

# 长期施肥对洞庭湖区水稻土物理性状及团聚体中有机碳积累的影响

李文军<sup>1,2</sup>, 彭保发<sup>1</sup>, 周诗彪<sup>1</sup>, 王亚力<sup>1</sup>, 陈端吕<sup>1</sup>, 童德保<sup>3</sup>, 李红专<sup>3</sup>

(1.湖南文理学院, 湖南 常德 415000; 2.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; 3.湖南省汉寿县农业局, 湖南 汉寿 415900)

**摘要:**基于27年长期试验,采集0~20 cm和20~40 cm两土层原状土样,研究施氮磷钾化肥及配施有机肥对洞庭湖区典型水稻土物理性状及团聚体中有机碳积累的影响。结果表明:与不施肥相比,长期施肥后两土层内土壤总孔隙度、田间持水量分别提高2.6%~8.3%、-3.0%~23.5%,土壤容重则降低3.0%~11.6%,其影响效应随土层加深而减弱,在0~20 cm土层均达显著水平( $P<0.05$ )。长期施肥后粒径>5 mm具不良孔性的团块结构数量明显减少,两土层中0.5~2 mm和2~5 mm大团粒结构体比例则较不施肥处理分别显著提高57.3%~94.3%和25.8%~103.8%( $P<0.05$ ),土壤物理结构得以改善。随粒径减小,团聚体中有机碳含量和储量分别呈现逐渐增加和降低的变化趋势,长期施肥均显著提高两土层特别是0~20 cm层土壤及各级团聚体中有机碳含量( $P<0.05$ )。施肥主要影响且显著提升粒径<5 mm特别是0.5~2 mm和2~5 mm团聚体中有机碳储量。研究表明,氮磷钾化肥配施有机肥改善土壤物理性状和增强团聚体固碳能力的效应较氮磷钾化肥单施更为突出,且随有机肥施用比例增加,其效应愈趋明显。

**关键词:**施肥;水稻土;物理性状;团聚体;有机碳;洞庭湖区

中图分类号:S158.3 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2015)04-0761-08 doi:10.11654/jaes.2015.04.022

## Effects of Long-term Fertilization on Soil Physical Properties and Aggregate Organic Carbon Accumulation in Paddy Soils of Dongting Lake Region, China

LI Wen-jun<sup>1,2</sup>, PENG Bao-fa<sup>1</sup>, ZHOU Shi-biao<sup>1</sup>, WANG Ya-li<sup>1</sup>, CHEN Duan-lü<sup>1</sup>, TONG De-bao<sup>3</sup>, LI Hong-zhuan<sup>3</sup>

(1.Hunan University of Arts and Science, Changde, 415000, China; 2.State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3.Agricultural Bureau of Hanshou County, Hanshou 415900, China)

**Abstract:** Soil physical properties and organic carbon are important indexes of soil quality, which are sensitive to fertilization practices. Based on a 27-year fertilization experiment on paddy field in Dongting Lake region, China, the responses of soil physical properties and dry sieved aggregate-associated organic carbon to applications of nitrogen (N), phosphorus (P) and potassium (K) mineral fertilizers with or without organic manure were studied at 0~20 cm and 20~40 cm soil layers. Compared to long-term unfertilized treatments, the soil total porosity and field moisture capacity in the two soil layers under fertilizer application increased by 2.6%~8.3% and -3.0%~23.5%, respectively, while the soil bulk density decreased by 3.0%~11.6%, which were significant ( $P<0.05$ ) at 0~20 cm layer but not at 20~40 cm layer. The amount of soil aggregates in the >5 mm group decreased after long-term fertilization, while the proportions of aggregates in 2~5 mm and 0.5~2 mm groups increased significantly ( $P<0.05$ ) by 57.3%~94.3% and 25.8%~103.8%, respectively, in two soil layers. These meant that the physical structure of paddy soil was improved by long-term fertilization. Along with aggregates size decreasing, the contents of aggregate-associated organic carbon increased, but storages presented an opposite trend. Both mineral and organic fertilizers applications significantly ( $P<0.05$ ) increased the organic carbon contents in various size classes of aggregates, but such effects decreased with increasing soil

收稿日期:2014-11-27

基金项目:国家自然科学基金(41201297,41471114);土壤与农业可持续发展国家重点实验室开放基金(0812201239);湖南省教育厅科研项目(12C0827);湖南省科技厅计划项目(2011NK3047);湖南省重点建设学科(产业经济学,应用化学)

作者简介:李文军(1982—),男,湖南常德人,博士,讲师,从事农田生态系统碳氮循环研究。E-mail:liwenjun1982@126.com

depths. Organic carbon storages in the <5 mm aggregates in two soil layers were significantly higher in all fertilization treatments ( $P<0.05$ ) than those of no fertilizer treatment, but the storages of aggregates-associated organic carbon in the 2~5 mm and 0.5~2 mm aggregates were more sensitive to long-term fertilization than in others. It can be concluded that the improvements of soil quality varied with different fertilization modes. Combined application of N, P, K fertilizers and organic manure was better than balanced application of N, P, K fertilizers in improving soil physical properties and enhancing carbon sequestration in aggregates. With increasing rates of manure applications, the improvement of soil quality would become more distinct.

