



长期施肥对黑土水稳性团聚体稳定性及有机碳分布的影响

张秀芝^{1,2}, 李强¹, 高洪军¹, 彭畅¹, 朱平¹, 高强²

(¹吉林省农业科学院农业资源与环境研究所, 长春 130033; ²吉林农业大学资源与环境学院, 长春 130118)

摘要:【目的】基于黑土长期定位试验平台, 研究不同施肥方式下土壤水稳性团聚体和有机碳分布特征, 以期揭示化肥和有机肥长期施用对土壤肥力的影响, 为实现黑土合理培肥提供理论指导。【方法】依托 37 年黑土长期定位试验, 采集 CK (不施肥)、NPK (化肥)、M₂ (常量有机肥)、M₂NPK (常量有机肥配施化肥)、M₄ (高量有机肥)、M₄NPK (高量有机肥配施化肥) 处理 0—20 cm 土层的土壤样品, 利用湿筛法分析水稳性团聚体稳定性及有机碳在不同粒级团聚体中的分配特征。【结果】长期有机无机配施以及施高量有机肥显著降低大团聚体比例, 提高微团聚体比例。长期施用化肥及常量有机肥并未明显改变团聚体的分布。M₂NPK、M₄NPK、M₄ 处理的大团聚体比例较 CK 处理分别降低 32.7%、45.8% 和 55.4%, 而微团聚体的比例较 CK 处理分别提高 73.2%、102.5% 和 123.9%。长期有机无机配施及高量有机肥的施用显著降低表层土壤水稳性团聚体的稳定性。长期施肥显著增加土壤有机碳含量, 增加量为 CK 的 1.12—2.06 倍, 施用有机肥及有机无机配施处理有机碳含量增加更为显著。长期施用有机肥可以增加各粒级水稳性团聚体中有机碳的含量, 且随着粒径的变小, 各处理有机碳含量的增加幅度逐渐减小。各处理水稳性大团聚体中有机碳含量显著高于微团聚体, 这表明有机碳主要分布在大团聚体中。长期施高量有机肥及配施化肥显著降低了大团聚体对有机碳的贡献率, 增大了微团聚体的贡献率, 即微团聚体有机碳贡献率高于大团聚体, 而其他处理大团聚体有机碳贡献率高于微团聚体。【结论】黑土长期施用化肥对团聚体的分布及团聚体有机碳含量没有显著影响。高量有机肥以及有机无机配施显著降低了大团聚体的比例, 进而降低土壤团聚体的稳定性。长期施用有机肥显著增加土壤及各粒级团聚体中有机碳含量。高量有机肥及配施化肥显著降低了大团聚体有机碳贡献率, 有机碳贡献率的优势粒级为微团聚体。

关键词: 长期施肥; 黑土; 水稳性团聚体; 有机碳含量; 有机碳贡献率

Effects of Long-Term Fertilization on the Stability of Black Soil Water Stable Aggregates and the Distribution of Organic Carbon

ZHANG XiuZhi^{1,2}, LI Qiang¹, GAO HongJun¹, PENG Chang¹, ZHU Ping¹, GAO Qiang²

(¹Institute of Agricultural Resource and Environment, Jilin Academy of Agricultural Sciences, Changchun 130033;

²College of Resources and Environmental Sciences, Jilin Agricultural University, Changchun 130118)

Abstract: 【Objective】Based on the long-term fertilization experiment station, in aims to study the influences on the soil fertility by long-term application of chemical fertilizer and manure, the characteristics of water stable aggregates and structure of organic carbon was analyzed under different fertilizer application conditions. 【Method】0-20 cm soil samples were collected from the 37-year long-term field experiment, including six treatments: CK (no fertilizer), NPK (chemical fertilizer alone), M₂ (normal manure application), M₂NPK (the chemical fertilizer combined with normal manure rate), M₄ (high quantity manure application), and

收稿日期: 2019-06-05; 接受日期: 2019-09-12

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFD0800905、2016YFD0800103)、中欧农田土壤质量评价及提升技术合作项目 (2016YFE0112700-3)

联系方式: 张秀芝, Tel: 0431-87063170; E-mail: zhangxiuzhi2006@163.com. 通信作者朱平, Tel: 0431-87063170; E-mail: zhuping1962@sohu.com. 通信作者高强, E-mail: gyt199962@163.com

M₄NPK (the chemical fertilizer combined with high quantity manure rate). Stability of water stable aggregates and distribution of organic carbon in aggregates were analyzed by wet sieve method. 【Result】 The proportion of large aggregates was reduced, while the proportion of micro aggregates was increased significantly under long-term application of organic and chemical fertilizer and high amount of organic fertilizer conditions. There was not significant change for the distribution of aggregates under long-term application of chemical fertilizer and constant organic fertilizer conditions. Compared with CK, the proportions in macro-aggregate of M₂NPK, M₄NPK and M₄ were reduced by 32.7%, 45.8% and 55.4%, respectively, and the proportion of that in micro-aggregate were increased by 73.2%, 102.5% and 123.9%, respectively. The stability of surface soil water stable aggregates was reduced significantly under long-term organic combined chemical fertilizer and high amount of organic fertilizer conditions. The soil organic carbon content was increased significantly by 1.12-2.06 times as much as CK under long-term fertilization condition, and the increase of organic carbon content was more significantly in organic fertilizer and organic combined with chemical fertilizer. The content of organic carbon in soil water stable aggregates of each size was increased under long-term organic fertilizer application, while the increase of organic carbon content in each treatment was gradually decreased with the decrease of particle size. Organic carbon content in the water stable macro-aggregate was significantly higher than that in the micro-aggregate, indicating that the organic carbon was mainly distributed in the macro-aggregate. The contribution rate of organic carbon in macro-aggregate was reduced significantly, and the contribution rate of organic carbon was increased significantly in micro-aggregate under long-term application of high amount of organic and combined with chemical fertilizer. The contribution rate of organic carbon in other treatments was higher in macro-aggregates than in micro-aggregates. 【Conclusion】 There were no significant effect for distribution and organic carbon content in aggregates under long-term chemical fertilization. The proportion of macro-aggregates and the stability of soil aggregates were reduced significantly under high amount of organic fertilizer and combination of organic and chemical fertilizer. The content of organic carbon in the aggregates was increased significantly under long-term application of organic fertilizer. The contribution rate of organic carbon in macro-aggregates was reduced significantly under high amount of organic fertilizer and combined with chemical fertilizer. The micro-aggregate was the dominant aggregate size of the organic carbon contribution rate.

