

# 长期施肥棕壤团聚体分布及其碳氮含量变化

苏慧清, 韩晓日\*, 杨劲峰, 罗培宇, 戴健, 杨明超, 何蕊

(沈阳农业大学土地与环境学院/农业部东北玉米营养与施肥科学观测实验站/  
土肥资源高效利用国家工程实验室, 辽宁沈阳 110866)

**摘要:**【目的】探究玉米-玉米-大豆轮作体系不同施肥处理对土壤团聚体分布及其有机碳、全氮的影响, 以期深入了解施肥对土壤培肥、改善土壤结构的机制。【方法】选取不施肥(CK), 化肥(NPK), 低量有机肥(M<sub>1</sub>), 低量有机肥与化肥配施(M<sub>1</sub>NPK), 高量有机肥(M<sub>2</sub>), 高量有机肥与化肥配施(M<sub>2</sub>NPK) 6个处理。采集棕壤37年长期定位试验微区不同施肥处理的0—20 cm和20—40 cm土样, 分析其水稳性团聚体(>1 mm、1~0.5 mm、0.5~0.25 mm、0.25~0.053 mm及<0.053 mm)分布及其有机碳、全氮分配特征。【结果】棕壤长期施肥对团聚体分布及其碳氮的影响0—20 cm大于20—40 cm, 随土层深度的增加, 有机碳(SOC)、全氮(TN)含量减少。各处理团聚体及碳、氮在团聚体中的分配主要在黏粉粒中(40%以上)。与CK相比, NPK处理显著提高了黏粉粒的含量, 降低大团聚体与微团聚体含量, 显著增加黏粉粒储碳比例; M<sub>1</sub>、M<sub>2</sub>处理显著增加>1 mm团聚体数量及其SOC含量, 显著增加>0.25 mm各粒级团聚体的储碳比例, 且M<sub>2</sub>处理显著高于M<sub>1</sub>处理; M<sub>1</sub>NPK、M<sub>2</sub>NPK处理也显著增加>1 mm团聚体数量及其SOC含量, M<sub>1</sub>NPK与M<sub>2</sub>NPK处理在NPK处理的基础上依次增加0.5~0.25 mm(M<sub>1</sub>NPK)、1~0.5 mm及>1 mm团聚体的储碳比例, M<sub>2</sub>NPK处理>0.25 mm团聚体储碳比例最高, 土壤团聚体全氮的变化趋势与有机碳类似。【结论】棕壤连续有机无机配合施用可显著增加土壤大团聚体数量、SOC、TN含量及其储碳、氮比例, 是提高土壤质量、改善土壤结构的有效施肥措施。

**关键词:** 棕壤; 长期施肥; 团聚体分布; 有机碳; 全氮

## Effect of long-term fertilization on distribution of aggregates and organic carbon and total nitrogen contents in a brown soil

SU Hui-qing, HAN Xiao-ri\*, YANG Jin-feng, LUO Pei-yu, DAI Jian, YANG Ming-chao, HE Rui  
(College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University/Station of North-east Corn Nutrition and Fertilizer Science, Ministry of Agriculture/National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources, Shenyang 110866, China)

**Abstract:** 【Objectives】The purpose of this study was to investigate effects of different fertilization treatments on soil aggregate distribution, organic carbon and total nitrogen in maize–maize–soybean rotation system, and to gain insight into the mechanism of soil fertility improvement and soil structure. 【Methods】The treatments were as follows: the control (CK), chemical fertilizer (NPK), low-level organic manure (M<sub>1</sub>), low-level organic fertilizer and chemical fertilizer (M<sub>1</sub>NPK), high-level organic manure (M<sub>2</sub>), and high-level organic fertilizer and chemical fertilizer (M<sub>2</sub>NPK). The soil samples at 0–20 cm and 20–40 cm soil layers were analyzed to understand the characteristics for their water-stable aggregates (> 1 mm, 1–0.5 mm, 0.5–0.25 mm, 0.25–0.053 mm and < 0.053 mm), the contents of SOC and TN and partitioning proportions of SOC and TN. 【Results】The effects of the long-term fertilization on aggregates distribution, carbon and nitrogen in brown soil at the 0–20 cm layer were greater than those at the 20–40 cm layer, and the contents of soil organic carbon (SOC) and total nitrogen (TN) decreased with soil depth increasing. The distribution of aggregates, and carbon

收稿日期: 2016–12–30 接受日期: 2017–04–14

基金项目: 国家自然科学基金项目(31471940); 国家科技支撑计划项目(2013BAD08B04, 2013BAD07B03)资助。

作者简介: 苏慧清(1990—), 女, 内蒙古包头人, 硕士研究生, 主要从事植物营养与土壤肥力研究工作。

E-mail: m15086702190@163.com. \*通信作者 E-mail: hanxiaori@163.com

and nitrogen in agglomerates were mainly in the clay particles (above 40%). Compared with CK, NPK significantly increased the content of clay particles, decreased the contents of macro-aggregates and micro-aggregates significantly.  $M_1$  and  $M_2$  significantly increased the contents of  $> 1$  mm aggregates and SOC, and carbon storage in  $> 0.25$  mm aggregates. Compared with NPK, the carbon storage ratios of  $M_1$ NPK and  $M_2$ NPK were increased in the order of 0.5–0.25 mm ( $M_1$ NPK), 1–0.5 mm and  $> 1$  mm aggregates. The proportion of carbon storage of  $> 0.25$  mm aggregates in the  $M_2$ NPK was the highest, and that of total nitrogen was similar to that of organic carbon. 【 **Conclusions** 】 Continuous organic and inorganic combinations of brown soil can significantly increase the amount of large aggregates, SOC, TN content and its carbon and nitrogen ratio, it is an effective fertilization measure to improve soil quality and soil structure.

