

长期施肥对水稻土颗粒有机碳和 矿物结合态有机碳的影响

袁颖红^{1,2}, 李辉信^{1,*}, 黄欠如^{1,3}, 胡 锋¹, 潘根兴¹, 樊后保²

(1. 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095; 2 南昌工程学院生态与环境科学研究所, 南昌 330099;
3. 江西红壤研究所, 江西 进贤 331717)

摘要:在 23a 的田间定位试验区, 研究了长期施肥对水稻土颗粒有机碳和矿物结合态有机碳的影响。结果表明, 在不施肥 (CK)、无机肥 (NPK)、有机肥 (猪粪 + 紫云英绿肥) (OM) 和无机肥与有机肥配施 (NPKM) 处理中, A 层游离态和闭蓄态颗粒有机物含量比 P 层高, 随着土层的加深呈下降的趋势; 而矿物态有机物呈相反的趋势。增施有机肥 (NPKM, OM 处理) 有利于提高土壤中游离态和闭蓄态颗粒有机物及其有机碳的含量以及占土壤有机碳的比例。团聚体中颗粒有机物占土壤团聚体重量的比例及颗粒有机物的有机碳含量均随着团聚体粒径的减小而明显增加。增施有机肥显著提高了团聚体特别是微团聚体 (< 0.25mm) 中颗粒有机物及其有机碳的含量。团聚体中颗粒有机物的有机碳含量显著高于容积土壤中颗粒有机物的有机碳含量。这些结果表明微团聚体对颗粒有机物具有富集和保护作用。

关键词:施肥; 水稻土; 团聚体; 颗粒有机碳; 矿物结合态有机碳

文章编号: 1000-0933(2008)01-0353-08 中图分类号: S154.1, S153.6 文献标识码: A

Effects of long-term fertilization on particulate organic carbon and mineral organic carbon of the paddy soil

YUAN Ying-Hong^{1,2}, LI Hui-Xin^{1,*}, HUANG Qian-Ru^{1,3}, HU Feng¹, PAN Gen-Xing¹, FAN Hou-Bao²

1 College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China

2 Institute of Ecosystem and Environmental Science, Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330099, China

3 Jiangxi Institute of Red Soil, Jiangxi Jinxian 331717, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(1): 0353 ~ 0360.

Abstract: A long-term field experiment was set in Jiangxi Institute of Red Soil (116°20'24"E, 28°15'30"N) in Jinxian county of Jiangxi province, China. One of the aims of the experiment was to investigate the effects of extensive use of various fertilizers over two decades on particulate organic carbon and mineral organic carbon of the paddy soil. The treatments on use of fertilizers were: (1) no added fertiliser (CK), (2) chemical fertilizers only (NPK), (3) organic fertilizers only (OM) and (4) a combination of chemical and organic fertilisers (NPKM). Results showed that the content of the free particulate organic matter (fPOM) and occluded particulate organic matter (oPOM) in A horizon was higher than that in P horizon and that the deeper in soil horizon the lower the content of the fPOM and oPOM was. However, the content of mineral organic matter (mOM) exhibited a reverse trend. Extensive use of organic fertilizers, or a combination of organic

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目 (40231016)

收稿日期: 2006-09-04; 修订日期: 2007-04-20

作者简介: 袁颖红 (1974 ~), 男, 江西宜春人, 硕士, 主要从事生态环境科研与教学. E-mail: yinghongyuan@sohu.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: huixinli@njau.edu.cn

Foundation item: The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 40231016)

Received date: 2006-09-04; **Accepted date:** 2007-04-20

Biography: YUAN Ying-Hong, Master, mainly engaged in ecology and environmental sciences. E-mail: yinghongyuan@sohu.com

and inorganic fertilizers helped increase the contents of fPOM and oPOM, content of organic carbon within fPOM and oPOM, and overall carbon level of soil organic matter (SOC) in red paddy soil. The level of the POM in soil aggregates, the content of organic carbon in POM decreased significantly over the size groups: 0.05 ~ 0.25mm, 0.25 ~ 1mm, 1 ~ 3mm, >3mm. It was also found that contents of organic carbon of POM in size groups were higher than that in bulk soil. These results showed that micro-aggregates (<0.25mm) enriched and maintain particulate organic matter of the red paddy soil.

