量碳(MBC)含量均达峰值, 红壤中总 MBC 含量分别为 231.7、273.0 mg/kg, 分别高于对照 70.2%和 100.5%; 棕色石灰土中总 MBC 含量分别为 288.1、307.7 mg/kg, 分别高于对照 23.0%和 31.3%; 黑色石灰土中总 MBC 含量分别为 683.7、787.2 mg/kg, 分别高于对照 4.5%和 20.3%。3 种土壤总溶解有机碳(DOC)含量均达到最大值; 黑色石灰土总 MBC 含量显著大于棕色石灰土和红壤, 而红壤总 DOC 含量显著大于石灰土( $P<0.05$ )。 $^{14}\text{C}$ -稻草对 3 种土壤  $^{14}\text{C}$ -MBC、 $^{14}\text{C}$ -DOC 含量的影响显著大于  $^{14}\text{C}$ - $\text{CaCO}_3$  的影响( $P<0.05$ )。添加外源碳酸钙和稻草均能增加土壤活性有机碳含量。喀斯特地区石灰性土壤较红壤稳定, 有利于土壤有机碳的积累。

**关 键 词:** 碳酸钙; 稻草; 土壤微生物量碳; 溶解有机碳;  $^{14}\text{C}$  示踪技术; 喀斯特

中图分类号: S153.6 文献标志码: A 文章编号: 1007-1032(2012)03-0314-05

## Influence of exogenous calcium carbonate and rice straw on active organic carbon of Karst soils

GE Yun-hui<sup>1,2,3</sup>, ZOU Dong-sheng<sup>1\*</sup>, SU Yi-rong<sup>2,3</sup>, HE Xun-yang<sup>2,3</sup>

(1.College of Bioscience and Biotechnology, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 2.Key Laboratory of Agro-Ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, the Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 3.Huanjiang Observation and Research Station for Karst Ecosystems, Chinese Academy of Sciences, Huanjiang, Guangxi 547100, China)

**Abstract:** To elucidate the features of active organic carbon in Karst soils in the turnover of soil organic carbon,  $^{14}\text{C}$ -labeled straw and  $^{14}\text{C}$ -labeled calcium carbonate were respectively added to each of the terra fusca, rendzina and zonal red soil of Huanjiang Guangxi for a 100 d incubation test. Soils with no addition were regarded as CK. Results showed that  $^{14}\text{C}$ -labeled straw exhibited obviously higher influence on  $^{14}\text{C}$ -MBC,  $^{14}\text{C}$ -DOC in the three soils, compared to  $^{14}\text{C}$ -labeled calcium carbonate ( $P<0.05$ ). After 5 d of incubation, total MBC (microbial biomass carbon) reached the peak in the three soils added with  $^{14}\text{C}$ -labeled straw or  $^{14}\text{C}$ -labeled calcium carbonate, and the MBC in red soils was 231.7, 273.0 mg/kg, were respectively 70.2% and 100.5% higher than that in the CK; the MBC in terra fusca was 288.1, 307.7 mg/kg, were respectively 23.0% and 31.3% higher than that in the CK while MBC in rendzina was 683.7, 787.2 mg/kg, were respectively 4.5% and 20.3% higher than that in the CK; DOC (dissolved organic carbon) in the three soils also reached the maximum. The MBC in rendzina was obviously higher than that in terra fusca and red soil, but the DOC in red soil was obviously higher in terra fusca, rendzina ( $P<0.05$ ). Exogenous  $^{14}\text{C}$ -labeled matters could promote the increase of soil active organic carbon and in the same condition, rendzina and terra fusca are more likely to accumulate

收稿日期: 2012-03-02

基金项目: 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, 41171246); 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)

作者简介: 葛云辉(1987—), 女, 云南易门人, 硕士研究生, 主要从事农业生态学研究, geyunhui713@126.com; \*通信作者, zoudongsheng2@sina.com

organic carbon, compared to red soil.

