

# 长期施用化肥条件下塬土团聚体中有机碳与养分分布

何瑞清<sup>1,3</sup>, 王百群<sup>1,2</sup>, 张燕<sup>1</sup>, 王蕊<sup>1</sup>

(1. 西北农林科技大学 水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3. 云南省文山壮族苗族自治州土壤肥料工作站, 云南 文山 663000)

**摘要:** [目的] 探究长期施肥与小麦—玉米轮作下塬土表层水稳性团聚体组成及对团聚体中有机碳和养分分布的影响, 为评价长期施肥对改善塬土肥力状况的影响提供科学依据。[方法] 利用田间长期施用化肥与轮作定位试验, 通过湿筛法分离土壤水稳性团聚体, 得到土壤团聚体构成, 并测定不同粒径团聚体中有机碳和养分的含量。[结果] 结果表明长期施用化肥显著影响土壤水稳性团聚体含量, 长期施肥降低了 >2 mm 的水稳性团聚体数量, 增加了 <1 mm 的水稳性团聚体含量。施肥在一定程度上提高了水稳性团聚体有机碳的含量, 但施用高量氮、磷下 0.25~0.5 mm 和 <0.25 mm 水稳性团聚体中有机碳含量明显低于施用低量氮、磷肥料。不同施肥处理土壤水稳性团聚体全氮含量变化趋势与水稳性团聚体有机碳含量基本一致。磷素在不施肥处理各粒径团聚体中均匀分布, 低氮、磷处理各粒径团聚体中全磷含量差异较小, 高氮、磷处理各粒径土壤团聚体中全磷含量变化无明显趋势。长期施肥降低了 >2 mm 水稳性团聚体中全 K 含量, 增加了 <2 mm 的水稳性团聚体中全 K 含量。[结论] 水稳性团聚体关系土壤有机碳、氮的数量, 水稳性团聚体及其中有机碳、氮含量在氮磷化肥的长期施用下变化无明显规律, 并且, 长期施用氮、磷化肥下土壤磷素和钾素在土壤中的保存及供应能力也受到影响。因此, 需要合理施肥管理, 促进农田生产力的可持续发展。

**关键词:** 塬土; 长期施用化肥; 团聚体; 有机碳; 养分

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2016)06-0347-05

**中图分类号:** S152, S158

**文献参数:** 何瑞清, 王百群, 张燕, 等. 长期施用化肥条件下塬土团聚体中有机碳与养分分布[J]. 水土保持通报, 2016, 36(6): 347-351. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2016.06.059

## Distribution of Organic Carbon and Nutrients in Water Stable Aggregates of Lou Soil Under Long-term Application of Chemical Fertilizer

HE Ruiqing<sup>1,3</sup>, WANG Baiqun<sup>1,2</sup>, ZHANG Yan<sup>1</sup>, WANG Rui<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on

the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University,

Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of

Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Station of Soil and Fertilizer

Management of Wenshan Zhuang and Miao Autonomous Prefecture in Yunnan Province, Wenshan, Yunnan 663000, China))

**Abstract:** [Objective] Studing the effects of long-term-fertilization in wheat-corn rotation field with Lou soil on water stable aggregates and soil nutrient distribution in different sizes of aggregates, to provide a scientific basis for the evaluation of long term-fertilization on its improvement effect. [Methods] The wheat-corn rotation field with long-term application of chemical fertilizer was selected as the study site. The composition of aggregates was analyzed using the wet sieve method. Contents of organic carbon and nutrients in different sizes of aggregates were measured. [Results] Long-term application of chemical fertilizers significantly affected soil water stable aggregate contents. Long-term fertilization reduced the contents of >2 mm soil

**收稿日期:** 2016-08-22

**修回日期:** 2016-10-10

**资助项目:** 国家自然科学基金重点项目“胶结物质驱动的土壤团聚体形成过程与稳定机制”(41330 852); 黄土高原生态系统与环境考察项目(2014FY210100); 国家自然科学基金项目(40301024); 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室专项(A314021403-C6)

