

石纹瑄, 刘世亮, 赵颖, 等. 猪粪有机肥施用对潮土速效养分含量及团聚体分布的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2017, 34(5): 431-438.

SHI Wen-xuan, LIU Shi-liang, ZHAO Ying, et al. Effects of Pig Manure Organic Fertilizer Application on Available Nutrient Content and Soil Aggregate Distribution in Fluvo-aquic Soil [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2017, 34(5): 431-438.

猪粪有机肥施用对潮土速效养分含量及团聚体分布的影响

石纹瑄¹, 刘世亮¹, 赵颖¹, 高焕平¹, 王洋洋², 李慧¹, 刘芳^{1*}

(1.河南农业大学资源与环境学院, 河南 郑州 450002; 2.郑州市建筑生态绿化工程技术研究中心, 河南 郑州 450000)

摘要:针对集约化养殖畜禽粪便无序排放产生的环境问题,采用连续2年的盆栽试验,以猪粪有机肥为研究对象,设计5个有机肥施用水平(0、6.7、13.3、26.7、40.0 g·kg⁻¹土),研究了猪粪有机肥施用对潮土有机碳、速效养分含量及土壤团聚体分布的影响,为畜禽粪便田间消纳和合理施用提供理论依据。研究表明,土壤中有机碳、碱解氮、速效磷和速效钾含量均随有机肥施用量的增加而呈现逐渐升高趋势,且第二年土壤中各指标增加更加明显,第二年施肥处理各速效养分含量分别比第一年高2.7%~54.0%、6.7%~34.6%、36.8%~159.5%、20.3%~35.7%;土壤有机碳含量与外源有机碳投入量之间存在着显著的线性关系,有机肥施用可以显著提高生菜产量,且具有明显的后效作用。2年试验中,土壤团聚体以0.053~0.25 mm和<0.053 mm小团聚体所占比例较大,且随有机肥施用量增加呈现降低趋势,而0.25~0.5 mm和>0.5 mm大团聚体含量却随有机肥施用量增加呈升高趋势,可见,施用有机肥可促进大团聚体的形成,在有机肥施加量为40.0 g·kg⁻¹土时,土壤中>0.25 mm团聚体的含量最高,土壤团聚体平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GWD)最大,土壤的团聚化作用最强,土壤结构最稳定。

关键词:猪粪;有机肥;土壤速效养分;土壤团聚体

中图分类号:S152.4

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2017)05-0431-08

doi: 10.13254/j.jare.2017.0070

Effects of Pig Manure Organic Fertilizer Application on Available Nutrient Content and Soil Aggregate Distribution in Fluvo-aquic Soil

SHI Wen-xuan¹, LIU Shi-liang¹, ZHAO Ying¹, GAO Huan-ping¹, WANG Yang-yang², LI Hui¹, LIU Fang^{1*}

(1.College of Resources and Environment, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China; 2.Zhengzhou Construction Ecological Afforestation Engineering Technology Research Center, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: This paper focuses on environmental risk caused by livestock manure disorderly discharged from integrated livestock and poultry industry. 2-year pot experiment was carried out to study the effects of pig manure organic fertilizer on fluvo-aquic soil organic carbon, available nutrient content and soil aggregate distribution, which designed in 5 levels of organic fertilizer application (0, 6.7, 13.3, 26.7, 40.0 g·kg⁻¹ soil). The results showed that the organic carbon, alkali-hydrolyzable nitrogen, available P and available K contents in soil were enhanced with organic fertilizer application increasing, and the indicators of soil were increased significantly in second year, such as organic carbon content was 2.7%~54.0% higher than that of the first year, alkali-hydrolyzable nitrogen content was higher 6.7%~34.6%, available P content was higher 36.8%~159.5% and available K content was higher 20.3%~35.7%. There was a significant linear relationship between soil organic carbon content and external organic carbon input. Organic fertilizer application could significantly improve lettuce yield, and it had a significant effect. The soil micro-aggregate contents for 0.053~0.25 mm and <0.053 mm took a larger percentage of total soil aggregates, and showed a decreasing trend with organic fertilizer application increasing, while the contents of 0.25~0.5 mm and >0.5 mm soil macro-

收稿日期:2017-03-11

基金项目:河南省重点科技攻关计划项目(132102110039, 152102110050);国家“十三五”重点研发计划项目(2016YFD0300803-03);中科院 STS 计划项目(KFJ-EW-ST5-055-1)

作者简介:石纹瑄(1992—),男,河南焦作人,硕士研究生,主要从事土壤-植物营养研究。E-mail:swx9292@163.com

*通信作者:刘芳 E-mail:f-liu113@163.com

aggregates were increased with organic fertilizer application increasing. Organic fertilizer application could promote soil macro-aggregates formation, when the pig manure organic fertilizer applied $40.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ soil, the contents of $>0.25 \text{ mm}$ soil aggregates reached maximum, and also the mean weight diameter(MWD) and geometric average diameter(GWD) of soil aggregates were higher than that of other treatments, the soil agglomeration became more stronger and the soil structure became more stable.

