

郭 振,王小利,段建军,等. 贵州黄壤性水稻土不同粒径有机碳之间的矿化差异[J]. 江苏农业科学,2017,45(14):223–226,235.  
doi:10.15889/j.issn.1002–1302.2017.14.059

# 贵州黄壤性水稻土不同粒径有机碳之间的矿化差异

郭 振<sup>1</sup>,王小利<sup>1</sup>,段建军<sup>2</sup>,徐明岗<sup>3</sup>,张雅蓉<sup>4</sup>,李 渝<sup>4</sup>,蒋太明<sup>4</sup>

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

3. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所/耕地培育技术国家工程实验室,北京 10081;

4. 农业部贵州耕地保育与农业环境科学观测实验站,贵州贵阳 550006)

**摘要:**以贵州长期定位试验的黄壤性水稻土为对象,以单施有机肥处理为例,采用湿筛法和碱液吸收法研究不同粒径土壤[粗颗粒( $>250\ \mu\text{m}$ )、微团聚体( $53\sim250\ \mu\text{m}$ )、单粉粒( $2\leq\text{粒径}<53\ \mu\text{m}$ )和单黏粒( $<2\ \mu\text{m}$ )]有机碳的矿化速率和累积矿化量,为提高土壤有机碳的稳定性提供理论依据。结果表明:所有组分有机碳的矿化速率呈现出先快速上升后逐渐下降的趋势,并在培养后 4 d 达到峰值,矿化速率  $\text{CO}_2\text{--C}$  介于  $0.004\ 0\sim0.050\ 4\ \text{g}/(\text{kg}\cdot\text{d})$  之间;培养前期单粉粒有机碳和微团聚体有机碳的矿化速率较高,粗颗粒有机碳矿化速率最低。所有组分的累积矿化量  $\text{CO}_2\text{--C}$  介于  $0.151\ 7\sim0.185\ 4\ \text{g}/\text{kg}$  之间,且粗颗粒和单黏粒有机碳累积矿化量较原土分别降低了 13.3% 和 8.18%,其他组分较原土略有提高;微团聚体和单粉粒的有机碳累积矿化量较高,分别为  $0.176\ 4\ \text{g}/\text{kg}$  和  $0.185\ 4\ \text{g}/\text{kg}$ ,显著高于粗颗粒和单黏粒( $P<0.05$ )。在培养前期所有组分的矿化速率方程为指数函数且达到极显著水平( $P<0.01$ ),培养后期呈对数函数( $P<0.01$ ),累积矿化量呈对数函数由快到慢增长( $P<0.01$ )。不同粒径土壤中可矿化有机碳的分配比例无显著差异( $P>0.05$ ),固碳能力依次是:粗颗粒 $>$ 单黏粒 $>$ 微团聚体 $>$ 单粉粒。不同粒径土壤中可矿化有机碳的分配比例随粒级减小而变大,大粒径土壤固碳能力较小粒径强。

**关键词:**黄壤性水稻土;粒径;有机碳;矿化;稳定性;矿化速率;累积矿化量

**中图分类号:**S152 **文献标志码:**A **文章编号:**1002–1302(2017)14–0223–04

土壤碳库作为陆地生态系统重要的组成部分,其中有  $1.5\times10^{15}\ \text{kg}$  属于土壤有机碳(SOC),具有相当大的库容<sup>[1]</sup>。SOC 占全球土壤碳库的 60% 左右,是大气碳库的 1.98 倍,因此 SOC 较小幅度的变化就会影响碳向大气的排放,以温室效应影响全球气候变化<sup>[2]</sup>。土壤碳素向大气的排放主要是通过 SOC 的矿化作用以  $\text{CO}_2$  的形式从土壤圈进入大气圈。SOC 的矿化作用是一个受土壤酶引导的生物化学过程,主要是通过土壤微生物利用、分解土壤活性有机碳(SAOC)来完成自身的代谢循环,同时释放出  $\text{CO}_2$  的过程,直接关系到土壤中养分元素的释放与供应、温室气体的形成及土壤质量的保持等<sup>[3–4]</sup>,因此探究 SOC 的矿化规律对于土壤养分的管理和温室效应的控制都具有非常重要的意义。土壤有机碳的矿化主要受土壤质地、土壤水分以及温度等因素的影响<sup>[5]</sup>,而不同粒径土壤有机碳之间也存在显著的矿化差异,会造成土壤环境明显不同。刘晶等研究表明,不同粒径有机碳之间的矿化速率存在显著差异,粒径  $>5\ \text{mm}$  的土壤颗粒可矿化碳最

