

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.10.026

长期施肥对紫色土旱坡地团聚体与有机碳组分的影响*

花可可¹ 朱波² 杨小林³ 王小国²

(1. 安徽省农业科学院土壤肥料研究所, 合肥 230031; 2. 中国科学院成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041;

3. 河南理工大学安全应急管理研究中心, 焦作 454003)

摘要:以紫色土旱坡地长期肥料试验地为平台,采用钢珠与湿筛的方法对团聚体有机碳进行分组,研究长期不同施肥对耕作层土壤水稳性团聚体及其有机碳组分的影响。结果表明,有机、无机肥配施显著提高大于2 mm和0.25~2 mm大团聚体的质量百分数、有机碳含量和有机碳贡献率,促进土壤有机碳向大团聚体富集;有机、无机配施可显著提高大团聚体中颗粒态有机碳(POM)、微团聚体有机碳(mM)和粉黏结合态有机碳(SC)的含量和储量,并提高POM组分的贡献率,促进大团聚体中有机碳向颗粒态富集,这说明增施有机肥更利于大团聚体对土壤颗粒态有机碳库的保护和储存;紫色土旱坡地土壤有机碳及大团聚体中有机碳的储量绝大部分以SC形式存在,大团聚体中SC组分储量的提高有利于紫色土旱坡地土壤有机碳的固定和累积,且在有机、无机肥配施中使用秸秆的效果优于猪厩肥。

关键词:长期施肥 团聚体 颗粒态有机碳 旱坡地 紫色土

中图分类号: S158.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)10-0167-08

引言

农田土壤有机碳是陆地生态系统较活跃的碳库,近几十年来,由于CO₂等温室气体的浓度持续升高导致全球气候变暖以及由此引发的一系列严重的环境问题,使农田土壤有机碳库被认为是影响全球气候变暖的源或汇^[1]。因而农田土壤有机碳库的稳定与否,与土壤碳排放及全球气候变暖均休戚相关。团聚体是土壤结构的基本单元,其对有机碳的物理性保护被认为是农田土壤有机碳稳定的主要机制^[2-3]。Six等^[4]认为团聚体可以有效地阻隔微生物对有机碳的矿化,从而达到对有机碳保护的目的是。Garten等^[5]研究表明,土壤中70%以上的有机碳存在于微团聚体中,并揭示了不同粒径团聚体对有机碳固定作用的差异。因此,开展土壤团聚体及其碳组分的研究对维持农田土壤有机碳库的稳定具有重要的意义。

土壤有机碳是进入土壤的有机物质在腐殖化作用下形成的一种结构和组成复杂的复合体,其在土壤各粒径团聚体中的分布是不均匀的^[6]。Chung等^[7]利用钢珠与湿筛法将大团聚体中有机碳分为

颗粒态有机碳(POM)、微团聚体包裹有机碳(mM)和粉黏结合态有机碳(SC)。POM指新鲜动植物残体向腐殖化有机物之间过度的有机碳库,周转速度较快,对农田管理方式的响应较为敏感。mM是指大团聚体内部能够与微团聚体相结合,被微团聚体包裹的有机碳组分。SC一般与土壤矿物颗粒结合较为紧密,是土壤中最稳定的有机碳库。影响团聚体有机碳组分的因素众多,如气候、土地利用方式、土壤类型和农田管理措施等^[8-11]。施肥作为最重要的农田管理措施之一,无疑是影响土壤团聚体中有机碳组分的重要因素。徐江兵等^[12]用湿筛与化学分组法对红壤团聚体中有机碳进行分组,发现长期施用有机肥显著提高了土壤团聚体中粗颗粒态有机碳、细颗粒有机碳和矿物结合态有机碳的含量,并认为有机肥的施入降低了大团聚体的周转。此外,安婷婷、刘中良等也采用此方法进行了相关研究^[13-14]。与化学分组相比,土壤物理分级法对有机碳组分的影响相对较小,因而与土壤有机碳的实际特征可能更为相符。但目前关于采用钢珠与湿筛物理分级法对团聚体中有机碳进行分组的研究鲜见报道,施肥与团聚体有机碳组分的这种定量关系仍不

收稿日期: 2013-12-02 修回日期: 2014-02-05

* 国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(2012CB417101)、国家公益性行业(农业)科研专项经费资助项目(201203030)和安徽省农业科学院院长杰出青年基金资助项目(14B1008)

作者简介: 花可可,助理研究员,博士,主要从事农田生态系统碳循环研究,E-mail: huakeke1220@126.com

通讯作者: 朱波,研究员,博士生导师,主要从事土壤学、环境地球化学和非点源污染控制研究,E-mail: bzh@imde.ac.cn

清楚。

紫色土旱坡地作为长江中上游主要的土地利用类型之一,多分布在山地丘陵,其耕层土层薄,降雨侵蚀严重,土壤有机质含量普遍偏低,平均约为1.2%^[15]。根据中国科学院盐亭紫色土农业生态站多年观测数据发现,常规耕作施肥下的旱坡地有机质含量呈逐年下降的态势,其下降的原因除与亚热带强烈的物质循环有关外,是否与土壤团聚体有机碳组分的分布机制有关尚不清楚。在该地区,唐晓红等^[16]研究了保护性耕作对紫色水稻土团聚体组成和有机碳储量的影响,认为保护性耕作有利于水稻土大团聚体的形成和有机碳储量的提高。袁俊吉等^[17]比较了冬水田、水旱轮作和垄作免耕3种耕作方式下土壤团聚体组成和有机碳的差异,发现垄作免耕土壤大团聚体含量显著高于冬水田和水旱轮作,而微团聚体则显著低于冬水田和水旱轮作。综上所述,土壤团聚体有机碳组分作为土壤有机碳固定的一个重要机制,在该地区的研究中主要集中在水稻土团聚体及其有机碳组分的研究,而对紫色土旱坡地的研究尚未涉及。

