

DOI: 10.11766/trxb201805300285

红壤性水稻土不同粒级团聚体有机碳矿化及其温度敏感性*

陈晓芬¹ 刘明^{1, 2} 江春玉¹ 吴萌¹ 贾仲君^{1, 2} 李忠佩^{1, 2†}

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 采用室内培养方法, 研究不同温度 (15℃、25℃和35℃) 条件下红壤性水稻土不同粒级团聚体 (>2 mm、1~2 mm、0.25~1 mm、0.053~0.25 mm和<0.053 mm) 中有机碳矿化特征, 分析团聚体有机碳矿化对全土有机碳矿化的贡献并探讨团聚体有机碳矿化的温度敏感性。结果表明:>0.25 mm大团聚体较<0.25 mm微团聚体含有更多的有机碳和全氮, 碳氮比随团聚体粒级减小而降低。全土和各粒级团聚体有机碳矿化速率在培养的前7d快速下降, 之后缓慢降低并在培养后期趋于稳定。25℃和35℃培养时, 有机碳累积矿化量在>1 mm团聚体中最高, 在0.053~0.25 mm团聚体中最低, 且有机碳累积矿化量与有机碳和全氮含量显著或极显著正相关。>2 mm和0.25~1 mm团聚体对全土有机碳矿化的贡献最大, 贡献率分别为34.6%和28.8%。培养温度的升高显著提高了全土和团聚体的有机碳矿化速率、累积矿化量和矿化率。不同粒级团聚体有机碳矿化的温度敏感性系数为1.38~2.00, 与有机碳、全氮和碳氮比均极显著正相关。综上所述, >0.25 mm大团聚体在红壤性水稻土有机碳矿化中发挥主导作用, 升温促进了不同粒级团聚体有机碳的矿化, 团聚体有机碳矿化的温度敏感性与有机质的数量和质量密切相关。

关键词 温度; 红壤性水稻土; 团聚体; 有机碳矿化

中图分类号 S154.1 **文献标识码** A

土壤有机碳库是陆地生态系统中最大的碳库, 土壤有机碳是土壤质量的核心, 土壤中有机碳的变化影响碳素向大气的排放, 同时也影响土壤生态系统的结构与功能^[1]。土壤有机碳的矿化是土壤微生物分解同化土壤中活性有机组分完成自身代谢并释放CO₂的过程, 是土壤中重要的生物化学过程, 关系到养分元素的释放与供应、土壤生产力的维持及温室气体的形成等^[2]。近年来, 对土壤有机碳

矿化规律及其机制的探索从未间断^[3-6], 是土壤、环境领域研究的热点。

土壤团聚体是土壤结构的基本单元, 也是有机碳存在的场所, 良好的土壤结构是储存和稳定有机碳的重要基础^[7]。目前, 关于不同施肥^[8]、利用方式^[9]及耕作措施^[10]等土壤管理条件下团聚体中有机碳的分布特征已有大量的研究报道, 也有少数研究关注团聚体中有机碳的矿化作用。如Yu

* 国家自然科学基金项目 (41601270, 41430859)、 “一三五” 计划和领域前沿项目 (ISSASIP1642) 和中国博士后基金项目 (2016M601904) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 41601270, 41430859), the “135” Plan and Field Frontier Project (No.ISSASIP1642) and the China Postdoctoral Science Foundation (No. 2016M601904)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: zhpli@issas.ac.cn

作者简介: 陈晓芬 (1987—), 女, 安徽阜阳人, 博士后, 主要从事土壤有机质转化研究。E-mail: xfchen@issas.ac.cn

收稿日期: 2018-05-30; 收到修改稿日期: 2018-07-22; 优先数字出版日期 (www.cnki.net): 2018-10-08

等^[11]对旱作砂壤土的研究表明,好气培养32 d, 0.053~0.25 mm团聚体有机碳平均矿化速率显著低于>0.25 mm和<0.053 mm团聚体。郝瑞军等^[12]对稻麦轮作土壤的研究发现,好气和淹水培养过程中,有机碳矿化速率在1~2 mm团聚体中最高,在<0.053 mm团聚体中最低。由此可见,不同土壤团聚体有机碳矿化变化规律结果不尽一致。表土中有90%的有机碳存在于团聚体中^[13],全土有机碳矿化应是不同粒级团聚体有机碳矿化的总体表现。研究团聚体中有机碳的矿化特征并明确不同粒级团聚体在全土有机碳矿化中发挥的作用,对于进一步理解土壤碳循环的过程与机理具有重要意义。

土壤有机碳矿化影响因素较多,如土壤质地、土壤肥力、温度、湿度及人为管理措施等^[14]。诸多因素中,温度是影响土壤有机碳矿化的重要环境因子。多数研究认为温度升高可以促进土壤有机碳的矿化^[4,5,15],但也有研究指出升温对土壤有机碳矿化没有影响^[16]。尽管结论不统一,但这些对土壤有机碳矿化及其温度敏感性的研究均是基于全土水平进行的,温度变化对土壤团聚体中有机碳矿化影响的研究还极少,目前已知的有王菁等^[17]采用原位培养试验研究土壤团聚体呼吸及其对温度变化的响应。温度变化对土壤团聚体有机碳矿化作用的影响如何仍有待于进行更多的研究和探索,以利于深入揭示土壤有机碳矿化对温度变化的响应和反馈机制。

