

不同有机厩肥输入量对土壤团聚体有机碳组分的影响*

刘中良^{1,2} 宇万太^{1†} 周 桦¹ 马 强¹

(1 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 土壤是重要的有机碳库, 其微小变化可能引起大气CO₂浓度水平的较大变异。土壤团聚体对土壤有机碳具有物理保护作用。有机厩肥的输入既可以提高土壤有机碳含量, 又可以促进土壤团聚体的形成, 对土壤有机碳的截获和保持有重要意义。本实验采用湿筛的方法分离土壤团聚体, 并对团聚体进行有机碳组分分离。通过对连续8年施加不同量有机厩肥试验的研究发现: 适量的有机厩肥施用可以显著提高土壤的平均质量直径(MWD), 改善土壤结构; 过量施用有机厩肥则明显降低了>2 000 μm团聚体含量。潮棕壤有机碳主要分布在250~53 μm和2 000~250 μm团聚体中, 两者相加约占有机碳全量的73.7%~78.5%。并且随着有机碳输入量的增加, 土壤有机碳主要贮存在2 000~250 μm团聚体中。有机厩肥的施加明显地加快了>2 000 μm团聚体的更新速率。土壤轻组分有机碳含量也随有机厩肥输入量的增加而不断增加, 高量有机厩肥下占全量的22.1%。土壤固定有机碳的能力有限, 存在明显的等级饱和现象。因此, 在有机质匮乏的土壤施用有机肥意义重大, 应尽量减少向高有机质土壤输入有机碳。

关键词 团聚体; 有机碳分组; 轻组分有机碳; 碳库饱和

中图分类号 S152.4⁺81 **文献标识码** A

全球土壤圈固定的有机碳大约为1 500 Pg^[1], 约是大气圈碳库的2倍。土壤有机碳库的微小变化可能引起大气CO₂浓度水平的较大变异, 因此土壤有机碳库的研究对全球变化研究具有重要意义^[1-3]。一般将土壤碳库分为易分解碳库和稳定性碳库^[4]。易分解碳库具有分解快、对土地管理方式和环境条件变化敏感等特点。因此, 易分解有机碳库在陆地生态系统中的短期C、N循环中起重要的作用^[5]。稳定性碳库对外界条件的变化不敏感, 对土壤有机碳的长期贮存和积累具有重要意义。因此寻求合理的经营方式提高土壤稳定性碳库含量, 可以有效地缓解温室效应。

研究发现, 较慢的大团聚体周转有利于大团聚体内部产生更多的微团聚体, 更有利于提高大团聚体的稳定性, 促进土壤有机碳的积累^[6]。大团聚体周转快, 使得易分解有机碳频繁地暴露在外, 易被微生物分解, 虽然有机碳的分解满足了作物吸收养分的需求, 但不利于土壤有机碳的积累。耕作措施对土壤大团聚体的周转速率影响很大^[6]。免耕可以有效地减少土壤扰动, 降低大团聚体的周转速率^[6]。但是也有研究发现, 经过5年的秸秆还田和耕作试验, 免耕处理下0~5 cm土层大于1 mm的大团聚体显著增加, 而5 cm以下(5~10、10~20、20~30 cm)则分别降低了59.9%、86.2%和69.7%^[7]。土壤亚表层有机质未得到有效补充可能是产生这种现象的主要原因^[8]。因此土壤有机质含量对大团聚体的形成至关重要。秸秆还田和施用有机厩肥是提高土壤有机质含量最有效的方法。有机厩肥含有大量的颗粒有机碳^[9], 施入土壤后经过短暂分解后作为有机胶结剂参与团聚体的形成^[10-12]。因此有机厩肥的施用对团聚体的形成与稳定有促进作用^[9]。

* 国家科技支撑计划课题(2008BADA7B08, 2007BAD89B02)和国家自然科学基金项目(40701067)资助

† 通讯作者, E-mail: wtyu@iae.ac.cn

作者简介: 刘中良(1986-), 男, 山东临沂人, 硕士研究生, 主要从事土壤团聚体固碳方面的研究。E-mail: liuzhongliang0616@sina.com, Tel: 024-83970421

收稿日期: 2010-11-11; 收到修改稿日期: 2011-04-06

一直以来对土壤的固碳潜力有激烈的讨论。大多数的有机碳模型认为土壤有机碳和外源碳输入呈线性关系^[13]，并且很多研究结果支持这一观点^[14-15]。然而，近年来越来越多的研究发现，土壤有机质含量并不能随碳输入量的增加而一直增加下去。Campbell等^[16]通过长达30年的定位研究发现，在有机碳含量丰富的土壤中，土壤有机碳含量并不随碳的输入而增加，而是稳定在某一特定值上。Chung等^[17]研究表明与碳输入量相比，本底土壤有机碳水平更能影响土壤对外源有机碳的固定。宇万太等^[18]根据黑土有机碳库的变化规律，提出在一定的的气候条件和农业管理措施下，土壤有机碳库存在一个稳定平衡点。Gulde等^[19]进一步提出，土壤对有机碳的固定存在一个饱和值，一旦达到此值，即使向土壤输入再多的碳，土壤有机碳含量也不会再增加。针对目前关于土壤固碳研究的实际情况，本实验通过研究不同有机氮肥施用量对土壤团聚体和有机碳分布的影响，进而阐明有机物质输入和土壤有机碳积累之间的关系，为土壤固碳措施的科学实施提供一定的理论依据和技术支撑。