**Key words:** calcium carbonate; rice straw; microbial biomass carbon(MBC); dissolved organic carbon(DOC); <sup>14</sup>C radioactive tracer technique; Karst

土壤微生物生物量碳(MBC)和溶解有机碳(DOC)是土壤有机碳的活性组分。活性有机碳尽管只占土壤有机碳总量的较小部分,但可在土壤总碳变化前反映土壤的微小变化,直接参与土壤生物化学转化过程<sup>[1]</sup>。与较为稳定的土壤腐殖质相比,土壤活性有机碳是环境变化的敏感指标<sup>[2]</sup>。中国西南喀斯特地区属亚热带季风气候,可溶性碳酸盐岩的地质背景决定了其成土慢和土壤富钙偏碱等特性。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的平衡<sup>[3]</sup>。微生物活性与底物的有效性密不可分<sup>[4]</sup>。环境条件和外源物质的施入可明显影响微生物活性及养分的矿化与固定<sup>[5]</sup>。Wu等<sup>[6]</sup>研究添加稻草和葡萄糖对土壤微生物生物量碳的影响,发现在培养第3天土壤MBC含量出现最大值,比对照高1.74~3.15倍。目前,国内外对土壤活性有机碳的研究主要集中在森林土壤、草地和农田土壤<sup>[7-10]</sup>,而关于喀斯特地区外源碳酸钙和稻草对土壤活性有机碳影响的研究报道尚少。笔者通过室内培养试验及<sup>14</sup>C示踪技术,研究添加不同外源物对广西典型喀斯特峰丛洼地石灰土(棕色和黑色

石灰土)和邻近地带性红壤活性有机碳(微生物生物量碳、溶解有机碳)的影响,旨在为深入研究土壤活性有机碳在土壤有机碳周转中的重要性以及维持喀斯特地区土壤碳库平衡提供参考。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

分别于桂西北典型喀斯特峰丛洼地——广西环江毛南族自治县肯福环境移民开发示范区(N24°51', E108°15')、木论国家级自然保护区(N25°09' E108°03')和明伦(N25°16', E108°22')采集红壤(第四纪红土)、棕色石灰土(白云岩和石灰岩)、黑色石灰土(白云岩和石灰岩)3种土壤,在保证植被类型均为多年生灌丛和坡位、坡度、坡向等基本一致的前提下,于每块样地随机选择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。将新鲜土壤去除可见的动、植物残体,风干至约45%田间饱和持水量,过2 mm筛,混匀,装袋,4℃保存。土壤基本理化性质见表1。

表 1 供试土壤基本理化性质

Table 1 General properties of the experimental soils

供试土壤	pH 值	有机碳含量/ (g·kg <sup>-1</sup> )	土壤碳酸盐 含量/(g·kg <sup>-1</sup> )	CEC 含量/ (mmol·kg <sup>-1</sup> )	矿质全量/(g·kg <sup>-1</sup> )			总微生物生物量碳 含量/(mg·kg <sup>-1</sup> )
					Ca	Mn	Fe	
红壤	(4.21±0.02)a	(7.08±0.02)a	(0.00±0.00)a	(75.30±6.07)a	(0.20±0.03)a	(0.11±0.002)a	(24.12±0.17)a	(107.00±4.12)a
棕色石灰土	(6.26±0.03)b	(16.33±0.21)b	(7.13±0.06)b	(131.10±10.32)b	(3.37±0.02)b	(1.53±0.012)b	(44.14±0.28)b	(268.00±7.89)b
黑色石灰土	(7.33±0.05)c	(66.67±1.80)c	(20.65±0.12)c	(328.80±12.10)c	(17.60±0.25)c	(2.14±0.019)c	(58.62±0.33)c	(2.45×10 <sup>3</sup> ±18.79)c