**Key words:** brown soil; long-term fertilization; distribution of aggregates; organic carbon; total nitrogen

土壤团聚体组成与有机质含量是表征土壤结构状况和肥力水平的重要指标。土壤团聚体是土壤的重要组成部分,参与土壤多个物理化学过程<sup>[1]</sup>,其数量和质量直接影响土壤理化性质和肥力高低<sup>[2]</sup>。土壤有机碳是土壤养分循环及营养供应的核心物质,对增强土壤颗粒团聚性、促进团粒结构形成具有重要作用<sup>[3–5]</sup>。研究不同施肥处理对土壤团聚体组成及其有机碳、全氮含量与分配比例的影响,可为阐明土壤有机碳及养分的循环和转化供应机制,揭示施肥条件下土壤肥力形成和变化规律提供参考。不少学者通过长期定位试验研究了施肥对团聚体分布及其有机碳、氮的影响,发现施用有机肥或有机无机肥配施可显著增加大团聚体的含量<sup>[6]</sup>及土壤全层有机碳库,有机碳主要向  $> 0.25$  mm 的团聚体富集<sup>[2,7–9]</sup>。研究发现土壤有机碳和全氮主要储存于  $< 0.25$  mm 的微团聚体<sup>[10]</sup>中,约 70% 的有机碳储存在  $< 0.053$  mm 团聚体中<sup>[11]</sup>,  $0.25 \sim 0.053$  mm 微团聚体含量不受施肥影响<sup>[12]</sup>。施有机肥并没有显著提高各粒级团聚体中氮的含量<sup>[13]</sup>。显然施肥对不同团聚体中有机碳、氮含量的影响并不一致,这些差异可能与施肥水平、施肥历史、作物体系、土壤性质以及气候差异有关。棕壤是我国东北地区的主要耕作土壤,主要轮作方式是一年一熟制玉米–玉米–大豆轮作。长期施用有机肥和化肥对棕壤团聚体形成及不同粒级团聚体中有机碳、氮含量影响的研究较少。

研究长期不同施肥处理对棕壤团聚体分布、团聚体各粒级中有机碳、全氮含量,及其在团聚体中的分配比例的影响,为培肥和改良土壤提供科学依据。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 试验地概况

试验地位于沈阳农业大学后山科研基地(北纬

40°48', 东经 123°33'),属于温带湿润–半湿润季风气候,年平均气温 7.0~8.1℃,10℃以上积温 3300~3400℃,无霜期 140~180 天。5~9 月平均气温 20.7℃,适于玉米、大豆等大多数农作物的生长。该地区春季降雨少,6~8 月雨量充沛,作物生长季(4~9 月)降雨量平均 547 mm。试验地土壤为发育于黄土母质的典型棕壤,1979 年试验前土壤基本理化性状:有机质 15.90 g/kg、全氮 0.80 g/kg、全磷 0.38 g/kg、全钾 21.1 g/kg、碱解氮 105.5 mg/kg、有效磷 6.5 mg/kg、速效钾 97.9 mg/kg、土壤 pH 6.5(土水比 1:2.5)。

### 1.2 试验设计

棕壤肥料长期定位田间试验始于 1979 年,共 28 个处理组合,作物轮作方式为玉米–玉米–大豆,1994 年因修高速公路,将田间试验改为微区试验,微区面积为 2 m<sup>2</sup>。本研究选用微区 2014~2015 年(玉米)试验的 6 个处理:不施肥(CK);单施化肥(NPK);低量有机肥( $M_1$ );低量有机肥与化肥配施( $M_1$ NPK);高量有机肥( $M_2$ );高量有机肥与化肥配施( $M_2$ NPK)。

试验用肥料:氮肥为尿素,磷肥为过磷酸钙,钾肥为硫酸钾,有机肥为猪厩肥,其不同年份有机质平均含量为 119.6 g/kg,全 N 为 5.6 g/kg,  $P_2O_5$  为 8.3 g/kg,  $K_2O$  为 10.9 g/kg。每年施肥量:低量有机肥( $M_1$ )为 13.5 t/hm<sup>2</sup>,高量有机肥( $M_2$ )为 27 t/hm<sup>2</sup>;所有处理玉米季施肥量为氮(N) 120 kg/hm<sup>2</sup>,磷( $P_2O_5$ ) 60 kg/hm<sup>2</sup>,钾( $K_2O$ ) 60 kg/hm<sup>2</sup>;大豆季施肥量为氮(N) 30 kg/hm<sup>2</sup>,磷( $P_2O_5$ ) 90 kg/hm<sup>2</sup>,钾( $K_2O$ ) 90 kg/hm<sup>2</sup>。所有肥料播前一次性施入,施肥方式为撒施,后翻入 20 cm 土层。大豆和玉米均无灌溉,生育期间进行常规田间管理,收获时作物地上部分全部移走。

### 1.3 土壤样品采集与测定

2015 年 (玉米) 收获后, 用直径为 5 cm、高度为 5 cm 的环刀, 分别采 0—20 cm, 20—40 cm 土层的原状土, 每区取三点。将采集后的原状土在室内沿其自然结构轻轻掰成小土块, 过 10 mm 筛, 自然风干。

水稳性团聚体的分级测定采用湿筛法<sup>[14-15]</sup>: 将不同孔径的筛子按孔径大小依次按顺序排好 (2 mm、1 mm、0.5 mm、0.25 mm、0.053 mm 5 个筛子, 大孔径在上, 小孔径在下), 四分法取 50 g 风干原状土置于套筛的最大孔径筛上, 然后将套筛放于装有自来水的桶中, 水不可漫过最大孔径筛的边缘, 静置 5 min 后, 振幅 4 cm, 频率 30 r/min, 上下震动 5 min, 重复三次, 震后取下筛子, 并将各筛上的土壤洗出, 分别转入已知重量的烧杯中, 56℃ 鼓风机干燥箱烘干, 放入干燥器中, 冷却后称重, 因 2 mm 筛上的土壤约 90% 为石砾, 所以将其与 1 mm 筛上的土壤混合, 即得到 > 1 mm、1~0.5 mm、0.5~0.25 mm、0.25~0.053 mm、< 0.053 mm 的土壤水稳性团聚体质量。将 > 0.25 mm 团聚体称为大团聚体, 0.25~0.053 mm 为微团聚体, < 0.053 mm 为黏粉粒。土壤团聚体有机碳 (SOC)、全氮 (TN) 采用元素分析仪 (Elementar III, Germany) 测定。

### 1.4 数据处理与分析

利用邱莉萍<sup>[16]</sup>的计算方法计算各粒级团聚体 SOC、TN 的贡献率:

团聚体的贡献率 (%) = [该粒级团聚体养分含量 (g/kg) × 该粒级团聚体含量 (%) / 土壤养分含量] × 100

采用 EXCEL 2016, 2007 处理数据并制图, SPSS 19.0 进行统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 长期不同施肥对土壤水稳性团聚体数量分布的影响