1 材料与amp;方法

1.1 供试材料

试验在中国科学院沈阳生态试验站进行，试验区位于北纬41° 32'、东经122° 23'，属暖温带湿润-半湿润大陆季风气候，四季分明，雨热同季，年平均气温7~8℃，最高月（7月）平均气温24℃，最低月（1月）平均气温-13℃，大于10℃活动积温3 300~3 400℃，太阳总辐射为5 410~5 600 MJ m⁻² a⁻¹，无霜期147~164 d，年降雨量约700 mm。土壤初始时的基本理化性质见表1。

表1 试验地土壤主要理化性状

Table 1 Main physical and chemical properties of tested soil

土壤 Soil	全碳 Total C (g kg ⁻¹)	全氮 Total N (g kg ⁻¹)	全磷 Total P (g kg ⁻¹)	全钾 Total K (g kg ⁻¹)	速效磷 Avail. P (g kg ⁻¹)	速效钾 Avail. K (g kg ⁻¹)	pH
潮棕壤 Aquic brown soil	11.55	1.00	0.50	17.57	10.39	103.0	6.4

1.2 试验设计

本研究设4个处理：（1）不施肥（CK）；（2）施低量有机氮肥（M1）；（3）中量有机氮肥（M2）；（4）高量有机氮肥（M3）。平均每年有机肥施用量（干质量）分别为0、10、20、50 t hm⁻²。试验开始以来有机肥养分的平均含量分别为有机碳191.8 g kg⁻¹，全氮13.28 g kg⁻¹，全磷10.33 g kg⁻¹，全钾13.91 g kg⁻¹。每年春播之前一次性施入。试验始于2002年，3次重复，区组设计，小区面积为162 m²，轮作方式为大豆-玉米-玉米。

1.3 研究方法

1.3.1 样品采集 样品采自2009年10月秋收之后。采集表层0~15 cm土样，每个处理随机取3个样点混合为一个土样。田间采回的土样，用硬质铝盒带回。

1.3.2 土壤团聚体分级 团聚体的分级采用湿筛法^[20]。新鲜土样先过10 mm筛，自然风干后，依次过2 000、250和53 μm筛，具体操作为：称取大约100 g风干土置于2 000 μm的筛子上，迅速浸在室温下的蒸馏水中5 min，然后在2 min内上下摆动50次，摆幅为3 cm，将留在筛上的物质用蒸馏水洗至烧杯中，通过筛子的土和水进行下一级团聚体的分离，操作步骤同上。分离出的不同大小团聚体土样在60℃下烘干，称量，备用。

1.3.3 有机颗粒密度大小分离 游离轻组（free LF）、团聚体内的颗粒有机质（iPOM）和矿物结合态的有机质（mSOC）分离采用Six等方法^[12]。分离出的团聚体置于60℃烘箱中烘干，取出，移入干燥器中冷却至室温。具体操作为：称取10.0 g土样于50 ml离心管中，加入

35 ml密度为1.85 g cm⁻³的溴仿-乙醇溶液，左右晃动10次，如果10次不能使管中溶液变成悬液，增加晃动次数，而不是增加晃动速度或强度（为了避免团聚体的破坏），然后用10 ml溴仿-乙醇溶液将附着在管壁和管帽上的物质洗入管中，置于138 kPa的真空下（排出封闭在团聚体内的空气）10 min，平衡20 min，之后离心60 min，用0.45 μm滤膜进行真空抽滤，并用乙醇洗掉剩余的溴仿，将浮在滤膜上的物质蒸干、称量，进行有机碳测定。离心管中的重组部分先用乙醇冲洗数次，再用去离子水冲洗2次，加入0.5%六偏磷酸钠10 ml，在往复式振荡机上振荡18 h，分别过250 μm、53 μm筛分离POM，将所有留在筛子上的样品洗入烧杯，60℃下烘干，称量，进行有机碳测定。

1.3.4 有机碳测定 土壤有机碳含量及分离得到的各组分有机碳含量采用元素分析仪测定（Elementar II，德国），其原理是土壤有机碳在高温条件下燃烧释放出CO₂，并用TCD监测器检测其碳含量。

1.4 结果计算与统计分析

平均质量直径：

$$MWD = \sum_{i=1}^n x_i \times m_i \quad (1)$$

式中， x_i 为第*i*个筛子上团聚体的平均直径， m_i 为第*i*个筛子上颗粒百分比。

团聚体结合有机碳（Aggregate-associated organic C）= 团聚体有机碳（Aggregate organic C）- 游离轻组有机碳（free LF-C）(2)

矿物结合态有机碳（Mineral-associated organic C）= 团聚体结合有机碳（Aggregate-associated organic C）- 团聚体内颗粒有机碳（iPOM-C）(3)