1.2 试验设计

试验共设干土中添加<sup>14</sup>C-稻草(每1 g干土添加500 μg C)、<sup>14</sup>C-CaCO<sub>3</sub>粉末(每1 kg干土添加50 g C)和不添加任何外源物(CK)3种处理。每处理4个重复。

为了使培养时各条件相对一致,将调节好水分(45%田间饱和持水量)的土壤样品在25℃恒温培养箱中预培养1周,使土壤从4℃恢复到常温状态。把干质量550 g的土样置于1 L聚乙烯瓶中,再把聚乙烯瓶置于50 L聚乙烯桶中(桶底加少量的去离子水,

以维持100%空气相对湿度)。为吸收土壤呼吸释放的CO<sub>2</sub>,将1个盛有200 mL,浓度为1 mol/L NaOH溶液的聚乙烯瓶置于桶内,密封。于25℃黑暗条件下恒温培养100 d。培养过程中,每5 d换1次气,及时补充桶内水分,以保持桶中湿度;每10 d更换1次NaOH溶液。分别于培养后0、1、5、10、30、80、100 d取样,以分析MBC、<sup>14</sup>C标记微生物生物量碳(<sup>14</sup>C-MBC)、DOC和<sup>14</sup>C标记溶解有机碳(<sup>14</sup>C-DOC)的变化。

### 1.3 测定指标及方法

土壤总微生物生物量碳的测定：用熏蒸提取-碳自动分析仪(Phoenix 8000)，参照文献[11]中的方法，每处理称取25.00 g土样(干质量)8份，其中4份土壤用去乙醇氯仿熏蒸24 h，除去土壤中氯仿，加入0.5 mol/L  $K_2SO_4$ 浸提剂(土质量与水体积的比为1:4)，振荡浸提30 min，过滤；另4份土样不熏蒸，浸提方法同上。浸提液中有有机碳含量采用碳自动分析仪测定。微生物生物量碳含量=(熏蒸土壤浸提的有机碳含量 - 不熏蒸土壤浸提的有机碳含量)  $\times$  2.22。以不熏蒸土壤浸提的有机碳含量作为总溶解有机碳含量。

$^{14}C$ 标记微生物生物量碳的测定：取上述1.00 mL土壤浸提液，加入9 mL闪烁液，混匀后放置24 h，用Beckman LS-6500型闪烁仪测定混合液的 $^{14}C$ 放射强度(计数5.00 min)。浸提液中 $^{14}C$ 标记有机碳含量(mg/kg)=(待测液 $^{14}C$ 每1 min的裂变量 - 本底值)  $\times$  (浸提液体积+土样含水体积)/(土样烘干基重 $\times$ 添加的 $^{14}C$ 标记稻草或碳酸钙放射性强度)。 $^{14}C$ -MBC含量(mg/kg)=(熏蒸土壤浸提的 $^{14}C$ 标记有机碳含量 - 不熏蒸土壤浸提的 $^{14}C$ 标记有机碳含量)  $\times$  2.22。以不熏蒸土壤浸提的 $^{14}C$ 标记有机碳含量作为 $^{14}C$ 标记溶解有机碳含量。

土壤有机碳含量、pH值、CEC含量和Ca、Mn、Fe等矿质全量参照文献[12]方法测定。

### 1.4 数据处理与统计分析

用Excel 2003对数据进行整理。用SPSS(16.0)对数据进行统计分析。以外源添加物和土壤类型作为处理因子进行双因素方差分析，单因素间比较采用独立样本 $t$ 检验；处理间的多重比较用S-N-K法( $P<0.05$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤微生物生物量碳的变化