Key words: long-term fertilization; black soil; water stable aggregates; content of organic carbon; contribution rate of organic carbon

0 引言

【研究意义】土壤团聚体是土壤的重要组成部分,也是形成良好土壤结构的基本物质。土壤团聚体粒径分布和稳定性是衡量土壤物理质量的重要指标^[1]。土壤有机碳是土壤团聚体形成的重要物质基础,促进团粒结构形成,同时土壤团聚状况也影响着土壤有机碳的分解^[2]。有机碳含量与土壤团聚体稳定性之间具有较好的相关性,是土壤团聚体稳定性的关键影响因子^[3]。团聚体水稳性与土壤可蚀性密切相关。研究长期施肥对土壤团聚体的组成及不同粒级有机碳含量的影响,可为阐明土壤有机碳循环与转化供应机制,揭示长期施肥条件下土壤肥力形成与变化规律,为黑土培育及抗侵蚀性提供理论依据。【前人研究进展】关于施肥对土壤团聚体组成、稳定性及有机碳分布的影响已有大量报道。耿瑞霖等^[4]在潮土的研究表明,长期施用有机肥显著提高 2—0.25 mm 团聚体数量,降低 0.25—0.053 mm 团聚体比例。无机肥的施用增加了各粒级团聚体有机碳含量,但对团聚体的比例没有影响。曾希柏等^[5]对灌漠土团聚体的研究表明,长期单施有机肥或配施氮肥能够显著提高各粒级水稳性团聚体有

机碳含量, >0.25 mm 水稳性团聚体的含量与土壤有机碳水平呈显著正相关。长期单施有机肥能促进 >0.25 mm 水稳性团聚体的形成。长期施用有机肥或有机无机配施可显著增加红壤大团聚体的含量及土壤有机碳库,有机碳主要向 >0.25 mm 的团聚体富集^[6-7]。张久明等^[8]对哈尔滨黑土的研究结果表明,长期施肥后,土壤 2—0.25 mm 和 0.25—0.053 mm 团聚体为优势粒级,0.25—0.053 mm 团聚体有机碳含量最高,<0.053 mm 粒级团聚体中有机碳含量最低。长期施用化肥降低了垆土 >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^[9]。长期有机无机配施对垆土 >0.25 mm 或 <0.25 mm 团聚体分布比例没有显著影响,显著改变了土壤有机碳在团聚体中的分配比例^[10]。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、有机碳含量及碳储量,而 NPK 长期施用显著提高了黏粉粒含量及有机碳分配比例^[11]。综合来看,施肥影响团聚体的分布、稳定性及团聚体有机碳的分布,但研究结果不尽相同。一方面,是由

于土壤类型不同,其成土母质及土壤质地差异不同;另一方面,当地的气候、作物等也会对团聚体及有机碳含量产生影响。【本研究切入点】黑土是由强烈的腐殖质累积和滞水淤积过程形成的,是一种特殊的草甸化过程。黑土养分含量丰富,肥力水平高,是重要的粮食产地。但黑土开垦后,连年的耕作施肥导致黑土腐殖质含量下降,土壤侵蚀明显。目前的研究多集中在宏观的黑土养分研究,对于水稳性团聚体的稳定性及团聚体中碳的分布研究较少。【拟解决的关键问题】依托 37 年黑土长期肥料定位试验,采用湿筛法,测定不同粒级团聚体含量及团聚体中有机碳含量,揭示黑土水稳性团聚体的稳定性及不同粒级有机碳分布对长期施肥的响应,以为黑土培育及抗侵蚀性提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本试验在“国家黑土肥力和肥料效益监测基地”进行,试验始于 1980 年,监测基地位于吉林省公主岭市吉林省农业科学院试验地(124°48′33.9″E, 43°30′23″N)。海拔 220 m,属于温带大陆性季风气候区,年平均气温 5.5℃,无霜期 125—140 d,有效积温 2 600—3 000℃,年降水量 450—650 mm,年蒸发量 1 200—1 600 mm,年日照时数 2 500—2 700 h。每年 12 月至翌年 3 月份为土壤冻结期,冻土层厚可达 1.5 m 左右,地下水埋深 14 m。试验始于 1980 年,土壤类型为发育于黄土母质上的中层黑土,成土母质为第四纪黄土状沉积物,地势平坦,地形呈漫岗波状起伏。耕层土壤有机质含量 28.1 g·kg⁻¹,全氮 1.9 g·kg⁻¹,碱解氮 114.0 mg·kg⁻¹,全磷 0.61 g·kg⁻¹,有效磷 11.8 mg·kg⁻¹,全钾 18.4 g·kg⁻¹,速效钾 158.3 mg·kg⁻¹,pH 7.8。

1.2 试验设计

试验设置 6 个处理,分别为:CK(不施肥)、NPK(常量化肥)、M₂(常量有机肥)、M₂NPK(常量有机肥+常量化肥)、M₄(高量有机肥)、M₄NPK(高量有机肥+常量化肥)。大区试验,不设重复,每个试验区面积 100 m²。种植的主要作物是玉米,一年一熟制。玉米在整个生育期内不灌水,主要依靠自然降水。常量化肥处理为 150 kg N·hm⁻²、75 kg P₂O₅·hm⁻²、75 kg K₂O·hm⁻²。化肥 N、P、K 分别由尿素(N 46%)、磷酸二铵(N 18%, P₂O₅ 46%)、硫酸钾(K₂O 50%)提供。有机肥施用量根据每年所用肥料的养分分析结果,以全氮含量为标准折算。有机肥为堆肥,有机质含量 13.0%—15.0%,全氮 0.45%—