水稻土是我国重要的土壤资源和主要的耕作土壤,水稻种植面积占世界水耕土壤面积的23%,占全国耕地总面积的25%,生产出中国约44%的粮食^[18-19]。本文选择江西鹰潭开垦自红壤荒地耕种20年的典型红壤性水稻土,研究不同培养温度下各粒级团聚体中有机碳矿化特征,并明确不同粒级团聚体对土壤有机碳矿化的贡献和团聚体有机碳矿化的温度敏感性,以期为揭示土壤有机碳的矿化机制及进一步研究土壤有机碳矿化对温度变化的响应提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤源于鹰潭农田生态系统国家野外科学观测研究站(江西省鹰潭市余江县,116°55'E,

28°15'N)的长期肥料定位试验田,开垦自红壤荒地。于1990年将发育自第四纪红色黏土的红壤荒地平整,然后灌水种稻,种植制度为早稻-晚稻一年两熟。有机无机肥配合施用更有利于红壤稻田土壤培肥^[20],本研究土壤样品取自长期肥料试验中的典型有机无机肥配施处理,其化肥施用量为1998年以前每季N 230 kg·hm⁻², P₂O₅ 68 kg·hm⁻², K₂O 84 kg·hm⁻²; 1998年以后施氮量减半,磷肥和钾肥施用量不变。同时,该处理水稻秸秆全部还田,并且每季施入833.3 kg·hm⁻²干猪粪用以补充收获籽粒所移出的养分。

1.2 土壤样品采集和团聚体分级

2010年12月下旬,晚稻收获后的冬闲时节,于3个田间重复小区内每个小区随机选取5个点,采集耕层0~15 cm原状土样组成一个混合样品,装入硬质塑料盒运回实验室。土样在风干过程中,沿其自然断裂面掰成10 mm左右的小块,同时挑出植物残根和砾石等。

土壤团聚体的分离采用湿筛法^[21]。称取100g风干土,置于孔径为2mm的筛子上,浸在蒸馏水中10 min,然后将土样依次通过孔径为1 mm、0.25 mm和0.053 mm的筛子。团聚体的分离通过上下移动筛子50次(2 min内)进行,摆幅为3 cm。<0.053 mm的团聚体通过沉降和离心获得。收集各级筛子上的团聚体,然后重复以上操作,直至筛分后得到的团聚体足够用于有机碳矿化试验。

1.3 测定项目与方法

用湿筛法分离红壤水稻土团聚体,有机碳和全氮在筛分过程中并未有明显损失^[22]。全土和团聚体的有机碳含量采用高温外加热重铬酸钾氧化-容量法测定,全氮含量用凯氏消煮法测定^[23]。

调节全土(过2 mm筛)和各粒级团聚体的含水量至土壤田间饱和持水量的60%,然后放入25℃恒温培养箱中预培养一周以恢复微生物活性,供土壤有机碳矿化研究。

采用室内恒温培养、碱液吸收法测定培养过程中土壤有机碳的矿化量^[24]。称取相当于风干土样20 g的预培养全土和团聚体,其含水量仍调节为田间饱和持水量的60%,置于500 mL塑料培养瓶中平铺在瓶底部。然后,将盛有5 mL 0.3 mol·L⁻¹ NaOH溶液的特制吸收瓶置于培养瓶内用于吸收土壤呼吸产生的CO₂。同时设置装有相同体积NaOH溶

液的培养瓶作为试验空白。将培养瓶加盖密封好，分别在15℃、25℃和35℃的恒温箱中避光培养。在培养的第1、3、5、7、14、21、28和35天取出吸收瓶，将吸收瓶中的溶液全部洗至玻璃三角瓶中，加入2 mL 1 mol L⁻¹的BaCl₂溶液和2滴酚酞指示剂，然后用盐酸（约0.075 mol L⁻¹）滴定至红色消失。根据消耗盐酸的量计算气体CO₂-C的释放量。

1.4 数据处理与分析

团聚体有机碳矿化对全土有机碳矿化的贡献通过如下公式进行计算：

某一粒级团聚体有机碳矿化对全土有机碳矿化的贡献率（%）=

该粒级团聚体有机碳矿化量 × 该粒级团聚体含量 / 全土有机碳矿化量 × 100

土壤有机碳矿化温度敏感性系数 Q_{10} ，即温度每升高10℃时土壤有机碳矿化速率增加的倍数。计算方法为：

$$R = ae^{bT}$$

$$Q_{10} = e^{10b}$$

式中， R 为土壤有机碳矿化速率； T 为培养温度； a 为温度为0℃时的土壤净矿化速率； b 为温度反应系数^[25]。

采用SPSS18.0软件进行单因素方差分析和相关性分析，显著性水平为 $P < 0.05$ 。用Origin 9.0软件进行绘图。

2 结果

2.1 团聚体分布及其中有机碳和全氮含量的变化

>2 mm和0.25 ~ 1 mm团聚体占全土的比例最高，在30%左右，其次为1 ~ 2mm和0.053 ~ 0.25 mm团聚体，约占全土的14%，<0.053 mm团聚体含量最低，占全土的10.6%（表1）。有机碳含量在1 ~ 2 mm团聚体中最高，为13.16 g·kg⁻¹，在0.053 ~ 0.25 mm团聚体中最低，仅为7.93 g·kg⁻¹，前者是后者的1.66倍。全氮含量在团聚体中的分布规律与有机碳基本一致，仍表现为1 ~ 2 mm团聚体最高（1.20 g·kg⁻¹），0.053 ~ 0.25 mm团聚体最低（0.78 g·kg⁻¹），前者是后者的1.54倍。>0.25 mm大团聚体中有机碳和全氮含量均高于<0.25 mm微团聚体。全土有机碳和全氮含量略低于1 ~ 2 mm团聚体而高于其余粒级团聚体。不同粒级团聚体中碳氮比为9.08 ~ 11.82，表现为随团聚体粒级减小而降低。