#### 2.1.1 $^{14}C$ 标记微生物生物量碳

添加 $^{14}C$ -稻草和 $^{14}C$ - $CaCO_3$ 后5 d，红壤、棕色和黑色石灰土中 $^{14}C$ -MBC与外源碳的质量比均达

到最大值，其 $^{14}C$ -MBC与稻草 $^{14}C$ 的质量比分别为7.25%、5.88%、4.98%(图1-a)， $^{14}C$ -MBC与碳酸钙 $^{14}C$ 的质量比分别为0.39%、0.32%、0.26%(图1-b)；2种添加方式下红壤 $^{14}C$ -MBC与外源碳的质量比均显著大于石灰土的( $P<0.05$ )。之后，该比值逐渐降低，至培养结束时，供试土壤的该比值差异不显著( $P>0.05$ )。整个培养过程中，土壤 $^{14}C$ -MBC与稻草 $^{14}C$ 的质量比显著大于与碳酸钙 $^{14}C$ 的质量比。

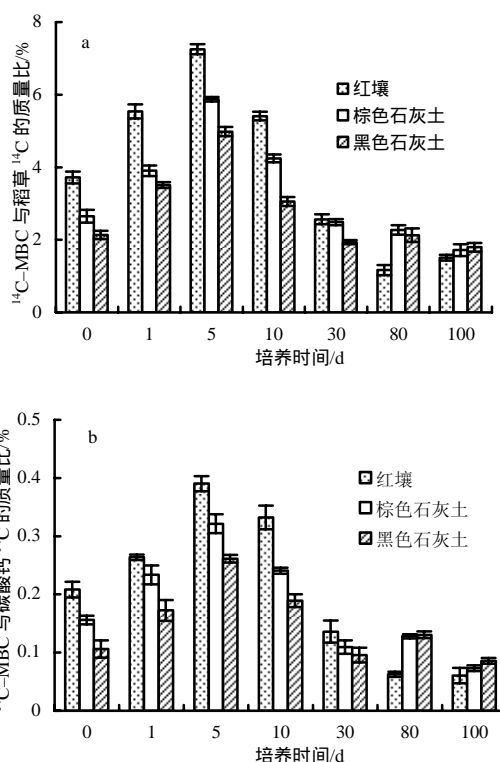


图1 添加 $^{14}C$ -稻草(a)和 $^{14}C$ - $CaCO_3$ (b)后供试土壤 $^{14}C$ -MBC与外源碳的质量比

Fig.1 Quality ratio of  $^{14}C$ -MBC and exogenous carbon in three soils following amendments with  $^{14}C$ -labeled straw (a) and  $^{14}C$ -labeled calcium carbonate (b)

#### 2.1.2 总微生物生物量碳

添加 $^{14}C$ -稻草和 $^{14}C$ - $CaCO_3$ 后5 d，红壤、棕色和黑色石灰土的总MBC含量达最大值(表2)：红壤中总MBC含量分别高于对照70.2%和100.5%；棕色石灰土中总MBC含量分别高于对照23.0%和31.3%；黑色石灰土中总MBC含量分别高于对照4.5%和20.3%。培养结束时，供试土壤总MBC含量均达到最低值。整个培养过程中，与对照相比，添加外源物后红壤总MBC含量的增加幅度均大于石灰土的增加幅度。