0.55%,全磷(P₂O₅) 0.40%—0.50%,全钾(K₂O) 0.1%—0.2%。M₂ 每年施用有机肥 30 t·hm⁻²,M₄ 为 2 倍量的 M₂。有机肥在秋季收获后施入土壤,化肥氮 1/3 基施,2/3 于拔节期追施。磷、钾肥与有机肥作为基施一次性施入。供试作物为玉米,品种为杂交玉米吉单 101(1980—1988 年),丹玉 13(1989—1993 年),吉单 304(1994—1996 年),吉单 209(1997—2003 年),郑单 958(2004—2017 年)。玉米株行距为 23.8 cm×70 cm,播种密度为 60 000 株/hm²,人工播种。播种时间为 4 月下旬,9 月下旬收获。玉米收获后将地上部秸秆移出,实施根茬还田,其他管理措施与当地农田一致。

1.3 样品采集与分析

2017 年玉米收获后,将各小区划分 3 部分,每个部分采集 3 个混合样本,每个样本按“S”采集 5 点。采取 0—20 cm 土层的原状土,放在保鲜盒中带回室内。将采集的原状土在室内沿自然结构轻轻掰成小土块,除去粗根及小石块,过 10 mm 筛,自然风干,备用。

团聚体分级采用萨维诺夫法^[12]。干筛法(机械稳定性团聚体):称取 500 g 风干土置于一组不同孔径(7、5、3、2、1、0.5、0.25 和 0.053 mm)土壤筛的顶部,进行干筛 5 min,分离出>7、7—5、5—3、3—2、2—1、1—0.5、0.5—0.25、0.25—0.053 和<0.053 mm 的土壤团聚体,分别称重,计算出各级干筛团聚体占土样总量的百分率。

湿筛法(水稳性团聚体):从干筛各级土壤团聚体中,按比例配成 25 g 风干土样。称取这样配比的土样 4 份。将套筛按孔径大小顺序排好(2、0.25 和 0.053 mm)放于振荡架上,并置于水桶中。调整桶内水的高度,使套筛最上面筛子在振荡位于最低位时的上缘部分稍高于水面,振荡位于最高位置时土壤依然浸在水里。将配好的土样放入最大孔径的筛子中,静止 5 min,然后上下振荡 3 min,振幅 3 cm。将各个筛子中的土壤洗出,在 50℃ 下烘干、称重,即得到了>2、2—0.25、0.25—0.053 和<0.053 mm 的土壤团聚体质量。

把>0.25 mm 粒级的团聚体称为大团聚体(Macro-aggregate),而<0.25 mm 粒级的团聚体为水稳性微团聚体(Micro-aggregate)。

原土及各个团聚体中有机碳用高温外加热重铬酸钾氧化-容量法测定^[13]。

1.4 数据处理

(1) 土壤团聚体平均质量直径的计算^[14]

$$MWD = \sum_{i=1}^n X_i W_i$$

式中，MWD 为团聚体平均质量直径（mm），Xi 为任一级别范围内团聚体的平均直径（mm），Wi 为对应于 Xi 的团聚体百分含量。

（2）几何平均直径的计算^[14]

$$GMD = \exp \sum [lg X_i W_i / m]$$

式中，GMD 为团聚体几何平均直径（mm）。Xi 为任一级别范围内团聚体的平均直径（mm），Wi 为对应于 Xi 的团聚体百分含量，m 为样品总重量。

（3）土壤团聚体破碎率（PAD）计算方法^[15]

$$PAD = (W_d - W_w) / W_d \times 100\%$$

式中，Wd 和 Ww 分别为 >0.25 mm 干筛和湿筛团聚体质量分数。

（4）分形维数^[16]

$$\left(\frac{X_i}{X_{max}}\right)^{3-D} = \frac{W(r < X_i)}{WT}$$

式中，Xi 为两筛分粒级间粒径的平均值，Xmax 为最大粒级土粒的平均直径，W（r<Xi）为大于 Xi 的累积土粒重量，WT 为土壤各粒级重量的总和，D 为分形维数。

（5）各粒级土壤团聚体对土壤有机碳的贡献率

利用李玮等^[17]方法计算各粒级团聚体对土壤有机碳的贡献率。

团聚体对土壤有机碳的贡献率（%）=[该粒级团聚体中有机碳含量（g·kg⁻¹）×该级团聚体含量（%）/耕层土壤有机碳含量]×100%。

2 结果

2.1 长期施肥对土壤水稳性团聚体分布的影响

从表 1 可以看出，不同粒级团聚体含量因施肥处理不同而有差异。2—0.25、0.25—0.053 mm 团聚体含量较高。不同施肥处理对不同粒级团聚体含量有一定影响。与 CK 相比，长期施肥降低了>2、2—0.25 mm 水稳性大团聚体的含量，提高了 0.25—0.053 和<0.053 mm 水稳性微团聚体的含量。单施化肥（NPK）、常量有机肥（M₂）处理较 CK 处理各粒级团聚体比例变异较小，未达显著水平。M₂NPK、M₄NPK、M₄ 处理的大团聚体占比较 CK 处理分别降低 32.7%、45.8% 和 55.4%，微团聚体的占比较 CK 处理分别提高 73.2%、102.5%和 123.9%，均达显著水平。说明长期有机无机配施以及施高量有机肥显著降低大团聚体的比例，提高微团聚体的比例。长期施用化肥及常量有机肥并未明显改变团聚体的分布。

表 1 长期施肥下各粒级水稳性团聚体分布

Table 1 The distribution of water stable aggregates under long-term fertilization conditions (%)

处理 Treatment	大团聚体 Macro-aggregate			微团聚体 Micro-aggregate		
	>2 mm	2-0.25 mm	总和 Sum	0.25-0.053 mm	<0.053 mm	总和 Sum
CK	18.6±1.5 a	50.5±4.9 a	69.1±4.3 a	21.8±3.3 c	9.1±1 c	30.9±4.3 c
NPK	16.4±1.1 ab	44.9±8.8 a	61.3±9.7 a	26.7±6.7 c	11.9±3.0 c	38.7±9.7 c
M ₂	14.1±3.6 b	49.3±3.9 a	63.4±12.5a	22.5±3.7 c	14.1±3.8 bc	36.6±6.8 c
M ₂ NPK	5.3±1.5 c	41.2±3.2 ab	46.5±1.6 b	35.2±2.8 b	18.3±1.3 b	53.5±1.6 b
M ₄	4.7±1.9 c	32.7±5.5 bc	37.4±6.4 bc	44.5±4.4 a	18.1±2.2 b	62.6±6.4 ab
M ₄ NPK	3.1±0.2 c	27.7±5.4 c	30.8±5.5 c	41.9±1.5 ab	27.3±4.3 a	69.2±5.5 a