表1 不同粒级土壤团聚体中有机碳和全氮含量及碳氮比

Table 1 Contents of organic C and total N and C/N ratio in soil aggregates relative to particle size

全土/团聚体粒级 Bulk soil/Aggregate size /mm	质量百分比 Mass percentage /%	有机碳 Organic C /(g·kg ⁻¹)	全氮 Total N (g·kg ⁻¹)	碳氮比 C/N
全土 Bulk soil	100	12.63 ± 0.48	1.18 ± 0.07	10.69 ± 0.52
>2	32.52 ± 2.97a	12.51 ± 0.92ab	1.07 ± 0.14a	11.82 ± 1.37a
1 ~ 2	13.90 ± 0.10c	13.16 ± 0.82a	1.20 ± 0.09a	11.01 ± 0.18ab
0.25 ~ 1	28.52 ± 1.44b	11.28 ± 0.68b	1.05 ± 0.06a	10.74 ± 0.10ab
0.053 ~ 0.25	14.50 ± 1.33c	7.93 ± 0.74d	0.78 ± 0.07b	10.18 ± 0.58bc
<0.053	10.56 ± 0.12d	9.80 ± 0.23c	1.08 ± 0.07a	9.08 ± 0.50c

注：同列小写字母不同表示团聚体粒级间差异显著（ $P < 0.05$ ） Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference between aggregate fractions at 0.05 level

2.2 团聚体有机碳矿化动态及累积矿化量

培养过程中土壤各粒级团聚体有机碳矿化速率随时间的变化如图1所示。三种培养温度下，无论是全土还是团聚体，培养前期有机碳矿化速率均快速下降，至培养第7天，土壤有机碳矿化速率分

别为开始时的38.2%、53.9%和59.6%；其后有机碳矿化速率缓慢下降，直至培养结束时达到稳定状态，此时有机碳矿化速率分别为开始时的23.3%、26.3%和31.6%。随培养温度的升高，全土和各粒级团聚体有机碳矿化速率均显著增加。同一培养

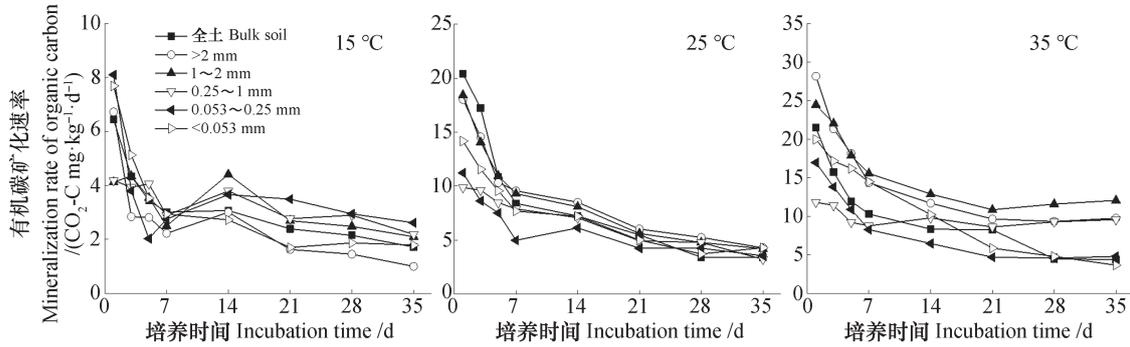


图1 不同培养温度下全土和团聚体有机碳矿化速率动态变化

Fig. 1 Dynamics of organic C mineralization in bulk soil and soil aggregates under incubation relative to temperature

温度条件下，不同粒级团聚体有机碳矿化速率之间的差异随培养时间不断变化，因此通过培养35d后团聚体中有机碳累积矿化量来进行进一步分析和比较。

不同粒级团聚体之间有机碳累积矿化量的差异受培养温度的影响（图2）。15 °C培养时，>2 mm团聚体有机碳累积矿化量最低，全土有机碳累积矿化量与<2 mm团聚体粒级相当；25 °C和35 °C培养时，>1 mm两个粒级团聚体有机碳累积矿化量最高，其次为0.25 ~ 1mm和<0.053 mm团聚体，0.053 ~ 0.25 mm 团聚体最低，全土有机碳累积矿化量高于<1 mm团聚体但低于>1 mm团聚体粒级。

培养温度升高，全土和各粒级团聚体有机碳累积矿化量显著提高。培养温度从15 °C升高至25 °C，全土有机碳累积矿化量提高142.0%，各粒级团聚体平均提高122.9%；温度由25 °C升到35 °C，全土有机碳累积矿化量提高52.3%，各粒级团聚体平均提高55.6%。由此来看，在较低的温度范围内，升温对有机碳矿化的促进作用更大。对于有机碳累积矿化率，不同粒级团聚体之间及全土和团聚体之间没有明显的变化规律。培养温度从15 °C至25 °C并进一步增至35 °C，全土有机碳累积矿化率依次提高143.3%和53.0%，各粒级团聚体则分别平均提高122.7%和56.0%。