**Keywords:** fertilization; paddy soil; physical properties; soil aggregates; organic carbon; Dongting Lake region

土壤质量优劣深刻影响着土壤的生产性能,土壤物理性质不仅是土壤质量评价的重要指标,而且是土壤肥力的重要内涵<sup>[1]</sup>,土壤中各种化学和生物过程都依赖土壤的物理状态和土壤中能量物质交换过程<sup>[2]</sup>。有机质是形成土壤肥力的基础,是土壤养分的重要来源,有机质不仅影响土壤容重、孔隙度、持水特征等物理属性<sup>[3-4]</sup>,而且与土壤团聚体结构具有密切的关系<sup>[5]</sup>,有机质直接增强土壤团粒的胶结作用,改善土壤物理结构,相反土壤团粒结构的破坏与消失则造成土壤有机碳等养分的流失,引发生态风险<sup>[6]</sup>。施肥是最普遍的农艺活动,国内外研究表明,施用有机肥能提升土壤有机质水平从而改善土壤孔隙状况、增强土壤入渗及蓄水性能<sup>[4,7-8]</sup>,进而提高大团聚体数量比例及其中有机碳含量<sup>[9]</sup>,但其效应受有机肥类型的明显影响<sup>[10]</sup>,施用高量有机肥并不能获得最优的蓄水保墒效果<sup>[11]</sup>,甚至会明显降低大团聚体含量<sup>[12]</sup>,而有机肥配施化肥则最有利于土壤水稳性团聚体的形成和稳定<sup>[13]</sup>。化肥单施是较普遍的施肥模式,但其对土壤物理性状的影响因研究条件的差异而有明显不同<sup>[4,10,14]</sup>,对团聚体中有机碳积累的影响也存在较大的不确定性<sup>[15-16]</sup>,因此进一步开展长期不同施肥影响下土壤物理性状演变及固碳特性研究对深化认识人为活动与土壤质量演变关系、合理评价农田施肥效应具有重要意义。

洞庭湖区是我国著名的“鱼米之乡”,境内分布着多种类型水稻土,然而长期的开发利用致使湖区农田土壤侵蚀、养分流失等生态问题凸显<sup>[17]</sup>,由此制约了水稻产量的进一步提高。研究指出,高产水稻土除具有较高的有机碳含量外,尚依赖于良好的土壤物理条件<sup>[18]</sup>,然而当前对人为活动影响下洞庭湖区水稻土物理性状响应特征的研究较为缺乏。为此,本文基于长期试验,研究长期施肥对洞庭湖区水稻土孔隙、持水性能、土壤结构等物理性状的影响,并探究团聚体中有机碳积累特性,为区域双季稻轮作水稻土科学施肥提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

国家级稻田肥力与肥料效应长期定位试验点位于湖南省常德市汉寿县(111°51'20" E, 28°55'48" N),属中亚热带向北亚热带过渡的季风湿润气候区,年均降水量 1 342.2 mm,多年平均气温 16.7 °C,全年无霜期 274 d,代表区域为我国江南平原复合农业生态类型区。供试土壤为环洞庭湖区第四纪红土母质发育而成的红壤性水稻土,俗称红黄泥,试验前耕作土层(0~20 cm)基本理化性质为:pH(H<sub>2</sub>O)5.83,有机碳 19.5 g·kg<sup>-1</sup>,碱解氮 175.0 mg·kg<sup>-1</sup>,速效磷 6.8 mg·kg<sup>-1</sup>,速效钾 50.0 mg·kg<sup>-1</sup>。

### 1.2 田间试验设计

稻田长期施肥效应试验始于 1986 年,实行“早稻-晚稻-冬闲”的耕作制度,共设 6 个处理小区,各小区均按国家土壤肥力长期定位监测标准统一设置为 66.7 m<sup>2</sup>(10 m×6.67 m),随机排列,未设重复。小区之间设置高出田间水面 30 cm、下至犁底层以下 5 cm、宽度为 25 cm 的水泥田埂,并设置排水沟,各小区单灌单排。

本研究选择其中 4 个处理:对照(CK),不施肥;单施氮磷钾化肥(NPK),采用测土施肥技术,根据试验点土壤氮、磷、钾供应情况和作物预期需求量均衡施氮(N)、磷(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)、钾(K<sub>2</sub>O),年均施用量分别为 300、94.5、180 kg·hm<sup>-2</sup>;低量有机肥与氮磷钾化肥配施(LOM),有机肥氮占总施氮量的 30%;高量有机肥与氮磷钾化肥配施(HOM),有机肥氮占总施氮量的 60%。施肥各处理同季作物上氮、磷、钾素投入量均相同。供试肥料为尿素、钙镁磷肥、氯化钾和有机肥(早稻为紫云英,晚稻为猪粪)。有机肥和磷肥一次性基施,其中有机肥在施用前测定其氮、磷、钾养分含量,LOM 和 HOM 处理早、晚稻季有机肥年均施用量均分别为 11 250、22 500 kg·hm<sup>-2</sup>,氮肥按 7:3 的基追比例施用,钾肥则作追肥施用。

### 1.3 样品采集与分析

#### 1.3.1 土壤样品采集与预处理

表层(0~20 cm)和亚表层(20~40 cm)土样均于2013年11月晚稻收获后采集,根据研究指标不同,采样方法及预处理过程有所不同。

(1)土壤容重分析样品:在各试验小区随机挖掘三个土壤剖面,在各土壤剖面各采样土层中部区域(表层为8~13 cm深度区间,亚表层为28~33 cm深度区间)用环刀(容积100 cm<sup>3</sup>;内径50.5 mm×高50 mm)按标准方法<sup>[19]</sup>采集原状土壤样品3~4个。确保环刀内土样在室内分析前不受挤压和损失,各土壤剖面同一土层采集到的原状土样测定结果取均值,作为一个有效分析数值。

(2)土壤田间持水量测定样品:采集方法及有效分析数值确定方法与土壤容重分析相同。

(3)土壤团聚体组成分析样品:在各小区用土铲按“S”形随机选取10~12个样点采集原状土样,如此采样重复3次。将每次所采自同一土层的10~12个原状土样予以非破坏性混合(组成一个混合原状土壤样品)后在室温下自然风干,待土壤含水量达到塑性时(含水量约为25%),用手把大土块沿着自然破碎面轻轻掰成直径约为1 cm的小块,挑去植物根系及石砾并过10 mm土筛后完全风干并混匀。