同一列中数据后不同字母表示同一粒级团聚体不同处理间的差异水平达 0.05。下同
Different letters in the same column indicate that the difference is significant up to 0.05. The same as below

2.2 长期施肥对土壤水稳性团聚体稳定性的影响

土壤团聚体平均重量直径（MWD）、几何平均直径（GMD）、团聚体破坏率（PAD）及分形维数（D）常用来表征土壤中团聚体的稳定程度。尤其湿筛下的 MWD 与 GMD 更能反映土壤结构的好坏：其值越大，说明土壤结构越好；反之土壤结构差，土壤养分易流失。表 2 表明，与 CK 相比，NPK 和 M₂ 处理 MWD、

GMD 无显著差异，M₂NPK、M₄、M₄NPK 处理 MWD、GMD 显著降低，分别较 CK 降低 35.4%、44.8%、53.8% 和 47.2%、56.0%、65.6%。

长期不同施肥对土壤团聚体破坏率的影响不同。与 CK 相比，NPK 和 M₂ 处理团聚体破碎率差异不显著，而 M₂NPK、M₄、M₄NPK 处理 PAD 显著增加，分别是 CK 处理的 2.1、2.4 及 2.7 倍。从分形维数来

看, 与 CK 相比, M_2 NPK、 M_4 、 M_4 NPK 处理的 D 值是显著增加的, 而 NPK 和 M_2 处理变异较小, 未达显著水平。综合 MWD、GMD、PAD 及 D 4 个水稳性指标来看, 长期有机无机配施及高量有机肥的施用降低了表层土壤水稳性团聚体的稳定性。

从表 3 可以看出, >0.25 mm 水稳性团聚体含量与 MWD、GMD 呈极显著正相关关系, 相关系数分别为 0.985 和 0.971, 这说明 >0.25 mm 水稳性团聚体比例越高, 团聚体平均重量直径、几何平均直径越大, 土壤团聚体稳定性越好。 >0.25 mm 水稳性团聚体含量与 PAD、分形维数呈极显著负相关, 说明 >0.25 mm

水稳性团聚体团聚体含量越低, 破碎率越大, 分形维数越高, 土壤抗侵蚀性越差。也就是说, 大团聚体的比例决定着团聚体的稳定性, 大团聚体比例越高, 土壤水稳性团聚体越稳定。

2.3 长期施肥对水稳性团聚体有机碳分布的影响

经过连续 37 年的耕种, 不同施肥处理土壤有机碳含量差异显著 (图 1)。施肥显著增加土壤有机碳含量, 且处理间均达到显著水平。 M_4 NPK 处理有机碳含量最高, 达 $34.0\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 是 CK 有机碳含量的 2.06 倍, 其次是 M_4 处理, 有机碳含量为 $30.5\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 是 CK 处理的 1.85 倍。 M_2 处理有机碳含量高于 M_2 NPK

表 2 长期施肥下土壤水稳性团聚体稳定性指标

Table 2 Soil aggregate stability indexes under long-term fertilization conditions

处理 Treatment	平均重量直径 MWD (mm)	几何平均直径 GMD (mm)	分形维数 D	团聚体破坏率 PAD (%)
CK	0.98a	0.61a	2.37c	23.15c
NPK	0.88a	0.50a	2.44c	31.88c
M_2	0.88a	0.50a	2.47bc	30.08c
M_2 NPK	0.63b	0.32b	2.56ab	47.98b
M_4	0.54bc	0.27b	2.57ab	55.64ab
M_4 NPK	0.45c	0.21b	2.67a	63.15a

表 3 团聚体稳定性与大团聚体含量的相关性

Table 3 Correlation between the stability of aggregates and the content of large aggregates

	>0.25 mm 水稳性团聚体含量 Content of >0.25 mm aggregate	MWD	GMD	PAD	D
>0.25 mm 水稳性团聚体含量 Content of >0.25 mm aggregate	1	0.985**	0.971**	-0.998**	-0.954**
MWD		1	0.987**	-0.985**	-0.960**
GMD			1	-0.968**	-0.972**
PAD				1	0.955**
D					1

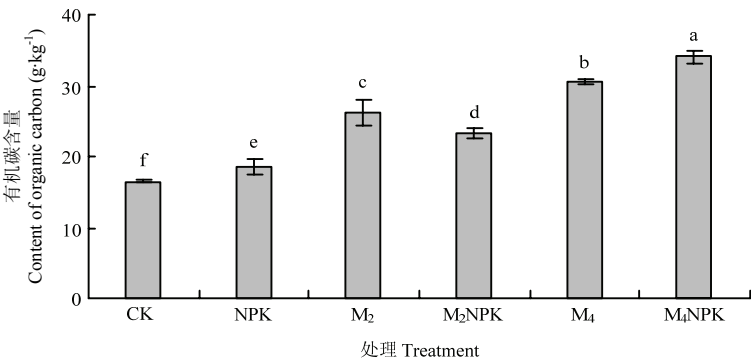


图 1 不同施肥处理土壤有机碳含量

Fig. 1 Organic C content of soil in different fertilization treatments

处理。 M_2 和 M_2NPK 处理的有机碳含量分别是 CK 处理的 1.59、1.41 倍。长期单施化肥 (NPK) 土壤有机碳含量较 CK 处理略有提高, 约为 CK 的 1.12 倍。与对照相比, 有机肥单独施用或有机无机配施较化肥更能提高有机碳含量。

有机碳在不同粒级水稳性团聚体中的含量与分布情况见图 2, 与 CK 相比长期单施化肥对土壤水稳性团聚体中有机碳的含量没有显著影响, 而长期单施有机肥、有机无机配施显著增加不同粒级团聚体有机碳含量, 且有机肥施用量越高, 团聚体中有机碳含量增加的越多。 M_4NPK 、 M_4 、 M_2 、 M_2NPK 处理与 CK 相比, 粒径 >2 mm 团聚体中有机碳含量分