**第一作者:** 何瑞清(1990—), 女(汉族), 云南省保山县人, 硕士, 助理农艺师, 主要从事土壤有机碳氮循环研究。E-mail: hrqing8990@163.com。

**通讯作者:** 王百群(1968—), 男(汉族), 陕西省渭南市人, 博士, 副研究员, 主要从事土壤有机碳氮循环研究。E-mail: bqwang@ms.iswc.ac.cn。

water stable aggregates, but increased  $<1$  mm soil water stable aggregate contents. To a certain extent, the amount of organic carbon in water stable aggregates increased, but the organic carbon contents of 0.25 ~ 0.5 mm and  $<0.25$  mm soil water stable aggregates under high nitrogen and phosphorus treatments were significantly lower than that of the low nitrogen and phosphorus treatment. The changing tendencies of contents of total nitrogen in soil water stable aggregates were essentially in agreement with organic carbon in soil water stable aggregates under different fertilization treatments. Distribution of phosphorus in different size soil water stable aggregates was even in no fertilization treatment. The difference of phosphorus content in each size soil water stable aggregate was insignificant under low nitrogen and phosphorus treatment, while the trend in high nitrogen and phosphorus treatment was not obvious. The total potassium contents of  $>2$  mm soil water stable aggregates decreased due to long-term application of chemical fertilizer, whereas total potassium contents of  $<2$  mm soil water stable aggregates increased under long-term application of fertilizer. [Conclusion] Soil water stable aggregates influenced the quantity of soil organic carbon and nitrogen. The contents of soil water stable aggregates, soil organic carbon and nitrogen of soil water stable aggregates varied irregularly under long-term application of nitrogen and phosphorus fertilizers. In addition, conservation and supply capacity of phosphorus and potassium in soil were affected by long-term application of nitrogen and phosphorus fertilizers. Therefore, reasonable use of chemical fertilizers and management were needed to improve the soil structure, maintain soil fertility and promote the sustainability of farmland productivity.

**Keywords:** Lou soil; long-term application of chemical fertilizer; aggregates; organic carbon; nutrient

土壤团聚体是土壤的基本结构单元,是土壤质量的重要因素之一。土壤团聚体不仅影响土壤的物理特性(如孔隙度、水分、温度等),而且还影响有机质的微生物分解速率以及植物养分的利用率等<sup>[1-7]</sup>。水稳性团聚体的数量和特征反映了土壤结构的稳定性和抗蚀能力,对研究土壤固碳、土壤改良和水土保持等至关重要<sup>[8-10]</sup>。在不同土壤中, $>0.25$  mm 水稳性团聚体的数量越少,土壤稳定性也就越低<sup>[13-15]</sup>。有机或无机肥的会影响土壤系统中物质的循环,增强土壤中 N,P,K 和 S 含量<sup>[16]</sup>。长期施肥对土壤团聚体的形成及稳定也有直接或间接的影响,进而影响土壤团聚体中养分的分布。不同粒径的微团聚体在营养元素的保持、供应及转化能力等方面发挥着不同的作用<sup>[17]</sup>。以往对土壤水稳性团聚体内养分的研究主要集中在 C,N 方面<sup>[18-24]</sup>,对 P,K 等养分的在水稳性团聚体中的研究则相对较少,并且,关于长期施肥对壤土水稳性团聚体组成、有机碳和养分含量的影响鲜见报道。本研究采用湿筛的分析方法,通过比较长期施肥对土壤水稳性团聚体的分布和水稳性团聚体中土壤主要养分分布变化的影响,评价长期施肥对改善壤土肥力状况的影响作用。

## 1 材料与方 法

### 1.1 采样地概况

土壤样品采自于陕西省杨凌示范区中国科学院水土保持研究所田间试验区,地处北纬 34.28°,东经 109.07°,海拔为 481 m。年平均气温 13.1 °C,年均

降水 635.1 mm,无霜期平均为 210 d。1 月份最冷,平均气温 0.4 °C,7 月份最热,平均气温 25.1 °C,属于暖温带半湿润大陆性,土壤类型为壤土。