#### 1.3.2 样品测定与数据处理

(1)土壤容重参照刘光崧<sup>[19]</sup>的方法测定:将取回的环刀土样去掉顶盖,先在电热板上烘干到近乎风干状态,然后放入烘箱中,在(105±2)℃下烘干至恒重,并采用下式计算容重结果:

$$S_B = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (1)$$

(2)土壤总孔隙度采用如下公式进行计算<sup>[20]</sup>:

$$S_P = 100 \times \left( 1 - \frac{S_B}{S_D} \right) \quad (2)$$

(3)土壤田间持水量采用威尔科克斯法<sup>[20]</sup>测定:首先将环刀采集原状土放入盛有蒸馏水的瓷盘中,吸水饱和一昼夜(勿使环刀上面淹水),与此同时将额外采集的同土层过1 mm筛的风干土装入环刀中,并轻拍结实;然后将装有饱和水分湿土的环刀底盖打开,连同滤纸一起紧密放在风干土的环刀上,经8 h充分吸水后,从装原状土环刀中称取土壤15~20 g(准确称重),经烘干后计算所获土壤含水量即为田间持水量。

(4)团聚体分级采用干筛法<sup>[19]</sup>:从3个混合原状土壤样品中分别称取过10 mm筛土样200 g,置于最大孔径为5 mm的土筛上,其下依次设置2、0.5、0.25

mm套筛,底层放置底盒,用于收取<0.25 mm团聚体。再将套筛置于XSB-88机械筛上振荡10 min,分离出>5、2~5、0.5~2、0.25~0.5 mm 4级团聚体,称重并计算各粒级团聚体质量百分比。

(5)土壤及各级团聚体中有机碳含量测定:各级团聚体及土壤样品过0.15 mm筛后,采用重铬酸钾容量法-外加热法测定<sup>[21]</sup>。

(6)各级团聚体中有机碳储量的计算参照向艳文等<sup>[22]</sup>所提公式并略作改进:

$$Y = H \times S_B \times C_{OC} \times R \quad (3)$$

土壤有机碳储量为粒径>0.25 mm各级团聚体及<0.25 mm颗粒中有机碳储量之和。

以上各式中: $S_B$ 为土壤容重,g·cm<sup>-3</sup>;  $m_2$ 为环刀和烘干土总质量,g;  $m_1$ 为环刀质量,g;  $V$ 为环刀体积,100 cm<sup>3</sup>;  $S_P$ 为土壤总孔隙度,%;  $S_D$ 在本研究中取恒值2.65 g·cm<sup>-3</sup>;  $H$ 为土层厚度,cm;  $Y$ 为各级团聚体有机碳储量,kg·hm<sup>-2</sup>;  $C_{OC}$ 为各级团聚体有机碳含量,g·kg<sup>-1</sup>;  $R$ 为各级团聚体质量百分比,%。

### 1.4 数据处理与统计分析

采用SigmaPlot 10.0绘图、Microsoft 2003制表,采用SPSS 16.0软件对试验数据进行单因素方差分析,并使用Duncan新复极差法进行多重比较,统计差异显著性定义为 $P \leq 0.05$ 水平。

## 2 结果与分析

### 2.1 施肥对土壤容重、总孔隙度和田间持水量的影响

容重和总孔隙度分别表征土壤松紧和孔隙状况,二者关系密切,对于相同类型土壤,比重相对恒定,土壤总孔隙度大小直接决定于容重大小<sup>[23]</sup>。表1表明,各处理0~20 cm层土壤容重均明显低于20~40 cm层,土壤总孔隙度则呈相反趋势。施肥对土壤容重和总孔隙度均有一定影响,与CK相比,长期施肥均降低0~20 cm和20~40 cm层土壤容重,同时增加其总孔隙度,计算得知,施肥处理两土层土壤容重较CK处理降低3.0%~11.6%,总孔隙度则增加2.6%~8.3%,但其效应在20~40 cm土层始终未达统计显著水平( $P > 0.05$ ),表明施肥对土壤容重和总孔隙度的影响主要集中在0~20 cm土层。同一土层中,施肥处理间土壤容重均表现出NPK处理高于LOM和HOM处理,土壤总孔隙度则呈相反趋势,二者之间的差异在0~20 cm土层达显著水平( $P < 0.05$ ),表明有机肥持续施入是降低土壤紧实度、改善土壤通气状况的更优施肥措施。



表1显示,施肥对土壤田间持水量的影响因土层差异而有明显不同,施肥各处理0~20 cm层土壤田间持水量均较CK处理显著提高( $P<0.05$ ),增幅达6.8%~23.5%,但20~40 cm层施肥处理的土壤田间持水量仅较CK处理提高-3.0%~7.7%,增加效应明显减弱,NPK处理该层的土壤田间持水量甚至略低于CK处理。从0~40 cm土层整体来看,施肥后土壤田间持水量均值较CK处理提高2.4%~14.5%,土壤持水特性呈改善趋势。表1表明,施肥处理间两土层田间持水量均表现为NPK处理显著低于氮磷钾肥配施有机肥处理( $P<0.05$ )。随有机肥施用比例增加,0~20 cm层土壤田间持水量呈增加趋势,HOM处理0~40 cm土层田间持水量均值亦高于LOM处理,显现更突出的土壤持水能力提升效应。

## 2.2 施肥对土壤团聚体组成的影响

团聚体是土壤结构的基本单元,土壤结构单元按其直径大小分为团块(>5 mm)、大团聚体(0.25~5 mm)、微团聚体(0.005~0.25 mm)和黏团(<0.005 mm)<sup>[24]</sup>,一般用粒径>0.25 mm的团聚体比例来反映土壤团聚体的数量变化<sup>[25]</sup>。由表2可知,自然状态下,试验土壤结构单元主要以团块和大团聚体为主,同一土层中,各处理中>0.25 mm团聚体含量均高于96.0%,且CK处理高于施肥各处理。