表 2 不同处理 3 种土壤总微生物量碳含量

		MBC 含量/(mg·kg <sup>-1</sup> )						
处理	供试土壤	0 d	1 d	5 d	10 d	30 d	80 d	100 d
CK	红壤	(86.42±3.73)a	(105.77±2.35)a	(125.11±4.21)a	(115.95±4.79)a	(69.85±4.71)a	(56.61±3.24)a	(40.81±1.31)a
	棕色石灰土	(154.02±4.31)b	(230.93±12.84)b	(234.32±9.22)b	(175.43±9.0)a	(146.54±13.37)b	(98.14±0.61)b	(84.90±1.27)b
	黑色石灰土	(563.91±4.39)c	(601.44±7.83)c	(654.32±10.73)c	(613.45±7.57)b	(514.97±22.83)c	(319.16±1.10)c	(291.59±1.47)c
稻草	红壤	(96.07±0.87)a	(182.47±1.18)a	(231.66±2.10)a	(157.55±4.68)a	(112.63±8.68)a	(77.46±6.23)a	(69.37±3.20)a
	棕色石灰土	(159.35±5.04)b	(265.54±3.78)b	(288.12±6.71)b	(199.14±8.43)b	(188.74±2.11)b	(103.50±7.58)a	(94.83±1.56)b
	黑色石灰土	(570.82±5.57)c	(657.67±13.85)c	(683.72±14.92)c	(659.66±7.50)c	(599.44±22.39)c	(375.60±9.33)b	(334.60±13.70)c
CaCO <sub>3</sub>	红壤	(94.40±4.15)a	(246.37±5.69)a	(272.95±3.87)a	(267.00±12.97)a	(177.85±6.75)a	(80.64±0.86)a	(72.79±1.82)a
	棕色石灰土	(160.86±5.90)b	(291.28±10.57)b	(307.72±4.88)b	(259.12±7.09)a	(220.76±6.41)b	(128.28±0.84)b	(120.37±4.17)b
	黑色石灰土	(569.04±4.24)c	(678.51±21.84)c	(787.20±24.91)c	(756.23±23.94)b	(547.60±12.45)c	(405.61±20.34)c	(398.41±26.62)c

2.2 土壤溶解有机碳的变化

2.2.1 <sup>14</sup>C 标记溶解有机碳

添加<sup>14</sup>C-稻草和<sup>14</sup>C-CaCO<sub>3</sub>后5 d, 3种土壤中<sup>14</sup>C-DOC与外源碳的质量比也达到最大值, 红壤、棕色和黑色石灰土3种土壤中<sup>14</sup>C-DOC与稻草<sup>14</sup>C的质量比分别为2.06%、1.77%、1.32%(图2-a), 与碳酸钙<sup>14</sup>C的质量比分别为0.32%、0.27%、0.20%(图2-b); 2种添加方式下红壤<sup>14</sup>C-DOC与外源碳的质量比均显著大于石灰土的(*P*<0.05)。至培养结束时, 黑色石灰土<sup>14</sup>C-DOC与外源碳的质量比显著大于棕色石灰土和红壤的(*P*<0.05)。<sup>14</sup>C-稻草对3种土壤<sup>14</sup>C-DOC的影响显著大于<sup>14</sup>C-CaCO<sub>3</sub>的影响。

2.2.2 总溶解有机碳

添加<sup>14</sup>C-稻草和<sup>14</sup>C-CaCO<sub>3</sub>后5 d, 供试土壤总DOC含量达到峰值(表3), 外源物的添加均对3种土壤总溶解有机碳产生显著影响, 红壤总DOC含量显著高于石灰土的(*P*<0.05)。培养结束时, 供试土壤总DOC含量均达到最低值。整个培养过程中, 与对照相比, 添加外源物后红壤总DOC含量的增加幅度均大于石灰土的增加幅度。

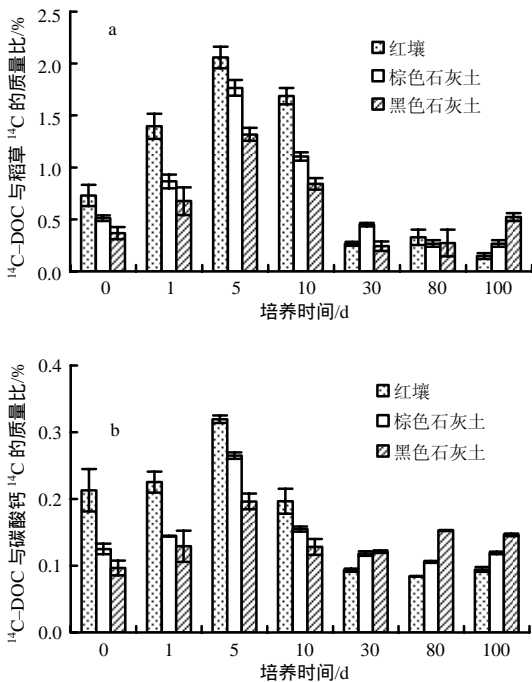


图 2 添加 <sup>14</sup>C-稻草 (a) 和 <sup>14</sup>C-CaCO<sub>3</sub> (b) 后供试土壤 <sup>14</sup>C-DOC 与外源碳的质量比