Key Words: fertilization; paddy soil; aggregates; particulate organic carbon; mineral organic carbon

颗粒有机物是处于新鲜的动植物残体和腐殖化有机物之间暂时或过度的有机物质^[1,2]。它在土壤中周转速度较快,比腐殖化有机物快一个数量级以上,一般为几年到几十年^[3]。它比土壤全碳更易受土壤管理的影响^[4]。因此如何提高这部分碳库含量,以抵消土壤中有有机碳的分解,缓解大气 CO₂浓度的上升显得尤为重要^[5]。矿物结合态有机物是指有机物的最终分解产物与土壤粘粒结合的部分。水稻土是我国最主要的农业土地利用方式,长期以来高量投入化肥和土地集约化利用,提高了水稻土有机碳含量,改变了水稻土的结构性质,增加了水稻的产量^[6]。李江涛^[7]等研究了长期施肥对水稻土颗粒有机物的影响。但在长期施肥条件下红壤性水稻土及团聚体中颗粒有机碳和矿物结合态有机碳的分布和变化至今不清楚,且目前也尚未见这方面的报道。本文以红壤性水稻土长期定位试验为依托,重点探讨长期不同施肥对红壤性水稻土及团聚体的颗粒有机碳和矿物结合态有机碳的影响,为合理施肥,促进稻田生态系统持续稳定发展及生态环境的保护等提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 试验地简介

红壤性水稻土长期定位试验设在江西省红壤研究所(进贤县高桥)(116°20'24"N, 28°15'30"E)内,海拔高度 26m,亚热带季风气候,年平均气温 17.7℃,月平均最高气温 29.0℃,月平均最低气温 5.0℃,年平均降雨量 1400 mm,其中 50% 集中在 3 ~ 7 月份,具有明显的干湿季节变化。无霜期为 262d。

试验从 1981 年早稻开始实施,耕作制为“稻-稻-冬闲”,代表了红壤丘陵单、双季稻作带。供试早、晚稻品种每 5 年更换 1 次,分别为“红梅早”、“73-07”、“2106”、“华联 2 号”、“金优 64”、“754”、“溪-28”、“威优 64”、“晚油 3 号”和“晚粳 923”,水稻年产量 9000kg/hm² 左右。土壤为第四纪红色粘土发育的潞育型水稻土,剖面特征为 Ap-P-W₁-W₂型。试前耕层土壤基本理化性质如表 1。

表 1 供试红壤水稻土表层(0 ~ 15cm)土壤基本性状

Table 1 the basic properties of surface red paddy soil studied

土壤样品 Soil sample	pH	有机 C Organic C (g/kg)	全 N Total N (g/kg)	全 P Total P (g/kg)	全 K Total K (g/kg)	水解 N Hydrolyzable N (mg/kg)	速效 P Available P (mg/kg)	速效 K Available K (mg/kg)
红壤水稻土 Red paddy soil	6.9	16.22	0.952	0.052	1.07	143.7	5.9	71.2

试验处理分为:(1)CK(不施肥);(2)NPK(无机肥);(3)OM(有机肥);(4)NPKM(无机肥和有机肥配施)。肥料用量:NPK 处理每公顷每季作物施 N 90 kg、P₂O₅ 45 kg、K₂O 75 kg;OM 处理早稻每公顷施 22500 kg 紫云英、晚稻每公顷施 22500 kg 猪粪;NPKM 处理早稻每公顷施 N 90 kg、P₂O₅ 45 kg、K₂O 75 kg 和 22500 kg 紫云英,晚稻每公顷施 N 90 kg、P₂O₅ 45 kg、K₂O 75 kg 和 22500 kg 猪粪。紫云英平均含有机碳 23315g/kg, N 311g/kg, P 213g/kg, K 1011g/kg, 猪粪平均含有机碳 6913g/kg, N 516g/kg, P 312g/kg, K 712g/kg。小区随机排列,3 次重复,小区面积 46.67m²。

1.2 土壤样品的采集

2003 年 12 月(晚稻收获后)采用五点混合采样法采集土壤原状样品。根据剖面,分耕作层(A:0~15cm)、犁底层(P:16~23cm)、潜育层(W_1 :24~45cm)和潜育层(W_2 :46~100cm)4 层进行采样,用硬质盒把土样带回实验室,置于 0~4℃ 冷藏箱待处理。

1.3 试验方法和结果统计

1.3.1 土壤团聚体的分离方法

土壤团聚体分离方法是依据 Mendes 等、Sainju 等和彭新华等的方法^[8~10],并略作修改:田间采回的原状土样(用硬质铝盒装好、保证不受挤压,每个土样 1 kg),在室温下风干,当土壤含水量到土壤塑限(含水量 22%~25% 左右)时,用手轻轻地把大土块沿着自然脆弱带(Failure zone)扳成不同大小的土壤团聚体,然后在室温条件下继续风干。把盛有土样的筛子置于摇床(型号 HY-5A)上,270 r/min 的转速下震荡 2 min 进行干筛(根据预备试验结果,确定 2 min 足够分离土壤各粒径团聚体),分离出 >3mm、1~3mm、0.25~1mm、0.05~0.25mm 和 <0.05mm 土壤团聚体,然后仔细剔除各粒径团聚体中的根系,备用。