所有测定结果用Excel进行整理和初步分析，用SPSS进行方差分析，多重比较采用LSD检验，显著水平（ $p < 0.05$ ）。

2 结果与分析

2.1 长期施用有机厩肥对土壤团聚体分布的影响

分析结果表明，不同量有机厩肥处理各粒级团聚体含量表现出相同的规律，250~53 μm团聚体含量最高，达到总量的54%~61%；<53 μm团聚体次之，占总量的19%~22%；>2 000 μm团聚体含量最低，仅为总量的4%~7%；2 000~250 μm团聚体含量因不同处理差别较大，占总量的11%~23%。所有>53 μm团聚体含量占土壤总量的78%~81%，其中M3>M2>M1>CK，且施肥处理和无肥处理差异显著，说明长期施用有机厩肥有利于土壤团聚体的形成。但是三种有机厩肥处理下团聚体（>53 μm）含量差异并未达到显著水平，说明当土壤有机质含量达到很高水平时，继续施加有机厩肥对土壤团聚体的形成不再具有明显的促进作用。

由表2可以看出，施肥处理影响土壤各粒级团聚体含量。其中对>2 000 μm团聚体形成影响显著，与不施肥处理相比，施中、低量有机厩肥可以明显促进>2 000 μm团聚体的形成，高量有机厩肥则明显降低了>2 000 μm团聚体的含量。施加高、低量有机厩肥对2 000~250 μm团聚体的形成具有明显的促进作用，高量有机厩肥促进作用尤为显著（ $p < 0.05$ ），中量有机厩肥对2 000~250 μm团聚体形成则没有显著影响。不同处理下微团聚体（250~53 μm）含量存在一定差别，高、低量有机厩肥处理微团聚体含量明显低于不施肥处理。

目前，人们多采用平均质量直径（MWD）作为评估土壤结构优劣的指标^[21]。MWD是基于不同直径团聚体的重量和大小拟定的，可用式（1）求得。MWD大小全方位地反映了土壤的团聚状况，MWD值越大说明土壤的团聚情况越好。不同施肥处理下，土壤团聚体

MWD差异明显, CK、M1、M2、M3处理MWD分别为562、705、721、581 μm 。由此可见, 有机厩肥的施加可以明显改善土壤结构, 中、低量有机厩肥的作用达到显著水平, 高量有机厩肥作用不明显。说明外源有机质的添加确实可以提高土壤团聚体的含量、改善土壤的物理结构, 但是当土壤有机质达到一定含量后, 继续增加有机质输入, 对土壤团聚化的促进作用减弱, 甚至会降低大团聚体的含量。

表2 不同施肥处理土壤团聚体的相对含量

Table 2 The relative content of aggregates in soils different in fertilization treatments

处理代号 Treatment code	团聚体相对含量 Composition of aggregates (%)				MWD (μm)
	>2 000 μm	2 000~250 μm	250~53 μm	<53 μm	
CK	5.27 \pm 0.41b	13.23 \pm 1.56c	59.93 \pm 3.92a	21.57 \pm 5.38a	561.5b
M1	6.99 \pm 0.44a	17.43 \pm 2.54b	55.78 \pm 5.08b	19.80 \pm 7.17b	705.0a
M2	7.53 \pm 0.72a	15.80 \pm 2.07c	57.13 \pm 2.65ab	19.54 \pm 3.26b	721.1a
M3	3.94 \pm 0.20c	22.89 \pm 5.35a	53.95 \pm 2.23b	19.22 \pm 3.06b	581.0a

注: 同一列中不同字母表示差异达到显著水平 ($p < 0.05$)。下同 Note: Different letters affixed to the data in the same column mean significant difference at $p < 0.05$. The same below

2.2 长期施用有机厩肥对团聚体有机碳含量的影响

长期施用有机厩肥有利于土壤有机碳的积累, 但不同粒级团聚体对此的反应不同。由结果分析可知, 土壤团聚体的有机碳含量一般存在以下规律: [2 000~250 μm 团聚体] > [>2 000 μm 团聚体] > [250~53 μm 团聚体] > [<53 μm 团聚体]。但在施加高量有机厩肥情况下则表现出明显不同的规律, 其中 [>2 000 μm 团聚体] > [2 000~250 μm 团聚体]。由表3可以看出, 三种有机厩肥处理下, 随施肥量的增加土壤各粒级团聚体有机碳含量均有所增加。与不施肥对照相比, 施低量有机厩肥各粒级团聚体有机碳含量没有显著变化, 施中、高量有机厩肥则导致 >2 000 μm 和2 000~250 μm 团聚体有机碳含量显著增加, 除此之外, 施高量有机厩肥还导致250~53 μm 团聚体有机碳含量显著增加。需要指出的是, <53 μm 团聚体有机碳含量随有机厩肥施入量的增加没有显著差异。

表3 不同施肥处理下团聚体有机碳含量

Table 3 Organic carbon content of aggregates in different treatments

处理代号 Treatment code	团聚体有机碳含量 Organic carbon content of aggregates (g kg^{-1})			
	>2 000 μm	2 000~250 μm	250~53 μm	<53 μm
CK	14.67 \pm 0.15c	16.21 \pm 1.21c	9.88 \pm 1.24b	9.74 \pm 1.76a
M1	16.97 \pm 1.59c	18.36 \pm 1.31c	10.89 \pm 0.24b	10.47 \pm 1.83a
M2	20.69 \pm 0.59b	24.56 \pm 2.51b	11.83 \pm 0.22ab	11.08 \pm 0.72a
M3	34.27 \pm 0.82a	27.93 \pm 0.20a	12.36 \pm 0.53a	11.60 \pm 0.86a