Keywords: pig manure; organic fertilizer; available nutrient; soil aggregate

随着社会经济的快速发展,我国居民由于生活水准的不断提高,人们对于畜、禽等肉制品的消费需求也在持续攀升,从而对畜禽养殖业的发展也起到了积极的推动作用。但是,随着畜禽养殖业的进一步快速发展^[1],由此带来的环境问题也日益突出,并将成为农村面源污染的主要来源之一^[2-3]。畜禽粪便富含的氮、磷、钾和有机质等都是作物生长所必需的重要养分,是我国传统肥料之一^[4],有研究结果显示,有机肥合理施用在改变传统施肥模式的同时,形成了一个家庭圈的物质循环体系,有机培肥的关键措施就是有机肥施用,它是将畜禽粪便作为主要的土壤肥料来源,一方面不仅提高了土壤的质量,并显著地增加了土壤的有机碳含量^[5]。土壤有机碳(SOC)在保持土壤肥效方面具有非常显著的作用^[6]。而土壤团聚体作为土壤结构的形成基础,有着土壤的“养分库”的美誉。研究证明,不同大小的团聚体在保持和供应土壤养分的作用不同,并且在空间上和数量上决定着土壤孔隙特征,从而决定土壤的水力性质,影响了土壤生物的活动^[7]。同时,土壤结构的稳定性和抗侵蚀的能力决定于水稳性团聚体的数量和土壤中的分布状况^[8]。土壤团聚体作为土壤结构体的重要组成部分,影响着土壤中酶的种类,既可以协调土壤中的水肥气热也能够维持和稳定土壤的疏松熟化。目前,有机肥或有机-无机配施在农作物、观赏植物、蔬菜栽培方面的研究较多^[9-11],而猪粪有机肥单独施用对土壤有机碳及团聚体分布性质、特种蔬菜品质等影响仍需加强研究。同时,潮土是河南省面积最大的一个土类^[12],是粮食作物主产区的土壤类型之一,但由于腐殖质积累作用较弱而表现出自然肥力不高^[13],因此,对潮土进行有机培肥是提高潮土肥力的研究热点问题之一。因此,本文以潮土为研究对象,通过盆栽试验着重开展猪粪有机肥施用对土壤团聚体分布特性进行研究,以期合理施用畜禽粪便有机肥提供经验数据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验土壤为采自河南省中部许昌市郊的潮土,属

于轻壤土,其基本理化性质如下:有机碳含量为 $4.9 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,碱解氮、速效磷(P_2O_5)和速效钾(K_2O)的含量分别为 34.3 、 $12.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $47.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,机械组成如下:黏粒和砂粒含量分别为 28.4% 和 71.6% 。

试验指示植物为“聚群牌”全年耐抽苔生菜。供试有机肥为河南省新郑市雏鹰农牧集团股份有限公司下属有机肥生产公司所堆制的有机肥,物理状态为粉状,堆制原料为猪粪,工艺为二次翻堆通风发酵,试验用 2014 年成品有机肥有机碳、全氮、全磷和全钾的含量分别为 103.7 、 9.4 、 $8.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $7.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,含水率为 12.7% 。试验用 2015 年成品有机肥有机碳、全氮、全磷和全钾的含量分别为 273.1 、 19.2 、 $39.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $7.9 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,含水率为 10.0% 。

1.2 试验设计

试验采用盆栽试验,长年采用塑料薄膜日光大棚进行防雨,试验地点为河南农业大学试验基地网室,从 2014 年 6 月—2016 年 1 月期间进行。有机肥设置 5 个处理,分别为 0 、 6.7 、 13.3 、 26.7 、 $40.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 土,分别用 CK、T1、T2、T3、T4 表示,每个处理 3 次重复,共 15 盆。试验采用水平直径 0.43 m 、高约 0.60 m 塑料桶,每桶装土约 124 kg ,装土容重 $1.13 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。试验连续进行了 2 年,土壤取样方式为分层取样,每年 6 月按试验设计一次性在 $0\sim 20 \text{ cm}$ 土层中施用有机肥并混匀,施入肥料一周后均匀撒种,15 d 定苗,每桶 30 棵。每年种植两季生菜,每季生长 40 d 取样,取样 10 d 后,耕层土壤混匀、平整后进行第二季播种,在每年第二季生菜收获后采集 $0\sim 20 \text{ cm}$ 土层土样,风干、过筛后供样品测试。

1.3 测定方法

土壤有机碳用重铬酸钾容量法^[14]测定,在有机碳测定前,首先对待测土壤样品进行充分筛检,去除可见的植物根系和有机肥残渣,然后进行 100 目过筛。碱解氮含量、速效磷含量、速效钾含量均为常规测定方法,分别为碱解扩散法、钼蓝比色法和醋酸铵浸提-火焰光度法^[14]。

生菜生物量采用称量法,以试验每桶为单位,在生菜生长约 40 d 时取生菜地上部可食部分用水洗

净,粗滤纸吸干,称取每桶生菜植株的重量(鲜重)。

采用湿筛法测定土壤水稳性团聚体,具体方法如下:首先在团聚体分析仪套筛顶部放置 100 g 风干的土壤样品,然后将 0.5、0.25 mm 和 0.053 mm 3 种孔径的套筛自上而下依次排列,之后沿分析仪桶壁加去离子水至水没过土样,对土样进行浸泡和润湿 20 min 后垂直震荡 20 min,振动频率为 25 次·min⁻¹,振幅为 8 cm,并保证上下筛动时套筛不能露出水面。然后将留在筛子上的各级团聚体用细水流通过漏斗冲洗到铝盒中,60 ℃下烘干称重。采用平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)以及大于 0.25 mm 团聚体含量($R_{0.25}$)来表示土壤团聚体的稳定性^[15-16],分别采用以下公式计算。

$$MWD = \sum_{i=1}^n (\bar{x}_i w_i)$$

$$GMD = \exp \left[\frac{\sum_{i=1}^n m_i \ln \bar{x}_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \right]$$

$$R_{0.25} = \frac{M_{T>0.25}}{M_T}$$

式中: $\bar{x}_i$ 表示粒级团聚体的平均直径(mm), w_i 代表粒级团聚体重量所占样品总重量的百分比, m_i 表示土壤不同粒级的团聚体重量(g), M_T 为团聚体总重量(g)。