低,但固碳潜力却最强<sup>[6]</sup>。葛序娟等对湖南省桃源县水稻土的研究表明,土壤有机碳矿化速率呈现出先升高后降低最后稳定在一个较低水平上的特性<sup>[7]</sup>。魏亚伟等对喀斯特土壤团聚体及其稳定性研究表明,随培养时间的延长,土壤团聚体有机碳的矿化速率先增加再减小,20 d 后趋于平稳,而且随着团聚体粒级的减小矿化速率逐渐增大<sup>[8]</sup>。国外有研究表明,土壤有机碳的矿化速率与土壤有机质的质量和团聚体密切相关<sup>[9]</sup>。土壤有机碳矿化主要通过室内土壤需氧培养法测定,培养土壤中没有有机碳输入和淋溶输出,土壤温湿度也得以有效控制,培养中释放  $\text{CO}_2$  的趋势和强度能反映不同条件下土壤有机碳的分解动态<sup>[10]</sup>。目前我国对土壤有机碳矿化的研究已有很多报道,但都主要集中在表层原状土壤的研究<sup>[11–12]</sup>,对不同粒径土壤有机碳的矿化研究较少。本研究采取贵州典型黄壤稻田土壤,对不同粒径中土壤有机碳的矿化速率和累积矿化量进行研究,为提高土壤有机碳的稳定性提供相应的理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

长期试验地位于贵州省农业科学院内( $106^{\circ}07'\text{E}$ 、 $26^{\circ}11'\text{N}$ ),地处黔中丘陵区,平均海拔  $1\ 071\ \text{m}$ ,属于亚热带季风气候,年均日照时数  $1\ 354\ \text{h}$  左右,年平均气温  $15.3\ ^{\circ}\text{C}$ ,相对湿度  $75.5\%$ ,年降水量  $1\ 100\sim1\ 200\ \text{mm}$ ,全年无霜期  $270\ \text{d}$  左右。试验地为黄壤性水稻土,成土母质为三叠系灰岩与砂页岩风化物。该长期定位试验起始于 1995 年,初始耕层( $0\sim20\ \text{cm}$ )土壤基本性质为:有机质  $31.15\ \text{g}/\text{kg}$ (折有机碳

收稿日期:2017–02–23

基金项目:国家自然科学基金(编号:31360503、41361064);贵州大学研究生创新基金(编号:研农 2017017);贵州省农业科学院自主创新专项(编号:黔农科院自主创新专项 2014007 号);贵州省科技计划项目(编号:黔科合 NY 字[2012]3082 号、黔科平台[2013]4002 号);耕地培育技术国家工程实验室开放基金(编号:201701)。

作者简介:郭 振(1992—),男,陕西大荔人,硕士生研究生,主要从事土壤有机碳的矿化研究。E-mail:675334047@qq.com。

通信作者:王小利,副教授,主要从事土壤肥力与作物施肥研究。

E-mail:xlwang@gzu.edu.cn。

18.07 g/kg), 全氮 1.76 g/kg, 全磷 2.30 g/kg, 碱解氮 134.4 mg/kg, 速效磷 21.1 mg/kg, 速效钾 157.9 mg/kg, pH 值 6.63。设有 11 个施肥处理, 采用大区对比试验, 不设重复, 小区面积为 201 m<sup>2</sup>。本研究根据需要仅选取单施有机肥的处理, 对该施肥条件下不同粒径土壤有机碳之间的矿化差异进行了初探。有机肥料为牛廐肥(平均含 C 413.8 g/kg, N 2.7 g/kg, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 1.3 g/kg, K<sub>2</sub>O 6.0 g/kg), 年施用量 61.1 t/hm<sup>2</sup>。

### 1.2 土壤采集和预处理

在 2014 年水稻收获后的 12 月中下旬进行采样, 用“S”型采样法随机采集水田表层 0~20 cm 深土壤, 5 点组成一个土样, 取 3 次重复。将采集的土壤除去动、植物残体混匀风干分成 2 份, 一部分研磨过 2 mm 筛用于湿筛分组, 另一部分过 0.25 mm 筛, 用于测定土壤有机碳。