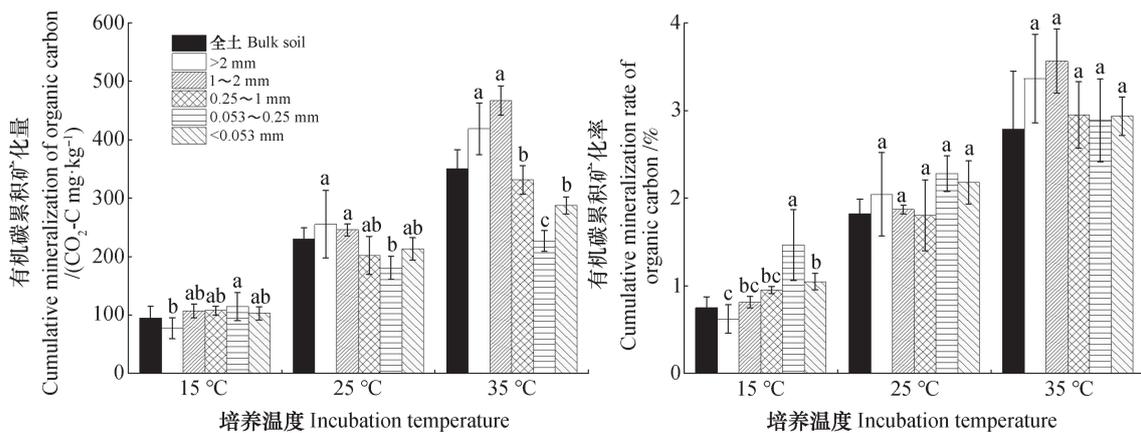


图2 不同培养温度下全土和团聚体有机碳累积矿化量和矿化率

Fig. 2 Cumulative mineralization and mineralization rate of organic C in bulk soil and soil aggregates under incubation relative to temperature

2.3 团聚体对全土有机碳矿化的贡献

三种温度条件下，各粒级团聚体对全土有机碳矿化贡献率的总和分别为105.8%、97.1%和107.8%，表明用湿筛分离法得到的团聚体进行有

机碳矿化研究是合理且可行的（图3）。同一粒级团聚体对土壤有机碳矿化贡献率随温度的变化并未表现出较为明显的规律。所有培养温度下，>2 mm和0.25 ~ 1 mm团聚体对全土有机碳矿化的贡

献率最大, 分别平均为34.6%和28.8%, <0.053 mm团聚体的贡献率最小, 平均为10.2%, 1~2 mm和0.053~0.25 mm团聚体对全土有机碳矿化的贡献率分别平均为16.8%和13.2%。>0.25 mm大团聚体对全土有机碳矿化的贡献率可达80.2%, 而微团聚体的贡献率仅为20.4%。

2.4 团聚体有机碳矿化的温度敏感性

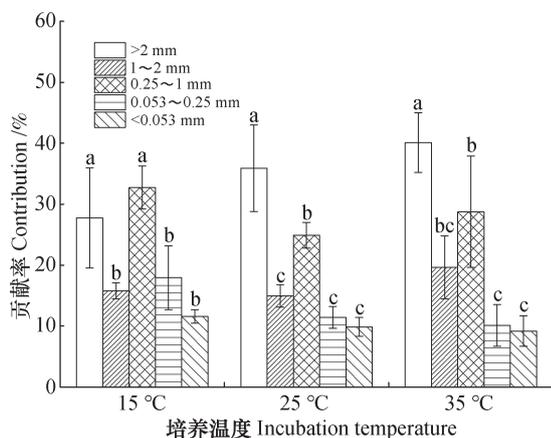


图3 不同粒径团聚体有机碳矿化对全土有机碳矿化的贡献
Fig. 3 Contribution of soil aggregates to organic C mineralization in bulk soil relative to particle size

2.5 团聚体有机碳矿化与土壤养分性质的关系

团聚体有机碳累积矿化量和温度敏感性系数 Q_{10} 与有机碳、全氮含量和碳氮比的相关性分析结果表明, 15 °C下有机碳累积矿化量与碳氮比显著

温度变化对土壤有机碳矿化速率的影响多用温度敏感性系数 Q_{10} 来衡量。全土有机碳矿化的 Q_{10} 值为1.75, 不同粒径团聚体有机碳矿化的 Q_{10} 值介于1.38~2.00之间(图4)。其中, >2 mm和1~2 mm团聚体有机碳矿化的 Q_{10} 值最高, 其次为0.25~1 mm和<0.053 mm团聚体, 0.053~0.25 mm团聚体有机碳矿化的 Q_{10} 值最低。

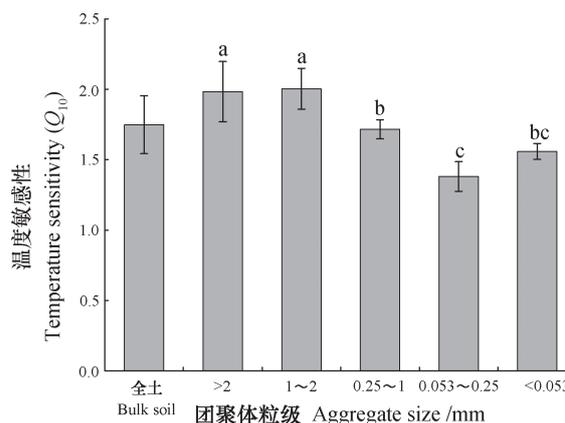


图4 全土和团聚体有机碳矿化的温度敏感性系数 Q_{10}
Fig. 4 Q_{10} of organic C mineralization in bulk soil and soil aggregates