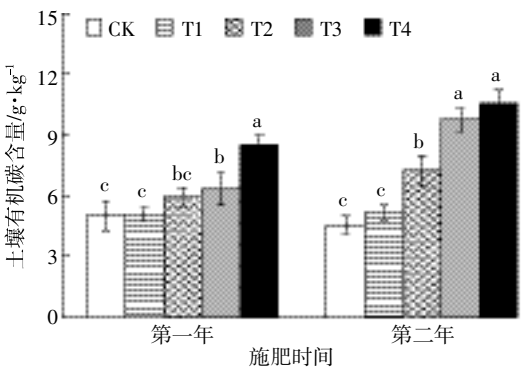
1.4 数据处理

应用 SPSS 20.0 软件对数据进行方差分析,并用 Duncan 新复极差法比较不同处理间各种指标之间的差异;相关数据统计分析和制图采用 Origin 8.5 软件进行。

2 结果与分析

2.1 不同有机肥施用量对土壤有机碳的影响

由图 1 可得,试验 2 年的土壤有机碳含量均随有机肥施用量的增加而呈逐渐升高的趋势,其中,第一年 T1、T2、T3 和 T4 处理的有机碳含量较 CK 分别提高 1.3%、19.1%、26.7%和 70.0%,第二年各施肥处理的有机碳含量较 CK 分别提高 13.9%、58.5%、113.3%和 131.9%。2 年中 T4 处理与 CK 之间差异显著。第二年各施肥处理有机碳含量比第一年高 2.7%~53.9%,这可能是因为第一年施入有机肥之后,增加了土壤中有机碳的含量,而第二次施用有机肥在第一年的基础上进一步增加了土壤有机碳含量。可见,有机肥施用



图中不同小写字母表示处理间差异达显著水平($P < 0.05$)。下同
The different lower case letters indicate significant difference among different treatments ($P < 0.05$). The same below

图 1 有机肥施用量对土壤有机碳含量的影响

Figure 1 Effects of organic fertilizer application amount on soil organic carbon contents

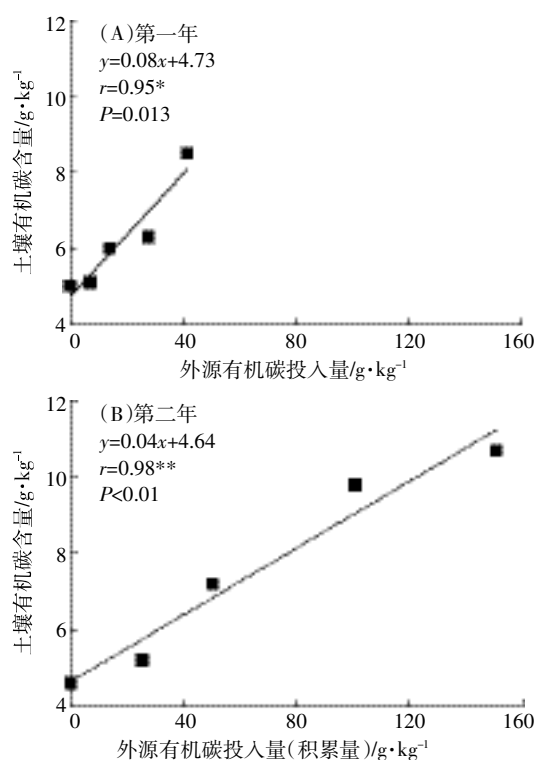
量的增加提高了土壤的有机碳含量,且有机肥的连续施用,对提高土壤有机碳含量的增加有明显的作用。

2.2 外源有机碳投入量与土壤有机碳间的关系

为了说明外源有机碳投入量与土壤有机碳含量间的关系,对二者之间进行了拟合(图 2)。由图 2 可以看出,2 年中,土壤有机碳的含量均随外源有机碳投入量的增加而增加,其中,第一年时二者之间的相关关系可以通过线性方程 $y = 0.08x + 4.73$ 表示,其中 x 代表碳投入量, y 代表土壤有机碳含量。可见,外源有机肥投入的第一年中,约有 8.0% 的外源有机碳投入转化为潮土有机碳,而且二者间的相关系数为 0.95,呈显著的正相关关系($P < 0.05$);而在第二年中,二者间的线性方程为: $y = 0.04x + 4.64$,相关系数为 0.98,呈极显著的正相关关系($P < 0.01$),可见,连续两年有机肥投入时,仅有 4.0% 左右的外源有机碳转化为潮土有机碳。具体原因可能是第二年时,外源有机碳投入量较高,加上第一年外源有机碳的残留,土壤中有有机碳含量太高,但是土壤环境中的速效养分特别是速效氮含量偏低,使体系 C/N 过高,从而影响土壤中微生物对有机肥的转化,所以仅有 4.0% 左右的外源有机碳转化为土壤有机碳,因此可以推测,并不是外源有机碳投入量越高越能提高土壤有机碳的转化率,但仍能明显提高土壤有机碳含量。总之,外源有机碳投入量的高低对土壤中有有机碳含量有较大的影响,在第二年,土壤有机碳含量也随两年碳投入积累量的增加而增加且呈极显著正相关关系。

2.3 有机肥施用量对土壤速效养分的影响

由图 3 可以看出,随着有机肥施用量的增加,各施肥处理的速效养分含量均表现为逐渐升高趋势,且



B图中积累量表示第一年和第二年外源有机碳投入总量

The amount accumulated in the Fig.B represents the total amount of external organic carbon inputs in the first and second year

图2 外源有机碳投入量与土壤有机碳间的关系

Figure 2 Correlation between external organic carbon input and soil organic carbon