>0.25 mm的团聚体质量优劣主要通过各级团聚体比例来反映<sup>[26]</sup>,表2表明,不同土层中>5 mm的团块含量在长期施肥后较CK降低10.2%~18.5%( $P<0.05$ ),且以HOM处理降低效应最为突出;2~5、0.5~2、0.25~0.5 mm团聚体含量在不同处理间均呈现CK<NPK<LOM<HOM的顺序,但NPK处理未能明显提高0~20 cm层0.25~0.5 mm团聚体含量( $P>0.05$ ),而施肥各处理两土层2~5 mm和0.5~2 mm团聚体含量较CK均有显著增加( $P<0.05$ ),增幅分别达57.3%~

表1 不同处理土壤容重、总孔隙度和田间持水量

Table 1 Soil bulk density, total porosity and field capacity in different treatments

| 处理<br>Treatment | 土层 Soil<br>layer/cm | 容重 Bulk<br>density/g·cm <sup>-3</sup> | 总孔隙度 Total<br>porosity/% | 田间持水量<br>Field capacity/% |
|-----------------|---------------------|---------------------------------------|--------------------------|---------------------------|
| CK              | 0~20                | 1.12±0.01A                            | 57.7±0.3C                | 26.4±0.6D                 |
|                 | 20~40               | 1.35±0.02A                            | 49.1±0.9A                | 23.4±0.6BC                |
|                 | 平均                  | 1.24                                  | 53.3                     | 24.9                      |
| NPK             | 0~20                | 1.08±0.01B                            | 59.2±0.5B                | 28.2±0.6C                 |
|                 | 20~40               | 1.31±0.03A                            | 50.4±1.1A                | 22.7±0.6C                 |
|                 | 平均                  | 1.20                                  | 54.8                     | 25.5                      |
| LOM             | 0~20                | 1.00±0.02C                            | 62.3±0.5A                | 30.8±0.5B                 |
|                 | 20~40               | 1.29±0.06A                            | 51.4±2.3A                | 25.2±0.5A                 |
|                 | 平均                  | 1.15                                  | 56.9                     | 28.0                      |
| HOM             | 0~20                | 0.99±0.01C                            | 62.5±0.3A                | 32.6±0.8A                 |
|                 | 20~40               | 1.29±0.01A                            | 51.4±0.3A                | 24.5±0.4AB                |
|                 | 平均                  | 1.14                                  | 57.0                     | 28.5                      |

注:同一列中同一土层不同大写字母代表处理间差异显著。下同。

Note: Different letters in the same soil layer within each column mean significant differences between different treatments. The same as below.

94.3%和25.8%~103.8%。由此可见,单施化肥和化肥配施有机肥对各级团聚体含量的影响趋势(增或减)一致,但更有利于增加0.5~5 mm团聚体含量。

## 2.3 施肥对土壤团聚体中有机碳积累的影响

### 2.3.1 不同处理下团聚体中有机碳含量

不同处理团聚体中有机碳含量见图1。与CK处理相比,NPK、LOM、HOM处理0~20 cm层土壤有机碳含量分别提高10.2%、20.8%、24.2%,20~40 cm层则分别提高7.3%、14.9%、17.2%,施肥后两土层土壤有机碳含量较CK均有显著增加( $P<0.05$ )。不论施肥与否,随团聚体直径减小,各土层团聚体中有机碳含量均增大,同级团聚体中有机碳含量均表现为0~20 cm土层明显高于20~40 cm土层。不同处理间各级团聚体中有机碳含量总体表现出HOM>LOM>NPK>CK

表2 不同处理各土层干筛团聚体组成

Table 2 Distribution of dry sieved soil aggregates in different layers under different treatments

| 处理 Treatment | 土层 Soil layer/cm | 团聚体百分比 Aggregate percentages/% |           |           |             |            |
|--------------|------------------|--------------------------------|-----------|-----------|-------------|------------|
|              |                  | >5 mm                          | 2~5 mm    | 0.5~2 mm  | 0.25~0.5 mm | <0.25 mm   |
| CK           | 0~20             | 80.2±1.1A                      | 10.3±0.8B | 6.2±0.8C  | 1.1±0.2C    | 97.8±0.4A  |
|              | 20~40            | 83.4±2.2A                      | 8.8±1.3B  | 5.2±0.8B  | 1.0±0.2B    | 98.5±0.4A  |
| NPK          | 0~20             | 72.0±1.4B                      | 16.2±1.3A | 7.8±0.3B  | 1.3±0.1BC   | 97.3±0.2AB |
|              | 20~40            | 72.4±2.0B                      | 14.5±2.2A | 9.4±2.4A  | 1.5±0.2A    | 97.8±0.3B  |
| LOM          | 0~20             | 68.1±1.4C                      | 17.2±1.2A | 9.9±1.4A  | 1.8±0.3AB   | 97.0±0.3B  |
|              | 20~40            | 71.1±1.5BC                     | 15.4±1.5A | 9.7±0.3A  | 1.6±0.3A    | 97.8±0.2B  |
| HOM          | 0~20             | 65.7±2.5C                      | 17.9±1.8A | 10.9±1.0A | 2.3±0.4A    | 96.8±0.1B  |
|              | 20~40            | 68.0±1.8C                      | 17.1±1.6A | 10.6±0.7A | 1.9±0.2A    | 97.6±0.2B  |

的顺序,且施肥处理显著高于 CK ( $P<0.05$ )。进一步计算得知,施肥后>5、2~5、0.5~2、0.25~0.5 mm 团聚体中有机碳含量增幅分别由 0~20 cm 层的 8.7%~20.3%、9.4%~25.0%、14.3%~26.9%、20.2%~43.3%下降至 20~40 cm 土层的 5.5%~16.0%、3.6%~11.9%、13.7%~16.3%、7.5%~18.6%,显示施肥对 0~20 cm 土层团聚体中有机碳含量的提升效应更为明显。