2.3 团聚体有机碳

在团聚体分离过程中, 通常会有一些与团聚体大小相同的游离颗粒有机物被筛分到各级团聚体中。通常情况下, 我们将这部分颗粒物有机碳也认为是团聚体有机碳的一部分。由于不同级别团聚体的胶结物质及作用强度不同, 与团聚体结合的有机碳受到的物理保护程度也不同, 为更好地说明团聚体对土壤有机碳的物理保护作用, 可以将团聚体有机碳进一步分离, 得到粗颗粒有机碳 (cPOC)、细颗粒有机碳 (fPOC)、游离轻组有机碳 (LF-C) 和矿物结合态有机碳 (MOM) ^[12]。由于土壤中水溶性有机碳的含量很低, 大约是土壤全碳含量的0.15%~0.19%^[22], 因此在团聚体有机碳组分的分离过程中可以不予考虑。因此, 得到式 (2) 和式 (3) ^[23]。

2.3.1 团聚体有机碳贮量 分析结果可以看出, 不同施肥处理下, 土壤有机碳主要储存在250~53 μm 和2 000~250 μm 团聚体中, 两者相加约占有机碳总量的73.7%~78.5%, 平均为

75.1%，其中高量有机厩肥处理占全量的78.5%。由表中还可以看出，施高量有机厩肥 $>2\ 000\ \mu\text{m}$ 团聚体有机碳贮量则呈下降趋势，这主要是由于 $>2\ 000\ \mu\text{m}$ 团聚体含量较低所致，而 $2\ 000\sim 250\ \mu\text{m}$ 团聚体有机碳贮量显著增加 ($p<0.05$)，分别是其他3种处理的2.52倍、2倍和1.65倍，说明高有机质土壤 $2\ 000\sim 250\ \mu\text{m}$ 团聚体是有机碳贮存的主要场所之一，也是土壤碳库饱和的重要指标。这与Chung等^[17]的研究结论相一致。而无论有机厩肥施入量如何变化， $250\sim 53\ \mu\text{m}$ 和 $<53\ \mu\text{m}$ 团聚体有机碳贮量均无显著变化。

表4 不同粒级团聚体有机碳贮量

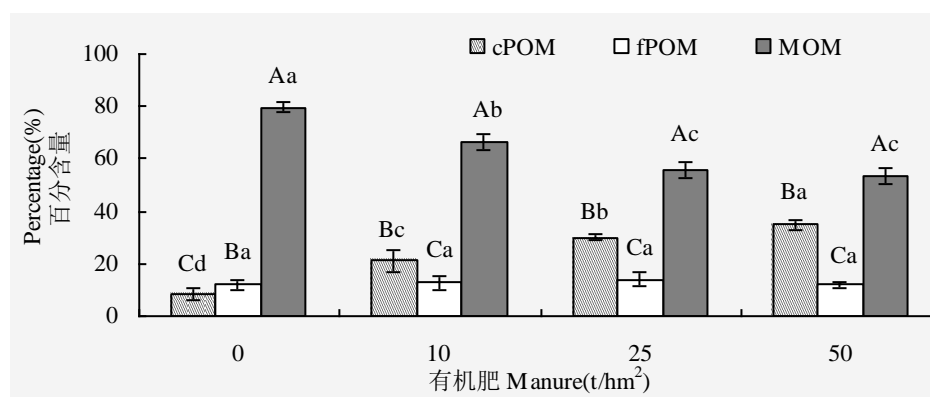
Table 4 Organic carbon storages in aggregates of different size fractions

处理代号 Treatment code	团聚体有机碳贮量 Storage of organic carbon in aggregates (C g kg^{-1} soil)							
	$>2\ 000\ \mu\text{m}$	占%	$2\ 000\sim 250\ \mu\text{m}$	占%	$250\sim 53\ \mu\text{m}$	占%	$<53\ \mu\text{m}$	占%
CK	0.78c	7.13	2.14c	19.56	5.92a	54.11	2.10a	19.20
M1	1.19b	9.49	3.20b	25.52	6.08a	48.48	2.07a	16.51
M2	1.56a	10.86	3.88b	27.02	6.76a	47.08	2.16a	15.04
M3	1.35ab	8.11	6.39a	38.40	6.67a	40.08	2.23a	13.40
平均 Average	1.22	8.90	3.90	27.63	6.36	47.44	2.14	16.04

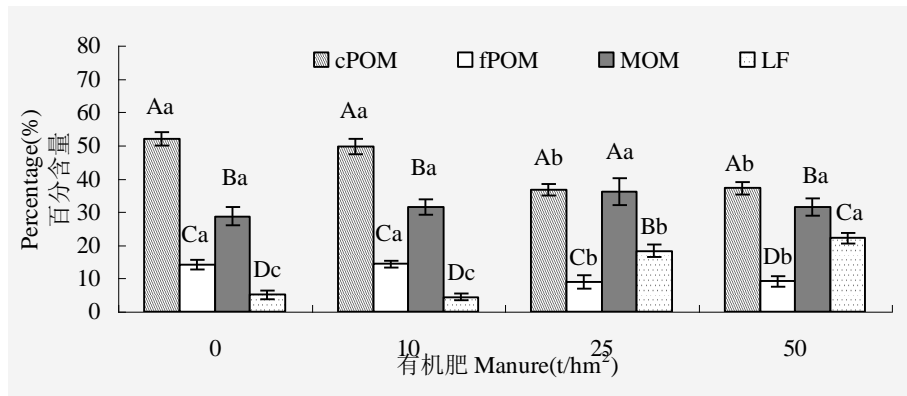
2.3.2 团聚体有机碳分组 由于 $>2\ 000\ \mu\text{m}$ 团聚体在全土中所占的百分含量很低 (3.94%~7.53%)，对这部分团聚体进行轻重组分的分离比较困难；在对 $250\sim 53\ \mu\text{m}$ 团聚体进行轻重组分分离过程中发现，其游离轻组分含量很低，很难准确测定。因此本文仅对 $2\ 000\sim 250\ \mu\text{m}$ 团聚体的游离轻组分有机碳进行分析。