别增加了 157.2%、100.2%、52.2%、45.3%; 粒径 2—0.25 mm 团聚体有机碳含量分别增加了 125.1%、106.6%、47.6%、38.57%; 粒径 0.25—0.053 mm 团聚体有机碳含量分别增加了 94.2%、76.1%、41.9%、25.3%; <0.053 mm 团聚体有机碳含量分别增加了 59.2%、58.6%、28.0%、26.1%。这说明, 长期施用有机肥可以增加各粒级土壤水稳性团聚体中有机碳的含量, 且随着粒径的变小, 各处理有机碳含量的增加幅度逐渐变小, 处理间差异缩减, 但仍达显著水平。总体来看, 各处理水稳性大团聚体中有机碳含量显著高于微团聚体, 这表明有机碳主要分布在大团聚体中。

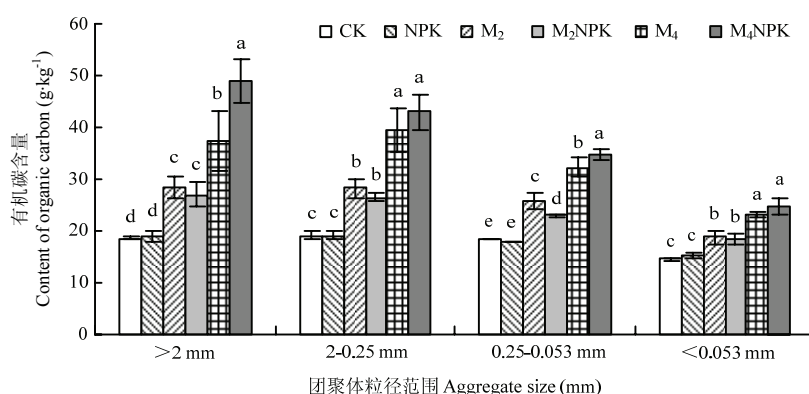


图 2 不同施肥处理对各级团聚体中有机碳含量的影响

Fig. 2 The effect of long-term different fertilization treatments on contents of organic carbon in different aggregates size

2.4 水稳性团聚体对有机碳的贡献率

表 4 表明, 各施肥处理对土壤有机碳贡献率最大是 2—0.25 mm 和 0.25—0.053 mm 两个粒级的团聚体。 M_4 、 M_4NPK 处理 0.25—0.053 mm 团聚体有机碳贡献率最大, 其次是 2—0.25 mm 团聚体。CK、NPK、 M_2 、 M_2NPK 处理 2—0.25 mm 团聚体有机碳贡献率最大, 其次是 0.25—0.053 mm 团聚体。施肥处理显著降低了 >2 mm 团聚体中有机碳的贡献率, 与 CK 相比, M_2NPK 、 M_4 、 M_4NPK 处理团聚体中有机碳贡献率分别降低 70.4%、73.6%和 78.6%, NPK、 M_2 处理有机碳贡献率下降 19.9%、28.3%。2—0.25 mm 团聚体中, 只有 M_4 、 M_4NPK 有机碳的贡献率是显著降低的, 其他处理虽有降低, 但未达显著水平。0.25—0.053 mm、 <0.053 mm 团聚体中, M_2NPK 、 M_4 、 M_4NPK 对有机碳的贡献率是显著增加的, 分别较 CK 增加 44.1%、94.9%、76.8%和 80.2%、69.8%、141.7%; NPK、 M_2

未有显著影响。总体来看, 长期施用化肥及常量有机肥对微团聚体有机碳的贡献率没有显著影响, 对大团聚体有机碳贡献率的影响也仅是在 >2 mm 的团聚体; 但有机无机配施及高量有机肥的长期施用显著降低大团聚体的有机碳贡献率, 提高微团聚体有机碳贡献率。这主要是有机无机配施及施高量有机肥显著降低了大团聚体的比例, 增加微团聚体的比例导致的。长期施用化肥及常量有机肥大团聚体有机碳贡献率高于微团聚体, 而高量有机肥的两个处理微团聚体有机碳贡献率显著高于大团聚体, 常量有机无机配施大、小团聚体有机碳贡献率相当。

3 讨论

3.1 长期施肥条件下的土壤团聚体分布及稳定性

土壤团聚体的稳定性受母质、气候、土地管理、耕作以及矿物组成、土壤有机质、微生物活动等一系

表 4 土壤各级别团聚体对土壤有机碳的贡献率
Table 4 Contribution rates of different aggregate fractions to organic carbon content (%)

处理 Treatment	大团聚体 Macro-aggregate			微团聚体 Micro-aggregate		
	>2 mm	2-0.25 mm	总和 Sum	0.25-0.053 mm	<0.053 mm	总和 Sum
CK	21.0 a	58.4 a	79.4 a	24.1 c	8.1 c	32.2 c
NPK	16.8 b	45.8 abc	62.6 b	25.9 c	10.0 bc	35.9 bc
M ₂	15.0 b	49.2 ab	64.2 b	25.9 c	10.1 bc	36.0 bc
M ₂ NPK	6.2 c	46.9 abc	53.1 bc	34.7 b	14.6 b	49.4 ab
M ₄	5.5 c	42.1 bc	47.6 cd	47.0 a	13.8 b	60.8 a
M ₄ NPK	4.5 c	34.7 c	39.2 d	42.6 ab	19.6 a	62.2 a

列土壤物理、化学和生物学性质影响，本试验基于长期定位平台下，重点评价不同化肥和有机肥配施处理对土壤团聚体分布、稳定性等的影响。有机无机配施增加土壤大团聚体比例，降低土壤微团聚体比例^[18-19]。本研究中，不同施肥处理对土壤团聚体比例的影响不同。长期施用化肥及常量有机肥对土壤水稳性大团聚体、微团聚体比例并无显著影响，而长期有机无机配施及高量有机肥的施用显著降低了大团聚体比例，增加了微团聚体比例。