负相关, 25 °C和35 °C时有机碳累积矿化量与有机碳和全氮显著或极显著正相关(表2)。有机碳矿化温度敏感性系数 Q_{10} 与有机碳、全氮和碳氮比均呈极显著的正相关关系。

表2 团聚体有机碳累积矿化量和 Q_{10} 与有机碳、全氮及碳氮比的相关性

Table 2 Correlation coefficients of cumulative organic C mineralization and Q_{10} with organic C content, total N content and C/N ratio in soil aggregates

项目 Item	累积矿化量 Cumulative organic C mineralization			Q_{10}
	15 °C	25 °C	35 °C	
有机碳 Organic C	-0.376	0.616*	0.861**	0.812**
全氮 Total N	-0.093	0.654**	0.703**	0.650**
碳氮比 C/N	-0.594*	0.102	0.493	0.726**

*, $P < 0.05$; **, $P < 0.01$

3 讨论

在本研究中, >2 mm团聚体含量为32.5%, 低于在较高肥力地区建立的长期施肥试验^[8]或同一地区高肥力^[9]的红壤性水稻土。红壤性水稻土的

大团聚体形成主要依靠有机质的胶结作用^[26]。红壤荒地开垦种稻并且施有机无机肥20年, 有机碳和全氮的含量仅为12.6 g·kg⁻¹和1.18 g·kg⁻¹, 而当地高产水稻土有机碳和全氮的含量(0~10 cm)为20.2 g·kg⁻¹和2.09 g·kg⁻¹^[27]。因此, 较低的有机

质含量不利于较大粒级团聚体的形成。有机碳和全氮在不同粒级团聚体中的分布差异较大,且 >0.25 mm大团聚体较 <0.25 mm微团聚体含有更多的有机碳和全氮,这与前人的许多报道是一致的^[8,10,12]。碳氮比可以反映有机物的腐殖化程度,即有机质的质量,碳氮比越高,有机物的腐解程度就越低,反之亦然^[28-29]。郭素春等^[30]对潮土团聚体有机碳分子结构的研究发现,随着团聚体粒级减小,烷基碳(抗分解有机碳,容易吸附在黏粒上)与烷氧碳(最容易分解的有机碳)的比值逐渐提高,且与碳氮比呈显著负相关。本研究中,团聚体的碳氮比表现为随粒级的减小而降低,表明小粒级团聚体中的有机质腐解程度较高,更难被微生物分解利用,而大团聚体则与之相反。

土壤有机碳矿化速率的大小表示有机碳分解的快慢程度,其随时间的变化趋势与有机碳组成的变化密切相关^[3]。培养前期,土壤中的活性有机碳较多,被微生物分解利用后释放出大量的 CO_2 ,有机碳矿化速率较高;随着培养时间的延长,土壤中的活性碳库被消耗,微生物开始利用缓效性碳库,可利用的有效碳源逐渐减少,导致有机碳矿化速率减慢并最终趋于平稳。这种有机碳分解先快后慢的变化特征在全土有机碳矿化研究中均有报道^[3-6],本研究中,团聚体有机碳矿化也表现出同样的趋势,反映出团聚体有机碳矿化(部分)与全土有机碳矿化(整体)变化规律上的一致性。

土壤中微生物可利用底物的含量是影响有机碳矿化的重要决定因素,不同粒级团聚体有机碳累积矿化量受有机碳和全氮含量的影响。 25°C 和 35°C 培养时,不同粒级团聚体中有机碳累积矿化量的差异与有机碳和全氮的分布近似,相关性分析也表明团聚体有机碳累积矿化量与有机碳和全氮显著或极显著正相关。吴萌等^[6]对不同类型水稻土有机碳矿化的研究也发现,有机碳累积矿化量与有机碳和全氮密切相关。然而, 15°C 培养时团聚体有机碳累积矿化量与有机碳和全氮含量并无显著关联,这可能是由于在供试土壤较低的肥力水平下,团聚体中微生物活性易受低温环境抑制,团聚体提供的有效碳源已经超过微生物活动的需求。作为全土有机碳矿化的一部分,某一粒级团聚体含量及其中有机碳累积矿化量决定着其在有机碳矿化中发挥的作用^[12]。本研究中, >2 mm和 $0.25\sim 1$ mm团聚体含

量最高,且其中有机碳累积矿化量也不低,因此对全土有机碳矿化的贡献率最大。 >0.25 mm大团聚体对全土有机碳矿化的贡献率平均为 80.2% ,约是 <0.25 mm微团聚体的4倍,在全土有机碳矿化中发挥主导作用,这也更进一步证明了红壤性水稻土中大团聚体是有机碳的主要载体^[22,29]。

随培养温度升高,全土和各粒级团聚体有机碳矿化速率、累积矿化量和矿化率均显著增加。这一方面是由于一定程度的温度升高对微生物生长和繁殖有利,微生物活性提高^[31]。另一方面,一定温度范围内,升温使得参与有机质分解的土壤酶活性增强^[32]。研究表明,温度由 25°C 增加至 30°C ,与土壤有机碳转化密切相关的转化酶、纤维素酶、淀粉酶和蛋白酶活性均增加,且转化酶的温度敏感性最大^[33]。因此,在适度的温度范围内,随全土和团聚体中土壤微生物和酶活性的增加,有机碳分解过程加剧,矿化作用增强。