本文依托紫色土旱坡地长期肥料试验为平台,利用钢珠与湿筛的物理分组法,分析长期施肥对土壤水稳性团聚体及其有机碳组分的影响,以探讨不同施肥方式下团聚体分布特征和团聚体中有机碳组分的消涨关系,从而为深入了解紫色土有机碳的固定机制提供一定的理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验点位于中国科学院盐亭紫色土农业生态试

验站内(105°27'E,31°16'N)。该站位于四川盆地中北部的盐亭县林山乡,地处涪江支流弥江、湍江的分水岭上。属中亚热带湿润季风气候,年均气温17.3℃,极端最高气温40℃,极端最低气温-5.1℃,多年平均降雨量826 mm。土壤为蓬莱镇组石灰性紫色土,质地为中壤,田间持水率0.28~0.37 cm³/cm³,凋萎含水率为0.07~0.10 cm³/cm³,土层厚度为20~60 cm,土壤母质为泥岩。

1.2 试验设计

试验小区始建于2002年6月,海拔420 m,坡向西北-东南,坡度6.5°,坡长8 m,宽度4 m,面积为32 m²,土层厚度约为60 cm,种植制度为冬小麦-夏玉米。试验共设置4种施肥处理:不施肥(CK)、常规氮磷钾肥(NPK)、猪厩肥配施氮磷钾肥(OMNPK)、秸秆配施氮磷钾肥(RSDNPK),每种施肥处理分别设置3个重复。冬小麦季施氮肥总量130 kg/hm²(以纯N计)、磷肥90 kg/hm²(以P₂O₅计)、钾肥36 kg/hm²(以K₂O计);夏玉米季施氮肥130 kg/hm²、磷肥和钾肥同小麦季。各施肥处理的施氮总量维持在同一水平,即小麦季130 kg/hm²,玉米季150 kg/hm²,全年共280 kg/hm²。施肥前,提前测定猪厩肥(新鲜猪粪)和当季秸秆中全氮含量,并按纯氮总量进行换算。OMNPK和RSDNPK处理所需氮量为无机氮肥占60%,有机肥占40%。施肥的方式采用基肥一次性于播种前人工施入,耕作和施肥同步,耕作方式为人工锄耕,深度为20 cm。冬小麦采取撒施的方式,夏玉米为穴施,冬小麦施肥时间为每年11月初,夏玉米为每年6月初。氮磷钾肥中氮肥为碳酸氢铵,磷肥为过磷酸钙,钾肥为氯化钾。

小麦和玉米季各处理施肥设计方案见表1。

表1 不同施肥处理的肥料类型与施肥量

Tab.1 Fertilization types and application rates of pig manure, crop residue and mineral fertilizers for different treatments

作物	处理	总氮施用量/ (kg·hm ⁻²)	猪厩肥施用量/ (t·hm ⁻²)	秸秆施用量/ (t·hm ⁻²)	化肥施用量/(t·hm ⁻²)		
					N	P ₂ O ₅	K ₂ O
冬小麦	CK						
	NPK	130			130	90	36
	OMNPK	130	32.4		78	90	36
	RSDNPK	130		7	78	90	36
夏玉米	CK						
	NPK	150			150	90	36
	OMNPK	150	33.2		90	90	36
	RSDNPK	150		10	90	90	36

1.3 理化分析

土壤理化性质测定均参考土壤农业化学分析方法^[18]。土壤有机质测定为重铬酸钾容量法;土壤全氮测定为凯氏法;土壤全磷采用酸溶-钼锑抗比色

法;pH值采用电位法测定(水土质量比2.5:1)、土壤干体积密度为环刀法。

1.4 土壤团聚体分离

取过8 mm筛的风干土样100 g,放入由2 mm、

0.25 mm、0.053 mm 构成的套筛上(厚度均匀),放入蒸馏水至淹没土样 2 cm 位置,浸泡土样 5 min。然后以 25 次/min 的速度在蒸馏水中振荡 2 min,上下振幅为 3 cm,将各筛上的团聚体分别冲洗到烧杯中,获得大于 2 mm,0.25 ~ 2 mm,0.053 ~ 0.25 mm 的水稳性团聚体,小于 0.053 mm 水稳性团聚体含量用差减法获取。4 个粒级的团聚体分别记为粗大团聚体(LM)、细大团聚体(SM)、微团聚体(M)和粉黏团聚体(SC)。将各级筛上团聚体组分开用去离子水冲洗干净置于铝盒中,60℃下干燥 12 h 后称量,计算各粒级水稳性团聚体的质量分数,同时将干燥的团聚体磨细过 100 目筛,供有机碳分析。