### 1.3 试验方法

1.3.1 土壤有机碳的分组和测定 采用湿筛法将过 2 mm 筛的土壤分离获得 >250 μm 的粗颗粒有机碳, 53≤粒径≤250 μm 的微团聚体有机碳, 2≤粒径<53 μm 的单粉粒有机碳和 <2 μm 的单黏粒有机碳<sup>[13-14]</sup>。具体操作为: 称取 20 g 过 2 mm 筛的风干土样于微团聚体分离器套筛的顶部筛上(上层 250 μm 筛子, 下层 53 μm 筛子), 放入 30 个玻璃珠, 然后上下摆动此装置约 20 min, 留在 250 μm 筛上的组分为粗颗粒有机碳, 在 53~250 μm 筛上的为微团聚体有机碳, 过 53 μm 筛的为粘粉粒有机碳, 然后将 <53 μm 的组分用离心法分别于 900 r/min 下离心 7 min 和 3 200 r/min 下离心 15 min 分离出单粉粒有机碳和单黏粒有机碳。所有组分均采用重铬酸钾-浓硫酸外加加热法测得有机碳含量<sup>[15]</sup>。

1.3.2 土壤有机碳矿化培养 称取各组分土壤 2 g 于 50 mL 烧杯中, 用蒸馏水调节至田间持水量的 45% 左右, 将烧杯置于 1 L 广口瓶中, 放入 25 °C 恒温培养箱中预培养 24 h<sup>[16]</sup>; 预培养结束后将盛有 10 mL 0.01 mol/L NaOH 溶液的烧杯放入广口瓶中, 密封, 于 25 °C 恒温培养箱中黑暗培养, 在 1、2、3、4、5、6、7、8 d 将烧杯中的 NaOH 吸收液转出并换上新的吸收液, 并用称质量法补充水分至恒质量, 通气 30 min 再加盖继续密闭黑暗培养。在转出的吸收液中加入 2 mL 1 mol/L 的 BaCl<sub>2</sub> 溶液, 然后加入酚酞指示剂 1 滴, 用 0.01 mol/L 的 HCl 滴定未消耗的 NaOH, 通过 HCl 消耗量来计算释放出的 CO<sub>2</sub> 量<sup>[17-18]</sup>。每个组分设置 3 次重复, 并设空白对照。

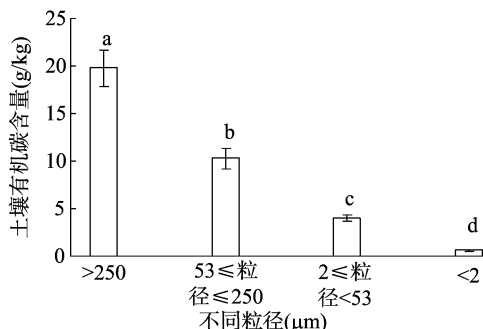
### 1.4 数据分析

试验数据采用 Excel 2016 和 SPSS 19.0 软件进行统计与分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同粒径土壤有机碳含量特征

图 1 显示, 不同粒径土壤有机碳含量之间均存在显著差异( $P<0.05$ )。以粗颗粒有机碳含量最高, 达 19.77 g/kg; 单黏粒有机碳含量最低, 仅有 0.61 g/kg; 微团聚体有机碳含量和单粉粒有机碳含量居中。其中粗颗粒有机碳含量分别是微团聚体、单粉粒、单黏粒有机碳含量的 1.93 倍、4.95 倍和 32.27 倍。微团聚体有机碳含量分别是单粉粒和单黏粒有机碳含量的 2.57 倍、16.75 倍, 单粉粒有机碳含量是单黏粒有机碳含量的 6.52 倍。



不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ )。下同

图1 不同粒径土壤有机碳含量

### 2.2 不同粒径土壤有机碳矿化特征

2.2.1 原土有机碳矿化速率 图 2 显示了原土在室内培养期间 CO<sub>2</sub>-C 的释放速率随培养时间的变化。在整个培养时间内, 原土有机碳的矿化速率呈现出先快速上升后逐渐下降的趋势, 并在培养 4 d 时达到峰值, 矿化速率 CO<sub>2</sub>-C 介于 0.01~0.05 g/(kg·d) 之间。原土有机碳的日均矿化速率均表现出显著性差异( $P<0.05$ )。