长期施肥试验布设于 1997 年,设置 3 个施肥处理:(1) CK(N<sub>0</sub>)。不施用肥料;(2) N<sub>1</sub>。施纯氮 75 kg/hm<sup>2</sup>,P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>45 kg/hm<sup>2</sup>;(3) N<sub>2</sub>。施纯氮 150 kg/hm<sup>2</sup>,P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>90 kg/hm<sup>2</sup>,施用的氮肥为尿素,磷肥为过磷酸钙。每个处理重复 2 次,在田间,每个处理随机排列,区组控制。试验小区规格为 4.3 m×2.5 m=10.75 m<sup>2</sup>。小区作物种植制度为冬小麦—夏玉米轮作。在播种小麦前,将设计施用的肥料均匀撒施于地表,然后翻入 0—20 cm 土层中。在玉米生长期,于玉米 3 叶期,施用设计施肥量的 1/3,在玉米大喇叭口期追施设计施肥量的 2/3。

### 1.2 样品采集与预处理

样品采自 2014 年 10 月秋收之后。采集每个试验小区中 0—20 cm 土层的原状土,每个处理随机取 3 个样点混为一个土样。田间采回的土样分别做好标记,并带回室内风干,在风干过程中,当土样含水量达到土壤田间持水量的 60%~70%(含水量为 15%~18%左右)时,用手轻轻地沿土壤自然裂隙掰成约小于 1 cm 的土块,然后在室温条件下风干,用于水稳性团聚体分析。

### 1.3 测定方法

采集的原状土样,用湿筛法分别收集  $>5$  mm, 5~2 mm,2~1 mm,1~0.5 mm,0.5~0.25 mm 和

<0.25 mm的各粒径水稳性团聚体,在60℃下烘干,称重,即得到了各粒径水稳性团聚体质量<sup>[25]</sup>。采用常规分析测定方法测定土壤团聚体中的有机碳和养分含量<sup>[26]</sup>。

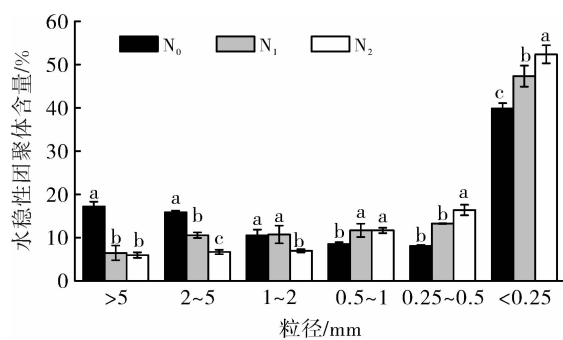
#### 1.4 数据分析

所有测定结果采用Excel软件进行整理和初步分析,用SPSS 19.0进行方差分析,采用LSD方法进行多重比较,采用Origin 8.0软件作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 施肥对壤土水稳性团聚体构成的影响

施肥显著影响土壤水稳性团聚体含量(图1)。从图1中可见,<0.25 mm水稳性团聚体占全土百分率最大,各处理均表现出相同的趋势,且都达到显著差异( $p < 0.05$ ),说明壤土水稳性团聚体以<0.25 mm团聚体为主。<1 mm的水稳性团聚体含量,施肥处理( $N_1$ 和 $N_2$ )的显著高于对照(CK)( $p < 0.05$ )。低氮、磷处理( $N_1$ )与高氮、磷处理( $N_2$ )之间除0.5~1 mm的水稳性团聚体差异性不显著( $p > 0.05$ )外,0.25~0.5 mm和<0.25 mm的水稳性团聚体,低氮、磷处理( $N_1$ )与高氮、磷处理( $N_2$ )间差异亦达到显著性水平( $p < 0.05$ )。肥料的施用降低了粒径>2 mm的水稳性团聚体含量,差异达到显著性水平( $p < 0.05$ )。李婕<sup>[27]</sup>也研究发现NP,NPK处理降低0—30 cm土层中>2 mm水稳性团聚体的含量。霍琳等<sup>[28]</sup>报道认为有机物质有促进大团聚体形成的作用,而化肥不利于大团聚体的形成。