1.5 大团聚体中有机碳分组

大团聚体内有机碳分组采用 Chung 等^[7]提出的物理分组法。将湿筛法获取的干燥铝盒内粗大团聚体(大于 2 mm)和细大团聚体(0.25 ~ 2 mm)进一步分成 2 ~ 0.25 mm、0.25 ~ 0.053 mm 和小于 0.053 mm 3 个组分。具体步骤为:分别取 10 g 粗大团聚体和细大团聚体放在 0.25 mm 和 0.053 mm 组成的筛子上,在水中浸泡 20 min,并加入 50 个直径为 4 mm 的小钢珠,在水中持续振荡 3 min,上下振幅为 3 cm,进而分离成 0.25 ~ 2 mm、0.053 ~ 0.25 mm 和小于 0.053 mm 组分(差减法)。而后用去离子水冲洗干净置于铝盒中,60℃下干燥 12 h 后称量,并磨细过 100 目筛,分析各组分的有机碳含量。大团聚体中颗粒态有机碳、微团聚体有机碳和粉黏结合态有机碳分别用 POM、mM 和 SC 表示。大于 2 mm 团聚体内 3 个组分分别记为 LM-POM、LM-mM 和 LM-SC,0.25 ~ 2 mm 团聚体分别用 SM-POM、SM-mM 和 SM-SC 表示。大团聚体中所有碳组分缩写均参照 Chung 等^[7]的表述。

1.6 结果计算与统计分析

团聚体质量分数

$$A_i = \frac{M_i}{M} \times 100\% \quad (1)$$

式中 A_i ——某粒级团聚体的质量分数,%

M_i ——某粒级团聚体的质量,g

M ——整个原状土的质量,g

平均质量直径

$$D = \sum_{i=1}^n x_i m_i \quad (2)$$

式中 x_i ——第 i 个筛子上团聚体的平均直径,mm

m_i ——第 i 个筛子上团聚体质量百分比,%

团聚体有机碳储量

$$S_i = C_i A_i \quad (3)$$

式中 S_i ——某粒级团聚体有机碳储量,g/kg

C_i ——某粒级团聚体有机碳含量,g/kg

团聚体有机碳贡献率

$$R_i = \frac{S_i}{C_b} \times 100\% \quad (4)$$

式中 R_i ——某粒级团聚体有机碳贡献率,%

C_b ——原状土有机碳含量,g/kg

大团聚体有机碳组分贡献率

$$R_{Li} = \frac{S_{Li}}{C_L} \times 100\% \quad (5)$$

式中 R_{Li} ——大团聚体内某有机碳组分贡献率,%

S_{Li} ——大团聚体内某有机碳组分储量,g/kg

C_L ——大团聚体有机碳含量,g/kg

所有的测定结果用 Excel 2010 进行数据的初步整理和汇总,用 SPSS 19.0 进行统计分析,多重比较采用 LSD 检验,显著水平($p < 0.05$ 显著,或 $p < 0.01$ 极显著)。用 Sigma plot 10.0 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 长期施肥对土壤基本理化性质的影响

各施肥处理土壤表层(0 ~ 20 cm)基本理化性质如表 2 所示(2012 年 9 月采集)。与不施肥(CK)处理相比,长期施肥可显著提高有机碳(SOC),全氮(TN)和全磷(TP)的含量。其中 NPK、OMNPK 和 RSDNPK 处理的 SOC 含量分别较 CK 提高了 82.12%、121.74% 和 162.81%,说明有机、无机肥配施的施肥方式可显著提高土壤有机碳的含量,采用秸秆配施的效果较明显。

表 2 各施肥处理试验小区 0 ~ 20 cm 土壤基本理化性质
Tab.2 Physicochemical properties of the experimental soil at 0 ~ 20 cm soil depth under different fertilization treatments

处理	有机碳 质量比/ (g·kg ⁻¹)	全氮 质量比/ (g·kg ⁻¹)	全磷 质量比/ (g·kg ⁻¹)	pH 值	土壤干体积密 度/(g·cm ⁻³)
CK	4.14 ^d	0.25 ^c	0.52 ^d	8.0 ^a	1.39 ^a
NPK	7.54 ^c	0.56 ^b	1.05 ^b	8.2 ^a	1.30 ^b
OMNPK	9.18 ^b	0.78 ^a	1.21 ^a	8.1 ^a	1.31 ^b
RSDNPK	10.88 ^a	0.79 ^a	0.68 ^c	8.1 ^a	1.26 ^c

注:表中列出的值为 3 个重复的平均值;同列数值后不同小写字母表示不同施肥处理之间差异显著, $P < 0.05$,下同。

2.2 长期施肥对土壤水稳性团聚体质量分数的影响

各施肥处理土壤团聚体质量分数表现出相似规律(表 3)。小于 0.053 mm 团聚体质量分数最高,为 32.59% ~ 49.52%,大于 2 mm 大团聚体质量分数最低,为 6.15% ~ 23.03%,随粒径的减小土壤团聚体质量分数逐渐增加。与 CK 相比,NPK 处理大于

2 mm和0.25~2 mm大团聚体质量分数分别提高了13.20%和28.56%,而对0.053~0.25 mm和小于0.053 mm团聚体质量分数并无显著影响。与NPK处理相比,OMNPK和RSDNPK处理显著提高了大于2 mm和0.25~2 mm团聚体质量分数,其中对大于2 mm提升效果最为显著,分别为NPK处理的2.66和3.28倍。