长期不同施肥改变了团聚体的分布, 且对 0—20 cm 的影响大于 20—40 cm。如图 1 所示, 0—20 cm 土层, CK 处理各粒级团聚体含量大小依次为 > 1 mm (2.1%)、1~0.5 mm (9.9%)、0.5~0.25 mm (23.0%)、0.25~0.053 mm (12.6%) 和 < 0.053 mm (52.7%)。与 CK 相比, 施有机肥显著提高 > 1 mm 团聚体的含量, 显著降低了 0.25~0.053 mm 团聚体含量 (除 M<sub>2</sub>NPK 处理); NPK 处理显著降低了 1~0.053 mm 团聚体含量, 增加了粘粉粒含量。与 NPK 处理相比, 施有机肥不仅增加了 > 1 mm 团聚体含量还增加了 1~0.5 mm 团聚体含量, 除 M<sub>2</sub>NPK 处理降低粘粉粒含量外, 其他处理差异不显著。与 M<sub>1</sub> 处理相比, M<sub>1</sub>NPK 处理各粒级团聚体含量无明显差异, M<sub>2</sub>、M<sub>2</sub>NPK 处理增加了 1~0.25 mm 团聚体含量, M<sub>2</sub>NPK 处理增加了微团聚体含量, 减少粘粉粒含量。20—40 cm 土层, 与 CK 相比, NPK 处理显著降低了 1~0.5 mm、0.25~0.053 mm 团聚体含量, 对其他粒级影响不明显; M<sub>1</sub>、M<sub>2</sub> 处理显著增加了 > 1 mm 团聚体含量, 增幅分别为 32.6% 和 46.2%, M<sub>1</sub> 处理降低了 1~0.5 mm 团聚体含量而 M<sub>2</sub> 处理显著降低了 0.25~0.053 mm 团聚体含量; M<sub>1</sub>NPK、M<sub>2</sub>NPK 处理显著增加了 > 1 mm 团聚体含量, 分别增加 28.6% 和 38.1%, 降低了 0.25~0.053 mm 团聚体含量, 分别降低 32.6% 和 40.5%, 同时, M<sub>1</sub>NPK 处理降低了 1~0.5 mm 团聚体含量, 其他粒级与 CK 差异不显著。

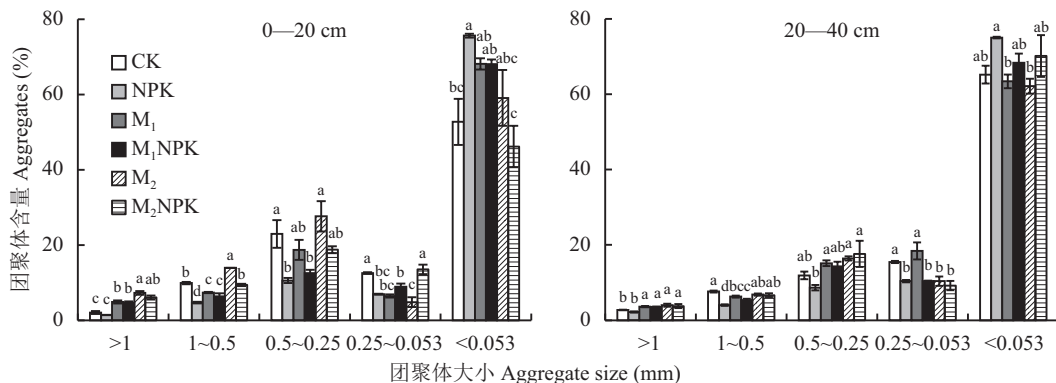


图 1 不同施肥处理土壤水稳性团聚体数量分布

Fig. 1 The quantity and vertical distribution of waterstable aggregates in different fertilizer treatments

[注 (Note): 柱上不同字母表示同一粒级团聚体不同处理间差异达 5% 显著水平

Different letters above the bars mean significant differences among the treatments for the same size of aggregate at the 5% level.]

## 2.2 长期不同施肥对各粒级团聚体有机碳含量影响

长期不同施肥显著影响各土层水稳性团聚体有机碳 (SOC) 含量 (表 1), 且团聚体中的 SOC 含量与土壤中的 SOC 含量有差异 (表 2), 各处理土壤 SOC 含量大致与 0.5~0.25 mm 团聚体相近。SOC 含量均随土层深度的增加有降低的趋势。就不同大小团聚体而言, 同一处理 SOC 含量均随粒级减小而降低, 即 > 1 mm 最高, < 0.053 mm 最低。

在 0—20 cm 土层, CK 团聚体 SOC 含量随粒级减小, 分别为 15.67、10.36、10.36、8.68、8.32 g/kg, NPK 处理与 CK 相比团聚体 SOC 含量除 1~0.5 mm 和微团聚体外增加不显著, 增幅为 8.4%~52.2% (除 0.5~0.25 mm 有微量减少外); M<sub>1</sub>、M<sub>2</sub>、M<sub>1</sub>NPK、M<sub>2</sub>NPK 处理显著高于 CK, 增幅分别为 41.7%~127.8%、61.9%~179.0%、26.0%~104.0% 和 62.0%~179.0%; 且 M<sub>2</sub>NPK 处理显著高于 M<sub>1</sub>NPK 处理, M<sub>2</sub> 处理比 M<sub>1</sub> 处理虽有些粒级差异不显著, 但大体呈增加趋势; 与 NPK 处理相比, M<sub>1</sub>、M<sub>2</sub>、M<sub>1</sub>NPK、M<sub>2</sub>NPK 处理团聚体 SOC 含量同样显著增加了 30.7%~60.5%、48.1%~92.4%、8.8%~87.9% 和 49.3%~97.1%。与 M<sub>1</sub> 处理相比, M<sub>1</sub>NPK 处理除 < 0.053 mm

增加外其他粒级 SOC 均减少; M<sub>2</sub> 与 M<sub>2</sub>NPK 处理除 1~0.5 mm 外差异不显著。

20—40 cm 土层, 各处理团聚体 SOC 含量变化趋势与 0—20 cm 土层类似, 总体上 CK 与 NPK 处理, M<sub>1</sub> 与 M<sub>1</sub>NPK 处理, 和 M<sub>2</sub> 与 M<sub>2</sub>NPK 处理组间差异显著, 且 SOC 含量依次增加, 组内处理间差异不显著 (除个别几个不符外)。M<sub>1</sub>、M<sub>2</sub> 处理显著高于 CK, 增幅分别为 41.7%~127.8% 和 61.9%~179%, 且 M<sub>2</sub> 处理显著高于 M<sub>1</sub> 处理 (除 0.5~0.25 mm 差异不显著); M<sub>1</sub>NPK、M<sub>2</sub>NPK 处理团聚体 SOC 含量显著高于 CK, 且 M<sub>2</sub>NPK 处理显著高于 M<sub>1</sub>NPK 处理; 与 M<sub>1</sub> 处理相比 M<sub>1</sub>NPK 处理 SOC 有下降趋势, 而 M<sub>2</sub> 处理与 M<sub>2</sub>NPK 处理无显著差异。