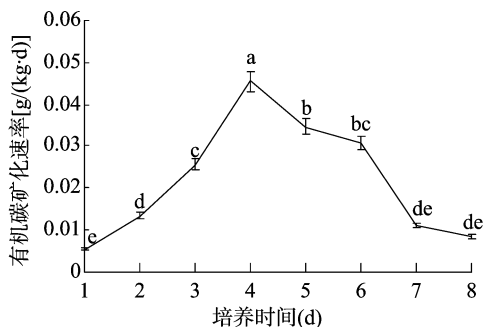


图2 原土有机碳矿化速率

2.2.2 不同粒径土壤有机碳矿化速率 图 3 描述了不同粒径土壤有机碳 8 d 内日均矿化量的动态变化。4 组不同粒径土壤有机碳的日均矿化量都存在明显的阶段特征: 在培养前 4 d, 土壤有机碳矿化速率有大幅度的上升, 且在 4 d 时达到峰值, 之后土壤有机碳矿化速率均逐渐下降, 说明随着培养时间的延长, 易矿化有机碳逐渐减少, 微生物开始分解难矿化有机碳, 因此 CO<sub>2</sub>-C 的释放速率开始降低。在培养 1 d 时, 不同粒径间土壤有机碳矿化速率无显著差异( $P>0.05$ ); 2 d 时, 单粉粒有机碳的矿化速率显著( $P<0.05$ ) 高于粗颗粒有机碳矿化速率; 3 d 时, 微团聚体有机碳的矿化速率最大; 4 d 时, 所有组分有机碳矿化速率均达到峰值但无显著性差异( $P>0.05$ ); 在培养后期的 5~8 d, 随着培养时间的增加, 不同粒径间土壤有机碳矿化速率的差异逐渐变小, 矿化量基本稳定且无显著性差异( $P>0.05$ )。粗颗粒有机碳的矿化速率介于 0.005 1~0.043 5 g/(kg·d) 之间, 日均矿化速率大小为 4 d>3 d>5 d>6 d>7 d>2 d>8 d>1 d; 微团聚体有机碳的矿化速率介于 0.004 7~0.050 4 g/(kg·d) 之间, 前 4 d 彼此之间均呈显著性差异( $P<0.05$ ), 培养后期土壤有机碳的矿化差异逐渐变小且相对稳定; 单粉粒有机碳的矿化速率介于 0.005 2~0.049 0 g/(kg·d) 之间, 8 d 时矿化速率最低, 是 4 d 时矿化速率的 10.61%; 单黏粒有机碳的矿化速率低于其他粒径, 介于 0.004 0~0.042 2 g/(kg·d) 之间。

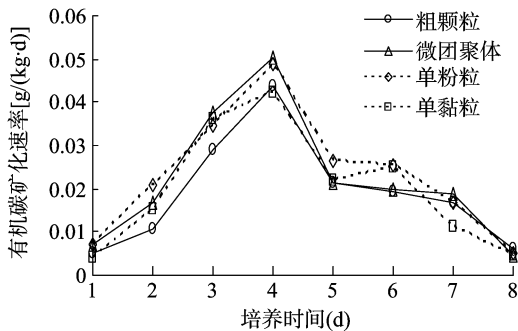


图3 不同粒径土壤有机碳矿化速率

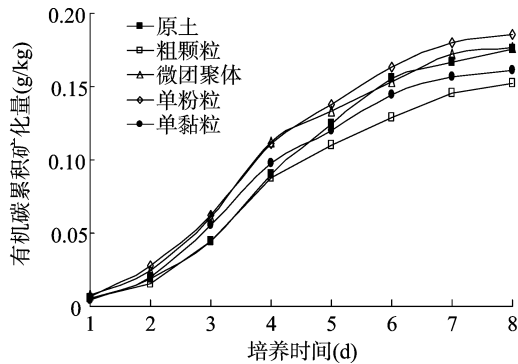


图4 不同粒径土壤有机碳累积矿化量

2.2.3 不同粒径土壤有机碳累积矿化量 图4表明,原土有机碳的累积矿化量为0.175 0 g/kg,不同粒径土壤有机碳的累积矿化量介于0.151 7~0.185 4 g/kg之间,且随培养时间的延长而呈上升趋势,但有机碳累积释放强度逐渐减缓。与原土相比,粗颗粒有机碳和单黏粒有机碳累积矿化量分别降低了13.3%和8.18%,微团聚体有机碳和单粉粒有机碳累积矿化量分别提高了0.8%和5.93%。微团聚体有机碳累积矿化量和原土有机碳累积矿化量相近,在0.005 4~0.176 4 g/kg之间。微团聚体有机碳累积矿化量和单粉粒有机碳累积矿化量较高,分别是0.176 4 g/kg和0.185 4 g/kg,是粗颗粒有机碳累积矿化量的1.16倍和1.22倍,不仅显著高于粗颗粒有机碳累积矿化量,也显著高于单黏粒土壤有机碳的累积矿化量。