1.3.2 土壤颗粒有机物和矿物态有机物的测定

土壤有机碳库的物理分级根据 Golchin 等^[11]和 Cambardella and Elliott^[12]的方法,略作修改,分离出游离态颗粒有机物、闭蓄态颗粒有机物和矿物态有机物(注:由于团聚体中游离态颗粒有机物较少,测定误差较大,因此不区分游离态和闭蓄态颗粒有机物,总称为颗粒有机物;另外在 W_1 和 W_2 层土壤中颗粒有机物的含量非常低,矿物态有机物含量高,且变化不大,因此在本文中只讨论 A 和 P 层的变化)。

1.3.3 分析方法和结果统计

有关项目测定均按常规方法^[13]进行。土壤容重测定:环刀法;有机碳(SOC): H_2SO_4 - K_2CrO_7 外加热法;全氮:半微量凯氏定氮法;全磷:氢氧化钠碱熔-钼锑抗比色法;全钾:氢氧化钠碱熔-火焰光度法;水解氮:碱解扩散法;速效磷:碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法;速效钾:醋酸氨浸提-火焰光度法;游离态颗粒有机物和闭蓄态颗粒有机物分别与已灼烧去掉有机碳的土壤混匀,矿物态有机物磨细过孔径为 100 目筛子,分别测定有机碳含量。

测定结果用 Excel、Origin7.0 分析软件进行统计分析。文中的图和表如大写字母不同,表示不同处理之间、同一发生层各指标间的差异显著($p < 0.05$);如小写字母不同,则表示同一处理各发生层或各团聚体指标间差异显著($p < 0.05$)。

2 结果与讨论

2.1 不同施肥处理对土壤颗粒有机碳和矿物结合态有机碳的影响

2.1.1 不同施肥处理对物理分级有机物组分在土壤重量中所占比例的影响

由图 1 可知,各处理中,A 层游离态颗粒有机物和闭蓄态颗粒有机物含量比 P 层高;而矿物结合态有机物含量 P 层比 A 层高。在同处理中,游离态颗粒有机物含量 < 闭蓄态颗粒有机物含量 < 矿物结合态有机物含量。颗粒有机物很容易吸附到带有电荷粘土矿物的表面被其包被^[14,15],由于水稻土粘粒含量高,为颗粒有机物的形成创造了先决条件^[1,2]。

不同施肥处理对游离态颗粒有机物、闭蓄态颗粒有机物和矿物结合态有机物含量的影响明显(图 1)。A 层游离态颗粒有机物、闭蓄态颗粒有机物和矿物结合态有机物含量分别为 0.59%~1.34%、17.54%~32.92%、65.26%~82.19%,P 层分别为 0.28%~0.71%、8.65%~12.99%、88.31%~92.43%。在不同施肥处理下游离态颗粒有机物含量表现为 NPKM > OM > NPK > CK;闭蓄态颗粒有机物含量也有相同的趋势,而矿物结合态有机物含量有相反的趋势,且 NPKM、OM 处理与 NPK、CK 处理之间差异显著($p < 0.05$)。因此增施有机肥能够增加土壤中游离态颗粒有机物和闭蓄态颗粒有机物的含量,Bremer 等^[16]和魏朝富^[17]也有相似报道。