## 2.3 长期不同施肥对不同粒级团聚体全氮含量的影响

长期不同施肥显著影响土壤团聚体各粒级全氮含量 (表 3), 且土壤全氮含量在 1~0.25 mm 两个粒级团聚体附近 (表 2)。与 SOC 类似, 全氮随土层深度增加有逐渐减小的趋势, 相同处理全氮均随粒级减小而降低, 即 > 1 mm 最高, < 0.053 mm 最低。

0—20 cm 土层, 与 CK 相比, NPK 处理全氮增加不显著 (除 1~0.5 mm、0.25~0.053 mm 显著增加

表 1 不同处理各粒级土壤水稳性团聚体有机碳含量 (g/kg)

Table 1 Organic carbon contents of each size of water-stable aggregates in 0–20 and 20–40 cm soil layers under different fertilization regimes

土层 (cm) Soil depth	处理 Treatment	团聚体大小 Aggregate size (mm)				
		>1	1~0.5	0.5~0.25	0.25~0.053	<0.053
0—20	CK	15.67 ± 1.29 fA	10.36 ± 0.07 fB	10.36 ± 0.54 fB	8.68 ± 0.04 eC	8.32 ± 0.14 dC
	NPK	17.10 ± 0.13 efA	15.77 ± 0.49 eB	10.07 ± 0.09 fC	10.32 ± 0.03 dC	9.02 ± 0.12 cdD
	M <sub>1</sub>	27.44 ± 0.20 bA	23.60 ± 0.40 bcB	17.40 ± 0.03 bcC	13.15 ± 0.71 cD	11.79 ± 0.48 bcdE
	M <sub>1</sub> NPK	19.72 ± 0.02 dA	18.49 ± 0.01 dAB	16.97 ± 0.33 bcAB	11.23 ± 0.04 dB	11.95 ± 0.06 bcdB
	M <sub>2</sub>	32.80 ± 3.39 aA	21.48 ± 0.69 cB	17.44 ± 0.54 bcBC	15.28 ± 0.42 aC	15.35 ± 0.84 abC
	M <sub>2</sub> NPK	33.70 ± 0.00 aA	28.89 ± 0.01 aB	18.16 ± 0.04 bC	15.59 ± 0.22 aD	13.47 ± 0.17 abcE
20—40	CK	14.55 ± 0.22 fA	12.34 ± 0.12 fB	12.19 ± 0.03 eB	8.85 ± 0.42 eC	8.02 ± 0.08 dD
	NPK	15.93 ± 0.11 fA	14.58 ± 0.00 eB	12.27 ± 0.14 eC	9.18 ± 0.02 eD	8.70 ± 0.01 cdE
	M <sub>1</sub>	22.86 ± 0.83 cA	19.06 ± 0.08 dB	16.72 ± 0.22 cC	10.72 ± 0.23 dD	9.67 ± 0.03 cdE
	M <sub>1</sub> NPK	19.45 ± 0.78 deA	17.95 ± 0.50 dB	14.87 ± 0.75 dC	10.70 ± 0.37 dD	9.59 ± 0.35 cdD
	M <sub>2</sub>	25.45 ± 0.08 bA	23.39 ± 0.22 bcB	17.73 ± 1.48 bcC	13.66 ± 0.26 bcD	12.38 ± 0.52 abcdD
	M <sub>2</sub> NPK	25.98 ± 0.86 bA	24.36 ± 3.19 bA	19.69 ± 0.36 aB	14.10 ± 0.83 bC	12.31 ± 0.14 abcdC

注 (Note): 同列不同小写字母表示 0—40 cm 土层不同处理间差异达 0.05 显著水平, 同行不同大写字母表示粒级间差异达 0.05 显著水平 Values followed by different small letters in a column indicate significant difference at 0.05 level among treatments, values followed by different capital letters in a row indicate significant difference at 0.05 level among particle sizes.

外); M<sub>1</sub>、M<sub>2</sub> 处理全氮显著增加, 增幅分别为 42.4%~116.5% 和 77.2%~216.5%, 且 M<sub>2</sub> 处理显著高于 M<sub>1</sub> 处理 (除 1~0.5 mm 外); M<sub>1</sub>NPK、M<sub>2</sub>NPK 处理全氮

含量也显著增加, 增幅为 39.1%~140% 和 78.3%~169.7%, 且 M<sub>2</sub>NPK 处理显著高于 M<sub>1</sub>NPK 处理; 与 M<sub>1</sub> 处理相比, M<sub>1</sub>NPK 处理全氮减小, 前三个粒级差异显著, 后两个粒级不显著; M<sub>2</sub> 处理与 M<sub>2</sub>NPK 处理差异不显著。20—40 cm 土层, 与 CK 相比, NPK 处理全氮差异不显著, M<sub>1</sub>、M<sub>2</sub> 处理显著增加, 增幅为 18.8%~46.0% 和 47.5%~81.0%, 且 M<sub>2</sub> 处理显著高于 M<sub>1</sub> 处理; M<sub>1</sub>NPK、M<sub>2</sub>NPK 处理全氮含量也显著增加, 增幅为 18.8%~46.0% 和 48.9%~92.0%, 且 M<sub>2</sub>NPK 处理显著高于 M<sub>1</sub>NPK 处理; M<sub>1</sub> 处理与 M<sub>1</sub>NPK 处理差异不显著; 与 M<sub>2</sub> 处理相比, M<sub>2</sub>NPK 处理除两个粒级全氮有所增加外其他粒级差异不显著。

表 2 不同施肥处理土壤有机碳 (SOC)、全氮 (TN) 含量  
Table 2 Organic carbon and total nitrogen contents in soil layers under various long-term fertilization regimes

土层 (cm) Soil depth	处理 Treatment	SOC (g/kg)	TN (g/kg)
0—20	CK	9.84 ± 0.19 gh	1.13 ± 0.00 g
	NPK	10.69 ± 0.35 fg	1.24 ± 0.01 g
	M <sub>1</sub>	17.36 ± 0.03 b	1.70 ± 0.01 cde
	M <sub>1</sub> NPK	16.31 ± 0.63 c	1.70 ± 0.03 cde
	M <sub>2</sub>	21.51 ± 0.15 a	2.07 ± 0.04 a
	M <sub>2</sub> NPK	21.88 ± 0.18 a	2.21 ± 0.08 a
20—40	CK	9.56 ± 0.18 h	1.55 ± 0.11 ef
	NPK	11.21 ± 0.22 ef	1.46 ± 0.04 f
	M <sub>1</sub>	11.99 ± 0.38 e	1.83 ± 0.03 bc
	M <sub>1</sub> NPK	13.96 ± 0.36 d	1.64 ± 0.04 de
	M <sub>2</sub>	15.76 ± 0.19 c	1.78 ± 0.04 bcd
	M <sub>2</sub> NPK	16.25 ± 0.01 c	1.89 ± 0.01 b

注 (Note): 数值后不同字母表示不同处理及不同土层间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters indicate significant differences at the 5% level among treatments.