MWD、GMD 作为衡量团聚体稳定性的指标，已被用于评价有机肥对土壤团聚体稳定性的影响。土壤结构越好、稳定性越强，则 MWD、GMD 值越大。破坏率（PAD）是表达水对土壤团聚体的破坏能力，即团聚体的水稳性。分形维数 D 是评价团聚体特征更敏感且更准确的参数，D 值越大说明土壤中小级别的团聚体的数量越大，土壤质地越细，土壤的改良程度越高，D 值越小说明土壤团粒结构越好、结构越稳定^[20-22]。以往研究表明，施用有机肥提高土壤水稳性团聚体的稳定性，但在本研究中，长期施用高量有机肥及有机无机配施较 CK 显著降低了 MWD、GMD，增加了团聚体破碎率及分形维数，从而导致团聚体稳定性的降低。XIE 等^[23]基于 30 年的定位试验结果与本研究相一致，与低量猪粪相比，高量猪粪的投入降低了棕壤大团聚体的含量与稳定性。这可能是由于有机肥中含有较多的 K⁺、Na⁺等一价阳离子，这些阳离子可能提高了土壤胶体的分散，促进了大团聚体的破散^[24-25]，降低了团聚体的稳定性^[26]。

3.2 长期施肥条件下的团聚体有机碳含量

长期以来，有机肥的施用一直被认为是提高有机碳含量的有效途径^[27-29]。本研究表明，与 CK 相比，施肥显著增加土壤有机碳含量，且各施肥处理间均达到显著水平（ $P<0.05$ ）。单独施用有机肥或有机无机

配施较化肥更能提高有机碳含量。这是由于有机肥的施用直接增加土壤有机碳含量，另外，作物在施肥的条件下能获得更高的生产力，增加了作物残茬量，同时促进根分泌物的增加，从而导致土壤有机碳的额外输入量增加^[30-33]。

许多长期定位试验表明，有机无机配施不仅可以增加土壤有机碳含量，还可以增加各级团聚体有机碳含量^[34-36]。本研究中，>2 mm 粒级团聚体有机碳含量最高，随着团聚体粒径的减小，团聚体有机碳含量降低，这说明大团聚体对有机碳具有一定的富集作用^[37]。同一粒级水稳性团聚体中，长期单施化肥对土壤水稳性团聚体中有机碳的含量没有显著影响，而长期单施有机肥、有机无机配施显著增加不同粒级团聚体有机碳含量，且有机肥施用量越高，团聚体有机碳增加的越多。这说明施用有机肥有利于农田土壤团聚体有机碳的积累^[38]。

3.3 长期施肥条件下团聚体对有机碳的贡献率

施肥不仅影响团聚体内有机碳的含量，还会对各级团聚体中有机碳的贡献率产生影响。张久明等^[8]研究指出黑土长期施肥促进土壤大团聚体的形成，大团聚体对养分的贡献率也相对较高。各施肥处理土壤有机碳贡献率最大的依次为粒级 2—0.25 mm 和 0.25—0.053 mm 的团聚体。徐江兵等^[7]指出，增施有机肥红壤大团聚体有机碳对总有机碳的贡献率增加，其中以>2 mm 增加最快，而<0.053 mm 团聚体有机碳的贡献率呈明显下降趋势。本研究中，各施肥处理土壤有机碳贡献率最大的是 2—0.25 mm 和 0.25—0.053 mm 两个粒级的团聚体。高量有机肥处理土壤中微团聚体居优势，其对土壤有机碳的贡献率达 60.8%—62.2%，不施肥、单施化肥及常量有机肥处理大团聚体居优势，有机碳贡献率为 53.1%—79.4%。虽有大量研究已表明，无论施用化肥还是有机肥均能增加各粒

级团聚体中有机碳的含量, 但团聚体对土壤有机碳的贡献率大小主要受其含量高低的影响^[39], 所以凡是影响团聚体组成的因素都会影响到对有机碳的贡献率。

4 结论

(1) 长期有机无机配施以及施高量有机肥显著降低大团聚体比例, 提高微团聚体比例; 长期施用化肥及常量有机肥并未明显改变团聚体的分布。(2) 长期有机无机配施及高量有机肥的施用显著降低表层土壤水稳性团聚体的稳定性。(3) 长期施肥显著增加土壤有机碳含量, 施用有机肥处理有机碳含量增加更为显著。长期施用有机肥可以增加各粒级土壤水稳性团聚体中有机碳的含量, 且随着粒径的变小, 各处理有机碳含量的增加幅度逐渐减小。各处理水稳性大团聚体中有机碳含量显著高于微团聚体。(4) 由于高量有机肥的施用及配施化肥显著改变团聚体比例, 因对团聚体有机碳的贡献率的影响也呈显著水平。长期施高量有机肥及配施化肥显著提高微团聚体有机碳贡献率, 其他处理以大团聚体有机碳贡献率较高。(5) 施用有机肥可以有效提升土壤质量, 但有机肥用量并非越高越好, 过量的施用有机肥不利于土壤结构的改善, 因此, 适度的施用有机肥有利于改善土壤团聚体结构, 提升团聚体碳库水平。