在T4处理时达到最大值。图3(A)显示,第一年各施肥处理的碱解氮含量比CK高6.3%~83.3%,第二年高39.0%~198.6%,两年中T3和T4处理与CK之间均差异显著。第二年各施肥处理碱解氮含量比第一年年高6.7%~34.6%。

图3(B)显示,2年中,土壤速效磷含量均随有机肥施用量的增加而显著增加,且T1、T2、T3和T4处理速效磷含量显著地高于CK,各施肥处理间差异显著,第一年各施肥处理的速效磷含量比CK高22.9%~141.1%,第二年高90.0%~607.1%。试验结束时,第二年各施肥处理速效磷含量比第一年年高36.8%~159.5%。

图3(C)显示,第一年各施肥处理的速效钾含量比CK高12.4%~235.5%,第二年高56.9%~411.8%。T4处理与CK之间差异显著。试验结束时,第二年各施肥处理速效钾含量明显高于第一年,比第一年年高20.3%~35.7%。

第二年各施肥处理速效养分含量均显著高于第一年,不施肥处理的速效养分含量有所下降,施肥处理的速效养分含量显著增加,可见,有机肥可以提高

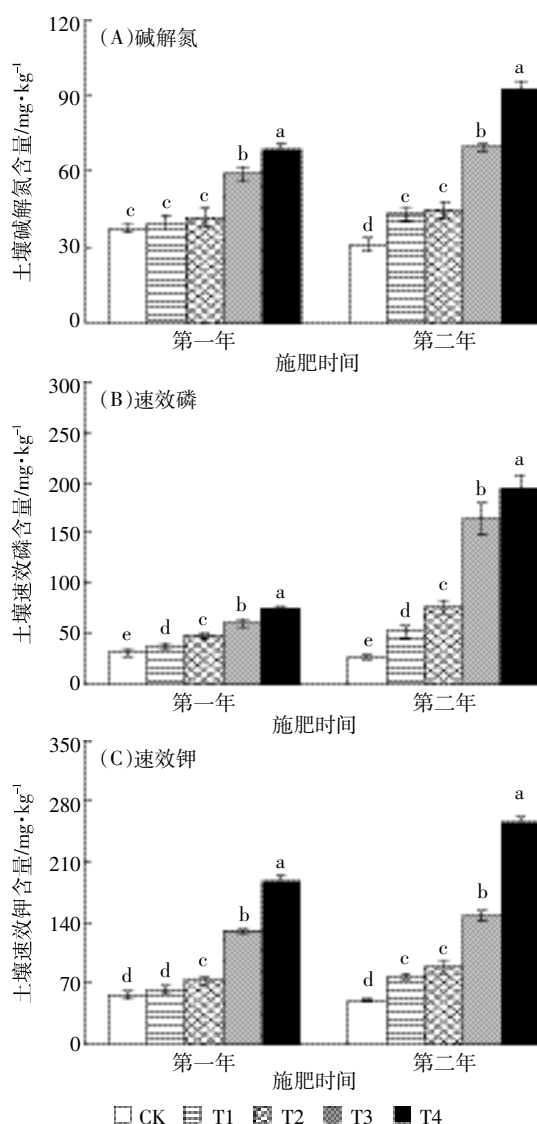


图3 有机肥施用量对土壤速效养分的影响

Figure 3 Effects of organic fertilizer application amount on soil available nutrients contents

土壤中速效养分含量,土壤速效养分含量随有机肥施用量的增加而增加,且在有机肥施用量为40.0 g·kg⁻¹土时,土壤中碱解氮、速效磷和速效钾含量最高。

2.4 有机肥施用量对生菜产量的影响

由表1可知,2年中,随着有机肥施用量的增加,各批次生菜的产量均表现为逐渐升高趋势,且均在T4处理时生菜产量达到最大值,第二年总体产量也高于第一年。第一年种植季,第一茬各施肥处理的生菜产量比CK高198.1%~450.0%,第二茬时比CK高71.4%~370.6%,第二年种植季,第一茬各施肥处理的生菜产量比CK高143.9%~394.0%,第二茬时比CK高107.8%~527.2%。而且可以发现,T4处理在两年的试验中生菜产量呈逐渐升高的趋势,这说明有机肥在

表 1 有机肥施用量对生菜产量的影响(g·盆⁻¹)

Table 1 Effects of organic fertilizer application amount on yield of lettuce(g·pot⁻¹)

施肥时间		CK	T1	T2	T3	T4
第一年	第一茬	53.0±9.2e	148.0±4.2d	194.0±2.7c	214.0±1.6b	291.5±12.0a
	第二茬	63.8±5.5e	109.3±9.4d	160.2±3.4c	180.0±4.2b	300.2±11.8a
第二年	第一茬	67.0±6.1e	164.4±16.5d	223.0±10.6c	268.0±5.7b	331.0±17.4a
	第二茬	58.1±7.1e	120.7±10.6d	193.1±8.9c	285.3±15.6b	364.2±13.8a

施入土壤一年后,外源有机碳在土壤中积累,土壤中养分含量有所提升,从而提高作物产量,也体现了有机肥施用后具有明显的后效作用。

2.5 有机肥施用量对土壤团聚体分布特征的影响

图 4 显示,总体来说,潮土中 0.053~0.25 mm 和<0.053 mm 小团聚体含量占总体的百分比较大,但随有机肥施用的增加有逐渐降低的趋势,而>0.5 mm 和 0.25~0.5 mm 大团聚体含量表现为逐渐升高趋势,分别达到 3.7%~7.8%和 4.9%~10.9%,可见,施用有机物料可明显改变土壤团聚体分布。图 4(A)显示,第一年土壤团聚体的变化趋势,随着有机肥施用量的增加,<0.053 mm 小团聚体的含量表现为逐渐降低趋势,较 CK 分别降低 6.3%~21.0%,而>0.5 mm 和 0.25~0.5 mm 大团聚体含量表现为逐渐升高趋势,较 CK 分别升高 53.2%~175.7%和 10.1%~64.7%,且各施肥处理的大团聚体含量与 CK 之间差异显著。