2.4 长期不同施肥对团聚体各粒级 SOC 分配比例的影响

长期不同施肥在一定程度上改变了土壤 SOC 在团聚体中的分配比例 (图 2), 且对 0—20 cm 土层的影响较大, 主要分布在 <0.053 mm 团聚体中, >1 mm 团聚体中 SOC 分配比例最低。

在 0—20 cm 土层, 与 CK 相比, NPK 处理显著提高了 <0.053 mm 团聚体 SOC 分配比例, 由 55% 提高到 72%, 显著降低了 1~0.5 mm 团聚体 SOC 分配比例, 其他粒级团聚体与 CK 无显著差异; M<sub>1</sub> 处

表 3 不同处理各粒级土壤水稳性团聚体中全氮含量 (g/kg)  
Table 3 Total nitrogen contents in each size of water-stable aggregates under the long-term fertilization

土层 (cm) Soil depth	处理 Treatment	团聚体大小 Aggregate size (mm)				
		>1	1~0.5	0.5~0.25	0.25~0.053	<0.053
0—20	CK	1.30 ± 0.02 fA	1.09 ± 0.00 fB	1.07 ± 0.03 fB	0.95 ± 0.04 iC	0.92 ± 0.01 eC
	NPK	1.53 ± 0.02 eA	1.47 ± 0.00 dB	1.12 ± 0.01 fC	1.10 ± 0.00 gC	1.00 ± 0.01 eD
	M <sub>1</sub>	2.71 ± 0.01 bA	2.36 ± 0.04 bB	1.81 ± 0.03 cC	1.44 ± 0.04 deD	1.31 ± 0.06 cE
	M <sub>1</sub> NPK	1.97 ± 0.01 dB	1.82 ± 0.02 cC	1.69 ± 0.03 dC	1.37 ± 0.02 eA	1.28 ± 0.11 cD
	M <sub>2</sub>	3.45 ± 0.26 aA	2.25 ± 0.06 bB	1.93 ± 0.08 abC	1.67 ± 0.01 bC	1.63 ± 0.01 aC
	M <sub>2</sub> NPK	3.39 ± 0.01 aA	2.94 ± 0.06 aB	2.03 ± 0.04 aC	1.81 ± 0.01 aD	1.64 ± 0.05 aE
20—40	CK	1.38 ± 0.01 efA	1.26 ± 0.01 eB	1.25 ± 0.02 eB	1.01 ± 0.01 hiC	0.96 ± 0.05 cC
	NPK	1.53 ± 0.05 eA	1.45 ± 0.00 dA	1.34 ± 0.01 eB	1.07 ± 0.04 ghC	1.01 ± 0.01 eC
	M <sub>1</sub>	1.93 ± 0.04 dA	1.84 ± 0.03 cA	1.67 ± 0.04 dB	1.24 ± 0.04 fC	1.14 ± 0.03 dD
	M <sub>1</sub> NPK	1.99 ± 0.01 dA	1.84 ± 0.01 cB	1.61 ± 0.10 dC	1.23 ± 0.01 fD	1.14 ± 0.04 dD
	M <sub>2</sub>	2.33 ± 0.06 cA	2.28 ± 0.02 bA	1.84 ± 0.08 bcB	1.49 ± 0.04 cdC	1.42 ± 0.04 bC
	M <sub>2</sub> NPK	2.65 ± 0.03 bA	2.37 ± 0.18 bB	2.02 ± 0.00 aC	1.54 ± 0.07 cD	1.43 ± 0.02 bD

注 (Note): 同列数值后不同小写字母表示 0—40 cm 土层不同处理间差异达 0.05 显著水平, 同行数值后不同大写字母表示粒级间差异达 0.05 显著水平 Values followed by different small letters in a column indicate significant difference at 0.05 level among treatments, values followed by different capital letters in a row indicate significant difference at 0.05 level among particle sizes.

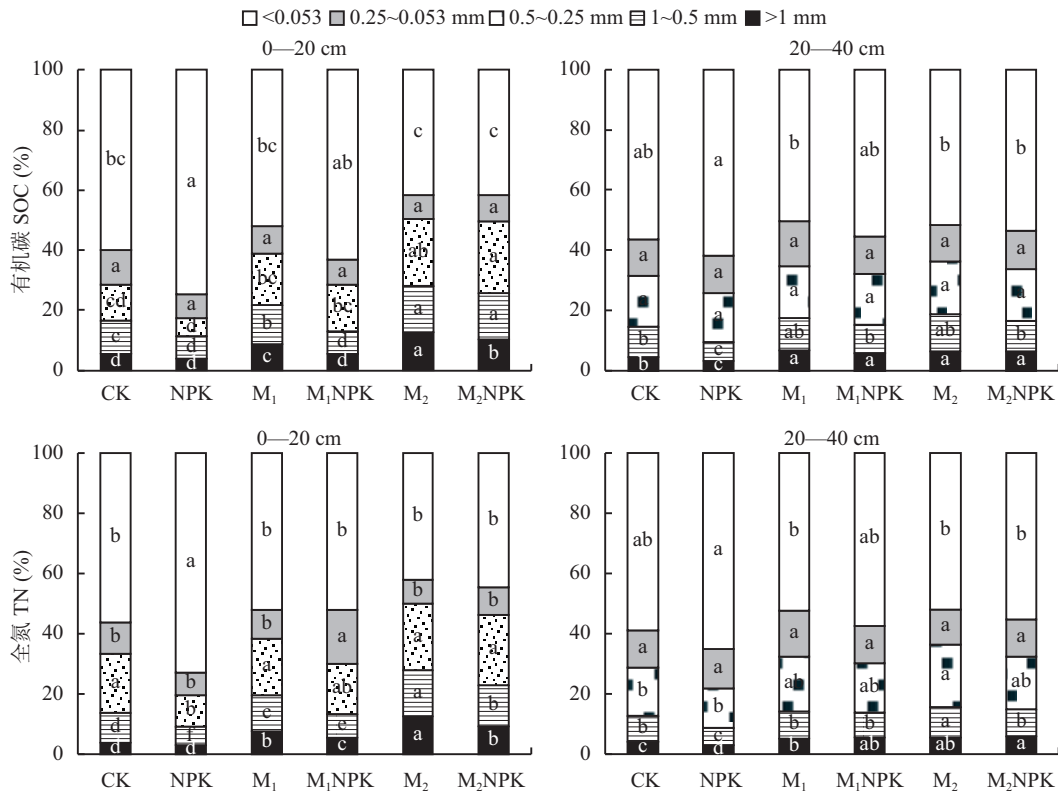


图 2 不同施肥处理 0—20 和 20—40 cm 土层土壤有机碳、全氮在水稳性团聚体中的分配比例

Fig. 2 Partitioning proportions of soil organic carbon (SOC) and total N (TN) in water-stable aggregates in 0–20 cm and 20–40 cm soil layers under different treatments

[注 (Note): 柱上不同小写字母表示处理间差异达 5% 显著水平

Different small letters above the bars indicate significant differences among treatments at the 5% level.]