2.1.2 不同施肥处理对物理分级有机物组分有机碳含量的影响

不同物理分级有机物组分有机碳含量如图 2,A 层游离态颗粒有机物、闭蓄态颗粒有机物和矿物结合态

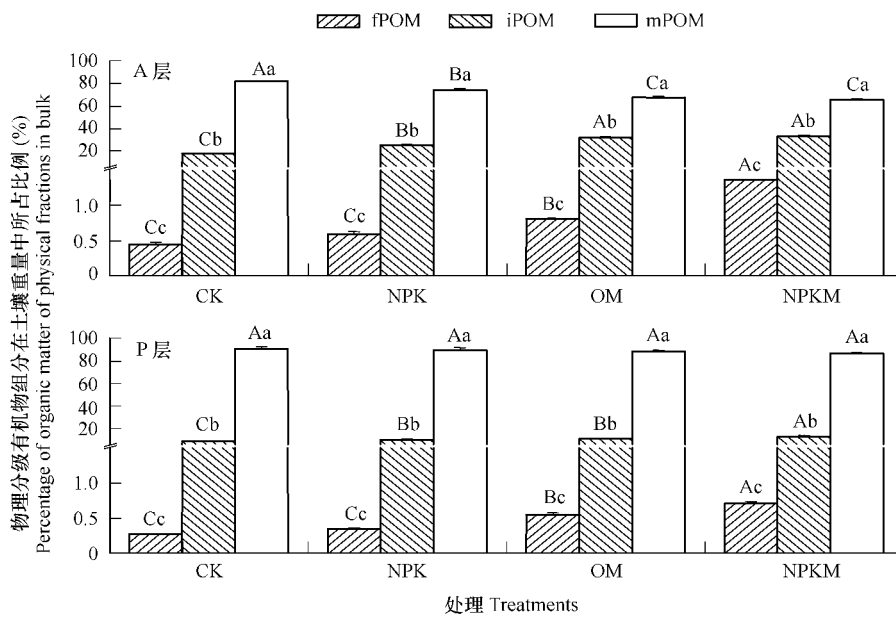


图1 施肥对物理分级有机物组分在土壤重量中所占比例的影响 (%)

Fig. 1 Effects of different fertilization on percentage of organic matter of physical fractions in bulk soil weight

有机物有机碳含量分别为 26.32 ~ 56.86 g/kg、27.14 ~ 42.76 g/kg 和 16.98 ~ 23.26 g/kg, 游离态颗粒有机物和闭蓄态颗粒有机物有机碳含量远大于矿物结合态有机物有机碳含量, 差异极显著 ($p < 0.001$); 且施用有机肥处理 (NPKM, OM) 的游离态和闭蓄态颗粒有机物的有机碳含量显著高于不施肥和施无机肥处理。P 层各有机物组分的有机碳含量分别为 14.32 ~ 20.63 g/kg、14.34 ~ 17.48 g/kg 和 10.32 ~ 11.41 g/kg, 显著小于相应的 A 层各组分有机碳含量。

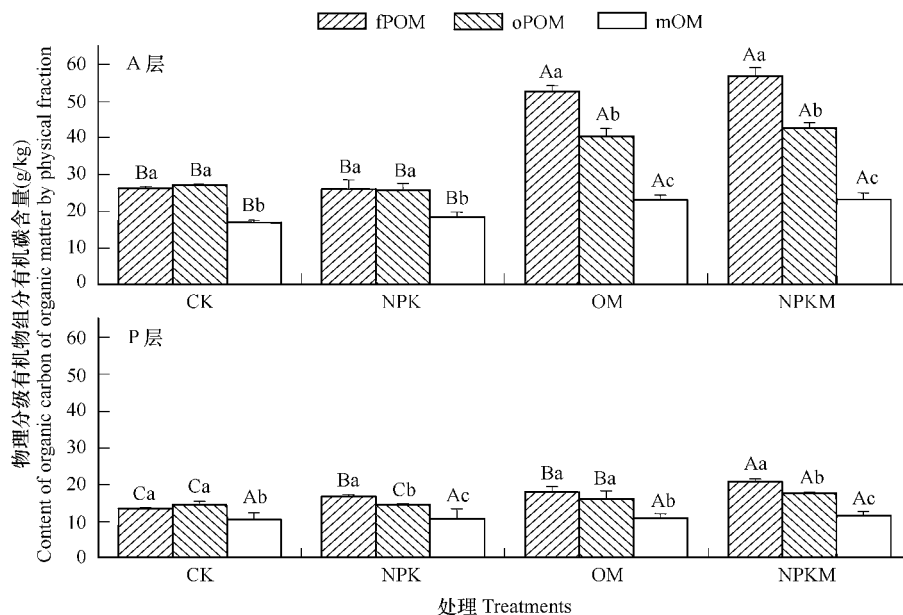


图2 施肥对物理分级有机物组分有机碳含量的影响 (g/kg)

Fig. 2 Effects of different fertilization on organic carbon content in different organic matter of physical fraction

根据图 1、图 2 物理分级有机物组分占土壤重量中的比例和有机碳含量, 计算出物理分级有机物组分有机碳占土壤有机碳的比例。在物理分级有机物组分有机碳占土壤有机碳的比例中, 矿物结合态有机碳所占比