注:不同字母表示差异显著( $p < 0.05$ )。下同。

图1 土壤中不同粒径水稳性团聚体含量

### 2.2 施肥对土壤团聚体中有机碳和养分含量的影响

2.2.1 施肥对土壤团聚体有机碳含量的影响 如图2所示,各施肥处理水稳性团聚体中有机碳含量因粒径而异。CK, $N_1$ 和 $N_2$ 处理的水稳性团聚体有机碳含量的变化范围分别是7.27~10.11 g/kg,7.65~11.42 g/kg,7.42~11.56 g/kg。<0.25 mm的水稳

性团聚体中有机碳含量最低。0.25~5 mm的土壤水稳性团聚体有机碳含量均随粒径逐渐增大呈现出逐渐增加的趋势。这说明有机碳与土壤团聚体的形成相关,并且,Jastrow等<sup>[29]</sup>利用<sup>13</sup>C示踪法,证实大团聚体比微团聚体含更多的有机碳的结果。施肥处理( $N_1$ 和 $N_2$ )>5 mm的水稳性团聚体有机碳含量明显低于2~5 mm和1~2 mm两个粒径,并且差异显著,表明有机碳在各粒径水稳性团聚体中的分布发生了变化,其原因可能是施肥使土壤中根系增加,一些细小根系不易清除造成的;也有可能是耕作的扰动,直接或间接造成。比较各粒径水稳性团聚体有机碳含量,无肥处理明显低于施肥处理,但高氮、磷处理( $N_1$ )下0.25~0.5 mm和<0.25 mm水稳性团聚体有机碳含量明显低于低氮、磷处理( $N_2$ )。这可能是由于这是由于不同施肥含量对作物生长的影响不同,从而形成的有机残茬量不同,导致同一粒径水稳性团聚体中有机碳含量因施肥含量而异<sup>[30-37]</sup>。并且,肥料的施用影响土壤微生物的种类、数量及微生物酶等<sup>[30,32-33]</sup>,进而影响微生物对有机质的分解,因此,出现了高氮、磷处理下<0.5 mm的水稳性团聚体有机碳含量明显降低的现象。

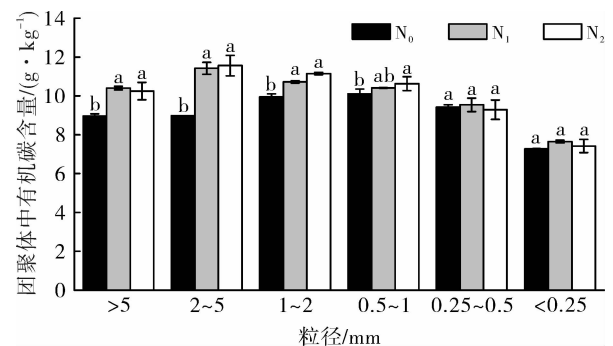


图2 不同粒径土壤水稳性团聚体中有机碳含量

2.2.2 施肥对土壤团聚体中全氮含量的影响 不同施肥处理土壤水稳性团聚体全氮含量变化趋势与水稳性团聚体有机碳含量基本一致(图3),Salju及高亚军等<sup>[34-35]</sup>曾研究表明土壤中有机碳的保持主要取决于土壤全氮含量,土壤有机碳及全氮的消长趋势往往是一致的。<0.25 mm的水稳性团聚体全氮含量最低,范围在0.81~0.86 g/kg。施肥与不施肥相比,施肥处理显著增加各大小团聚体中全氮含量。低氮、磷处理( $N_1$ )与高氮、磷处理( $N_2$ )对各粒径水稳性团聚体全氮含量的影响不同,除<0.25 mm粒径的水稳性团聚体外,不施肥处理与低氮、磷施肥处理的全N在各粒径水稳性团聚体之间的变化不是很大。高氮、磷处理( $N_2$ )中,全氮含量在>1 mm的水稳性团