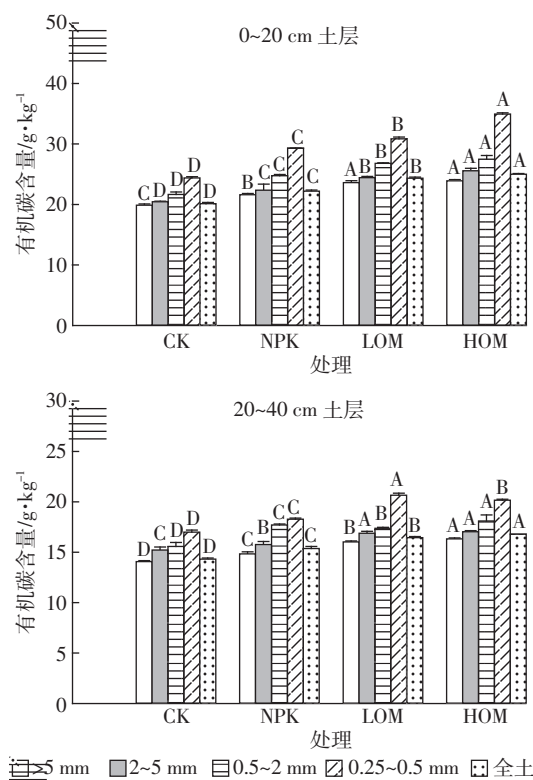
### 2.3.2 不同处理下团聚体中有机碳储量

各级团聚体及土壤有机碳储量结果见图 2。随土层加深,土壤有机碳储量均呈下降趋势,与 CK 处理相比,氮磷钾均衡施肥及与有机肥配施均显著增加两土层土壤有机碳储量 ( $P<0.05$ )。不论施肥与否,不同大小团聚体中有机碳储量差异均较明显,同一土层中随团聚体粒径减小其储量显著降低。

图 2 表明,与 CK 处理相比,施肥后相同大小团聚体中有机碳储量的变化趋势(增加或降低)一致,但变化幅度则因团聚体大小不同而存在较大差异,计算

得知:两土层中,施肥处理>5 mm 团聚体中有机碳储量较 CK 处理降低 5.8%~12.8% ( $P<0.05$ ),但其 2~5 mm、0.5~2 mm、0.25~0.5 mm 团聚体中有机碳储量则较 CK 处理分别提高 65.4%~181.4%、39.0%~125.3%、35.1%~107.8%,可见长期施肥对试验水稻土块状结构体有机碳储量的影响相对较小,而对大团聚体中有机碳储量的影响效应明显增强。由图 2 结果进一步计算得知,施肥处理同土层土壤有机碳储量在 2~5 mm 和 0.5~2 mm 团聚体中的分配比例较 CK 处理分别提高 5.5~8.1、2.0~5.7 个百分点,在 0.25~0.5 mm 团聚体中的分配比例则仅较 CK 处理提高 0.3~1.8 个百分点,表明施肥主要通过增加 2~5 mm 和 0.5~2 mm 团聚体中有机碳积累来提升土壤整体有机碳储量。

团聚体中有机碳储量的变化亦受肥料类型及用量的明显影响。相对于 NPK 和 LOM 处理,HOM 处理两土层中<5 mm 各级团聚体及全土中有机碳储量均有显著增加 ( $P<0.05$ ),而 LOM 处理与 NPK 处理相比较,亦未能显著增加 20~40 cm 土层 0.5~2 mm 团聚体中有机碳储量。



图中不同大写字母表示同级团聚体(或全土)

不同处理间差异显著。下同

Different letters within each particle size of aggregate and whole soil mean significant differences between different treatments. The same as below

图 1 不同处理土壤及团聚体中有机碳含量

Figure 1 Organic carbon contents in whole soil and different aggregates under different treatments

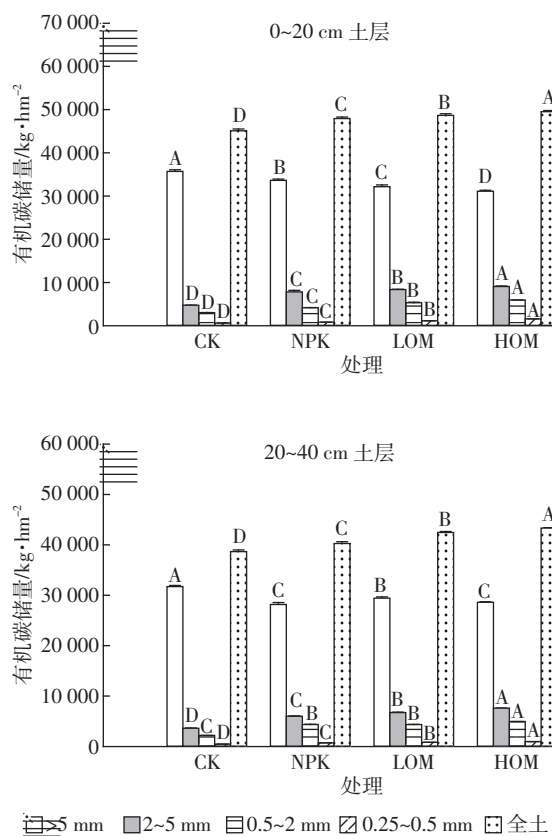


图 2 不同处理全土及团聚体中有机碳储量

Figure 2 Organic carbon storages in whole soil and different aggregates under different treatments