如图1， $>2\ 000\ \mu\text{m}$ 团聚体有机碳主要以矿物结合态有机碳 (MOM) 的形式存在，占团聚体有机碳的50%以上，随着有机厩肥施入量的增加，粗颗粒有机碳 (cPOM) 百分含量显著增加，MOM显著降低，细颗粒 (fPOM) 有机碳则没有明显变化，不同处理之间的变异系数仅为4.34%。与之相反， $2\ 000\sim 250\ \mu\text{m}$ 团聚体内cPOM和fPOM有机碳百分含量则明显降低，LF有机碳百分含量则显著升高，MOM有机碳百分含量在中量有机厩肥处理下达到最高。轻重组分的分离可能是导致 $>2\ 000\ \mu\text{m}$ 和 $2\ 000\sim 250\ \mu\text{m}$ 团聚体有机碳组分百分含量有明显差异的原因。 $250\sim 53\ \mu\text{m}$ 团聚体有机碳仅由两部分组成：fPOM和MOM，随着有机厩肥施入量的增加fPOM有机碳百分含量明显升高，MOM随之降低。

(a) $>2\ 000\ \mu\text{m}$ 团聚体 $>2\ 000\ \mu\text{m}$ aggregates



(b) $2\ 000\sim 250\ \mu\text{m}$ 团聚体 $2\ 000\sim 250\ \mu\text{m}$ aggregates



(c) 250~53 μm团聚体 250~53 μm aggregates

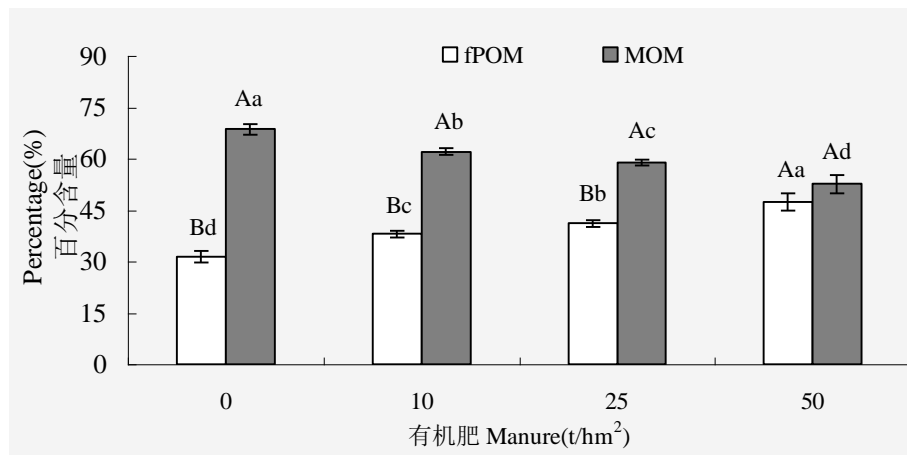


图1 团聚体内有机碳分组

Fig. 1 Organic carbon fractions in aggregates

注：不同小写字母表示同一团聚体粒度不同施肥处理之间差异显著 ($p < 0.05$)，不同大写字母表示同一施肥处理不同团聚体粒度之间差异显著 ($p < 0.05$)。下同 Note: Different small letters indicate significant difference among treatments at $p < 0.05$; different capital letters indicate significant difference among aggregates at $p < 0.05$. The same below

2.3.3 团聚体内fPOM/cPOM Six等^[23]认为土壤团聚体内fPOM/cPOM是衡量团聚体更新速率的重要指标。如图所示，随着有机厩肥施入量的增加， $> 2000 \mu\text{m}$ 团聚体内fPOM/cPOM明显降低， $2000 \sim 250 \mu\text{m}$ 团聚体内fPOM/cPOM变化不明显。

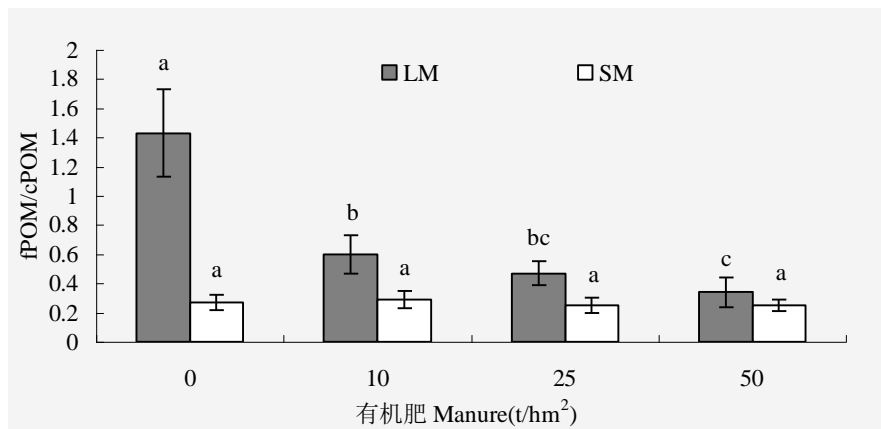


图2 团聚体内细颗粒有机碳和粗颗粒有机碳的比值

Fig. 2 Ratio of organic carbon in fine particles (250~53 μm) and coarse particles (>250 μm) within soil aggregates