例最高,其次是闭蓄态颗粒有机物,最低的是游离态颗粒有机物(图 3)。并且这些级别在不同施肥处理下的含量与物理分级有机物组分在土壤重量中的比例的趋势一致。A 层矿物结合态有机碳占土壤有机碳 50.06% ~ 74.02%,闭蓄态颗粒有机碳和游离态颗粒有机碳分别占 25.35% ~ 46.70% 和 0.62% ~ 2.58%,这与 Cambardella and Elliott 等的结果相符^[4,12,18];P 层矿物结合态有机碳占土壤有机碳 82.29% ~ 88.14%,闭蓄态颗粒有机碳和游离态颗粒有机碳分别占 11.43% ~ 16.60% 和 0.43% ~ 1.11%。在不同施肥处理下 A、P 2 层游离态颗粒有机碳、闭蓄态颗粒有机碳和矿物结合态有机碳占土壤有机碳的比例最高的处理分别是 NPKM、NPKM 和 CK。因此增施有机肥有利于提高土壤中游离态颗粒有机物、闭蓄态颗粒有机物的含量以及占土壤有机碳的比例。至于耕作措施和养分管理是否也对土壤有机物及其有机碳含量有影响,有待进一步研究。

2.2 不同施肥处理对团聚体的颗粒有机碳和矿物结合态有机碳的影响

2.2.1 不同施肥处理对团聚体物理分级有机物组分在土壤团聚体重量比例的影响

不同施肥处理团聚体物理分级有机物组分占团聚体重量比例如图 4 所示。同施肥处理同粒级团聚体颗粒有机物占土壤团聚体重量的比例,A 层比 P 层高;相反,矿物结合态有机物占土壤团聚体重量的比例 P 层比 A 层高。

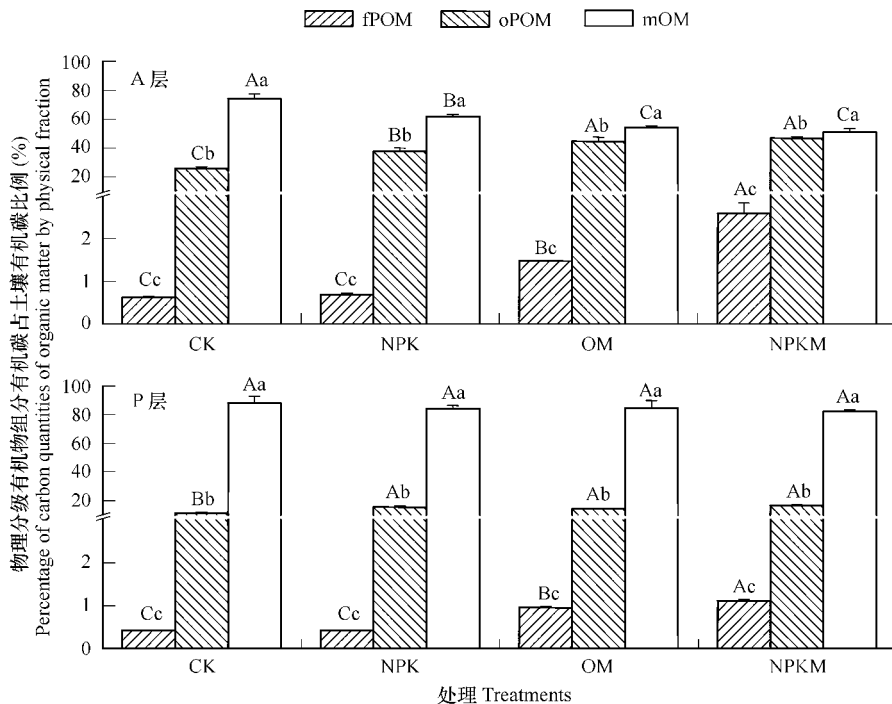


图 3 施肥对物理分级有机物组分有机碳占土壤有机碳比例的影响(%)

Fig. 3 Effects of different fertilizations on percentage of carbon quantities of organic matter by physical fractions in total SOC

在不同的团聚体之间,颗粒有机物占土壤团聚体重量的比例随团聚体粒径的减小而明显增加,以 0.05 ~ 0.25mm 团聚体为最高;而矿物结合态有机物占土壤团聚体重量的比例则呈相反的趋势,以 >3mm 团聚体为最高。

A 层,不同施肥处理 >3mm、1 ~ 3mm、0.25 ~ 1mm 和 0.05 ~ 0.25mm 团聚体中,颗粒有机物占土壤团聚体重量的比例都有如下趋势:NPKM > OM > NPK > CK;而矿物结合态有机物占土壤团聚体重量的比例的趋势为 NPKM < OM < NPK < CK。P 层与 A 层的变化趋势是一致的,但幅度没 A 层明显。