### 3 讨论

#### 3.1 施肥对土壤物理性状的影响

土壤容重和总孔隙度是评价土壤物理性质的重要指标,二者直接影响土壤水肥供应、通气状况及作物生长<sup>[2]</sup>。施肥会对土壤容重、总孔隙度产生重要影响,但化肥施用的处理效应则存在不确定性<sup>[4,27]</sup>。

单施化肥可能因作物对不同电荷离子的选择吸收、土壤吸附作用差异、杂质离子的作用等因素而导致土壤物理性质恶化,亦可通过增加有机物归还量而改善土壤物理性状<sup>[28]</sup>,其对土壤容重和总孔隙度的影响取决于具体试验情景中上述两种效应的综合作用强度。本研究中,与CK处理相比,连续27年实行氮磷钾均衡施肥后耕作层土壤容重和总孔隙度的改善效应更为突出。这与李强等<sup>[28]</sup>在黄绵土上的研究结论明显不同,这可能与研究区地形、土壤性质及施肥水平不同有关。土壤物理性状与有机碳含量关系密切,提升有机碳含量有助于改善土壤物理性状<sup>[4]</sup>,长期施肥对20~40 cm层土壤有机碳含量的显著提升并未带来同土层土壤松紧和孔隙状况的明显改善,说明施肥对土壤体积质量和孔隙特性的影响是一个渐进的积累过程,只有当土壤有机碳含量增加到较高水平时才对土壤容重和总孔隙度具有良好效应。有机肥具有较好的肥效,施用有机肥可直接向土壤补充大量活性有机物质、促进作物生长,更有效地提升土壤有机碳含量(图2),因此在降低土壤容重和增加土壤总孔隙度方面往往较化肥单施具有更突出的效果<sup>[4,29-30]</sup>。

田间持水量是反映土壤水分物理性质的特征常数,是表征土壤持水能力的重要指标<sup>[23]</sup>。许多研究结果显示,土壤持水能力与土壤孔隙度及有机碳含量密切相关<sup>[23,29]</sup>,长期施肥改变土壤孔隙状况和肥力水平,势必对土壤持水能力产生影响。本研究显示,施肥后田间持水量与土壤总孔隙度及有机碳含量之间总体表现出较明显的同向变化趋势,长期施肥提升土壤有机质水平,进而驱动土壤通气状况改善,有利于水稻土在干旱时节维持更好的水分状况,增加有机肥施用比例其效果更佳。

土壤结构体数量与质量是反映土壤培肥的重要指标,不同大小团聚体对土壤结构改善和养分固定的作用不同<sup>[6]</sup>,>5 mm的团块结构通常内部紧实,孔隙性很差,在有机质缺乏、耕作和干湿交替频繁的土壤条件下更易形成<sup>[31-32]</sup>,而团粒则是良好的土壤结构体。本研究揭示,长期施肥改变不同性质团聚体的分配比

例,减弱结构不良的块状结构体的形成,由此有利于改善红壤性水稻土结构体质量。化肥配施有机肥较化肥单施更有利于土壤团粒结构的形成,说明长期施用有机肥一方面更为明显地提升土壤有机质含量,促进土壤颗粒团聚化,另一方面可能更有效地增强水稻根系在土壤中的穿插能力,减缓块状结构的形成,从而更好地改善土壤物理结构特性。

#### 3.2 施肥对土壤团聚体中有机碳积累的影响

土壤团聚体与有机碳不可分割,互为影响,团聚体是有机碳的固存场所,而有机碳则是团聚体形成的重要胶结物质<sup>[33]</sup>。不同粒级团聚体中有机碳含量差异往往较大,对此,先前有研究认为团聚体的形成遵循“层级机制”,即大粒级团聚体系由小粒级团聚体经由有机、无机胶结物质的胶结作用而形成,因而含有更多的有机碳<sup>[34]</sup>。本研究显示,>0.25 mm的各级团聚体中有机碳含量的高低顺序与施肥与否及施肥模式无关,均随团聚体直径减小而增大,与李辉信等<sup>[35]</sup>在红壤丘陵区水稻土及黄丹丹等<sup>[36]</sup>在东北黑土上的研究结果相似,但明显不同于刘振东等<sup>[9]</sup>在华北褐土上所获结果。上述研究结果的差异性一方面表明团聚体中有机碳积累可能与土壤特性有关,另一方面亦显示除“层级机制”外,团聚体中有机碳积累尚存在其他机制,即小粒径团聚体受到大团聚体的物理保护及具有较大的比表面积和强大的有机物质吸附能力<sup>[36-37]</sup>,易于浓缩更多的有机碳。本研究揭示施肥后相同粒级团聚体中0~20 cm土层有机碳含量增幅较20~40 cm土层更为明显,表明浅层土壤受人为活动的影响更明显,对长期施肥的响应亦更敏感。

土壤不同粒级团聚体有机碳储量是其有机碳含量与相应大小团聚体含量的乘积,其大小能够反映土壤有机碳库在不同大小团聚体中的真实储量。本研究发现,虽然>5 mm团聚体是土壤有机碳储量的主要载体,但长期施肥提升两土层全土有机碳储量,其作用途径在于施肥显著增加了<5 mm特别是0.5~2 mm和2~5 mm大团粒结构体中有机碳储量。

单施化肥是最为普遍的农田施肥模式,先前研究表明,长期氮磷钾平衡施肥并非总对土壤或团聚体中有机碳积累有提升作用,在某些条件下甚至表现出较缺素施肥更差的处理效应<sup>[15]</sup>。本试验综合效应揭示,长期均衡施氮磷钾化肥对改善土壤物理性状及提升土壤固碳能力有益,但其效应明显弱于氮磷钾化肥配施有机肥处理,说明有机肥与化肥配合施用是改善研究区红壤性水稻土质量的更优施肥模式。本研究未探



讨其他化肥单施模式的生态效应,亦未涉及单施有机肥的生态效应评价,在今后的研究中应予以加强,同时亦应深化研究不同类型及用量的有机肥施用所产生的农学、生态及环境效应。