图 4(B)显示,第二年土壤团聚体的变化趋势与第一年相似,各施肥处理的<0.053 mm 小团聚体的含量比 CK 低 3.7%~31.3%,而>0.5 mm 和 0.25~0.5 mm 大团聚体含量分别比 CK 高 12.7%~97.3%和 27.5%~147.1%,且各施肥处理大团聚体含量与 CK 之间差异显著。

第二年的不施肥处理的大团聚体含量高于第一年,这可能是由于第一年种植生菜后,生菜根部周围的团粒结构改变,增加了大团聚体的含量,第二年 T1、T2、T3 和 T4 处理的>0.5 mm 和 0.25~0.5 mm 大团聚体含量之和分别比第一年高 24.3%、31.7%、10.3%、40.3%,这可能是因为有机肥施加量的增加促进了土壤>0.25 mm 各粒径团聚体的形成,土壤的团聚化作用也更明显,其中以有机肥施用量为 40.0 g·kg⁻¹ 土时效果最好。

2.6 有机肥施用量对土壤团聚体稳定性的影响

土壤的几何平均直径(GMD)和平均重量直径(MWD)的大小反映了土壤团聚体大小分布状况,数值越大土壤的团聚化作用越明显,稳定性也越强^[7]。在进行湿筛后,>0.25 mm 水稳性团聚体含量的比率可称为团聚体稳定率(WSAR),稳定率高低决定了土

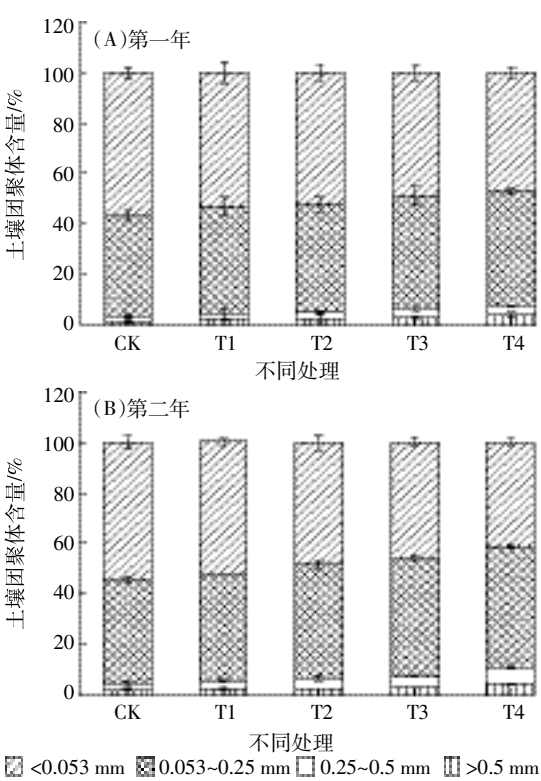


图 4 不同量有机肥处理下土壤团聚体的分布

Figure 4 Distribution of soil aggregates under different amounts of organic fertilizer

壤结构稳定性,稳定率越高土壤结构就越稳定,从而为作物的生长提供良好的缓冲环境,有效地促进作物生长^[18]。

由表 2 可知,2 年中,随着有机肥施加量的增加,各测定指标均呈现逐渐升高趋势,第一年各施肥处理 MWD 较 CK 提高 0.9%~26.4%,GMD 较 CK 提高 2.3%~17.2%,R_{0.25} 较 CK 提高范围 37.8%~89.2%。第二年各施肥处理 MWD 较 CK 提高 5.1%~29.9%,GMD 较 CK 提高范围 5.4%~21.7%,R_{0.25} 较 CK 提高范围 20.4%~122.5%,各指标 T4 处理与 CK 之间均差异显著。

第二年 T1、T2、T3 和 T4 处理的 MWD、GMD 和 R_{0.25} 均高于第一年,其中,MWD 分别比第一年高 10.8%、6.7%、4.6%、9.4%,GMD 分别比第一年高

表 2 有机肥对土壤团聚体的平均重量直径、几何平均直径和团聚体稳定率的影响

Table 2 Effects of organic manure on soil aggregates *MWD*, *GMD* and *R*_{0.25}

不同处理	第一年			第二年		
	<i>MWD</i> /mm	<i>GMD</i> /mm	<i>R</i> _{0.25} /mm	<i>MWD</i> /mm	<i>GMD</i> /mm	<i>R</i> _{0.25} /mm
CK	0.110±0.005b	0.087±0.002c	0.037±0.001b	0.117±0.001b	0.092±0.003b	0.049±0.001c
T1	0.111±0.007b	0.089±0.004c	0.037±0.008b	0.123±0.003b	0.097±0.002b	0.059±0.001bc
T2	0.120±0.006ab	0.093±0.002bc	0.051±0.008ab	0.128±0.003b	0.100±0.005ab	0.067±0.001bc
T3	0.130±0.004a	0.098±0.001ab	0.068±0.005a	0.136±0.002ab	0.101±0.001ab	0.075±0.001b
T4	0.139±0.006a	0.102±0.004a	0.07±0.004a	0.152±0.001a	0.112±0.004a	0.109±0.002a