2.2.2 不同施肥处理对团聚体物理分级有机物组分有机碳含量的影响

不同施肥处理下团聚体物理分级有机物组分有机碳含量如图 5 所示。同施肥处理同粒级团聚体颗粒有

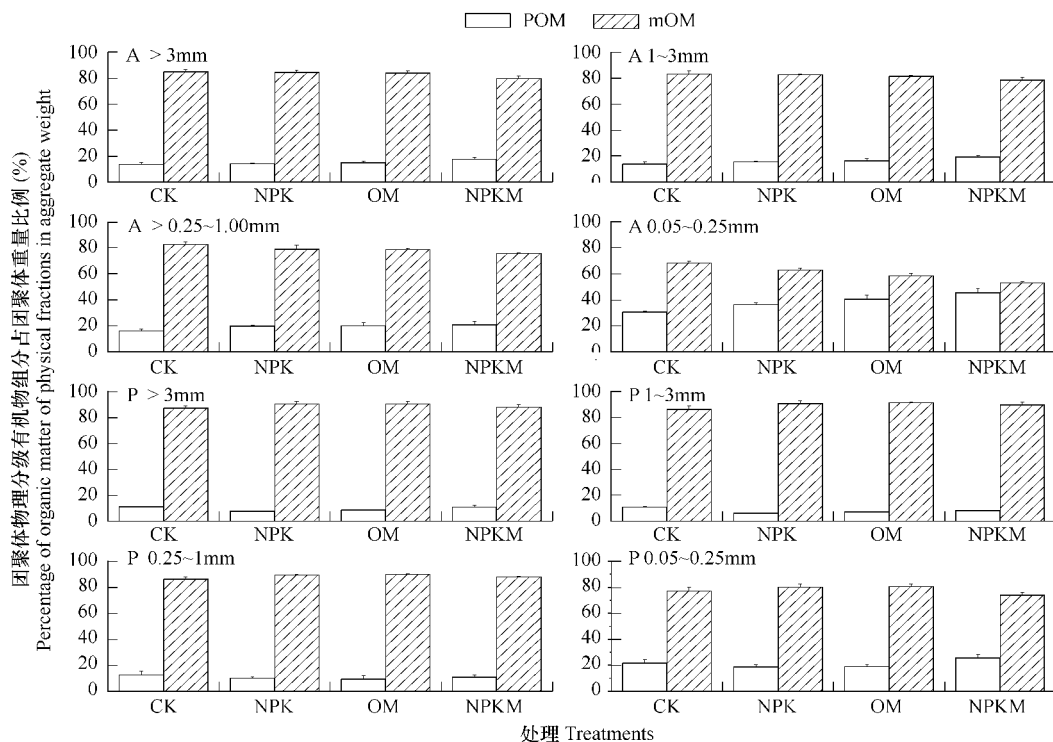


图4 施肥对团聚体物理分级有机组分占团聚体重量比例的影响

Fig. 4 Effects of different fertilization on percentage of organic matter of physical fractions in aggregate weight

矿物和矿物结合态有机物的有机碳含量,A层比P层高。

团聚体中颗粒有机物有机碳含量明显高于容积土壤(比较图2和图5)。说明团聚体更有利于保护颗粒有机物。颗粒有机物被粘粒包被后形成的团聚体,由于团聚体内部孔隙较小且更弯曲导致微生物很难到达,从而增加了其分解的难度^[1,2,19]。

图5表明,A、P两层不同施肥处理团聚体中颗粒有机物有机碳含量从高到低的顺序为:NPKM > OM > NPK > CK。A层同粒径团聚体中颗粒有机物有机碳含量 NPKM、OM 处理与 NPK、CK 处理之间差异显著($p < 0.05$);0.05~0.25mm、0.25~1mm 和 >3mm 团聚体中颗粒有机物有机碳含量 NPKM 处理与 OM 处理之间差异显著。P层0.05~0.25mm、0.25~1mm 和 1~3mm 团聚体中颗粒有机物有机碳含量 NPKM、OM 处理与 NPK、CK 处理之间差异显著($p < 0.05$);>3mm 团聚体中颗粒有机物有机碳含量 NPKM 处理与 OM、NPK、CK 处理之间差异显著,NPKM、OM、NPK 处理与 CK 处理之间差异也显著。A、P 两层各粒级团聚体中矿物结合态有机物有机碳含量各处理之间无显著差异。