Fig. 2 Quality ratio of <sup>14</sup>C-DOC and exogenous carbon in three soils following amendments with <sup>14</sup>C-labeled straw (a) and <sup>14</sup>C-labeled calcium carbonate (b)

表 3 不同处理供试土壤的总溶解有机碳含量

		DOC 含量/(mg·kg <sup>-1</sup> )						
处理	供试土壤	0 d	1 d	5 d	10 d	30 d	80 d	100 d
CK	红壤	141.42±10.99	(210.98±9.44)a	(308.61±8.87)a	(230.89±12.76)a	(208.52±8.96)a	(109.34±7.54)a	(90.62±8.71)a
	棕色石灰土	134.33±7.33	(187.27±7.30)a	(234.49±8.10)b	(168.09±12.51)b	(120.42±9.51)b	(97.85±2.75)ab	(71.08±8.28)ab
	黑色石灰土	90.17±13.82	(113.47±7.42)b	(192.78±10.03)b	(106.16±4.76)c	(66.89±10.90)c	(61.11±11.82)bc	(43.45±4.41)bc
稻草	红壤	(158.08±12.35)a	(351.33±7.88)a	(482.24±9.19)a	(430.73±8.84)a	(358.91±11.12)a	(245.82±13.34)a	(151.27±1.86)a
	棕色石灰土	(141.42±14.77)ab	(252.63±20.40)b	(295.97±10.92)b	(246.71±10.07)b	(148.97±12.02)b	(127.77±11.94)b	(92.94±16.14)b
	黑色石灰土	(93.07±12.79)bc	(136.68±15.89)c	(247.78±11.21)b	(186.16±4.93)c	(104.80±6.91)b	(68.08±5.68)c	(58.63±6.42)c
CaCO <sub>3</sub>	红壤	163.44±20.08	(308.51±10.02)a	(423.15±9.15)a	(375.23±10.72)a	(334.56±16.61)a	(200.46±5.10)a	(131.38±0.18)a
	棕色石灰土	134.85±11.68	(238.83±7.30)b	(280.43±8.94)b	(203.12±10.59)b	(162.33±12.50)b	(112.49±3.05)b	(94.98±2.96)b
	黑色石灰土	96.24±5.32	(124.74±10.83)c	(242.79±4.16)b	(164.67±15.51)c	(90.11±1.91)c	(59.26±5.41)c	(57.87±2.56)c

### 3 结论与讨论

本试验结果表明:添加外源碳酸钙和稻草能增加土壤活性有机碳含量;黑色石灰土总微生物生物量碳含量显著大于棕色石灰土和红壤的,而红壤总溶解有机碳含量显著大于石灰土的;喀斯特石灰性土壤较红壤稳定,有利于土壤有机碳的积累。

外源物对土壤微生物生物量碳的影响。添加外源物后5 d,供试土壤中 $^{14}\text{C}$ -MBC与外源碳的质量比达到峰值,土壤总MBC含量也达到峰值,说明大部分外源物在短期内被土壤微生物分解利用,从而使土壤总MBC含量迅速增加<sup>[13]</sup>。添加外源物后5 d,土壤中 $^{14}\text{C}$ -MBC与稻草 $^{14}\text{C}$ 的质量比显著大于与碳酸钙 $^{14}\text{C}$ 的质量比,说明稻草作为易分解的有机物,易被微生物吸收利用。添加外源物后5 d,黑色石灰土总MBC含量显著大于棕色石灰土和红壤的。这可能是由黑色石灰土pH值高、微生物生物量碳在pH值高的环境中更容易移动,且黑色石灰土碳酸钙含量较高所导致。