#### 4 结论

基于27年的定位施肥试验研究显示,长期均衡施氮磷钾化肥及配施有机肥均可降低红壤性水稻土土壤容重、增加土壤总孔隙度、提高土壤田间持水量,从而改善土壤松散状况、孔隙特性及持水性能,其影响效应在0~20 cm土层明显强于20~40 cm土层。与长期不施肥相比较,施肥土壤0.5~5 mm团粒含量显著增加,物理结构趋于优化。施肥改善土壤碳素肥力,表现为施肥后各土层特别是0~20 cm层土壤及>0.25 mm各级团聚体有机碳含量均较长期不施肥处理有显著增加,且显著提升了非块状结构体特别是2~5 mm和0.5~2 mm团聚体中有机碳储量。从施肥模式来看,化学氮磷钾肥配施有机肥改善土壤物理性状及增强大团聚体固碳能力的效应要优于化肥单施,提高有机肥配施比例,其效果更趋明显。

#### 参考文献:

- [1] 李裕元,邵明安,陈洪松,等.水蚀风蚀交错带植被恢复对土壤物理性质的影响[J].生态学报,2010,30(16):4306-4316.  
LI Yu-yuan, SHAO Ming-an, CHEN Hong-song, et al. Impact of vegetation recovery on soil physical properties in the cross area of wind-water erosion[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(16): 4306-4316.
- [2] 李保国,任国生,张佳宝.土壤物理学研究的现状、挑战与任务[J].土壤学报,2008,45(5):810-816.  
LI Bao-guo, REN Guo-sheng, ZHANG Jia-bao. Current status, challenges, and missions in soil physics[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 810-816.
- [3] Hati K M, Swarup A, Dwivedi A K, et al. Changes in soil physical properties and organic carbon status at the topsoil horizon of a vertisol of central India after 28 years of continuous cropping, fertilization and manuring[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2007, 119(1-2): 127-134.
- [4] Rasool R, Kukal S S, Hira G S. Soil organic carbon and physical properties as affected by long-term application of FYM and inorganic fertilizers in maize-wheat system[J]. *Soil and Tillage Research*, 2008, 101(1-2): 31-36.
- [5] 孙汉印,姬强,王勇,等.不同秸秆还田模式下水稳性团聚体有机碳的分布及其氧化稳定性研究[J].农业环境科学学报,2012,31(2):369-376.  
SUN Han-yin, JI Qiang, WANG Yong, et al. The distribution of water-stable aggregate-associated organic carbon and its oxidation stability under different straw returning modes[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(2): 369-376.
- [6] Bronick C J, Lal R. Soil structure and management: A review[J]. *Geoderma*, 2005, 124(1-2): 3-22.
- [7] Arriaga F J, Lowery B. Soil physical properties and crop productivity of an eroded soil amended with cattle manure[J]. *Soil Science*, 2003, 168(12): 888-899.
- [8] Zhang S L, Yang X Y, Wiss M, et al. Changes in physical properties of a loess soil in China following two long-term fertilization regimes[J]. *Geoderma*, 2006, 136(3-4): 579-587.
- [9] 刘振东,李贵春,周颖,等.无机肥配施粪肥对华北褐土团聚体分布及有机碳含量的影响[J].农业环境科学学报,2013,32(11): 2239-2245.  
LIU Zhen-dong, LI Gui-chun, ZHOU Ying, et al. The effect of fertilizer management practices on distribution of aggregates and SOC[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(11): 2239-2245.
- [10] 李成亮,孔宏敏,何园球.施肥结构与旱地红壤有机质和物理性质的影响[J].水土保持学报,2004,18(6):116-119.  
LI Cheng-liang, KONG Hong-min, HE Yuan-qiu. Effect of fertilization structures on soil organic matter and physical properties of upland field in red soil area[J]. *Journal of Water and Soil Conservation*, 2004, 18(6): 116-119.
- [11] 王晓娟,贾志宽,梁连友,等.旱地施有机肥对土壤水分和玉米经济效益影响[J].农业工程学报,2012,28(3):144-149.  
WANG Xiao-juan, JIA Zhi-kuan, LIANG Lian-you, et al. Effects of organic fertilizer application on soil moisture and economic returns of maize in dryland farming[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(3): 144-149.
- [12] 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 Zhong-liang, YU Wan-tai, 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.
- [13] 荣井荣,钟文昭,刘燕,等.干旱区长期施肥对土壤活性碳组分及团聚体的影响[J].生态学杂志,2013,32(10):2559-2566.  
RONG Jing-rong, ZHONG Wen-zhao, LIU Yan, et al. Effect of long-term fertilization on soil labile carbon fractions and aggregates in an arid area[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(10): 2559-2566.
- [14] 王慎强,李欣,徐富安,等.长期施用化肥与有机肥对潮土土壤物理性质的影响[J].中国生态农业学报,2001,9(2):77-78.  
WANG Shen-qiang, LI Xin, XU Fu-an, et al. Effect of long-term use of organic manure and chemical fertilizers on fluvo-aquic soils physical quality[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2001, 9(2): 77-78.
- [15] Su Y Z, Wang F, Suo D R, et al. Long-term effect of fertilizer and manure application on soil-carbon sequestration and soil fertility under the wheat-wheat-maize cropping system in Northwest China[J]. *Nutrient Cycling in Agro-ecosystems*, 2006, 75(1-3): 285-295.
- [16] Chen Y, Zhang X D, He H B, et al. Carbon and nitrogen pools in different aggregates of a Chinese Mollisol as influenced by long-term fertilization[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2010, 10(6): 1018-1026.
- [17] 邢旭东,张建新,鲁江,等.洞庭湖区土壤肥力的综合评价[J].农业现代化研究,2009,30(1):122-125.  
XING Xu-dong, ZHANG Jian-xin, LU Jiang, et al. Comprehensive e-