在不同粒级团聚体之间,不同施肥处理下的微团聚体(<0.25mm)颗粒有机物有机碳含量显著高于大团聚体(>0.25mm)($p < 0.05$),以0.05~0.25mm 团聚体为最高,随着耕层团聚体粒径的增加而明显减少,这一结果与旱地^[20]的相反。Dexter^[21]认为较大的团聚体是通过土壤有机碳胶结较小的团聚体形成的,因此土壤有机碳含量是随着土壤团聚体的增大而增加。但是水稻土深受人为因素干扰,每年的犁耕翻耙使其土壤结构遭受很大破坏,而水稻土灌溉和晒田的干湿交替过程又重新形成具有一定稳定性的土壤结构。团聚体水稳定性是较大的团聚体低于较小的团聚体,这样较大团聚体在犁耕翻耙过程中容易分散,释放其中的颗粒有机物,而较小团聚体可能部分保存起来。而矿物结合态有机物有机碳含量以>3mm 团聚体为最高,与颗粒有机物有相反的趋势。至于耕作措施和养分管理是否也对土壤团聚体有机物及其有机碳含量有影响,有待于深入研究。

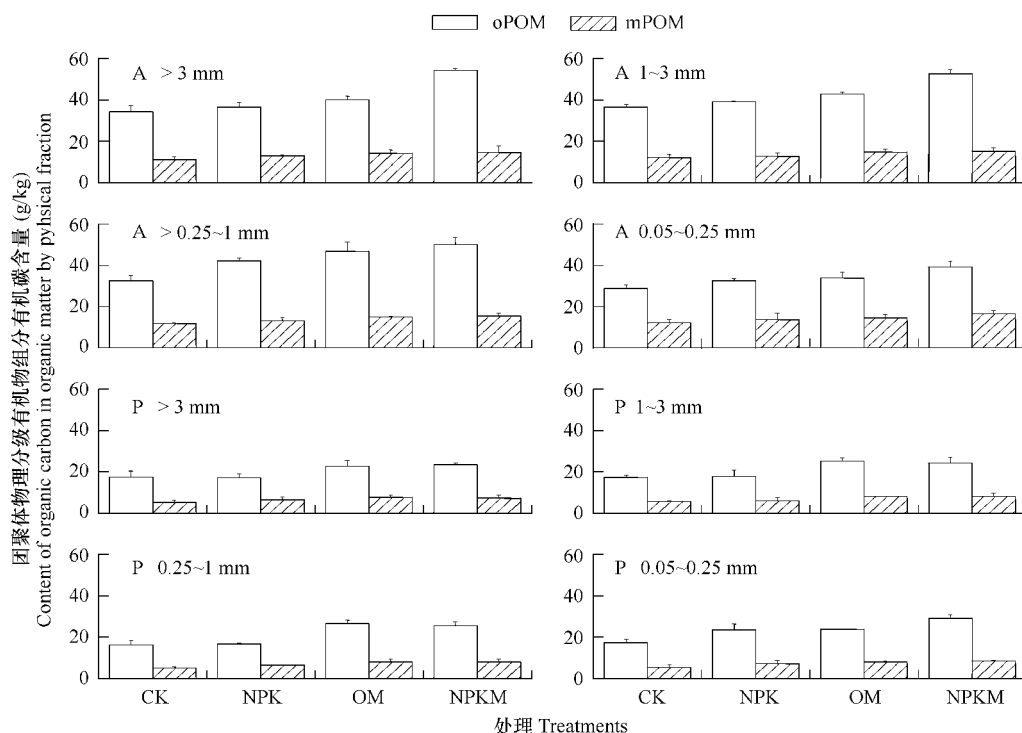


图5 施肥对土壤团聚体物理分级有机物组分有机碳含量的影响(g/kg)

Fig. 5 Effects of different fertilizations on content of organic carbon in organic matter by physical fraction in aggregate

3 结论

(1)各处理土壤和团聚体中,A层颗粒有机物含量比P层高,随着土层的加深呈下降的趋势;而矿物态有机物含量P层比A层高,随着土层的加深,呈上升的趋势。A、P层土壤游离态颗粒有机碳、闭蓄态颗粒有机碳和矿物态有机碳占土壤有机碳的比例最高的处理分别是NPKM、NPKM和CK。这说明增施有机肥有利于土壤颗粒有机物碳库的增加。