References

- [1] SHRESTHA B M, SINGH B R, SITAULA B K, BAJRACHARYA R M. Soil aggregate- and particle-associated organic carbon under different land uses in Nepal. *Soil Science Society of America Journal*, 2007, 71(4): 1194-1203.
- [2] EYNARD A, SCHUMACHER T, LINDSTROM M, MALO D. Effects of agricultural management systems on soil organic carbon in aggregates of Ustolls and Usterts. *Soil and Tillage Research*, 2005, 81(2): 253-263.
- [3] 李小刚. 甘肃景电灌区土壤团聚体特征研究. *土壤学报*, 2000, 37(2): 263-270.
LI X G. The characteristics of soil aggregate in Jingtai electric-irrigating area of Gansu. *Acta Pedologica Sinica*, 2000, 37(2): 263-270. (in Chinese)
- [4] 耿瑞霖, 郁红艳, 丁维新, 蔡祖聪. 有机无机肥长期施用对潮土团聚体及其有机碳含量的影响. *土壤*, 2010, 42(6): 908-914.
GENG R L, YU H Y, DING W X, CAI Z C. Effects of long-term application of organic manure and chemical fertilizers on organic carbon in aggregates of a sandy loam. *Soils*, 2010, 42(6): 908-914. (in Chinese)
- [5] 曾希柏, 柴彦君, 俄胜哲, 车宗贤, 黄涛, 王亚男, 苏世鸣, 白玲玉. 长期施肥对灌漠土团聚体及其稳定性的影响. *土壤通报*, 2014, 45(4): 783-788.
ZENG X B, CHAI Y J, E S Z, CHE Z X, HUANG T, WANG Y N, SU S M, BAI L Y. Effects of long-term fertilization on soil aggregate and its stability in irrigated desert soil of China. *Chinese Journal of Soil Science*, 2014, 45(4): 783-788. (in Chinese)
- [6] WANG W, CHEN W C, WANG K R, XIE X L, YIN C M, CHEN A L. Effects of long-term fertilization on the distribution of carbon, nitrogen and phosphorus in water-stable aggregates in paddy soil. *Agricultural Sciences in China*, 2011, 10(12): 1932-1940.
- [7] 徐江兵, 李成亮, 何园球, 王艳玲, 刘晓利. 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. *土壤学报*, 2007, 44(4): 675-682.
XU J B, LI C L, HE Y Q, WANG Y L, LIU X L. Effect of fertilization on organic carbon content and fractionation of aggregates in upland red soil. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(4): 675-682. (in Chinese)
- [8] 张久明, 迟凤琴, 韩锦泽, 周宝库, 匡恩俊. 长期不同施肥黑土团聚体有机碳分布特征. *土壤与作物*, 2017, 6(1): 49-54.
ZHANG J M, CHI F Q, HAN J Z, ZHOU B K, KUANG E J. SOC distribution characteristics of mollisols aggregates in different long-term fertilization systems. *Soils and Crops*, 2017, 6(1): 49-54. (in Chinese)
- [9] 何瑞清, 王百群, 张燕, 王蕊. 长期施用化肥条件下壤土团聚体中有机碳与养分分布. *水土保持学报*, 2016, 36(6): 347-351.
HE R Q, WANG B Q, ZHANG Y, WANG R. Distribution of organic carbon and nutrients in water stable aggregates of loess soil under long-term application of chemical fertilizer. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 36(6): 347-351. (in Chinese)
- [10] 王仁杰, 强久次仁, 薛彦飞, 张树兰, 杨学云. 长期有机无机肥配施改变了壤土团聚体及其有机和无机碳分布. *中国农业科学*, 2015, 48(23): 4678-4689.
WANG R J, QIANGJIU C R, XUE Y F, ZHANG S L, YANG X Y. Effect of long-term organic-manure combined with chemical fertilizers on aggregate sizes distribution and its organic and inorganic carbon on a tier soil. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(23): 4678-4689. (in Chinese)
- [11] 苏慧清, 韩晓日, 杨劲峰, 罗培宇, 戴健, 杨明超, 何蕊. 长期施肥棕壤团聚体分布及其碳氮含量变化. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(4): 924-932.
SU H Q, HAN X R, YANG J F, LUO P Y, DAI J, YANG M C, HE R. Effect of long-term fertilization on distribution of aggregates and

- organic carbon and total nitrogen contents in a brown soil. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, 23(4): 924-932. (in Chinese)
- [12] 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. 北京: 科学出版社, 1978: 77-88.
- Department of Soil Physics, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. *Determination of Soil Physical Properties*. Beijing: Science Press, 1978: 77-88. (in Chinese)
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- BAO S D. *Soil and Agrochemical Analysis*. Beijing: China Agricultural Press, 2000. (in Chinese)
- [14] 周虎, 吕贻忠, 杨志臣, 李保国. 保护性耕作对华北平原土壤团聚体特征的影响. 中国农业科学, 2007, 40(9): 1973-1979.
- ZHOU H, LÜ Y Z, YANG Z C, LI B G. Effects of conservation tillage on soil aggregates in Huabei plain, China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(9): 1973-1979. (in Chinese)
- [15] 陈山, 杨峰, 林杉, 柳淑蓉, 汤水荣, 蔡崇法, 胡荣桂. 土地利用方式对红壤团聚体稳定性的影响. 水土保持学报, 2012, 26(5): 211-216.
- CHEN S, YANG F, LIN S, LIU S R, TANG S R, CAI C F, HU G R. Impact of land use patterns on stability of soil aggregates in red soil region of south China. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(5): 211-216. (in Chinese)
- [16] 杨培岭, 罗远培, 石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征. 科学通报, 1993, 38(20): 1896-1899.
- YANG P L, LUO Y P, SHI Y C. Fractal features of soils characterized by weight distribution of particle size. *Chinese Science Bulletin*, 1993, 38(20): 1896-1899. (in Chinese)
- [17] 李玮, 郑子成, 李廷轩, 刘敏英. 不同植茶年限土壤团聚体及其有机碳分布特征. 生态学报, 2014, 34(21): 6326-6336.
- LI W, ZHENG Z C, LI T X, LIU M Y. Distribution characteristics of soil aggregates and its organic carbon in different tea plantation age. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(21): 6326-6336. (in Chinese)
- [18] 梁尧, 苑亚茹, 韩晓增, 李禄军, 邹文秀, 任军, 李刚. 化肥配施不同剂量有机肥对黑土团聚体中有机碳与腐殖酸分布的影响. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(6): 1586-1594.
- LIANG Y, YUAN Y R, HAN X Z, LI L J, ZOU W X, REN J, LI G. Distribution of organic carbon and humic acids in aggregates of Mollisol as affected by amendments with different rates of organic manure plus mineral fertilizer. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2016, 22(6): 1586-1594. (in Chinese)
- [19] MAJUMDER B, RUEHLMANN J, KUZYAKOV Y. Effects of aggregation processes on distribution of aggregate size fractions and organic C content of a long-term fertilized soil. *European Journal of Soil Biology*, 2010, 46(6): 365-370.
- [20] 华瑞, 徐学选, 张少妮, 赵传普. 不同退耕年限林草地土壤颗粒分形特征研究. 水土保持学报, 2016, 30(4): 206-209.
- HUA R, XU X X, ZHANG S N, ZHAO C P. The research of soil particle fractal characteristics of forestland and grassland with different restoration years. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(4): 206-209. (in Chinese)
- [21] 孙家兴, 赵雨森, 辛颖, 张军. 黑土区杨树农田防护林土壤团聚体的稳定性. 水土保持学报, 2018, 38(3): 66-73.
- SUN J X, ZHAO Y S, XIN Y, ZHANG J. Soil aggregate stability of poplar farmland shelter belts in black soil region. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 38(3): 66-73. (in Chinese)
- [22] 祁迎春, 王益权, 刘军, 于雄胜, 周彩景. 不同土地利用方式土壤团聚体组成及几种团聚体稳定性指标的比较. 农业工程学报, 2011, 27(1): 340-347.
- QI Y C, WANG Y Q, LIU J, YU X S, ZHOU C J. Comparative study on composition of soil aggregates with different land use patterns and several kinds of soil aggregate stability index. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(1): 340-347. (in Chinese)
- [23] XIE H T, LI J W, ZHANG B, WANG L F, WANG J K, HE H B, ZHANG X D. Long-term manure amendments reduced soil aggregate stability via redistribution of the glomalin-related soil protein in macroaggregates. *Scientific Report*, 2015, 5: 1-8.
- [24] HAYNES R J, NAIDU R. Influence of lime, fertilizer and manure applications on soil organic matter content and soil physical conditions: a review. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1998, 51(2): 123-137.
- [25] 冷延慧, 汪景宽, 李双异. 长期施肥对黑土团聚体分布和碳储量变化的影响. 生态学杂志, 2008, 27(12): 2171-2177.
- LENG Y H, WANG J K, LI S Y. Effects of long-term fertilization on aggregates size distribution and carbon stock in black soil. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(12): 2171-2177. (in Chinese)
- [26] WHALEN J K, CHANG C. Macroaggregate characteristics in cultivated soils after 25 annual manure applications. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, 66(5): 1637-1647.
- [27] BHATTACHARYYA R, PRAKASH V, KUNDU S, SRIVASTVA A K, GUPTA H S, MITRA S. Long term effects of fertilization on carbon and nitrogen sequestration and aggregate associated carbon and nitrogen in the Indian sub-Himalayas. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2010, 86(1): 1-16.
- [28] CHEN Y, ZHANG X D, HE H B, XIE H T, YAN Y, ZHU P, REN J, WANG L C. Carbon and nitrogen pools in different aggregates of a Chinese Mollisol as influenced by long-term fertilization. *Journal of*