8.9%、7.5%、3.1%、9.8%，*R*_{0.25} 分别比第一年高 59.5%、31.4%、10.3%、55.7%，这可能是因为有机肥施用量的增加，提高土壤有机碳含量，从而提高土壤团聚体的稳定性，其中以有机肥施用量在 40.0 g·kg⁻¹ 土时效果最好。

2.7 土壤团聚体的平均重量直径与>0.25 mm 水稳性团聚体含量之间的关系

由图 5 可知，>0.25 mm 水稳性团聚体含量在 3%~12% 之间，土壤团聚体平均重量直径范围为 0.10~0.16 mm，2 年中，随着>0.25 mm 水稳性团聚体含量的逐渐增加，土壤团聚体平均重量直径均呈逐渐升高的趋势，>0.25 mm 水稳性团聚体含量与土壤团聚体的平均重

量直径之间均呈极显著正相关关系。可见，>0.25 mm 水稳性团聚体含量的高低影响着团聚体平均重量直径，当>0.25 mm 水稳性团聚体的含量达到最大值时，此时团聚体的平均重量直径也就最大，土壤团聚体水稳性也得到明显的提升，土壤结构也最稳定。

3 讨论

3.1 有机肥施用对土壤有机碳及速效养分的影响

有研究表明，施猪粪地块与没有施加的处理相比，施猪粪地块土壤总有机碳含量显著高于没有施加地块的总有机碳含量^[19]。而单施有机肥能促进土壤有机碳含量的升高，这是因为有机肥中本身含有大量的微生物和有机质，土壤的有机碳含量通过矿化作用和腐殖化作用得到显著增加^[20]。张贵龙等^[21]通过施用牛粪和鸡粪混合肥，研究了种植夏玉米后土壤有机碳含量的差异，试验结果表明，与不施肥处理相比，单施有机肥能显著提高土壤有机碳含量。Zhang 等^[22]也认为，土壤碳含量与外源碳输入量之间呈显著正相关关系。本研究经过 2 年试验，结果表明土壤有机碳的含量与有机肥中有机碳的投入量之间呈正相关关系，但是通过拟合外源有机碳投入量与土壤有机碳含量间的关系发现，外源有机肥投入的第一年中，约有 8.0% 的外源有机碳投入转化为潮土有机碳，而连续 2 年有机肥投入时，仅有 4.0% 左右的外源有机碳转化为潮土有机碳，可能是外源有机碳连续投入，但供试潮土碱解氮含量仅为 34.3 mg·kg⁻¹，从而使体系 C/N 过高，土壤中微生物对有机肥的矿化作用和腐殖化作用均较弱，具体原因需要进一步研究分析。李铁群等^[23]研究结果表明，在一定年限内，单施有机肥能持续增加作物产量，增加土壤有机质、碱解氮、速效磷和速效钾含量，该试验研究培肥长达 17 年后速效钾含量先增加后减少，而本研究仅开展了 2 年试验后速效钾的变化情况，故出现不一致的现象。本试验结果表明，2 年均 40.0 g·kg⁻¹ 土时有机碳含量达到最大值，且显著高于

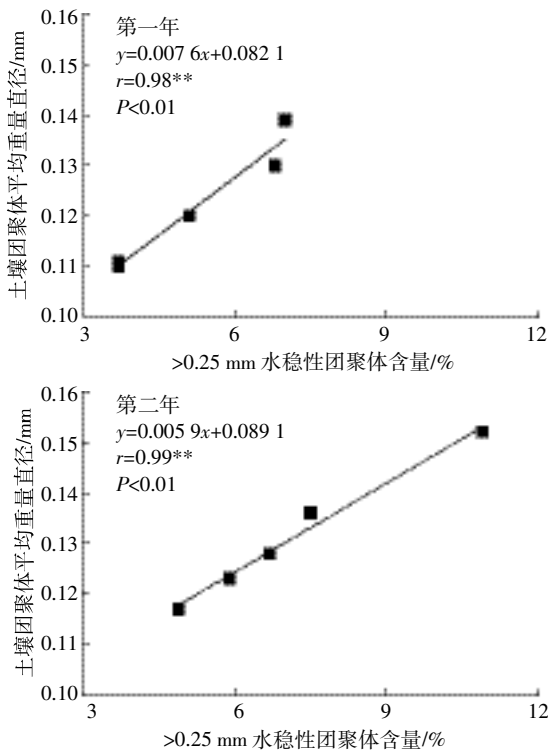


图 5 >0.25 mm 水稳性团聚体含量与团聚体平均重量直径之间的关系

Figure 5 Correlation between the contents of >0.25 mm water-stable soil aggregates and mean weight diameter

CK。随着有机肥施用量的增加,土壤中有机碳、碱解氮、速效磷和速效钾含量均呈逐渐上升的趋势,且在第一年施肥收获生菜后,第二年再试验所测指标均高于第一年,在比较土壤有机碳和速效养分指标后,我们发现与不施肥处理相比,单施有机肥均不同程度地提高了土壤有机碳和速效养分的含量,且各施肥处理较CK之间均达到显著水平。