聚体中随粒径的递减而增加,在 $<1$  mm的水稳性团聚体中随粒径的递减而递减,在 $1\sim 2$  mm的水稳性团聚体中达到最高。

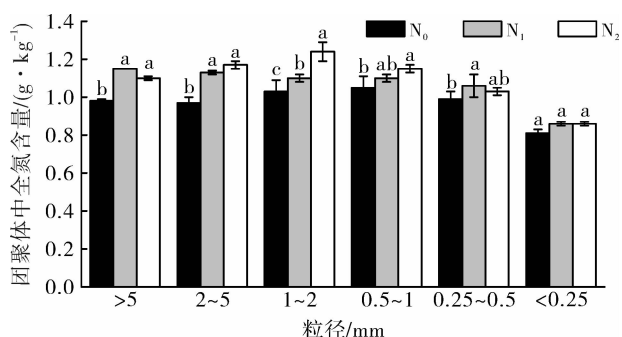


图 3 不同粒径土壤水稳性团聚体中全氮含量

2.2.3 施肥对土壤团聚体中全磷含量的影响 从图 4 中可见, $<0.25$  mm 水稳性团聚体全磷含量最低,各处理均表现出相同的趋势,且都达到显著差异。施肥处理(N₁ 和 N₂)的水稳性团聚体全磷含量显著高于不施肥处理(N₀) ( $p < 0.05$ ),这与陈平帮<sup>[36]</sup>的研究结果一致。宋春等<sup>[37]</sup>的研究得出施肥增加了黑土各粒径水稳性团聚体中全磷含量,其中,NP 处理比对照(CK)全磷含量增加 28.9%~37.8%。低氮、磷处理(N₁)与高氮、磷处理(N₂)间差异亦达到显著性水平( $p < 0.05$ )。低氮、磷处理(N₁)与高氮、磷处理(N₂)0.5~5 mm 团聚体中全磷含量显著高于对照处理(N₀),这与有机碳在团聚体中的分布相似。磷素在不施肥处理各粒径团聚体中分布平均,低氮、磷处理(N₁)各粒径团聚体中全磷含量差异较小,高氮、磷处理(N₂)各粒径土壤团聚体中全磷含量变化无规律性趋势。说明磷素分布在土壤团聚体中的差异性较有机碳及全氮小,这可能是由于磷素本身的稳定性,而不容易被吸附固定以及流失。

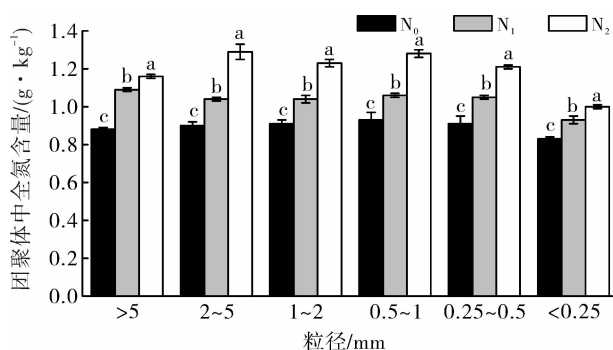


图 4 不同粒径土壤水稳性团聚体中全磷含量

2.2.4 施肥对土壤团聚体中全钾含量的影响 施肥显著影响土壤水稳性团聚体全钾含量(图 5)。由图 5

可以看出,在 0—20 cm 土层中,长期施肥降低了 $>2$  mm 水稳性团聚体中全钾含量,增加了 $<2$  mm 的水稳性团聚体中全钾含量。在低氮、磷(N₁)处理中,各粒径水稳性团聚体中的全钾含量差异不明显,这可能是因为长期连续种植作物,土壤钾素被作物不断吸收而使得土壤钾素处消耗状态。在 $<2$  mm 的各粒径水稳性团聚体中,全钾在不施肥处理及低氮、磷(N₁)处理与高氮、磷(N₂)处理间的分布均达到显著性差异;并且随着氮、磷肥施用量的增加,各粒径水稳性团聚体中全钾含量增加。这可能是由于作物根茬的归还量,随氮、磷肥施用量的提高而增加,从而相应地增加了表层土壤中钾素的归还量,这些归还钾素被土壤胶体吸附或固定,因而施用氮、磷肥增加小团聚体和微团聚体中全钾的含量。