注: LM=粗大团聚体 (>2 000 μm 团聚体); SM=细大团聚体 (2 000~250 μm 团聚体) Note: LM=Large macro-aggregates (>2 000 μm aggregates), SM=Small macro-aggregates (2 000~250 μm aggregate)

3 讨 论

土壤团聚体的形成与土壤有机碳含量有着密切的联系^[24]。有机厩肥的施用既可以直接提高土壤有机碳的含量,又可以促进生物生长、增加生物量。本试验结果显示(如表2),长期施用不同量有机厩肥对土壤团聚体的形成有明显的促进作用。与不施肥相比,施中、低量有机厩肥可以明显增加大团聚体的数量,提高土壤的MWD,有利于土壤结构的改善。有机厩肥施入土壤后,首先作为胶结剂参与团聚体的形成,增加土壤大团聚体的含量^[25]。当土壤大团聚体含量达到一定比例后,有机厩肥的施用不再单纯提高大团聚体的数量,大团聚体有机碳的含量也明显升高。所以说随着有机质的输入,先增加团聚体的数量后提高团聚体的质量^[26]即团聚体有机碳的含量。但是长期过量地施用有机厩肥并不能明显促进>2 000 μm 团聚体的形成。这可能是由于有机厩肥的施用明显降低了土壤容重和增加了土壤孔隙度^[27],导致微生物活性增强,促使更多的有机碳分解^[28],使得>2 000 μm 团聚体有机碳更新速度加快,2 000~250 μm 团聚体显著增高,从而不利于>2 000 μm 团聚体的形成。本研究还发现,潮棕壤下250~53 μm 团聚体是土壤有机碳的主要贮存场所,占有有机碳贮量的40.08%~54.11%,并且随有机厩肥施用量的增加,2 000~250 μm 团聚体有机碳的贮量也明显增加,高量有机肥处理下占有有机碳贮量的38.40%。Chen等^[29]通过研究不同施肥制度对东北黑土团聚体碳库的影响也发现,2 000~250 μm 团聚体有机碳占总贮量的52.69%~62.11%。说明在高有机质土壤下2 000~250 μm 团聚体对有机碳的贮存起重要作用。

土壤POM是土壤有机碳的重要组成部分,其分解速率小于新鲜植物残体,大于矿物结合态有机碳^[30]。降低POM的分解速率是提高土壤碳储量的重要途径。土壤团聚体对土壤有机碳的物理保护作用主要体现在对POM的保护上。很多研究表明,团聚体内POM周转速率明显低于游离POM^[31],因此增加大团聚体数量提高团聚体内POM含量,对土壤有机碳的固定具有重要意义。本研究发现(如图1),随着土壤碳输入量的增加,土壤内POM百分含量明显增加,表明土壤POM含量的增加是土壤碳截获和保持的重要途径。但是通过对2 000~250 μm 团聚体进行轻重组分分离发现,碳输入量的增加并未导致土壤重组POM(团聚体内POM)的增加,而导致土壤游离的轻组有机碳含量明显升高,而轻组分有机碳更容易被微生物分解。可见土壤包裹POM的能力有限,这也在一定程度上说明土壤碳饱和理论的可能性。

Six认为团聚体周转对有机碳的固定有着重要的作用,因为团聚体周转决定了团聚体内POM和游离有机碳的数量^[6,30]。如果团聚体周转慢,团聚体内粗POM会进一步分解为细POM^[16]。所以Six认为团聚体内细POM与粗POM的比值会随团聚体周转速率减小而升高,并将其作为衡量团聚体周转速率的指标^[6]。研究结果显示(如图2),随着有机厩肥输入量的增加,>2 000 μm 团聚体内fPOM与cPOM的比值明显降低,表明碳输入量的增加,加速了土壤>2 000 μm 团聚体的更新。而徐江兵等^[32]在研究不同施肥处理对旱地红壤团聚体影响时则发现有有机肥的施入降低了大团聚体的周转速率。得出以上两种截然相反结论的原因可能与土壤自身的有机碳水平有关。

Kool^[33]在团聚体的等级发育模型^[24-25]基础上,提出土壤有机碳的等级饱和模型,指出土壤碳浓度与碳输入呈非线性相关,随着碳输入的增加最小粒级的团聚体首先饱和,最大粒级的团聚体最后饱和,最终土壤碳库饱和。Gulde等^[19]进一步证实了这一理论。本研究结果

也支持了这种饱和机制。由表3可以看出, 随有机厩肥输入量的增加, $<53\ \mu\text{m}$ 团聚体有机碳含量没有显著变化, $250\sim 53\ \mu\text{m}$ 团聚体有机碳含量变化较小, 而 $2\ 000\sim 250\ \mu\text{m}$ 和 $>2\ 000\ \mu\text{m}$ 团聚体变化显著。说明团聚体有机碳含量随碳输入量的增加呈由小到大逐渐饱和的现象。除此之外, 团聚体有机碳贮量也呈等级饱和的趋势(如表4): $<53\ \mu\text{m}$ 团聚体和 $250\sim 53\ \mu\text{m}$ 团聚体有机碳贮量随厩肥输入量的增加没有明显变化, 而 $>250\ \mu\text{m}$ 团聚体有机碳贮量则有明显增加。但是由于试验时间有限(仅8年), 无法看到土壤全量有机碳的饱和现象, 我们只能在等级饱和现象的基础上推测其存在。