- Soils and Sediments*, 2010, 10(6): 1018-1026.
- [29] TRIPATHI R, NAYAK A K, BHATTACHARYA P, SHUKLA A K, SHAHID M, RAJA R, PANDA B B, MOHANTY S, KUMAR A, THILAGAM V K. Soil aggregation and distribution of carbon and nitrogen in different fractions after 41 years long-term fertilizer experiment in tropical rice-rice system. *Geoderma*, 2014, 213: 280-286.
- [30] 蔡岸冬, 张文菊, 杨品品, 韩天富, 徐明岗. 基于 Meta-Analysis 研究施肥对中国农田土壤有机碳及其组分的影响. *中国农业科学*, 2015, 48(15): 2995-3004.
- CAI A D, ZHANG W J, YANG P P, HAN T F, XU M G. Effect degree of fertilization practices on soil organic carbon and fraction of croplands in China-Based on Meta-Analysis. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(15): 2995-3004. (in Chinese)
- [31] 何亚婷. 长期施肥下我国农田土壤有机碳组分和结构特征[D]. 北京: 中国农业科学院, 2015.
- HE Y T. Characteristics of soil organic carbon fraction and chemical composition under long-term fertilization in upland soil of China[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2015. (in Chinese)
- [32] SONG Z W, ZHU P, GAO H J, PENG C, DENG A X, ZHANG C Y, MANNAF M A, ISLAM M N, ZHANG W J. Effects of long-term fertilization on soil organic carbon content and aggregate composition under continuous maize cropping in Northeast China. *Journal of Agricultural Science*, 2015, 153: 236-244.
- [33] XIE H T, LI J W, ZHU P, PENG C, WANG J K, HE H B, ZHANG X D. Long-term manure amendments enhance neutral sugar accumulation in bulk soil and particulate organic matter in a Mollisol. *Soil Biology & Biochemistry*, 2014, 78: 45-53.
- [34] GREEN V S, CAVIGELLI M A, DAO T H, FLANAGAN D C. Soil physical properties and aggregate-associated C N and P distributions in organic and conventional cropping systems. *Soil Science*, 2005, 170(10): 822-831.
- [35] 李辉信, 袁颖红, 黄欠如, 胡锋, 潘根兴. 不同施肥处理对红壤水稻土团聚体有机碳分布的影响. *土壤学报*, 2006, 43(3): 422-429.
- LI H X, YUAN Y H, HUANG Q R, HU F, PAN G X. Effects of fertilization on soil organic carbon distribution in various aggregates of red paddy soil. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(3): 422-429. (in Chinese)
- [36] 高会议, 郭胜利, 刘文兆, 车升国, 李森. 不同施肥处理对黑垆土各粒级团聚体中有机碳含量分布的影响. *土壤学报*, 2010, 47(5): 931-938.
- GAO H Y, GUO S L, LIU W Z, CHE S G, LI M. Effect of fertilization on organic carbon distribution in various fractions of aggregates in caliche soils. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(5): 931-938. (in Chinese)
- [37] 向艳文, 郑圣先, 廖育林, 鲁艳红, 谢坚, 聂军. 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. *中国农业科学*, 2009, 42(7): 2415-2424.
- XIANG Y W, ZHENG S X, LIAO Y L, LU Y H, XIE J, NIE J. Effects of long-term fertilization on distribution and storage of organic carbon and nitrogen in water-stable aggregates of red paddy soil. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(7): 2415-2424. (in Chinese)
- [38] 陆太伟, 蔡岸冬, 徐明岗, 高强, 孙楠, 张文菊. 施用有机肥提升不同土壤团聚体有机碳含量的差异性. *农业环境科学学报*, 2018, 37(10): 2183-2193.
- LU T W, CAI A D, XU M G, GAO Q, SUN N, ZHANG W J. Variation in sequestration of organic carbon associated with differently sized aggregates after organic manure application. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(10): 2183-2193. (in Chinese)
- [39] 李文军, 杨基峰, 彭保发, 崔京珍. 施肥对洞庭湖平原水稻土团聚体特征及其有机碳分布的影响. *中国农业科学*, 2014, 47(20): 4007-4015.
- LI W J, YANG J F, PENG B F, CUI J Z. Effects of fertilization on aggregate characteristics and organic carbon distribution in a paddy soil in Dongting Lake Plain of China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(20): 4007-4015. (in Chinese)

(责任编辑 李云霞)