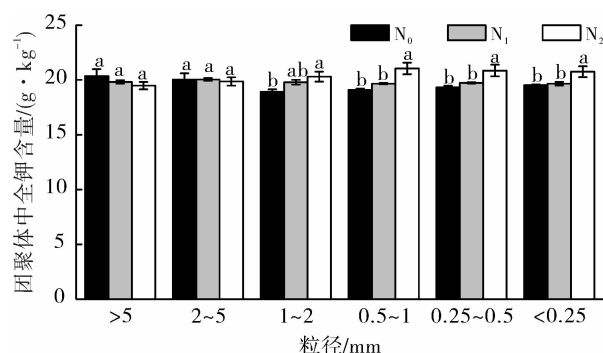


图 5 不同粒径土壤水稳性团聚体中全钾含量

### 3 结论

壤土水稳性团聚体以 $<0.25$  mm 团聚体为主,长期施肥显著影响土壤水稳性团聚体含量,长期氮、磷化肥配施降低了粒径 $>2$  mm 的水稳性团聚体含量,增加了 $<1$  mm 的水稳性团聚体含量。与对照相比,施肥处理(N₁ 和 N₂)显著提高了 $<1$  mm 的水稳性团聚体含量( $p < 0.05$ )。各处理水稳性团聚体中有机碳含量因粒径而异。土壤水稳性团聚体有机碳含量均随团聚体粒径的逐渐增大,呈现出逐步增加的趋势,这说明有机碳与土壤团聚体的形成相关。施肥在一定程度上提高了水稳性团聚体有机碳的含量。不同施肥处理土壤水稳性团聚体全氮含量变化趋势与水稳性团聚体有机碳含量基本一致,施肥处理显著增加各粒径团聚体中全氮含量。施肥处理增加了的水稳性团聚体全磷含量,磷素在不施肥处理各粒径团聚体中分布平均。长期施肥降低了 $>2$  mm 水稳性团聚体中全钾含量,增加了 $<2$  mm 的水稳性团聚体中全钾含量。在农业生产中需要合理施肥以改善土壤结构,以保持和提高土壤肥力,促进农田生产力的可持续性。