外源物对土壤溶解有机碳的影响。添加外源物后显著提高了土壤中 $^{14}\text{C}$ -DOC、DOC含量,添加后5 d达到峰值;随着培养时间的延长,其含量逐渐降低。这是因为培养初期土壤微生物对外源物的利用率较高,而土壤微生物的代谢产物是土壤溶解有机碳的主要来源,所以DOC含量迅速增加;但随着培养时间的延长,大部分稻草在土壤中转化为较稳定的土壤腐殖质组分<sup>[14]</sup>,土壤溶解有机碳随之减少。本研究红壤总DOC含量显著大于石灰土的,这可能是因为石灰土土壤pH值较高,而DOC中很大一部分为酸性,在高pH值条件下,DOC容易与土壤中的钙、镁化合物发生中和反应,所以土壤DOC总量减少。

关于添加外源物促进土壤活性有机碳含量增加机制的研究还不够深入,对土壤活性有机碳内循环(如活性有机碳的根际效应)的研究及微生物对土壤有机碳有效利用机理的研究还有待加强。

#### 参考文献:

[1] Wander M, Traina S. Organic and conventional management effects on biologically-active soil organic-matter pools[J]. Soil Science Society of America Journal,

1994, 58(4): 1130-1139.

- [2] 宇万太, 马强, 赵鑫, 等. 不同土地利用类型下土壤活性有机碳库的变化[J]. 生态学杂志, 2007(12): 2013-2016.
- [3] 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.
- [4] Ocio J A, Brookes P C, Jenkinson D S. Field incorporation of straw and its effects on soil microbial biomass and soil inorganic-N[J]. Soil Biology & Biochemistry, 1991, 23(2): 171-176.
- [5] Witter E, Martensson A M, Garcia F V. Size of the soil microbial biomass in a long-term field experiment as affected by different N-fertilizers and organic manures[J]. Soil Biology & Biochemistry, 1993, 25(6): 659-669.
- [6] Wu J S, Huang M, Xiao H A, et al. Dynamics in microbial immobilization and transformations of phosphorus in highly weathered subtropical soil following organic amendments[J]. Plant and Soil, 2007, 290(1/2): 333-342.
- [7] Post W M, Kwon K C. Soil carbon sequestration and land-use change: Processes and potential[J]. Global Change Biology, 2000, 6(3): 317-327.
- [8] Bradley R L, Fyles J W. A kinetic parameter describing soil available carbon and its relationship to rate increase in C mineralization[J]. Soil Biology & Biochemistry, 1995, 27(2): 167-172.
- [9] Galantini J, Rosell R. Long-term fertilization effects on soil organic matter quality and dynamics under different production systems in semiarid pampean soils[J]. Soil & Tillage Research, 2006, 87(1): 72-79.
- [10] 沈宏, 曹志洪, 徐志红. 施肥对土壤不同碳形态及碳库管理指数的影响[J]. 土壤学报, 2000(2): 166-173.
- [11] Wu J S, Joergensen R G, Pommerening B, et al. Measurement of soil microbial biomass C by fumigation extraction—an automated procedure[J]. Soil Biology & Biochemistry, 1990, 22(8): 1167-1169.
- [12] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1978: 132-202.
- [13] Raj Setia, Jeff P M. Baldock and david chittleborough, is  $\text{CO}_2$  evolution in saline soils affected by an osmotic effect and calcium carbonate[J]. Biology and Fertility of Soils, 2010, 46(8): 781-792.
- [14] Kalbitz K, Solinger S, Park J H, et al. Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils: A review[J]. Soil Science, 2000, 165(4): 277-304.

责任编辑: 王赛群