Q_{10} 值反映土壤有机碳矿化速率对温度的敏感性。湖南省三个长期定位施肥监测点水稻土的 Q_{10} 值变化范围为 $1.01\sim 1.53$ ^[4],三种不同黏粒含量的水稻土(砂壤土、壤黏土、粉黏土) Q_{10} 值为 $1.92\sim 2.37$ ^[34]。江苏句容稻麦轮作的典型潜育、潜育、淹育水稻土的 Q_{10} 值则为 $1.48\sim 2.88$ ^[35]。本研究中,江西鹰潭开垦自红壤荒地水稻土全土的 Q_{10} 值为 1.75 ,团聚体的 Q_{10} 值为 $1.38\sim 2.00$,在已有报道的水稻土有机碳矿化温度敏感性范围之内。

理论上,当土壤有机质含量越高,有机碳矿化速率越大时,有机碳矿化的温度敏感性应该越低^[36-37],但目前关于土壤有机碳矿化温度敏感性系数 Q_{10} 与有机碳关系的研究结果并非如此。有研究发现土壤有机碳矿化的 Q_{10} 值与有机质数量大小并不存在对应关系^[5],而有的研究却指出 Q_{10} 值与土壤有机碳及碳组分(易氧化有机碳、胡敏酸碳和富里酸碳)呈显著正相关^[4]。王菁等^[17]对黄棕壤人工林地的研究表明, Q_{10} 值与土壤有机碳、全氮含量的变化规律基本一致。本文对红壤性水稻土团聚体有机碳矿化的研究则发现, Q_{10} 值与有机碳和全氮含量及反映有机物质量的碳氮比均极显著正相关。因此,团聚体有机碳矿化对温度响应的敏感度与有机质的数量和质量间存在密切关联。

4 结 论

团聚体有机碳矿化速率在培养前期快速下降,后期逐渐降低并最终达到稳定状态。25℃和35℃培养团聚体有机碳累积矿化量与有机碳和全氮含量显著或极显著正相关。>2 mm和0.25~1 mm团聚体对全土有机碳矿化的贡献最大,>0.25mm大团聚体在红壤性水稻土有机碳矿化中发挥主导作用。在当前的温度范围内,升温提高了团聚体有机碳矿化速率、累积矿化量和矿化率,促进了红壤性水稻土团聚体有机碳的矿化。不同粒级团聚体有机碳矿化的温度敏感性系数 Q_{10} 与有机碳、全氮和碳氮比相关性极显著,团聚体有机碳矿化的温度敏感性与有机质的数量和质量密切相关。

参 考 文 献

- [1] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 2004, 304 (5677): 1623—1627
- [2] 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. *土壤学报*, 2004, 41 (4): 544—552
- Li Z P, Zhang T L, Chen B Y. Dynamics of soluble organic carbon and its relation to mineralization of soil organic carbon (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41 (4): 544—552
- [3] 朱凌云, 潘剑君, 张威. 祁连山不同海拔土壤有机碳库及分解特征研究. *环境科学*, 2013, 34 (2): 668—675
- Zhu L Y, Pan J J, Zhang W. Study on soil organic carbon pools and turnover characteristics along an elevation gradient in Qilian Mountain (In Chinese). *Environmental Science*, 2013, 34 (2): 668—675
- [4] 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. *应用生态学报*, 2014, 25 (5): 1340—1348
- Lin S, Chen T, Zhao J S, et al. Characteristics of soil organic carbon mineralization at different temperatures in paddy soils under long-term fertilization (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25 (5): 1340—1348
- [5] 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. *水土保持学报*, 2015, 29 (3): 130—135
- Wu J H, Pan J J, Ge X J, et al. Variations of soil organic carbon mineralization and temperature sensitivity under different land use types (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29 (3): 130—135
- [6] 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. *中国农业科学*, 2016, 49 (9): 1705—1714
- Wu M, Li Z P, Feng Y Z, et al. Dynamic differences of organic carbon mineralization in different types of paddy soil under long-term located fertilization (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49 (9): 1705—1714
- [7] 刘中良, 宇万太. 土壤团聚体中有机碳研究进展. *中国生态农业学报*, 2011, 19 (2): 447—455
- Liu Z L, Yu W T. Review of researches on soil aggregate and soil organic carbon (In Chinese). *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19 (2): 447—455
- [8] 陈惟财, 王凯荣, 谢小立. 长期不同施肥处理对红壤性水稻土团聚体中碳、氮分布的影响. *土壤通报*, 2009, 40 (3): 523—528
- Chen W C, Wang K R, Xie X L. Effects on distributions of carbon and nitrogen in a reddish paddy soil under long-term different fertilization treatments (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 2009, 40 (3): 523—528
- [9] 刘晓利, 何园球, 李成亮, 等. 不同利用方式和肥力红壤中水稳性团聚体分布及物理性质特征. *土壤学报*, 2008, 45 (3): 459—465
- Liu X L, He Y Q, Li C L, et al. Distribution and physical properties of soil water-stable aggregates in red soils different in land use and soil fertility (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45 (3): 459—465
- [10] 王勇, 姬强, 刘帅, 等. 耕作措施对土壤水稳性团聚体及有机碳分布的影响. *农业环境科学学报*, 2012, 31 (7): 1365—1373
- Wang Y, Ji Q, Liu S, et al. Effects of tillage practices on water-stable aggregation and aggregate-associated organic C in soils (In Chinese). *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31 (7): 1365—1373
- [11] Yu H Y, Ding W X, Luo J F, et al. Effects of long-term compost and fertilizer application on stability of aggregate-associated organic carbon in an intensively cultivated sandy loam soil. *Biology and Fertility of Soils*, 2012, 48 (3): 325—336
- [12] 郝瑞军, 李忠佩, 车玉萍, 等. 好气与淹水条件下水稻土各粒级团聚体有机碳矿化量. *应用生态学报*,