理显著提高  $> 0.5$  mm 团聚体 SOC 分配比例, 其他粒级该比例与 CK 相似; 而 M<sub>2</sub> 处理显著提高了  $> 0.25$  mm 粒级团聚体 SOC 分配比例, 且该处理中  $> 1$  mm、 $1 \sim 0.5$  mm 团聚体 SOC 分配比例较 M<sub>1</sub> 处理分别提高 4.4% 和 3.2%; M<sub>1</sub>NPK 处理较 CK 显著降低  $1 \sim 0.5$  mm 团聚体 SOC 分配比例, 而 M<sub>2</sub>NPK 处理显著提高了该粒级团聚体 SOC 分配比例, 且  $> 1$  mm 与  $0.5 \sim 0.25$  mm 团聚体 SOC 分配比例也显著提高, 分别提高了 5.1%、5.6% 和 13.1%, 其他粒级团聚体 SOC 分配比例与 CK 差异不显著。与 NPK 处理相比, M<sub>1</sub>NPK 处理仅显著提高  $0.5 \sim 0.25$  mm 团聚体 SOC 分配比例, M<sub>2</sub>NPK 处理显著提高前三个粒级团聚体 SOC 分配比例, 显著降低  $< 0.053$  mm 团聚体 SOC 分配比例; M<sub>2</sub>NPK 处理较 M<sub>1</sub>NPK 处理显著提高  $> 0.25$  mm 三个粒级团聚体 SOC 分配比例, 显著降低  $< 0.053$  mm 团聚体 SOC 分配比例。

在 20—40 cm 土层, 长期不同施肥均显著提高  $> 1$  mm 团聚体 SOC 分配比例, 除 NPK 处理显著降低了  $1 \sim 0.5$  mm 团聚体 SOC 分配比例外, 其他处理均

与 CK 无显著差异。

## 2.5 长期不同施肥对团聚体各粒级全氮分配比例的影响

长期不同施肥对团聚体中全氮分配比例的影响与 SOC 类似, 如图 2 所示, 不同土层全氮仍主要分布在  $< 0.053$  mm 粒级团聚体。

在 0—20 cm 土层, 与 CK 相比, NPK 处理显著降低  $> 0.25$  mm 团聚体全氮分配比例, 显著提高  $< 0.053$  mm 团聚体全氮分配比例, 其他粒级团聚体全氮分配比例与 CK 无显著差异; 单施有机肥显著提高  $> 0.5$  mm 团聚体全氮分配比例, M<sub>1</sub> 处理提高 5.6%, M<sub>2</sub> 处理提高 9.2%, 且 M<sub>2</sub> 处理处理显著高于 M<sub>1</sub> 处理; 有机无机配施与 CK 相比, M<sub>1</sub>NPK 处理显著提高  $> 1$  mm 与  $0.25 \sim 0.053$  mm 团聚体全氮分配比例, 提高 1.8% 与 7.2%; M<sub>2</sub>NPK 处理显著提高了  $> 0.5$  mm 团聚体全氮分配比例, 分别提高了 5.5% 和 3.7%, 且在 M<sub>1</sub>NPK 处理的基础上, 增施有机肥 (M<sub>2</sub>NPK) 处理也显著提高该两个粒级全氮分配比例, 同时降低  $0.25 \sim 0.053$  mm 团聚体全氮分配比例。

在 20—40 cm 土层, 与 CK 相比, NPK 处理显著降低 > 0.5 mm 团聚体全氮分配比例; 长期施有机肥显著增加 > 1 mm 团聚体全氮分配比例,  $M_2$  显著提高了 > 0.25 mm 团聚体 TN 分配比例。

### 3 讨论

本研究表明, 同一土层团聚体主要分布在黏粉粒中 (40% 以上), 这在胡阳等、杜立宇等的研究中得到验证<sup>[14, 17-19]</sup>, 但安婷婷等 2007 年的研究结果不同<sup>[20]</sup>, 其团聚体主要分布在微团聚体中 (60%~70%), 可能与连年种植作物导致土壤结构退化有关。土壤有机质含量降低会使直径较大的水稳定性团聚体的百分含量降低<sup>[21-22]</sup>, 本研究中 NPK 处理显著减少了大团聚体与微团聚体的含量, 团聚体向 < 0.053 mm 团聚体集中, 冷延慧等<sup>[23]</sup>在对施肥 20 年后棕壤团聚体分布及碳储量变化的研究中也得出相同结论。施粪肥和秸秆能增加大团聚体含量, 并提高团聚体的稳定性<sup>[24-26]</sup>, 本研究与 CK 和 NPK 处理相比,  $M_1$ 、 $M_2$  与  $M_1$ NPK、 $M_2$ NPK 处理显著提高 > 1 mm 团聚体的数量, 且随有机质输入的增加, 大团聚体含量也逐渐增加。