3.2 有机肥施用对土壤团聚体的影响

有研究结果显示,直径 <0.25 mm(微团聚体)团聚体聚合从而形成大团聚体(直径 >0.25 mm),大团聚体又破碎成小团聚体,二者既互为基础又互为消长^[24],以上的现象被称为团聚体的多级团聚理论。土壤团聚体的稳定性决定着土壤特性,尤其是土壤有机质的含量^[25]。土壤有机质的增加不但可以增加团聚体的数量,还能提高土壤团聚体的稳定性^[26]。霍林等^[27]报道,增施有机肥能显著增加大粒径水稳性团聚体含量,改善土壤团聚体的结构,土壤团聚体MWD随着 >0.25 mm水稳性团聚体含量的升高而逐渐增加,当土壤团聚体MWD最大时,土壤团聚体水稳性也就最强。路磊等^[28]研究证明,土壤中单施有机肥不仅能够有效地避免化肥和农药的使用,同时也增加了土壤大团聚体的含量,此时土壤所含的生物量也大于传统施肥,土壤结构的稳定性也获得了提高,在比较后发现以上研究结果与本研究也有一定的相似之处。本试验结果表明,经过2年连续施用有机肥后,土壤有机碳含量得到明显提高,相应的土壤大团聚体的数量也随有机肥施用量的增加而逐渐升高,与不施肥处理相比,单施有机肥均降低了 <0.25 mm团聚体含量,从而增加了 $0.25\sim0.5$ mm和 >0.5 mm团聚体含量,说明施用有机肥对于潮土小团聚体向大团聚体汇聚有明显的促进作用,有助于增强土壤结构的稳定性,形成较好的土壤结构。本研究结果显示,土壤团聚体MWD随着 >0.25 mm水稳性团聚体含量的增加而呈现逐渐升高的趋势,土壤团聚体MWD与 >0.25 mm水稳性团聚体含量呈显著性正相关的关系,说明当土壤团聚体MWD最大时,土壤团聚体水稳性最高,此时土壤结构的也越稳定,结合土壤团聚体MWD与 >0.25 mm水稳性团聚体含量之间呈正相关关系,可以更加全面和准确地反映土壤结构。此试验结果与前人的研究结果一致^[29]。

4 结论

随着猪粪有机肥施用量的增加,土壤中有机碳、

碱解氮、速效磷和速效钾含量以及作物产量呈现逐渐升高趋势,且在有机肥施加量在 $40.0\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 土时效果最好,且土壤有机碳含量与外源有机碳投入量之间存在着显著的线性关系,有机肥施用可以显著提高生菜产量,且具有明显的后效作用。通过对 >0.25 mm团聚体含量和土壤团聚体平均重量直径(MWD)分析后,结合土壤团聚体几何平均直径(GMD)等土壤团聚体稳定性参数,我们发现,单施有机肥有利于提高土壤水稳定性团聚体结构水平,增加土壤稳定性,改善土壤结构状况,以有机肥施加量在 $40.0\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 土时,土壤团聚体MWD和GMD最大,潮土的团聚化作用最强,土壤结构最稳定。

参考文献:

- [1] 李江涛,钟晓兰,赵其国. 畜禽粪便施用对稻麦轮作土壤质量的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(10):2837-2845.
LI Jiang-tao, ZHONG Xiao-lan, ZHAO Qi-guo. Enhancement of soil quality in a rice-wheat rotation after long-term application of poultry litter and livestock manure[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(10): 2837-2845. (in Chinese)
- [2] 龚俊勇,彭小珍,廖新伟. 广东省梅州市农地畜禽粪便环境风险评价[J]. 生态与农村环境学报, 2011, 27(3):25-28.
GONG Jun-yong, PENG Xiao-zhen, LIAO Xin-di. Risk assessment of livestock manure in Meizhou area of Guangdong[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2011, 27(3):25-28. (in Chinese)
- [3] Han J K, Ki Y Kim, Hyeon T Kim, et al. Evaluation of maturity parameters and heavy metal contents in composts made from animal manure[J]. *Waste Management*, 2008, 28(5):813-820.
- [4] 王成贤,石德智,沈超峰,等. 畜禽粪便污染负荷及风险评估:以杭州市为例[J]. 环境科学学报, 2011, 31(11):2562-2569.
WANG Cheng-xian, SHI De-zhi, SHEN Chao-feng, et al. Pollution load and risk assessment of livestock manure: A case study in Hangzhou[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(11):2562-2569. (in Chinese)
- [5] 赵红,袁培民,李季,等. 施用有机肥对土壤团聚体稳定性的影响[J]. 土壤, 2011, 43(2):306-311.
ZHAO Hong, YUAN Pei-min, LI Ji, et al. Effects of organic manure application on stability of soil aggregates[J]. *Soils*, 2011, 43(2):306-311. (in Chinese)
- [6] 胡宁,娄翼来,梁雷. 保护性耕作对土壤有机碳、氮储量的影响[J]. 生态环境学报, 2010, 19(1):22-26.
HU Ning, LOU Yi-lai, LIANG Lei. Soil organic C and N stocks as affected by the conservation tillage[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(1):22-26. (in Chinese)
- [7] Dexter A R. Advances in characterization of soil structure[J]. *Soil & Tillage Research*, 1988, 11:199-238.
- [8] Yoder R E. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses[J]. *Journal of the American Society of Agronomy*, 1936, 28:337-351.
- [9] 杨苞梅,李国良,姚丽贤,等. 有机肥施用模式对蔬菜产量、品质及土