平均质量直径(D)可全面反映土壤的团聚状况, D 越大土壤的团聚状况越良。CK、NPK、OMNPK和RSDNPK处理的 D 值分别为0.17、0.20、0.44和0.53。OMNPK和RSDNPK的 D 值分别为NPK处理的2.20和2.65倍。说明有机、无机肥配合施肥可显著增强土壤的团聚化作用,改善土壤的物理结构,采用秸秆配施的效果优于猪厩肥配施。

表3 不同施肥处理土壤团聚体质量分数

Tab.3 Distribution of water stable aggregates in soils under different fertilization treatments

处理	团聚体质量分数/%				平均质量直径/mm
	大于2 mm	0.25~2 mm	0.053~0.25 mm	小于0.053 mm	
CK	6.21 ± 0.15 ^d	13.55 ± 0.53 ^c	30.72 ± 1.02 ^a	49.52 ± 1.86 ^a	0.17 ^c
NPK	7.03 ± 0.26 ^c	17.42 ± 0.19 ^b	28.52 ± 1.29 ^a	47.04 ± 1.75 ^a	0.20 ^c
OMNPK	18.74 ± 0.78 ^b	20.91 ± 0.91 ^a	26.89 ± 1.37 ^b	33.47 ± 1.61 ^b	0.44 ^b
RSDNPK	23.03 ± 1.35 ^a	20.95 ± 0.69 ^a	23.44 ± 1.53 ^b	32.59 ± 1.87 ^b	0.53 ^a

2.3 长期施肥对土壤团聚体有机碳的含量与储量的影响

长期施肥有利于土壤有机碳的累积,但不同施肥处理各粒级团聚体有机碳的累积效应却不尽相同。与CK处理相比,施肥均能显著提高各粒级团聚体中有机碳的含量,其中以OMNPK和RSDNPK处理提升效果最为显著。OMNPK和RSDNPK处理0.25~2 mm团聚体有机碳含量分别为11.71和12.22 g/kg,分别较NPK处理提高了34.91%和40.83%,RSDNPK显著高于OMNPK处理(表4)。不同施肥处理团聚体有机碳储量如表5所示。CK处理各粒级团聚体有机碳储量分别为0.28、0.80、1.07和1.99 g/kg,相应的贡献率分别为6.81%、

19.31%、25.82%和48.06%。各粒级有机碳的储量和相应的贡献率随土壤团聚体粒级的增大而逐渐减少。NPK各粒级土壤团聚体有机碳储量的分布规律与CK相同,OMNPK和RSDNPK处理却有一定的差异。OMNPK和RSDNPK处理的0.25~2 mm团聚体有机碳储量高于0.053~0.25 mm团聚体。OMNPK和RSDNPK处理大于2 mm和0.25~2 mm团聚体有机碳贡献率分别为17.7%、22.79%和25.91%、23.51%,高于NPK处理,而0.053~0.25 mm和小于0.053 mm团聚体有机碳贡献率低于NPK。表明有机、无机肥配施土壤有机碳向大团聚体富集。

表4 不同施肥处理下团聚体有机碳质量比

Tab.4 Organic carbon content of water stable aggregates under different fertilization treatments

处理	团聚体有机碳质量比/(g·kg ⁻¹)			
	大于2 mm	0.25~2 mm	0.053~0.25 mm	小于0.053 mm
CK	4.54 ± 0.13 ^d	5.90 ± 0.23 ^d	3.48 ± 0.06 ^d	4.02 ± 0.14 ^c
NPK	7.30 ± 0.38 ^c	8.68 ± 0.37 ^c	6.62 ± 0.17 ^c	7.71 ± 0.8 ^b
OMNPK	8.93 ± 1.24 ^b	11.71 ± 0.20 ^b	7.55 ± 0.13 ^b	10.42 ± 0.51 ^a
RSDNPK	10.78 ± 0.17 ^a	12.22 ± 0.45 ^a	9.62 ± 0.59 ^a	9.86 ± 0.68 ^a

表5 不同施肥处理下各粒级团聚体有机碳储量和贡献率

Tab.5 Organic carbon stock in aggregates under different fertilization treatments

处理	团聚体粒级							
	大于2 mm		0.25~2 mm		0.053~0.25 mm		小于0.053 mm	
	有机碳储量/ (g·kg ⁻¹)	贡献率/%						
CK	0.28 ± 0.01 ^d	6.81	0.80 ± 0.06 ^c	19.31	1.07 ± 0.05 ^c	25.82	1.99 ± 0.14 ^b	48.06
NPK	0.51 ± 0.05 ^c	6.81	1.51 ± 0.08 ^b	20.05	1.89 ± 0.13 ^b	25.04	3.63 ± 0.51 ^a	48.11
OMNPK	1.67 ± 0.30 ^b	17.71	2.45 ± 0.15 ^a	25.91	2.03 ± 0.14 ^a	21.48	3.30 ± 0.34 ^a	34.91
RSDNPK	2.48 ± 0.18 ^a	22.79	2.56 ± 0.18 ^a	23.51	2.25 ± 0.29 ^a	20.70	3.59 ± 0.41 ^a	33.00

2.4 长期施肥对大团聚体中有机碳组分质量分数的影响

各施肥处理大团聚体中各有机碳组分分布规律基本相似,大团聚体中有机碳组分分布绝大部分以 SC 的形式存在,占大于 2 mm 和 0.25 ~ 2 mm 大团聚体的质量分数分别为 59.90% ~ 61.85% 和 52.40% ~ 63.57% (表 6)。与 CK 相比,施 NPK 肥对大团聚体内各有机碳组分质量分数无显著影响,而 OMNPK 和 RSDNPK 处理可显著提高大于 2 mm 和 0.25 ~ 2 mm 大团聚体内 POM 组分质量分数,较 NPK 处理分别提高 145.37%、229.45% 和 109.81%、162.48%,并使 SC 组分质量分数降低(8.83%、16.61%、10.78%、17.58%),而对 mM 组分质量分数无显著影响。