4 结 论

通过连续8年施加不同量有机厩肥试验发现, 土壤固定有机碳的能力有限, 存在碳饱和现象。并且土壤有机碳饱和存在明显的等级顺序, 小粒级的团聚体先饱和, 大团聚体后饱和。适量的有机厩肥施用可以显著地改善土壤结构, 提高土壤有机碳含量; 过量施用有机厩肥明显降低 $>2\ 000\ \mu\text{m}$ 团聚体含量, 导致MWD降低, 不利于土壤结构的改善。不同施肥处理下, 土壤有机碳主要分布在 $250\sim 53\ \mu\text{m}$ 和 $2\ 000\sim 250\ \mu\text{m}$ 团聚体中, 两者相加约占有机碳全量的73.7%~78.5%。并且随着有机碳输入量的增加, 土壤有机碳主要贮存在 $2\ 000\sim 250\ \mu\text{m}$ 团聚体中。有机厩肥的施加明显地加快了 $>2\ 000\ \mu\text{m}$ 团聚体的更新速率, 土壤轻组分有机碳含量显著增加, 不利于土壤有机碳的固定。因此, 在现实生活中有机厩肥不能盲目施加, 应适量而行之。在连续地施加有机厩肥后, 适当地减小耕作强度对大团聚体的形成和稳定将具有重要意义。此外, 本文只研究了有机肥施用对土壤团聚体及碳组分的综合作用影响, 就本研究而言, 还无法具体区分有机肥本身的作用还是有机肥施用后有机残体归还量变化的间接作用, 欲进一步讨论这两种作用的影响, 需要更加深入的研究。

参考文献

- [1] Brown S, Lugo A E. The storage and production of organic matter in tropical forests and their role in the global carbon cycles. *Biotropica*, 1982, 14:161-187
- [2] Post W M, Pang T H, Emanuel W R, et al. The global carbon cycle. *American Scientist*, 1990, 78: 312-326
- [3] Sundquist E T. The global carbon dioxide budget. *Science*, 1993, 259: 934-941
- [4] Parton W J, Schimel D S, Cole C V, et al. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in Great Plains grasslands. *Soil Science Society of America Journal*, 1987, 51: 1 173-1 179
- [5] Schlesinger W H. Evidence from chronosequence studies for a low carbon-storage potential of soils. *Nature*, 1990, 348: 232-234
- [6] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32: 2 099-2 103
- [7] 梁爱珍, 张晓平, 杨学明, 等. 耕作对东北黑土团聚体粒级分布及其稳定性的短期影响. *土壤学报*, 2009, 46(1): 154-158. Liang A Z, Zhang X P, Yang X M, et al. Short-term effects of tillage on soil aggregate size distribution and stability in black soil in northeast China (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(1): 154-158
- [8] Liang A Z, Zhang X P, Fang H J, et al. Short-term effects of tillage practices on soil organic carbon in clay loam soil in North-east China. *Pedosphere*, 2007, 17(5): 619-623
- [9] Aoyama M, Angers D A, Dayegamiye A N. Particulate and mineral associated organic matter in water-stable aggregates as affected by mineral fertilizer and manure applications. *Can J Soil Sci*, 1999, 79: 295-302
- [10] Golchin A, Oades J M, Skjemstad J O, et al. Soil structure and carbon cycling. *Aust J Soil Res*, 1994, 32: 1