- valuation of soil fertility in Dongting Lake region[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2009, 30(1): 122-125.
- [18] 聂军, 郑圣先, 廖育林, 等. 湖南双季稻种植区不同生产力水稻土的物理性质[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(11): 2777-2784.
- NIE Jun, ZHENG Sheng-xian, LIAO Yu-lin, et al. Physical properties of paddy soils with different productivity in double-rice cropping region of Hunan Province[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(11): 2777-2784.
- [19] 刘光崧. 土壤理化分析与剖面描述[M]. 北京: 中国标准出版社, 1996: 7-8.
- LIU Guang-song. Soil physical-chemical analysis and profile description[M]. Beijing: China Standards Press, 1996: 7-8.
- [20] 中国科学院南京土壤研究所土壤物理研究室. 土壤物理性质测定法[M]. 北京: 科学出版社, 1978: 114-118.
- Research group of soil physical, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. Methods for soil physical properties[M]. Beijing: Science Press, 1978: 114-118.
- [21] 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, 1999: 12-282.
- LU Ru-kun. Analysis methods of soil agrochemistry[M]. Beijing: China Agriculture Science and Technique Press, 1999: 12-282.
- [22] 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 Yan-wen, ZHENG Sheng-xian, LIAO Yu-lin, 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.
- [23] 李会科, 张广军, 赵政阳, 等. 渭北黄土高原旱地果园生草对土壤物理性质的影响[J]. *中国农业科学*, 2008, 41(7): 2070-2076.
- LI Hui-ke, ZHANG Guang-jun, ZHAO Zheng-yang, et al. Effects of different herbage on soil quality characteristics of non-irrigated apple orchard in Weibei Loess Plateau[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(7): 2070-2076.
- [24] 熊毅, 姚贤良, 樊润威. 土壤结构的性态研究[J]. *土壤学报*, 1965, 13(4): 411-417.
- XIONG Yi, YAO Xian-liang, FAN Run-wei. Physical and morphological studies on soil structure[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1965, 13(4): 411-417.
- [25] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil structure and soil matter: II. A normalized stability index and the effect of mineralogy[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64(3): 1042-1049.
- [26] 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, 9(3): 545-550.
- HUO Lin, WU Tian-yun, LIN Hai-ming, et al. Effects of long-term fertilization on water-stable aggregates in calcic kastanozem of Loess Plateau[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 9(3): 545-550.
- [27] Rasool R, Kukal S S, Hira G S. Soil physical fertility and crop performance as affected by long term application of FYM and inorganic fertilizers in rice-wheat system[J]. *Soil and Tillage Research*, 2007, 96(1-2): 64-72.
- [28] 李强, 许明祥, 齐治军, 等. 长期施用化肥对黄土丘陵区坡地土壤物理性质的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(1): 103-109.
- LI Qiang, XU Ming-xiang, QI Zhi-jun, et al. Effects of long-term chemical fertilization on soil physical properties of slope lands in the Loess hilly region[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(1): 103-109.
- [29] 李江涛, 钟晓兰, 张斌, 等. 长期施用畜禽粪便对土壤孔隙结构特征的影响[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(6): 137-140, 180.
- LI Jiang-tao, ZHONG Xiao-lan, ZHANG Bin, et al. Soil pore structure properties as affected by long-term application of poultry litter and livestock manure[J]. *Journal of Water and Soil Conservation*, 2010, 24(6): 137-140, 180.
- [30] 江恒, 邹秀文, 韩晓增, 等. 土地利用方式和施肥管理对黑土物理性质的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2013, 29(5): 599-604.
- JIANG Heng, ZOU Xiu-wen, HAN Xiao-zeng, et al. Effects of land use and fertilization on physical properties of black soil[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2013, 29(5): 599-604.
- [31] 王益, 王益权, 刘军, 等. 黄土地区农田土壤块状结构体理化性状研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2007, 25(3): 110-112, 124.
- WANG Yi, WANG Yi-quan, LIU Jun, et al. The physical and chemical properties of soil block cloddy in Loess area farmland[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2007, 25(3): 110-112, 124.
- [32] 程科, 李军, 毛红玲. 不同轮耕模式对黄土高原旱作麦田土壤物理性状的影响[J]. *中国农业科学*, 2013, 46(18): 3800-3808.
- CHENG Ke, LI Jun, MAO Hong-ling. Effects of different rotational tillage patterns on soil physical properties in rainfed wheat fields of the Loess Plateau[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(18): 3800-3808.
- [33] 刘中良, 宇万太. 土壤团聚体中有机碳研究进展[J]. *中国生态农业学报*, 2011, 19(2): 447-455.
- LIU Zhong-liang, YU Wan-tai. Review of researches on soil aggregate and soil organic carbon[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(2): 447-455.
- [34] Tisdall J M, Oades J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils[J]. *Journal of Soil Science*, 1982, 33(2): 141-163.
- [35] 李辉信, 袁颖红, 黄欠如, 等. 不同施肥处理对红壤水稻土团聚体有机碳分布的影响[J]. *土壤学报*, 2006, 43(3): 422-429.
- LI Hui-xin, YUAN Ying-hong, HUANG Qian-ru, et al. Effects of fertilization on soil organic carbon distribution in various aggregates of red paddy soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(3): 422-429.
- [36] 黄丹丹, 刘淑霞, 张晓平, 等. 保护性耕作下土壤团聚体组成及其有机碳分布特征[J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31(8): 1560-1565.
- HUANG Dan-dan, LIU Shu-xia, ZHANG Xiao-ping, et al. Constitution and organic carbon distribution of soil aggregates under conservation tillage[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(8): 1560-1565.
- [37] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil macroaggregate turn-over and microaggregate formation: A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(14): 2099-2103.