2.3 土壤有机碳矿化速率方程和累积矿化量方程 根据土壤有机碳矿化速率将整个培养期分为前4 d的快速增长阶段和后4 d的缓慢下降阶段。对图2原土有机碳的矿化速率和图3不同粒径土壤有机碳的矿化速率进行拟合,结果见表1,表明在培养前期原土和不同粒径土壤有机碳的矿化速率随培养时间的变化符合指数函数关系,相关性均达到极显著水平( $P<0.01$ );在培养后期原土和不同粒径土壤有机碳的矿化速率随培养时间的变化符合对数函数关系,相关性也均达到极显著水平( $P<0.01$ );对图4原土及不同粒径土壤有机碳的累积矿化量进行拟合,结果见表1,表明在整个培养期内,原土和不同粒径土壤有机碳累积矿化量随培养时间的变化符合对数函数关系,相关性均达到极显著水平( $P<0.01$ )。

表1 土壤有机碳矿化速率方程和累积矿化量方程

| 不同粒径 | CO <sub>2</sub> 产生速率方程                |  | CO <sub>2</sub> 累积产生量方程                 |  |
|------|---------------------------------------|--|---|--|
|      | 1~4 d                                 | 5~8 d                                    | 0~8 d                                   |  |
| 原土   | $y_1=0.003e^{0.704x}, r^2=0.987^{**}$ | $y_1=-0.021\ln(x)+0.038, r^2=0.849^{**}$ | $y_2=0.092\ln(x)-0.025, r^2=0.909^{**}$ |  |
| 粗颗粒  | $y_1=0.003e^{0.743x}, r^2=0.977^{**}$ | $y_1=-0.009\ln(x)+0.023, r^2=0.696^{**}$ | $y_2=0.079\ln(x)-0.019, r^2=0.926^{**}$ |  |
| 微团聚体 | $y_1=0.004e^{0.662x}, r^2=0.963^{**}$ | $y_1=-0.010\ln(x)+0.024, r^2=0.581^{**}$ | $y_2=0.091\ln(x)-0.016, r^2=0.943^{**}$ |  |
| 单粉粒  | $y_1=0.005e^{0.637x}, r^2=0.929^{**}$ | $y_1=-0.014\ln(x)+0.030, r^2=0.757^{**}$ | $y_2=0.096\ln(x)-0.018, r^2=0.943^{**}$ |  |
| 单黏粒  | $y_1=0.002e^{0.794x}, r^2=0.896^{**}$ | $y_1=-0.013\ln(x)+0.026, r^2=0.635^{**}$ | $y_2=0.085\ln(x)-0.018, r^2=0.943^{**}$ |  |

注: $y_1$ 为CO<sub>2</sub>产生速率[g/(kg·d)]; $y_2$ 为CO<sub>2</sub>累积产生量(g/kg); $x$ 为培养天数(d);“\*\*”表示 $P<0.01$ 。

2.4 不同粒径中可矿化有机碳的分配比例

土壤可矿化有机碳的分配比例是在培养时间内土壤有机碳矿化释放的CO<sub>2</sub>-C量占土壤总有机碳含量的比例,它从某种程度上反映了土壤的固碳能力,如果该比例越低,表明土壤的固碳能力越强,反之则固碳能力越弱<sup>[19]</sup>。本研究,不同粒径土壤中可矿化有机碳的分配比例无显著差异( $P>0.05$ ),变化范围在0.47%~0.57%,但粗颗粒和单黏粒的可矿化有机碳分配比例较低,单粉粒和微团聚体的可矿化有机碳分配比例较高,不同粒径土壤组分的固碳能力依次是:粗颗粒>单黏粒>微团聚体>单粉粒(图5)。表明不同粒径土壤中可矿化有机碳的分配比例随粒径级减小而变大,大粒径土壤固碳能力较小粒径更强。

3 讨论

土壤有机碳的矿化受土壤颗粒组成、土壤温度、湿度、pH值、施肥措施、土地类型和质地等因素的影响,不同组分有机碳因土壤物理、化学、生物和非生物等性质的差异会造成土壤有机碳含量的改变,甚至不同组分间会出现显著性差异,从而