本试验结果表明, 0—20 cm 土层团聚体 SOC 含量明显高于 20—40 cm 土层, 这与多数研究结果一致<sup>[2, 15]</sup>, 这可能是由于肥料主要施于 0—20 cm。因此, 施肥对团聚体 SOC 的影响也呈 0—20 cm 大于 20—40 cm 的趋势。另外, 随团聚体粒径的减小, SOC 含量逐渐降低, SOC 在 > 0.25 mm 的各粒级团聚体中含量最高, 占 65% 以上, 陈晓芬等<sup>[3]</sup>发现各施肥处理 SOC 在 2~1 mm 团聚体中的含量最高。Cheshire<sup>[27]</sup>对土壤多糖与水稳性团聚体做了较深入的研究后指出, 团聚作用与土壤有机质之间的关系实际上是团聚作用与土壤多糖之间的关系。所以这可能是由于土壤有机质中松散状胶结物质<sup>[28]</sup>或多糖与土壤较小颗粒发生团聚作用形成了较大粒径的团聚体, 因而大粒级团聚体中 SOC 含量较多。与 CK 相比, NPK 处理 SOC 含量无明显变化, 而  $M_1$ 、 $M_1$ NPK 及  $M_2$ 、 $M_2$ NPK 处理均显著提高了团聚体中 SOC 的含量, 这与郭菊花等<sup>[7]</sup>研究水稻土团聚体长期施肥试验中 NPK 处理对团聚体 SOC 含量没有影响而 NPK + OM 处理显著增加团聚体 SOC 含量的结果一致。李辉信等<sup>[2]</sup>也观察到红壤性水稻土长期施氮磷钾, 团聚体 SOC 含量较 CK 无显著差异。表土中近 90% 的土壤 SOC 位于团聚体内<sup>[29]</sup>, 而外源有机质的输入增加了土壤有机质含量, 有机质中的胶结物质与土壤颗

粒形成团聚体<sup>[30]</sup>, 继而增加了团聚体中 SOC 的含量, 这一观点解释了施有机肥显著增加团聚体中 SOC 含量的现象。刘中良等<sup>[31]</sup>对不同有机肥输入量对团聚体有机碳含量影响的结果表明, 团聚体有机碳含量随有机肥输入量的增加而不断增加, 本研究的结果与其相符。与  $M_1$  处理相比,  $M_1$ NPK 处理 SOC 含量降低, 而与  $M_2$  处理相比  $M_2$ NPK 处理 SOC 含量增加, 这可能是由于土壤养分的供给促进了微生物对有机碳的部分降解导致<sup>[32]</sup>。

棕壤 SOC 主要贮存在 < 0.053 mm 的黏粉粒中, 分配比例占 40% 以上, 这与该粒级团聚体百分含量较高有关<sup>[33]</sup>。本试验结果表明, 与 CK 相比, NPK 处理显著增加了 < 0.053 mm 团聚体 SOC 分配比例, 降低了 1~0.5 mm 团聚体 SOC 分配比例, 而  $M_1$ NPK 与  $M_2$ NPK 处理在 NPK 处理的基础上依次不断增加 0.5~0.25 mm ( $M_1$ NPK)、1~0.5 mm 及 > 1 mm 团聚体 SOC 分配比例, 且  $M_2$ NPK 中 > 0.25 mm 团聚体储碳比例最高, 达 49.72%。 $M_1$  在 CK 基础上同时增加了以上三个粒级团聚体 SOC 分配比例,  $M_2$  处理又显著高于  $M_1$  处理, 说明随有机质输入团聚体的储碳比例逐渐向大团聚体靠拢, 这与闫颖等<sup>[34]</sup>的长期施用有机肥砂粒级有机碳和氮的富集系数升高的结果一致, 与陈晓芬等<sup>[3]</sup>在红壤水稻土上施用有机肥提高了 > 0.25 mm 团聚体有机碳对全土的贡献率, 达 45%~63% 的结果相近。另外, 团聚体碳、氮的相关性显示二者存在极显著正相关, 表明土壤团聚体 TN 的变化趋势与 SOC 类似。本研究发现, 长期不同施肥其微团聚体 (0.25~0.053 mm) SOC 的储存比例几乎无变化, 而其原因尚不清楚, 且输入的有机肥增加了 SOC 中的哪一组份从而增加了在团聚体中的储存比例也不明确, 有待进一步探究。

### 4 结论

棕壤长期不同施肥对团聚体分布及其碳氮的影响 0—20 cm 大于 20—40 cm, 随土层深度的增加大团聚体含量降低, 黏粉粒含量增加, 有机碳、全氮含量减少。长期施用氮磷钾化肥显著提高了黏粉粒的含量及 SOC 分配比例, 对有机碳、全氮含量无明显影响;  $M_1$ 、 $M_2$  处理增加了 > 1 mm 团聚体数量及其 SOC 含量和 > 0.25 mm 各粒级团聚体 SOC 分配比例, 并且随着有机肥输入的增加,  $M_2$  处理相对  $M_1$  处理有显著促进作用;  $M_1$ NPK、 $M_2$ NPK 处理同样增加了 > 1 mm 团聚体数量及其 SOC 含量,  $M_1$ NPK 与  $M_2$ NPK 处理在 NPK 处理的基础上依次不断增加

0.5~0.25 mm ( $M_1$ NPK)、1~0.5 mm 及 > 1 mm 团聚体储碳贡献率,  $M_2$ NPK 处理 > 0.25 mm 团聚体储碳比例最高。在施用化肥的基础上配施高量有机肥可大幅度提高土壤大团聚体的数量、SOC、TN 含量及其储碳、储氮比例, 这是土壤质量提高与结构改善的体现, 是培肥与改良土壤的重要特征。