2.5 长期施肥对大团聚体内有机碳组分的含量与储量的影响

如表 7 所示,各施肥处理大团聚体中各组分有

机碳含量的变化规律相似(由大到小依次为 POM、Mm、SC)。OMNPK 和 RSDNPK 处理大于 2 mm 团聚体中 POM 的有机碳质量比分别较 NPK 处理提高 120.76% 和 145.58%,0.25 ~ 2 mm 团聚体中 POM 的有机碳含量提高 60.66% 和 90.03%,且 RSDNPK 处理显著高于 OMNPK 处理。

大团聚体中各有机碳组分的质量分数与相应组分有机碳含量的乘积得出有机碳的储量(表 8)。各施肥处理大于 2 mm 和 0.25 ~ 2 mm 大团聚体内有机碳储存主要以 SC 组分的形式存在,其次是 mM, POM 组分最小。与 NPK 处理相比,OMNPK 和 RSDNPK 处理可显著增加大团聚体中 POM 和 mM 组分的储量,而对 SC 组分的储量无显著影响。同时,OMNPK 和 RSDNPK 处理 POM 的贡献率大幅提高,SC 的贡献率大幅度降低,而 mM 的贡献率变化幅度不明显(图 1),说明长期有机、无机肥配施大团聚体中有机碳有向颗粒态富集的趋势。

表 6 不同施肥处理下大于 2 mm 与 0.25 ~ 2 mm 团聚体内有机碳组分质量分数

Tab. 6 Distribution of fractions in aggregates greater than 2 mm and 0.25 ~ 2 mm under different fertilization treatments

处理	LM - POM	LM - mM	LM - SC	SM - POM	SM - mM	SM - SC
CK	4.15 ± 0.04 ^b	34.00 ± 1.66 ^a	61.85 ± 1.75 ^a	5.76 ± 0.22 ^b	32.28 ± 2.16 ^a	61.96 ± 1.78 ^a
NPK	4.21 ± 0.05 ^b	35.89 ± 1.45 ^a	59.90 ± 1.62 ^a	5.81 ± 0.17 ^b	30.62 ± 1.38 ^a	63.57 ± 2.66 ^a
OMNPK	10.33 ± 0.67 ^a	35.06 ± 1.46 ^a	54.61 ± 2.98 ^b	12.19 ± 0.53 ^a	31.09 ± 1.57 ^a	56.72 ± 2.93 ^b
RSDNPK	13.87 ± 1.52 ^a	36.18 ± 2.23 ^a	49.95 ± 1.95 ^c	15.25 ± 1.38 ^a	32.35 ± 3.55 ^a	52.40 ± 1.37 ^c

表 7 不同施肥处理下大于 2 mm 与 0.25 ~ 2 mm 团聚体中有机碳组分的质量比

Tab. 7 Content of particular and silt-clay organic carbon fractions in soil aggregates greater than 2 mm and 0.25 ~ 2 mm

处理	LM - POM	LM - mM	LM - SC	SM - POM	SM - mM	SM - SC
CK	7.80 ± 0.08 ^d	5.63 ± 0.11 ^d	3.72 ± 0.60 ^c	8.71 ± 0.35 ^d	7.39 ± 0.81 ^c	4.86 ± 0.69 ^c
NPK	8.38 ± 0.04 ^c	7.51 ± 0.34 ^c	7.10 ± 0.20 ^b	9.43 ± 0.09 ^c	9.21 ± 0.13 ^b	8.36 ± 0.27 ^b
OMNPK	18.50 ± 0.90 ^b	8.93 ± 0.71 ^b	7.12 ± 0.67 ^b	12.66 ± 0.63 ^b	13.37 ± 0.55 ^a	10.60 ± 0.61 ^a
RSDNPK	20.58 ± 0.77 ^a	10.17 ± 0.31 ^a	8.50 ± 0.50 ^a	17.92 ± 1.21 ^a	14.06 ± 1.06 ^a	9.43 ± 0.94 ^a

表 8 不同施肥处理下大于 2 mm 与 0.25 ~ 2 mm 团聚体中有机碳组分储量

Tab. 8 Stock of particular and silt-clay organic carbon fractions in soil aggregates greater than 2 mm and 0.25 ~ 2 mm

处理	LM - POM	LM - mM	LM - SC	SM - POM	SM - mM	SM - SC
CK	0.32 ± 0.01 ^c	1.91 ± 0.13 ^b	2.30 ± 0.44 ^b	0.50 ± 0.04 ^c	2.39 ± 0.42 ^b	3.01 ± 0.51 ^b
NPK	0.35 ± 0.01 ^c	2.70 ± 0.23 ^b	4.25 ± 0.23 ^a	0.55 ± 0.02 ^c	2.82 ± 0.17 ^b	5.31 ± 0.39 ^a
OMNPK	1.91 ± 0.22 ^b	3.13 ± 0.38 ^a	3.89 ± 0.58 ^a	1.54 ± 0.14 ^b	4.16 ± 0.38 ^a	5.71 ± 0.66 ^a
RSDNPK	2.85 ± 0.44 ^a	3.68 ± 0.34 ^a	4.25 ± 0.42 ^a	2.73 ± 0.43 ^a	4.55 ± 0.84 ^a	4.94 ± 0.62 ^a