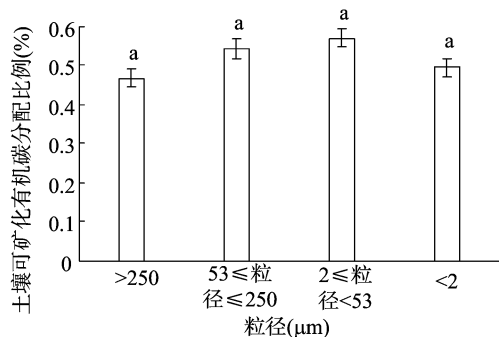


图5 不同粒径土壤可矿化有机碳的分配比例

对不同组分土壤有机碳的矿化速率和累积矿化量产生不同程度的影响<sup>[6]</sup>。本研究,经过单施有机肥处理的土壤有机碳主要分布于粗颗粒上,不同粒径土壤有机碳含量占土壤总有机碳含量的百分比依次是:粗颗粒有机碳(55.51%)>微团聚体有机碳(28.80%)>单粉粒有机碳(11.22%)>单黏粒有机碳(1.72%)。王芳等研究结果表明,太湖地区黄泥土、乌泥土、白土3种土壤耕层有机碳主要存在于250~

2 000  $\mu\text{m}$  和 20 ~ 250  $\mu\text{m}$  粒级团聚体上<sup>[20]</sup>。郭菊花等对红壤性水稻土的研究也指出,土壤有机碳主要分配在 250 ~ 2 000  $\mu\text{m}$  的大团聚体上<sup>[21]</sup>。说明有机碳含量高的组分主要依靠有机胶结物质,这不仅与施肥措施有关,还与大团聚体的物理保护机制相关。刘京等在对乾县土壤定点培肥试验地土壤团聚体分析测定时指出,施有机肥或有机无机肥配施可明显增加土壤团聚体含量<sup>[22]</sup>。

土壤有机碳按其分解的难易程度可分为活性有机碳库和惰性有机碳库,前者矿化速率较快、易被微生物分解利用;后者稳定性高,矿化速率较慢且很难被分解。本研究中对培养的 4 d 时,原土及不同粒径土壤有机碳的矿化速率达到最大,因为矿化初期土壤中存在易分解的糖类和蛋白质等有机物质,为微生物活动提供了足够的养分,且矿化初期土壤有机碳的矿化速率随培养时间的变化呈指数函数,同时达到极显著水平( $P < 0.01$ );之后由于糖类和蛋白质等有机物质的减少,土壤微生物开始利用惰性有机碳,原土及各粒径土壤有机碳矿化速率随培养时间的变化符合对数函数且达到极显著水平( $P < 0.01$ ),后期的研究结果与陈涛等<sup>[23-24]</sup>的研究结果类似。本研究中,小粒径土壤有机碳的矿化速率和累积矿化量大于大粒径,这说明土壤大团聚体的有机碳较稳定,不易分解,而小团聚体中的有机碳易矿化,不利于有机碳的储存,这与魏亚伟等的研究结果<sup>[8]</sup>类似,但与部分研究结果不同: Elliott 等研究表明,大团聚体中的有机碳比较年轻,因而比微团聚体中的有机碳更易矿化<sup>[25]</sup>; Puget 等研究发现,小团聚体中的有机碳比大团聚体中的有机碳老化,这可能与土壤母质、地上植被和生态环境的差异有关<sup>[26]</sup>,因而造成土壤团聚体中有机碳的分布不同。不同粒径土壤有机碳的矿化速率和累积矿化量均以粗颗粒有机碳组分最小,其他组分较大,这可能与各粒径土壤中有机碳含量和微生物相关, Sato 等研究结果表明,土壤可矿化碳与微生物生物量碳和土壤有机碳有着很好的相关性,但不同粒级团聚体中有机碳矿化量的差异,除与土壤微生物和有机碳含量有关外,还可能受其他多种因素的影响<sup>[27]</sup>。本研究中,不同粒径土壤中可矿化有机碳的分配比例无显著差异,变化范围在 0.47% ~ 0.57%,可矿化有机碳分配比例大小顺序依次是:单粉粒有机碳 > 微团聚体有机碳 > 单黏粒有机碳 > 粗颗粒有机碳,表明粗颗粒组分的固碳能力最强,其次是单黏粒、微团聚体、单粉粒。此结果与刘晶等的研究报道<sup>[6]</sup>一致,表明团聚体可矿化有机碳的分配比例随粒级减小而变大,大团聚体的固碳能力强于小团聚体的固碳能力。

#### 4 结论

(1) 原土及不同粒径土壤有机碳的矿化速率呈现出先快速升高后缓慢降低的趋势,累积矿化量呈现出培养前期增长速率较快后期增长速率较慢的趋势。

(2) 培养前期原土及不同粒径土壤有机碳的矿化速率呈指数函数且达到极显著水平,培养后期呈对数函数且达到极显著水平,累积矿化量也呈对数函数由快到慢增长且达到极显著水平( $P < 0.01$ )。