## [ 参 考 文 献 ]

- [1] Bronick C J, Lai R. Soil structure and management: A review[J]. *Geoderma*, 2005, 124(1/2):3-22.
- [2] Dexter A R. Advances in characterization of soil structure [J]. *Soil & Tillage Research*, 1988, 11 (3/4): 199-238
- [3] Horn R, Dexter A R. Dynamics of soil aggregation in an irrigated desert loess [J]. *Soil Tillage Research*, 1989, 13:253-266
- [4] Le B Y. Aggregate stability and assessment of soil crust-ability and erodibility: (1): Theory and methodology [J]. *European Journal Soil Science*, 1996, 47 (1): 425-437
- [5] 任雅阁, 马玲玲, 成杭新, 等. 典型农耕区褐土水稳性团聚体有机碳的分布及组成[J]. *水土保持通报*, 2014, 34 (2):15-19.
- [6] 李龙, 姚云峰, 秦富仓, 等. 半干旱区不同土层深度土壤有机碳变化[J]. *水土保持通报*, 2014, 34(2):118-122.
- [7] 包承宇, 曾和平, 张梦妍, 等. 云南省土壤有机碳储量估算及空间分布[J]. *水土保持通报*, 2014, 34(6):260-266.
- [8] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [9] 蔡立群, 齐鹏, 张仁陆. 保护性耕作对麦—豆轮作条件下土壤团聚体组成及有机碳含量的影响[J]. *水土保持学报*, 2008, 22(2):141-145
- [10] 陈恩凤, 周礼惜, 武冠云. 微团聚体的保肥供肥性能及其组成比例在评判土壤肥力水平中的意义[J]. *土壤学报*, 1994, 31(1):18-25
- [11] 廖文超, 毕华兴, 高路博, 等. 晋西苹果与大豆间作系统土壤养分分布特征[J]. *水土保持通报*, 2014, 34(3): 252-256.
- [12] 曾天慧, 胡海波, 张勇, 等. 不同植被群落土壤水溶性有机碳的变化特征[J]. *水土保持通报*, 2015, 35(3): 49-54.
- [13] Barthes B, Roose E. Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to run off and erosion principle course: Validation at several levels[J]. *Catena*, 2002, 47(10):133-14.
- [14] 井大炜, 王明友, 张红, 等. 樱桃栽培中施用蚯蚓粪对土壤有机碳氧化稳定性及碳库管理指数的影响[J]. *水土保持通报*, 2015, 35(3):73-77.
- [15] 巩晟萱, 王丹, 戴伟, 等. 不同生长时期丝栗栲林下土壤有机碳含量及矿化特征[J]. *水土保持通报*, 2015, 35 (5):59-63.
- [16] 周卫军, 王凯荣, 张光远, 等. 有机与无机肥配合对红壤稻田系统生产力及其土壤肥力的影响[J]. *中国农业科学*, 2002, 35(9):1109-1113.
- [17] 陈恩凤, 关连珠, 汪景宽, 等. 土壤特征微团聚体的组成比例与肥力评价[J]. *土壤学报*, 2001, 38(1):49-53.
- [18] Tisdall J M, Oades J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils[J]. *Journal of Soil Science*, 1982, 33(2),141-163.
- [19] Christensen B T. Carbon in primary and secondary organ mineral complexes[M]//Cater M R, Stewart A B. *Structure and Organic Matter Storage in Agricultural soils*. Boca Raton, Florida; CRC Press, Inc. 1996.
- [20] LI Huilin HAN Yong CAI Zucong. Modeling nitrogen mineralization in paddy soils of Shanghai Region [J]. *Pedosphere*, 2003, 13(4):331-336.
- [21] Joann K. W, Chi C H, George W. C, et al. Cattle manure amendments can increase the pH of acid soils [J]. *Soil*, 2000, 64(3):962-966.
- [22] 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.
- [23] 冷延慧. 长期施肥对棕壤、黑土团聚体组成及其稳定性的影响[D]. 辽宁 沈阳: 沈阳农业大学, 2008.
- [24] 徐阳春, 沈其荣. 长期施用不同有机肥对土壤各粒级复合体中 C, N, P 含量与分配的影响[J]. *中国农业科学*, 2000, 33(5):65-71.
- [25] Elliott E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1986, 50(3): 627-633.
- [26] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [27] 李婕. 不同管理措施对壤土土壤团聚体碳、氮分布及碳矿化的影响[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2013.
- [28] 霍琳. 长期施肥对黄土高原旱地黑垆土的影响[D]. 甘肃 兰州: 甘肃农业大学, 2007.
- [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] 路磊, 李忠佩, 车玉萍. 不同施肥处理对黄泥土微生物生物量碳氮和酶活性的影响[J]. *土壤*, 2006, 38(3): 309-314.
- [31] 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.
- [32] 路磊, 李忠佩, 车玉萍. 不同利用年限菜地土壤有机碳矿化动态和酶活性变化[J]. *土壤*, 2006(4):429-434.
- [33] 任祖淦, 陈玉水, 唐福钦, 等. 有机无机肥料配施对土壤微生物和酶活性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 1996, 2(3):279-283.
- [34] Salju U M, Terrill T H, Gelaye S, et al. Soil aggregation and carbon and nitrogen pools under rhizoma peanut and perennial weeds[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, 67(67):146-155.
- [35] 高亚军, 朱培立, 黄东迈, 等. 稻麦轮作条件下长期不同土壤管理对有机质和全氮的影响[J]. *土壤与环境*, 2000, 9(1):27-30.
- [36] 陈平帮. 长期不同施肥制度下红壤旱地团聚体磷素吸附与解析特性研究和环境风险分析[D]. 江苏 南京: 南京农业大学, 2009.
- [37] 宋春, 韩晓增, 王凤菊, 等. 长期不同施肥条件下黑土水稳性团聚体中磷的分布及其有效性[J]. *中国生态农业学报*, 2010, 18(2):272-276.