3 讨论

3.1 有机、无机肥配施对水稳性大团聚体的影响

团聚体是土壤结构的基本单元^[19],其分布特征和稳定性可表征土壤肥力的变化,是评价农田管理

措施对土壤肥力影响效果的重要指标^[2]。作为土壤团聚体的重要组成部分,土壤水稳性大团聚体的形成与土壤有机质的含量关系密切^[6]。有机质是参与土壤水稳性大团聚体形成的主要胶结物质^[20]。Zhang 等^[21]对红壤土的研究表明,水稳性大团聚体

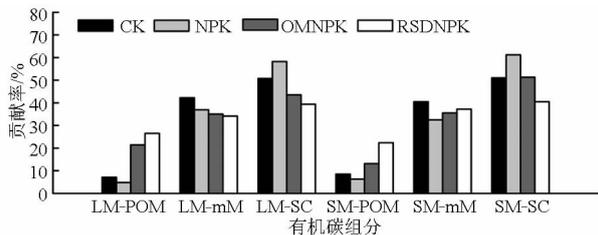


图1 大于2 mm与0.25~2 mm团聚体中有机碳组分贡献率

Fig.1 Contribution rates of organic carbon fractions in aggregates greater than 2 mm and 0.25 ~ 2 mm

的形成主要依靠土壤中有机、无机复合体的胶结作用。长期施肥,尤其是施用有机肥能够为土壤提供丰富的外源有机质,提升土壤有机质含量,并在土壤微生物的作用下分解为大团聚体的形成提供所需的有机无机胶结物质,而胶结物质首先参与土壤大团聚体的形成^[22]。本研究中,与常规施肥相比,10 a长期定位施用有机肥(猪厩肥和秸秆)后,土壤大团聚体的含量与团聚体的平均质量直径(D)均有显著提高,主要由于有机物料的投入增加了土壤有机质数量并改善了品质,活化土壤养分,使微生物活性得以增强,从而加速了有机、无机胶结物质的形成,促进水稳性大团聚体的形成。这与相关学者对黄泥土和黑垆土的研究结果基本相似^[23-24]。土壤水稳性大团聚体的形成除与有机质的数量有关外,还与有机质的成分密切相关^[25]。与猪厩肥相比,施用作物秸秆在腐解的过程中可产生更多的颗粒态有机碳和木质素,而颗粒态有机碳和木质素均有利于大团聚体的形成,随着颗粒态有机碳的矿化、木质素的分解与微生物分泌物的释放,使大团聚体更加稳定,同时稳定的小团聚体被包裹在大团聚体内^[26],这也是本研究中长期施入秸秆下水稳性大团聚体含量和稳定性高于猪厩肥的主要原因。

3.2 有机、无机肥配施与大团聚体中颗粒态有机碳

土壤团聚体内有机碳组分是相互联系的,并对土壤团聚体的稳定性起着十分重要的作用^[27]。进入土壤的新鲜有机物残体首先与大团聚体结合形成颗粒态有机碳(POM),而后在微生物或耕作等农田管理措施下大团聚体进一步破碎成微团聚体^[4]。较慢的大团聚体周转有利于大团聚体内产生更多的颗粒态有机碳,更有利于提高大团聚体的稳定性,从而促进土壤有机碳的累积;若大团聚体周转快,使得易分解颗粒态有机碳频繁地暴露在团聚体外,易被微生物分解和矿化,不利于土壤中有机碳的积

累^[12]。本研究表明,长期施用有机肥可显著增加大团聚体中POM组分的储量,这主要是因为长期有机物料的投入降低了大团聚体的周转速率^[12],加强了对大团聚体的保护作用,进而削弱了大团聚体内POM的矿化速率,有利于POM组分的储存。此外,长期施用有机肥还可显著增加土壤中外源有机碳的输入量,增加外源有机碳向大团聚体中POM的转化。Chung等^[28]研究表明大团聚体中POM组分的储量随外源有机碳输入量的增加而逐渐增大,这也进一步佐证了外源有机物料的输入对大团聚体中POM形成的重要性。因此,长期施用有机肥对大团聚体的周转速率降低和外源有机碳含量的提高可能是本研究大团聚体中POM组分储量得以提高的本质原因。与施用猪厩肥相比,秸秆还田更利于提高POM组分的储量和贡献率,主要是因为秸秆中含有丰富的木质素,其腐殖化系数高^[29],使更多的有机物质残留在土壤团聚体中,加之秸秆处理下真菌数量和菌丝密度均较多,两方面作用使得秸秆处理的大团聚体周转较慢^[13],因而更有利于POM组分的储存。本研究仅定性的从大团聚体周转速率和外源有机碳投入量两方面解释增施有机肥对大团聚体中POM储量的影响,具有一定的局限性。土壤中POM的累积的本质为外源有机碳输入和输出的平衡,因此,今后应加强不同施肥管理方式下外源有机碳的投入量和大团聚体中POM储量的定量关系研究,从而更为深入地了解施肥对大团聚体POM的周转与累积的影响。