- [11] Puget P, Chenu C, Balesdent J. Total and young organic matter distributions in aggregates of silty cultivated soils. *Eur J Soil Sci*, 1995, 46: 449-459
- [12] Six J, Elliott E T, Paustian K, et al. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1998, 62: 1 367-1 377
- [13] Paustian K, Collins H P, Paul E A. Management controls on soil carbon//Paul E A, et al. *Soil organic matter in temperate agroecosystems: Long-term experiments in North America*. Boca Raton, FL: CRC Press, 1997: 15-49
- [14] Rasmussen P E, Parton W J. Long-term effects of residue management in wheat-fallow: I. Inputs, yield, and soil organic matter. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, 58: 523-536
- [15] Huggins D R, Buyanovsky G A, Wagner G H, et al. Soil organic C in the tallgrass prairie- derived region of the Corn Belt: Effects of long-term crop management. *Soil Tillage Res*, 1998, 47: 219-234
- [16] Campbell C A, Bowren K E, Schnitzer M, et al. Effect of crop rotations and fertilization on soil organic matter and some biochemical properties of a thick Black Chernozem. *Can J Soil Sci*, 1991, 71: 377-387
- [17] Chung H, John H G, Six J. Indications for soil carbon saturation in a temperate agroecosystem. *Soil Science Society of America Journal*, 2007, 72: 1 132-1 139
- [18] 宇万太, 沈善敏, 张璐, 等. 黑土开垦后水稳性团聚体与土壤养分的关系. *应用生态学报*, 2005, 15(12): 2 287-2 291. Yu W T, Shen S M, Zhang L, et al. Relationships between water-stable aggregates and nutrient status in black soil after reclamation (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 15(12): 2 287-2 291
- [19] Gulde S, Chung H, Amelung W, et al. Soil carbon saturation controls labile and stable carbon pool dynamics. *Soil Science Society of America Journal*, 2008, 72(3): 605-612
- [20] Elliott E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1986, 50: 627-633
- [21] Youker R E, McGuinness J L. Short method of obtaining mean weight diameter values of aggregate analyses of soils. *Soil Science*, 1957, 83(4): 291-294
- [22] 倪进治, 徐建民, 谢正苗, 等. 不同施肥处理下土壤水溶性有机碳含量及其组成特征的研究. *土壤学报*, 2003, 40(5): 724-730. Ni J Z, Xu J M, Xie Z M, et al. Contents of WSOC and characteristics of its composition under different fertilization systems (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(5): 724-730
- [23] Six J, Elliott E T, Paustian K. Aggregate and soil organic matter dynamics under conventional and no-tillage systems. *Soil Science Society of America Journal*, 1999, 63: 1 350-1 358
- [24] Tisdall J M, Oades J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *J Soil Sci*, 1982, 33: 141-163
- [25] Oades J M. Soil organic matter and structural stability: Mechanisms and implications for management. *Plant and Soil*, 1984, 76: 319-337
- [26] 邱莉萍, 张兴昌, 张晋爱. 黄土高原长期培肥土壤团聚体中养分和酶的分布. *生态学报*, 2009, 26(2): 364-372. Qiu L P, Zhang X C, Zhang J A. Distribution of nutrients and enzymes in Loess Plateau soil aggregates after long-term fertilization (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 26(2): 364-372
- [27] 李成亮, 孔宏敏, 何园球. 施肥结构对旱地红壤有机质和物理性质的影响. *水土保持学报*, 2004, 18(6): 116-119. Li C L, Kong H M, He Y Q. Effect of fertilization structures on soil organic matter and physical properties of upland field in red soil area (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18(6): 116-119
- [28] Debosz K, Rasmussen P H, Pedersen A R. Temporal variations in microbial biomass C and cellulolytic enzyme activity in arable soils: Effects of organic matter input. *Applied Soil Ecology*, 1999, 13(3): 209-218
- [29] Chen Y, Zhang Y D, He H B, et al. Carbon and nitrogen pools in different aggregates of a Chinese Mollisol as

- influenced by long-term fertilization. *Journal of Soils and Sediments*, 2010, 10(6): 1 018-1 026
- [30] Deneff K, Six J, Merckx R, et al. Carbon sequestration in microaggregates of no-tillage soils with different clay mineralogy. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68: 1 935-1 944
- [31] Jagadamma S, Lal R. Distribution of organic carbon in physical fractions of soils as affected by agricultural management. *Biol Fertil Soils*, 2010, 46: 543-554
- [32] 徐江兵, 李成亮, 何圆球, 等. 不同施肥处理对旱地红壤团聚体中有机碳含量及其组分的影响. *土壤学报*, 2007, 44(4): 675-682. Xu J B, Li C L, He Y Q, et al. Effect of fertilization on organic carbon content and fractionation of aggregates in upland red soil (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(4): 675-682
- [33] Kool D M, Chung H, Tate K R, et al. Hierarchical saturation of soil carbon pools near a natural CO₂ spring. *Global Change Biol*, 2007, 13: 1 282-1 293

EFFECT OF APPLICATION RATE OF BARNYARD MANURE ON ORGANIC CARBON FRACTION OF SOIL AGGREGATES

Liu Zhongliang^{1,2} Yu Wantai^{1†} Zhou Hua¹ Ma Qiang¹

(1 Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

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

Abstract Soil is an important organic carbon pool, of which any small change may lead to great variation of CO₂ concentration in the atmosphere. Soil aggregates have the function of physical protection of soil organic carbon. Application of barnyard manure can not only increase the content of soil organic carbon, but also promote formation of soil aggregates, which is of great significance to sequestering and maintaining soil organic carbon. In this experiment the wet sieving method was used to isolate and fractionate aggregates. It was found after a 8-year stationary field experiment on application rate of manure that application of an appropriate amount of manure significantly increased soil mean weight diameter (MWD), and improved soil structure, but excessive application of manure significantly reduced the content of >2 000 μm aggregates while increased that of 2 000~250 μm aggregates. In Aquic-brown soil, soil organic carbon was mainly distributed in 250~53 μm and 2 000~250 μm fractions of aggregates, accounting for about 73.7%~78.5% of the total soil organic carbon content. With increased input of organic carbon, soil organic carbon was mainly stored in the 2 000~250 μm fraction of aggregates. Manure application significantly sped up renewal of the >2 000 μm fraction of aggregates. The content of light fraction organic carbon in the soil increased with increased manure input, and accounted for 22.1% of the total soil organic carbon in the soil applied with a high rate of manure. The ability of the soil to sequester organic carbon is limited, and apparent phenomena of hierarchical saturation are observed. It is, therefore, concluded that in soils deficient in organic matter, it is of great significance to apply organic manure, whereas in soils high in organic matter it is advisable to put in less organic carbon.

Key words Aggregate; Organic carbon fraction; Light fraction organic carbon; Carbon saturation