(2)各处理中,颗粒有机物占土壤团聚体重量的比例随着团聚体粒径的减小而明显增加,而矿物结合态有机物趋势相反。施用有机肥处理提高了颗粒有机物占土壤团聚体重量的比例。土壤微团聚体(<0.25mm)颗粒有机物有机碳含量显著高于大团聚体(>0.25mm),随着耕层团聚体粒径的增加而明显减小。这些结果表明微团聚体对颗粒有机物具有富集和保护作用。

References:

- [1] Golchin A, Oades J M, Skjemstad J O, *et al.* Soil structure and carbon cycling. *Australian Journal of Soil Research*, 1994, 32:1043—1068.
- [2] Golchin A, Oades J M, Skjemstad J O, *et al.* Study of free and occluded particulate organic matter in soils by solid-state ^{13}C CP/MAS NMR Spectroscopy and Scanning Electron Microscopy. *Australian Journal of Soil Research*, 1994, 32:285—309.
- [3] Carter M R. Analysis of soil organic matter storage in agroecosystems. In: Carter, M. R., Stewart, B. A., eds. *Adv. Soil Science: Structure and Organic Matter storage in Agricultural soils*. London: CRC Lewis, 1996. 3—11.
- [4] Chan K Y, Heenan D P, Oates A. Soil carbon fractions and relationship to soil quality under different tillage and stubble management. *Soil & Tillage Research*, 2002, 63:133—139.
- [5] Swift R S. Sequestration of carbon by soil. *Soil Science*, 2001, 166:858—871.
- [6] Li Q K. *Paddy soils of China*. Beijing: Science Press, 1992. 174—175.
- [7] Li J T, Zhang B, Peng X H, *et al.* Effects of fertilization on particulate organic matter formation and aggregate stability in paddy soil. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(6): 912—917.
- [8] Sainju U M, Terrill T H, Gelaye S, *et al.* Soil aggregation and carbon and nitrogen pools under rhizoma peanut and perennial weeds. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, 67:146—155.

- [9] Mendes I C, Bandick A K, Dick R P, *et al.* Microbial biomass and activities in soil aggregates affected by winter cover crops. *Soil Science Society of America Journal*, 1999, 63:873 — 881.
- [10] Peng X H, Zhang B, Zhao Q G. Effect of soil organic carbon on aggregate stability after vegetative restoration on severely eroded red soil. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(10): 2177 — 2183.
- [11] Lchin A, Oades J M, Skjemstad J O, *et al.* Soil structure and carbon cycling. *Australian Journal of Soil Research*, 1994, 32:1043 — 1068.
- [12] Cambardella C A, Elliott E T. Particulate soil organic matter changes across a grassland cultivation sequence. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56:777 — 783.
- [13] Lu R K. *Analytical methods for soil agricultural chemistry*. Beijing: Science Press, 2000.
- [14] Dexter A R. Advances in characterization of soil structure. *Soil & Tillage Research*, 1988, 11:199 — 238.
- [15] Tisdall J M, Oades J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science*, 1982, 33:141 — 163.
- [16] Bremer E, Janzen H H, Johnston A M. Sensitivity of total, light fraction and mineralizable organic-matter to management-practices in a leithbridge soil. *Canadian Journal of Soil Science*, 1994, 74:131 — 138.
- [17] Wei C F, Chen S Z, Xie D T. Effects of long-term application of organic manures on characters of organo-mineral complex in purple paddy soil. *Acta Pedologica Sinica*, 1995, 32 (2): 159 — 166.
- [18] Six J, Elliot 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: 1367 — 1377.
- [19] Horn R, Taubner H, Wuttke M, *et al.* Soil physical properties related to soil structure. *Soil & Tillage Research*, 1994, 30:187 — 216.
- [20] Puget P, Chenu C, Balesdent, J. Dynamics of soil organic matter associated with particle-size fractions of water-stable aggregates. *European Journal of Soil Science*, 2000, 51:595 — 605.
- [21] Dexter A R. Advances in characterization of soil structure. *Soil & Tillage Research*, 1988, 11: 199 — 238.

参考文献:

- [6] 李庆逵等编. 中国水稻土. 北京:科学出版社,1992. 174 ~ 175.
- [7] 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): 912 ~ 917.
- [10] 彭新华,张斌,赵其国. 红壤侵蚀裸地植被恢复及土壤有机碳对团聚体稳定性的影响. *生态学报*, 2003, 23(10): 2177 ~ 2183.
- [13] 鲁如坤主编. *土壤农业化学常规分析方法*. 北京:科学出版社,2000.
- [17] 魏朝富,陈世正,谢德体. 长期施用有机肥对紫色水稻土有机无机复合性状的影响. *土壤学报*, 1995,32: 159 ~ 166.