4 结论

(1)长期有机、无机肥配施显著提高了水稳性大团聚体的质量百分数、有机碳含量和贡献率,促进了土壤有机碳向大团聚体富集。

(2)长期有机、无机肥配施显著提高大团聚体中颗粒态有机碳(POM)、微团聚体有机碳(mM)和粉黏结合态有机碳(SC)的含量和储量,并提高POM的贡献率,促进大团聚体中有机碳向颗粒态富集,这说明增施有机肥更有利于大团聚体对土壤颗粒态有机碳库的保护和储存。

(3)紫色土旱坡地土壤有机碳及大团聚体中有机碳的储量绝大部分以粉黏结合态有机碳(SC)的形式存在,秸秆还田对SC累积的促进效果最佳。

参 考 文 献

1 刘恩科,赵秉强,梅旭荣,等.不同施肥处理对土壤水稳性团聚体及有机碳分布的影响[J].生态学报,2010,30(4):1035-1041.

Liu Enke, Zhao Bingqiang, Mei Xurong, et al. Distribution of water-stable aggregates and organic carbon of arable soils affected by

- different fertilizer application[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(4): 1035 – 1041. (in Chinese)
- 2 Mikha M M, Rice C W. Tillage and manure effect on soil and aggregate-associated carbon and nitrogen[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68(3): 809 – 816.
- 3 彭新华, 张斌, 赵其国. 土壤有机碳库与土壤结构稳定性关系的研究进展[J]. *土壤学报*, 2004, 41(4): 618 – 623. Peng Xinhua, Zhang Bin, Zhao Qiguo. A review on relationship between soil organic carbon pools and soil structure stability[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(4): 618 – 623. (in Chinese)
- 4 Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(14): 2099 – 2103.
- 5 Garten C T, Post W M, Hanson P J, et al. Forest soil carbon inventories and dynamics along an elevation gradient in the southern Appalachian Mountains[J]. *Biogeochemistry*, 1999, 45(2): 115 – 145.
- 6 Bronick C J, Lal R. Manuring and rotation effects on soil organic carbon concentration for different aggregate size fractions on two soils in northeastern Ohio, USA[J]. *Soil and Tillage Research*, 2005, 81(2): 239 – 252.
- 7 Chung H, Kathie J N, Alain P, et al. Evidence for carbon saturation in a highly structured and organic-matter-rich soil[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2010, 74(1): 130 – 138.
- 8 Wei X R, Qiu L P, Shao M A, et al. The accumulation of organic carbon in mineral soils by afforestation of abandoned farmland[J]. *PLoS ONE*, 2012, 7(3): e32054.
- 9 Tong X G, Xu M G, Wang X J, et al. Long-term fertilization effects on organic carbon fractions in a red soil of China[J]. *Catena*, 2013, 113: 251 – 259.
- 10 He N P, Yu Q, Wang R M, et al. Enhancement of carbon sequestration in soil in the temperate grasslands of northern China by addition of nitrogen and phosphorus[J]. *PLoS ONE*, 2013, 8(10): e77241.
- 11 Liu E K, Yan C R, Mei X R, et al. Long-term effect of manure and fertilizer on soil organic carbon pools in dryland farming in northwest China[J]. *PLoS ONE*, 2013, 8(2): e56536.
- 12 徐江兵, 李成亮, 何园球, 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[J]. *土壤学报*, 2007, 44(4): 676 – 682. Xu Jiangbing, Li Chengliang, He Yuanqiu, et al. Effect of fertilization on organic carbon content and fraction of aggregates in upland red soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(4): 676 – 682. (in Chinese)
- 13 安婷婷, 汪景宽, 李双异, 等. 施用有机肥对黑土团聚体有机碳的影响[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(2): 369 – 373. An Tingting, Wang Jingkuan, Li Shuangyi, et al. Effects of manure application on organic carbon in aggregates of black soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(2): 369 – 373. (in Chinese)
- 14 刘中良, 宇万太, 周桦, 等. 不同有机肥输入量对土壤团聚体有机碳组分的影响[J]. *土壤学报*, 2011, 48(6): 1149 – 1157. Liu Zhongliang, Yu Wantai, Zhou Hua, et al. Effect of application rate of barnyard manure on organic carbon fraction of soil aggregates[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48(6): 1149 – 1157. (in Chinese)
- 15 李仲明. 中国紫色土: 上篇[M]. 北京: 科学出版社, 1991: 1 – 11.
- 16 唐晓红, 邵景安, 高明, 等. 保护性耕作对紫色水稻土团聚体组成和有机碳储量的影响[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(5): 1027 – 1032. Tang Xiaohong, Shao Jingan, Gao Ming, et al. Effects of conservational tillage on aggregate composition and organic carbon storage in purple paddy soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(5): 1027 – 1032. (in Chinese)
- 17 袁俊吉, 彭思利, 蒋先军, 等. 稻田垄作免耕对土壤团聚体和有机质的影响[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(12): 153 – 160. Yuan Junji, Peng Sili, Jiang Xianjun, et al. Effects of combing ridge and no-tillage on aggregates and organic matter in a rice-based cropping system[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(12): 153 – 160. (in Chinese)
- 18 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 13 – 52.
- 19 Haynes R J, Swift R S, Stephen R C. Influence of mixed cropping rotations (pasture-arable) on organic matter content, water stable aggregation and clod porosity in a group of soils[J]. *Soil and Tillage Research*, 1991, 19(1): 77 – 87.
- 20 刘希玉, 王忠强, 张心昱, 等. 施肥对红壤水稻土团聚体分布及其碳氮含量的影响[J]. *生态学报*, 2013, 33(16): 4949 – 4955. Liu Xiyu, Wang Zhongqiang, Zhang Xinyu, et al. Effects of long-term fertilization on aggregate dynamics and organic carbon and total nitrogen contents in a reddish paddy soil[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(16): 4949 – 4955. (in Chinese)
- 21 Zhang B, Horn R. Mechanisms of aggregate stabilization in Udisols from subtropical China[J]. *Geoderma*, 2001, 99(3): 123 – 145.
- 22 Oades J M. Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management[J]. *Plant and Soil*, 1984, 76(3): 319 – 337.
- 23 周萍, 潘根兴. 长期不同施肥对黄泥土水稳性团聚体颗粒态有机碳的影响[J]. *土壤通报*, 2007, 38(2): 256 – 261. Zhou Ping, Pan Genxing. Effect of different long-term fertilization treatments on particulate organic carbon in water-stable aggregates of a paddy Soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, 38(2): 256 – 261. (in Chinese)
- 24 霍琳, 武天云, 蔺海明, 等. 长期施肥对黄土高原旱地黑垆土水稳性团聚体的影响[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(3): 545 – 550. Huo Lin, Wu Tianyun, Ling Haiming, et al. Effects of long-term fertilization on water-stable aggregates in calcic kastanozem of Loess Plateau[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(3): 545 – 550. (in Chinese)
- 25 向艳文, 郑圣先, 廖育林, 等. 长期施肥对红壤水稻土水稳性团聚体有机碳、氮分布与储量的影响[J]. *中国农业科学*,