- 2008, 19 (9) : 1944—1950
Hao R J, Li Z P, Che Y P, et al. Organic carbon mineralization in various size aggregates of paddy soil under aerobic and submerged conditions (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19 (9) : 1944—1950
- [13] Jastrow J D. Soil aggregate formation and the accrual of particulate and mineral-associated organic matter. *Soil Biology & Biochemistry*, 1996, 28 (4/5) : 665—676
- [14] 张东秋, 石培礼, 张宪洲. 土壤呼吸主要影响因素的研究进展. *地球科学进展*, 2005, 20 (7) : 778—785
Zhang D Q, Shi P L, Zhang X Z. Some advances in the main factors controlling soil respiration (In Chinese). *Advances in Earth Science*, 2005, 20 (7) : 778—785
- [15] Fang C, Moncrieff J B. The dependence of soil CO₂ efflux on temperature. *Soil Biology & Biochemistry*, 2001, 33 (2) : 155—165
- [16] Giardina C P, Ryan M G. Evidence that decomposition rates of organic carbon in mineral soil do not vary with temperature. *Nature*, 2000, 404: 858—860
- [17] 王菁, 陈防, 刘毅. 不同粒级土壤团聚体呼吸特征及其对碳排放的贡献. *植物科学学报*, 2014, 32 (6) : 586—593
Wang J, Chen F, Liu Y. Respiration characteristics of different sized soil aggregates and their contribution to carbon emissions (In Chinese). *Plant Science Journal*, 2014, 32 (6) : 586—593
- [18] 李庆远. 中国水稻土. 北京: 科学出版社, 1992
Li Q K. *Paddy soils of China* (In Chinese). Beijing: Science Press, 1992
- [19] 龚子同. 中国土壤系统分类: 理论方法实践. 北京: 科学出版社, 1999
Gong Z T. *Chinese soil taxonomy: Theory, method, and practice* (In Chinese). Beijing: Science Press, 1999
- [20] 侯红乾, 刘秀梅, 刘光荣, 等. 有机无机肥配施比例对红壤稻田水稻产量和土壤肥力的影响. *中国农业科学*, 2011, 44 (3) : 516—523
Hou H Q, Liu X M, Liu G R, et al. Effect of long-term located organic-inorganic fertilizer application on rice yield and soil fertility in red soil area of China (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44 (3) : 516—523
- [21] Elliott E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen and phosphorus in native and cultivated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1986, 50 (3) : 627—633
- [22] 陈晓芬, 李忠佩, 刘明, 等. 不同施肥处理对红壤水稻土团聚体有机碳、氮分布和微生物生物量的影响. *中国农业科学*, 2013, 46 (5) : 950—960
Chen X F, Li Z P, Liu M, et al. Effects of different fertilizations on organic carbon and nitrogen contents in water-stable aggregates and microbial biomass content in paddy soil of subtropical China (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46 (5) : 950—960
- [23] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000
Lu R K. *Analytical methods for soil and agro-chemistry* (In Chinese). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000
- [24] 李忠佩, 吴晓晨, 陈碧云. 不同利用方式下土壤有机碳转化及微生物群落功能多样性变化. *中国农业科学*, 2007, 40 (8) : 1712—1721
Li Z P, Wu X C, Chen B Y. Changes in transformation of soil organic carbon and functional diversity of soil microbial community under different land use patterns (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40 (8) : 1712—1721
- [25] Luo Y Q, Wan S Q, Hui D F, et al. Acclimatization of soil respiration to warming in a tall grass prairie. *Nature*, 2001, 413: 622—625
- [26] Zhang B, Horn R. Mechanisms of aggregate stabilization in Ustisols from subtropical China. *Geoderma*, 2001, 99 (1/2) : 123—145
- [27] 李忠佩, 张桃林, 陈碧云. 江西余江县高产水稻土有机碳和养分含量变化. *中国农业科学*, 2006, 39 (2) : 324—330
Li Z P, Zhang T L, Chen B Y. Changes of organic carbon and nutrient contents in highly productive paddy soils in Yujiang County of Jiangxi Province (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39 (2) : 324—330
- [28] 李江涛, 张斌, 彭新华, 等. 施肥对红壤性水稻土颗粒有机物形成及团聚体稳定性的影响. *土壤学报*, 2004, 41 (6) : 913—917
Li J T, Zhang B, Peng X H, et al. Effects of fertilization on particulate organic matter formation and aggregate stability in paddy soil (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41 (6) : 913—917
- [29] 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. *土壤*, 2007, 39 (5) : 787—793
Guo J H, Chen X Y, Liu M Q, et al. Effects of fertilizer management practice on distribution of