(3) 不同粒径土壤中可矿化有机碳的分配比例无显著差异,固碳能力依次是:粗颗粒 > 单黏粒 > 微团聚体 > 单粉粒。

#### 参考文献:

- [1] Poll C, Marhan S, Back F, et al. Field - scale manipulation of soil temperature and precipitation change soil CO<sub>2</sub> flux in a temperate agricultural ecosystem[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2013, 165(S1/S2): 88 - 97.
- [2] 曾 骏, 董 博, 张东伟, 等. 不同施肥方式对灌漠土土壤有机碳, 无机碳和微生物量碳的影响[J]. 水土保持通报, 2013, 33(2): 35 - 38.
- [3] 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.
- [4] 王 苑, 宋新山, 王 君, 等. 干湿交替对土壤碳库和有机碳矿化的影响[J]. 土壤学报, 2014, 51(2): 154 - 162.
- [5] 徐洪文, 卢 妍. 土壤碳矿化及活性有机碳影响因子研究进展[J]. 江苏农业科学, 2014, 42(10): 4 - 7.
- [6] 刘 晶, 田耀武, 张巧明. 豫西黄土丘陵区不同土地利用方式土壤团聚体有机碳含量及其矿化特征[J]. 水土保持学报, 2016, 30(3): 254 - 261.
- [7] 葛序娟, 潘剑君, 尹正宇, 等. 不同土层水稻土培养条件下有机碳矿化规律研究[J]. 土壤通报, 2015, 46(3): 570 - 578.
- [8] 魏亚伟, 苏以荣, 陈香碧, 等. 人为干扰对喀斯特土壤团聚体及其有机碳稳定性的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(4): 971 - 978.
- [9] Hassink J. Density fractions of soil macro - organic matter and microbial biomass as predictors of C and N mineralization[J]. Soil Biology & Biochemistry, 1995, 27: 1099 - 1108.
- [10] 周 焱, 徐宪根, 阮宏华, 等. 武夷山不同海拔高度土壤有机碳矿化速率的比较[J]. 生态学杂志, 2008, 27(11): 190 - 1907.
- [11] 马 力, 杨林章, 肖和艾, 等. 施肥和秸秆还田对红壤水稻土有机碳分布变异及其矿化特性的影响[J]. 土壤, 2011, 43(6): 883 - 890.
- [12] 朱凌宇. 我国南方几种主要土壤有机碳分解特征及模拟研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2013.
- [13] 张丽敏, 徐明岗, 姜翼来, 等. 土壤有机碳分组方法概述[J]. 中国土壤与肥料, 2014(4): 1 - 6.
- [14] 窦 森. 土壤有机质: 土壤有机质的分组[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 26 - 46.
- [15] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000.
- [16] Goyal S, Chander K, Mundra M C, et al. Influence of inorganic fertilizers and organic amendments on soil organic matter and soil microbial properties under tropical conditions[J]. Biology and Fertility of Soils, 1999, 29(2): 196 - 200.
- [17] 吴 萌, 李忠佩, 冯有智, 等. 长期施肥处理下不同类型水稻土有机碳矿化的动态差异[J]. 中国农业科学, 2016, 49(9): 1705 - 1714.
- [18] 李顺姬, 邱莉萍, 张兴昌, 等. 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.
- [19] 戴 慧, 王希华, 阎恩荣. 浙江天童山土地利用方式对土壤有机碳矿化的影响[J]. 生态学杂志, 2007, 26(7): 1021 - 1026.
- [20] 王 芳, 潘根兴, 李恋卿. 长期不同施肥处理下黄泥土原土和团聚体颗粒组的非含量变化[J]. 土壤, 2009, 41(3): 464 - 470.
- [21] 郭菊花, 陈小云, 刘满强, 等. 不同施肥处理对红壤性水稻土团聚体的分布及有机碳、氮含量的影响[J]. 土壤, 2007, 39(5): 787 - 793.