- 壤酶活性的影响[J]. 土壤通报, 2011, 42(1): 70-76.
- YANG Bao-mei, LI Guo-liang, YAO Li-xian, et al. Effects of organic fertilizer application pattern on the vegetable yield, quality and soil enzyme activity[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, 42(1): 70-76. (in Chinese)
- [10] 黄东风, 王 果, 李卫华, 等. 不同施肥方式对蔬菜地蔬菜生长、氮肥利用率及氮素流失的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(3): 631-638.
- HUANG Dong-feng, WANG Guo, LI Wei-hua, et al. Effects of different fertilization modes on vegetable growth, fertilizer nitrogen utilization, and nitrogen loss from vegetable field[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(3): 631-638. (in Chinese)
- [11] 龚 伟, 颜晓元, 蔡祖聪, 等. 长期施肥对小麦-玉米轮作体系土壤颗粒有机碳和氮的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(11): 2375-2381.
- GONG Wei, YAN Xiao-yuan, CAI Zu-cong, et al. Effects of long-term fertilization on soil particulate organic carbon and nitrogen in a wheat-maize cropping system[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(11): 2375-2381. (in Chinese)
- [12] 黄绍敏, 宝德俊, 皇甫湘荣, 等. 小麦-玉米轮作制度下潮土硝态氮的分布及合理施氮肥研究[J]. 土壤与环境, 1999, 8(4): 271-273.
- HUANG Shao-min, BAO De-jun, HUANGPU Xiang-rong, et al. Study on distribution of nitrate-N in Chao soil and reasonable application of N fertilizer under the group rotation system of winter wheat and corn[J]. *Soil and Environmental Sciences*, 1999, 8(4): 271-273. (in Chinese)
- [13] 马常宝, 卢昌艾, 任 意, 等. 土壤地力和长期施肥对潮土区小麦和玉米产量演变趋势的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(4): 796-802.
- MA Chang-bao, LU Chang-ai, REN Yi, et al. Effect of soil fertility and long-term fertilizer application on the yields of wheat and maize in fluvo-aquic soil[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(4): 796-802. (in Chinese)
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 25.
- BAO Shi-dan. Soil and agricultural chemistry analysis [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 25. (in Chinese)
- [15] Vanavel C H M. Mean weight-diameter of soil aggregates as a statistical index of aggregation[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1949, 14: 20-23.
- [16] Mazurak A P. Effect of gaseous phase on water-stable synthetic aggregates[J]. *Soil Science*, 1950, 69: 135-148.
- [17] Nimmo J R, Perkins K S. Methods of soil analysis, Part 4: Physical methods[M]. Madison Wisconsin, USA: Soil science Society of America. Inc. 2002: 317-328.
- [18] 文 倩, 关 欣. 土壤团聚体形成的研究进展[J]. 干旱区研究, 2004, 21(4): 434-438.
- WEN Qian, GUAN Xin. Progress in the study on soil aggregate formation[J]. *Arid Zone Research*, 2004, 21(4): 434-438. (in Chinese)
- [19] 宋哲岳. 施加畜禽养殖废弃物对土壤有机碳累积与迁移的影响[D]. 临安: 浙江农林大学, 2012.
- SONG Zhe-yue. Effects of animal faeces wastes amendment on accumulate and migration of organic carbon in soil[D]. Lin'an: Zhejiang A & F University, 2012. (in Chinese)
- [20] 聂佳如. 有机肥与化肥配施对土壤养分的影响研究[J]. 环境科学与管理, 2016, 41(9): 52-55.
- NIE Jia-ru. Influence of organic manure and chemical fertilizer on soil nutrients[J]. *Environmental Science and Management*. 2016, 41(9): 52-55. (in Chinese)
- [21] 张贵龙, 赵建宁, 宋晓龙, 等. 施肥对土壤有机碳含量及碳库管理指数[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(2): 359-365.
- ZHANG Gui-long, ZHAO Jian-ning, SONG Xiao-long, et al. Effects of fertilization on soil organic carbon and carbon pool management index [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18 (2): 359-365. (in Chinese)
- [22] Zhang W J, Xu M G, Wang X J, et al. Effects of organic amendments on soil carbon sequestration in paddy fields of subtropical China [J]. *Journal of Soils Sediments*, 2012(4): 457-470.
- [23] 李轶群, 牛富兰, 张存岭, 等. 砂姜黑土连续培肥对作物产量和土壤养分含量的影响[J]. 安徽农学通报, 2005, 11(2): 41-44, 53.
- LI Yi-qun, NIU Fu-lan, ZHANG Cun-ling, et al. Effect of continuous fertilization on crop yield and soil nutrient content in sandy soil[J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2005, 11(2): 41-44, 53. (in Chinese)
- [24] 杨如萍, 郭贤仕, 吕军峰, 等. 不同耕作和种植模式对土壤团聚体分布及稳定性的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(1): 252-256.
- YANG Ru-ping, GUO Xian-shi, LÜ Jun-feng, et al. Affects of distribution and stability on soil aggregate in different patterns of tillage and cropping[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(1): 252-256. (in Chinese)
- [25] 彭新华, 张 斌, 赵其国. 红壤侵蚀裸地植被恢复及土壤有机碳对团聚体稳定性的影响[J]. 生态学报, 2003, 23: 2176-2183.
- PENG Xin-hua, ZHANG Bin, ZHAO Qi-guo. Effect of soil organic carbon on aggregate stability after vegetative restoration on severely eroded red soil[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23: 2176-2183. (in Chinese)
- [26] Guber A K, Pachepsky Y A, Levkovsky E V. Fractal mass size scaling of wetting soil aggregates[J]. *Ecological Modeling*, 2005, 182: 317-322.
- [27] 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, 19(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, 19(3): 545-550. (in Chinese)
- [28] 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.
- LU Lei, LI Zhong-pei, CHE Yu-ping. Effects of different fertilization treatments on soil microbial biomass and enzyme activities in Hapli-Stagnic Anthrosols[J]. *Soils*, 2006, 38(3): 309-314. (in Chinese)
- [29] 高 飞, 贾志宽, 韩清芳, 等. 有机肥不同施用量对宁南土壤团聚体粒级分布和稳定性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(3): 101-106.
- GAO Fei, JIA Zhi-kuan, HAN Qing-fang, et al. Effects of different organic fertilizer treatments on distribution and stability of soil aggregates in the semiarid area of South Ningxia[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2010, 28(3): 101-106. (in Chinese)