- aggregates and content of organic carbon and nitrogen in red paddy soil (In Chinese). *Soils*, 2007, 39 (5): 787—793
- [30] 郭素春, 郁红艳, 朱雪竹, 等. 长期施肥对潮土团聚体有机碳分子结构的影响. *土壤学报*, 2013, 50 (5): 922—930
- Guo S C, Yu H Y, Zhu X Z, et al. Effect of long-term fertilization on molecular structure of organic carbon in soil aggregates in fluvo-aquic soil (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50 (5): 922—930
- [31] Kirschbaum M U F. The temperature dependence of organic-matter decomposition—still a topic of debate. *Soil Biology & Biochemistry*, 2006, 38 (9): 2510—2518
- [32] Rustad L E, Campbell J L, Marion G M, et al. A meta-analysis of the response of soil respiration, net nitrogen mineralization, and aboveground plant growth to experimental ecosystem warming. *Oecologia*, 2001, 126 (4): 543—562
- [33] 韩玮, 孙晨曦, 苏敬. 模拟增温和酸雨对水稻土酶活性及温度敏感性的影响. *生态与农村环境学报*, 2017, 33 (12): 1117—1124
- Han W, Sun C X, Su J. Effects of elevated temperature and simulated acid rain on enzyme activity and temperature sensitivity of paddy soil (In Chinese). *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2017, 33 (12): 1117—1124
- [34] 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. *应用生态学报*, 2007, 18 (10): 2245—2250
- Ren X E, Tong C L, Sun Z L, et al. Effects of temperature on organic carbon mineralization in paddy soils with different clay content (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18 (10): 2245—2250
- [35] 葛序娟, 潘剑君, 邬建红, 等. 培养温度对水稻土有机碳矿化参数的影响研究. *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 (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 2015, 46 (3): 562—569
- [36] Sierra C A. Temperature sensitivity of organic matter decomposition in the Arrhenius equation: Some theoretical considerations. *Biogeochemistry*, 2012, 8 (1/3): 1—15
- [37] Conant R T, Ryan M G, Ågren G I, et al. Temperature and soil organic matter decomposition rates—synthesis of current knowledge and a way forward. *Global Change Biology*, 2011, 17 (11): 3392—3404

Mineralization of Soil Organic Carbon and Its Sensitivity to Temperature in Soil Aggregates, Relative to Particle Size in Red Paddy Soil

CHEN Xiaofen¹ LIU Ming^{1,2} JIANG Chunyu¹ WU Meng¹ JIA Zhongjun^{1,2} LI Zhongpei^{1,2†}

(1 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract 【Objective】 Soil organic carbon (C) is distributed heterogeneously in soil aggregates of all size particles. Organic C mineralization is an important biochemical process in the soil ecosystem and is greatly affected by environmental factors, such as temperature. The objective of this study is to illuminate relationship of organic C mineralization in aggregates with that in bulk soil, to evaluate sensitivity of organic C mineralization in soil aggregates to temperature relative to particle size and eventually to help understand mechanisms of the organic C mineralization in soil aggregates and its sensitivity to temperature. 【Method】 The soil used in this study was collected from a paddy field of red soil fertilized with inorganic and organic manure for 20 years in Yujiang Country, Jiangxi Province, China. Five fractions of aggregates, i.e., >2 mm, 1 ~ 2 mm, 0.25 ~ 1 mm, 0.053 ~ 0.25 mm and <0.053 mm, were isolated with the wet-sieving technique. All the aggregates and bulk soil samples were moistened or dried till they reached 60% in water holding

capacity and incubated at 15 °C, 25 °C and 35 °C, separately, for 35 d. Emissions of carbon dioxide (CO₂) were monitored and measured during this period. 【 Result 】 Macroaggregates of >0.25 mm contained more organic C and total nitrogen (N) than microaggregates of <0.25 mm. C/N ratio in soil aggregates decreased with declining particle size. Mineralization rates of organic C in both bulk soil and soil aggregates decreased rapidly during the first 7 days of incubation, then gradually leveled off till a stable state in the end. In the soils incubated at 25 °C and 35 °C, the fraction of soil aggregates >1 mm was the highest while the fraction of soil aggregates 0.053 ~ 0.25 mm was the lowest in cumulative organic C mineralization. What's more, cumulative organic C mineralization in soil aggregates was significantly or ultra-significantly and positively related to the content of organic C and total N. The fractions, >2 mm and 0.25 ~ 1 mm, contributed the most to cumulative bulk soil organic C mineralization, reaching up to 34.6% and 28.8%, respectively, in contribution rate. With rising temperature, mineralization rate, cumulative mineralization and cumulative mineralization rate of organic C in bulk soil and aggregates all increased. Sensitivity of organic C mineralization (Q_{10}) in soil aggregates to temperature varied in the range of 1.38 ~ 2.00, and was ultra-significantly and positively related to organic C and total N contents as well as C/N ratio. 【 Conclusion 】 Macroaggregates of >0.25 mm play a key role in organic C mineralization in bulk soil. Temperature rise promotes organic C mineralization in soil aggregates. Sensitivity of organic C mineralization to temperature in soil aggregates is closely related to quantity and quality of organic matter in the aggregates.

Key words Temperature; Red paddy soil; Aggregates; Organic carbon mineralization

(责任编辑：卢 萍)