2009, 42(7): 2415 – 2424.

Xiang Yanwen, Zheng Shengxian, Liao Yulin, et al. Effects of long-term fertilization on distribution and storage of organic carbon and nitrogen in water-stable aggregates of red paddy soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(7): 2415 – 2424. (in Chinese)

- 26 Manna M C, Swarup A, Wanjari R H, et al. Long-term effect of fertilizer and manure application on soil organic carbon storage, soil quality and yield sustainability under sub-humid and semi-arid tropical India[J]. *Field Crops Research*, 2005, 93(2 – 3): 264 – 280.
- 27 Deneff K, Six J, Merckx R, et al. Carbon sequestration in microaggregates of no-tillage soils with different clay mineralogy[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68(6): 1935 – 1944.
- 28 Chung H, Grove J H, Six J. Indications for soil carbon saturation in a temperate agroecosystem[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2008, 72(4): 1132 – 1139.
- 29 李忠佩, 林心雄. 瘠薄红壤中有机物质的分解特征[J]. *生态学报*, 2002, 22(8): 1224 – 1230.
Li Zhongpei, Lin Xinxiong. Characteristics of organic materials decomposition in infertile red soils[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(8): 1224 – 1230. (in Chinese)

Effects of Long-term Different Fertilization on Soil Aggregates and Organic Carbon Fractions on Sloping Upland of Purple Soil

Hua Keke¹ Zhu Bo² Yang Xiaolin³ Wang Xiaoguo²

(1. Soil and Fertilizer Research Institute, Anhui Academy of Agricultural Sciences, Hefei 230031, China

2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Science, Chengdu 610041, China

3. Safety and Emergency Management Research Center, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China)

Abstract: Long-term fertilization has a significant impact on soil organic carbon (SOC) stock. However, fertilization impact on physical fractions of SOC is still poorly understood on sloping upland of purple soil in the central Sichuan Basin, southwestern China. Therefore, this study assessed the impact of long-term different fertilization on soil aggregates distribution and its organic carbon fractions under an intensive wheat (*Triticum Aestivium* L.)-maize (*Zea mays* L.) cropping system through four fertilization treatments, no fertilizer (CK), applied mineral fertilizer (NPK), pig manure matched with mineral fertilizer (OMNPK), and crop straw residue matched with mineral fertilizer (RSDNPK). Soil samples from 0 ~ 20 cm soil layer were separated into four soil aggregations (>2 mm large macroaggregates-LM, 0.25 ~ 2 mm small macroaggregates-SM, <0.25 mm microaggregates-M and <0.053 mm slit-clay microaggregates-SC) by using wet sieving method. LM and SM were further separated into particulate organic matter (POM), microaggregates (mM) and the silt-plus-clay fraction (SC). The results showed that the mass percent, organic carbon content and contribution of LM and SM under organic amendments combined with mineral fertilizer (OMNPK and RSDNPK) were significantly increased compared with NPK treatment, indicating that SOC was enriching towards larger soil aggregates under long-term application of organic fertilizer. Furthermore, organic carbon content and storage of POM, mM and SC in large aggregates were significantly enhanced by OMNPK and RSDNPK treatment. In comparison with NPK treatment, OMNPK and RSDNPK treatments significantly increased contributions of POM while decreased contribution of SC in large soil aggregates. The results also showed that it was greatly helpful to enhance POM sequestration and accumulation in large aggregates by long-term application of organic fertilizer. Additionally, the soil organic carbon storage in the whole soil and larger aggregates were dominated by SC fraction, which was helpful to enhance organic carbon sequestration, especially for crop straw return practice on sloping upland of purple soil.

Key words: Long-term fertilization Soil aggregates Particulate organic matter Sloping upland
Purple soil