### 参 考 文 献:

- [1] 卢金伟, 李占斌. 土壤团聚体研究进展[J]. 水土保持研究, 2002, 9(1): 81-85.  
Lu J W, Li Z B. Advance in soil aggregate study[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2002, 9(1): 81-85.
- [2] 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 H X, Yuan Y H, Huang Q R, *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.
- [3] 陈晓芬, 李忠佩, 刘明, 江春玉. 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[J]. 中国农业科学, 2013, 46(5): 950-960.  
Chen X F, Li Z P, Liu M, Jiang C Y. Effects of different fertilizations on organic carbon and nitrogen contents in water-stable aggregates and microbial biomass content in paddy soil of subtropical China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(5): 950-960.
- [4] 樊廷录, 王淑英, 周广业, 等. 长期施肥下黑垆土有机碳变化特征及碳库组分差异[J]. 中国农业科学, 2013, 46(2): 300-309.  
Fan T L, Wang S Y, Zhou G Y, *et al.* Effects of long-term fertilizer application on soil organic carbon change and fraction in cumelic haplustoll of loess plateau in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(2): 300-309.
- [5] 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 X H, Zhang B, Zhao Q G. A review on relationship between soil organic carbon pools and soil structure stability[J]. Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(4): 618-623.
- [6] Wang W, Chen W C, Wang K R, *et al.* Effects of long-term fertilization on the distribution of carbon, nitrogen and phosphorus in water-stable aggregates in paddy soil[J]. Agricultural Sciences in China, 2011, 10(12): 1932-1940.
- [7] 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[J]. 土壤学报, 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[J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, 39(5): 787-793.
- [8] 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): 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[J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(4): 675-682.
- [9] 姜灿烂, 何园球, 刘晓利, 等. 长期施用有机肥对旱地红壤团聚体结构与稳定性的影响[J]. 土壤学报, 2010, 47(4): 715-722.  
Jiang C L, He Y Q, Liu X L, *et al.* Effect of long-term application of organic manure on structure and stability of aggregate in upland red soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2010, 47(4): 715-722.
- [10] Lugato E, Simonetti G, Morari F, *et al.* Distribution of organic and humic carbon in wet-sieved aggregates of different soils under long-term fertilization experiment[J]. Geoderma, 2010, 157(3-4): 80-85.
- [11] Lee S B, Chang H L, Ki Y J, *et al.* Changes of soil organic carbon and its fractions in relation to soil physical properties in a long-term fertilized paddy[J]. Soil and Tillage Research, 2009, 104(2): 227-232.
- [12] Yu H, Ding W, Luo J, *et al.* Effects of long-term compost and fertilizer application on stability of aggregate-associated organic carbon in an intensively cultivated sandy loam soil[J]. Biology & Fertility of Soils, 2012, 48(3): 325-336.
- [13] Yang Z, Singh B R, Hansen S. Aggregate associated carbon, nitrogen and sulfur and their ratios in long-term fertilized soils[J]. Soil and Tillage Research, 2007, 95(1-2): 161-171.
- [14] 唐晓红, 魏朝富, 吕家恪, 等. 保护性耕作对丘陵区水稻土团聚体稳定性的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(11): 49-54.  
Tang X H, Wei C F, Lü J K, *et al.* Effects of conservation tillage on aggregate stability of paddy soil in hilly region[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(11): 49-54.
- [15] 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 P, Pan G X. 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.
- [16] 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[J]. 生态学报, 2006, 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[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(2): 364-372.
- [17] 胡阳, 邓艳, 蒋忠诚, 等. 典型岩溶山区植被恢复对土壤团聚体分布及稳定性的影响[J]. 水土保持通报, 2015, 35(1): 62-67.  
Hu Y, Deng Y, Jiang Z C, *et al.* Effects of vegetation restoration on distribution and stability of soil aggregate in typical karst mountains[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015, 35(1): 62-67.
- [18] 杜立宇, 李天来, 梁成华, 等. 长期不同施肥处理对设施土壤团聚体组成及其稳定性的影响[J]. 水土保持通报, 2012, 32(1): 38-41.  
Du L Y, Li T L, Liang C H, *et al.* Effects of long-term different fertilizations on composition and stability of soil aggregates in a greenhouse soil[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012, 32(1): 38-41.
- [19] 窦森, 王其存, 代晓燕. 土壤有机培肥对微团聚体组成及其碳、氮分布和活性的影响[J]. 吉林农业大学学报, 1991, (2): 43-48.  
Dou S, Wang Q C, Dai X Y. Effect of improving soil fertility by organic materials on the composition, C, N distribution and activity of microaggregates[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 1991(2): 43-48.
- [20] 安婷婷, 汪景宽, 李双异. 施肥对棕壤团聚体组成及团聚体中有机



- 碳分布的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2007, 38(3): 407-409.
- An T T, Wang J K, Li S Y. Effects of fertilization on distribution of aggregate size and organic carbon in aggregates in brown earth[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2007, 38(3): 407-409.
- [21] Rillig M C, Wright S F, Eviner V T. The role of arbuscular mycorrhizal fungi and glomalin in soil aggregation: comparing effects of five plant species[J]. Plant and Soil, 2002, 238(2): 325-333.
- [22] Rovira P, Vallejo V R. Physical protection and biochemical quality of organic matter in mediterranean calcareous forest soils: a density fractionation approach[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2003, 35(2): 245-261.
- [23] 冷延慧, 汪景宽, 薛菁芳. 连续施肥20年后棕壤团聚体分布和碳储量变化[J]. 土壤通报, 2008, 39(4): 743-747.
- Leng Y H, Wang J K, Xue J F. Soil aggregation and carbon storage in brown earth after 20-years of fertilization[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2008, 39(4): 743-747.
- [24] 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 & Tillage Research, 2008, 101(1-2): 31-36.
- [25] Aoyama M, Angers D A, N'Dayegamiye A. Particulate and mineral-associated organic matter in water-stable aggregates as affected by mineral fertilizer and manure applications[J]. Canadian Journal of Soil Science, 1999, 79(2): 295-302.
- [26] Yang C, Yang L, Zhu O. Organic carbon and its fractions in paddy soil as affected by different nutrient and water regimes[J]. Geoderma, 2005, 124(1-2): 133-142.
- [27] Cheshire M V. Nature and origin of carbohydrates in soils [M]. Academic Press, 1979.
- [28] 李映强, 曾觉延. 不同耕作制下水稻土有机物质变化及其团聚作用[J]. 土壤学报, 1991, (4): 404-409.
- Li Y Q, Zeng J Y. Change in organic matter and its role in aggregation of paddy soils under different cropping systems[J]. Acta Pedologica Sinica, 1991(4): 404-409.
- [29] Jastrow J D. Soil aggregate formation and the accrual of particulate and mineral-associated organic matter[J]. Soil Biology & Biochemistry, 1996, 28(4/5): 665-676.
- [30] 史奕, 陈欣, 沈善敏. 有机胶结形成土壤团聚体的机理及理论模型[J]. 应用生态学报, 2002, 13(11): 1495-1498.
- Shi Y, Chen X, Shen S M. Mechanisms of organic cementing soil aggregate formation and its theoretical models[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(11): 1495-1498.
- [31] 刘中良, 宇万太, 周桦, 等. 不同有机厩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 Z L, Yu W T, Zhou H, *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.
- [32] 梁斌. 有机肥与化肥长期配施协调土壤供氮的效应及机理[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学博士学位论文, 2012.
- Liang B. Effect of long-term combined application of manure and inorganic fertilizers on soil nitrogen availability and its mechanism [D]. Yangling, Shannxi: PhD Dissertation of Northwest A&F University, 2012.
- [33] 李婕, 杨学云, 孙本华, 张树兰. 不同土壤管理措施下壤土团聚体的大小分布及其稳定性[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(2): 346-354.
- Li J, Yang X Y, Sun B H, Zhang S L. Effects of soil management practices on stability and distribution of aggregates in Lou soil[J]. Journal of Plant Nutrition & Fertilizer, 2014, 20(2): 346-354.
- [34] 闫颖, 何红波, 白震, 等. 有机肥对棕壤不同粒级有机碳和氮的影响[J]. 土壤通报, 2008, 39(4): 738-742.
- Yan Y, He H B, Bai Z, *et al.* Effect of manure application on the organic C and N in brown earth and particle-size fractions[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2008, 39(4): 738-742.