- 探[J]. 华北农学报,2000,15(增刊1):153-156.
- [5] 吴燕飞,张雪艳,李元,等. 轮作对黄瓜连作土壤环境和产量的影响[J]. 园艺学报,2008,35(3):357-362.
- [6] 吕卫光,张春兰,袁飞,等. 有机肥减轻连作黄瓜自毒作用的机制[J]. 上海农业学报,2002,18(2):52-56.
- [7] 张春兰,吕卫光,袁飞,等. 生物有机肥减轻设施栽培黄瓜连作障碍的研究[J]. 中国农学通报,1999,15(6):67-69.
- [8] 武雪萍,朱凯在,刘国顺,等. 有机无机肥配施对烟叶化学成分和品质的影响[J]. 土壤肥料,2005(1):10-13.
- [9] 李晓磊,李井会,宋述尧,等. 秸秆有机肥改善设施黄瓜连作土壤微生物区系[J]. 长春大学学报,2006,16(6):121-122.
- [10] 苏立涛,沈向,郝云红,等. 有机物料对连作平邑甜茶幼苗生长及微生态环境的影响[J]. 中国农学通报,2010,26(20):187-192.
- [11] 刘灵霞,王金成,刘建新,等. 生物发酵肥对温室黄瓜土壤微生物组成的影响[J]. 水土保持通报,2012,32(6):84-88.
- [12] 文景芝,李刚,张齐凤,等. 施肥对大棚黄瓜根际微生物群落结构和数量消长的影响[J]. 中国蔬菜,2007(12):11-14.
- [13] 赵斌,何绍江. 微生物学实验[M]. 北京:科学出版社,2003,69-75.
- [14] Muyzer G, de Waal E C, Uitterlinden A G. Profiling of complex microbial populations by denaturing gradient gel electrophoresis analysis of polymerase chain reaction - amplified genes coding for 16S rRNA[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1993, 59(3):695-700.
- [15] Sandhu G S, Kline B C, Stockman L, et al. Molecular probes for diagnosis of fungal infections[J]. Journal of Clinical Microbiology, 1995, 33(11):2913-2919.
- [16] 周宝利,徐妍,尹玉玲,等. 不同连作年限土壤对茄子土壤生物学活性的影响及其嫁接调节[J]. 生态学杂志,2010,29(2):290-294.
- [17] 杜茜,卢迪,马琨. 马铃薯连作对土壤微生物群落结构和功能的影响[J]. 生态环境学报,2012,21(7):1252-1256.
- [18] 赵萌,李敏,王森焱,等. 西瓜连作对土壤主要微生物类群和土壤酶活性的影响[J]. 微生物学通报,2008,35(8):1251-1254.
- [19] 赵辉,赵铭钦,程玉渊,等. 土壤微生物影响因子研究综述[J]. 江西农业学报,2009,21(12):52-56.
- [20] 朱盼盼,张显,任自力. 不同施肥处理对连作西瓜土壤微生物区系的影响[J]. 北方园艺,2013(11):171-174.
- [21] 马宁宁,李天来. 设施番茄长期连作土壤微生物群落结构及多样性分析[J]. 园艺学报,2013,40(2):255-264.
- [22] 吴凤芝,王学征. 设施黄瓜连作和轮作中土壤微生物群落多样性的变化及其与产量品质的关系[J]. 中国农业科学,2007,40(10):2274-2280.
- [23] 夏昕,石坤,黄欠如,等. 长期不同施肥条件下红壤性水稻土壤微生物群落结构的变化[J]. 土壤学报,2015,52(3):697-705.
- [24] 夏昕,石坤,黄欠如,等. 长期施肥条件下菜田土壤微生物特征变化[J]. 生态学杂志,2009,28(7):1288-1291.
- [25] 魏巍,许艳丽,朱琳,等. 长期施肥对黑土农田土壤微生物群落的影响[J]. 土壤学报,2013,50(2):372-380.
- [26] Wakelin S A, Macdonald L M, Rogers S L, et al. Habitat selective factors influencing the structural composition and functional capacity of microbial communities in agricultural soils[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2008, 40(3):803-813.
- [27] 高玉峰,贺字典. 影响土壤真菌多样性的土壤因素[J]. 中国农学通报,2010,26(10):177-181.
- [28] Muyzer G, Dewaal E C, Uitterlinden A G. Profiling of complex microbial populations by denaturing gradient gel electrophoresis analysis of polymerase chain reaction - amplified genes encoding for 16S rRNA[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1993, 59(3):695-700.
- (上接第 226 页)
- [22] 刘京,常庆瑞,李岗,等. 连续不同施肥对土壤团聚性影响的研究[J]. 水土保持通报,2000,20(4):24-26.
- [23] 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.
- [24] 王朔林,杨艳菊,王改兰,等. 长期施肥对栗褐土有机碳矿化的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2016,22(5):1278-1285.
- [25] Elliott E T, Cambardella C A. Physical separation of soil organic matter[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 1991, 34(1/2/3/4):407-419.
- [26] Puget P, Chenu C, Balesdent J. Dynamics of soil organic matter associated with particle - size fractions of water - stable aggregates[J]. European Journal of Soil Science, 2000, 51(4):595-605.
- [27] Sato A, Seto M. 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[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 1999, 2(19/20):2593-2605.