

改良剂对粘质潮土团聚体特征及分形维数的影响

马 征^{1,2}, 张柏松^{1,2}, 徐长英^{1,2}, 董晓霞¹, 边文范^{1,2}, 郑福丽^{1,2}

(1. 山东省农业科学院农业资源与环境研究所, 济南 250100; 2. 山东省植物营养与肥料重点实验室, 济南 250100)

摘要: 为评价复合功能改良剂(NSA)对板结土壤的改良效果,通过小白菜盆栽试验,研究 NSA 对滨州粘质潮土的理化性状、土壤团聚体数量、分布和稳定性的影响。结果表明,增施 NSA 可降低土壤容重、比重和 pH 值,提高土壤总孔隙度;施用 NSA 显著增加了 0.5~1 mm 和 0.25~0.5 mm 的团聚体含量,显著降低了 <0.05 mm 的团聚体含量,施用 0.5% 和 1.0% 的 NSA 后,土壤水稳性大团聚体总含量($R_{0.25}$)比 CK 分别显著提高 67.14% 和 141.58%,NSA 可将团聚体聚合成更大粒径来实现对土壤结构的改良;添加 NSA 使平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)显著提高,土壤不稳定团粒指数(E_{LT})显著降低;分形维数(D)随着 NSA 的添加而减少。施用 NSA 可促进土壤团聚体的形成,并提高其稳定性,对土壤结构具有显著的改善作用,这对进一步研制多功能的土壤改良剂提供了参考。

关键词: 土壤改良剂; 平均重量直径; 几何平均直径; 团聚体; 分形维数

中图分类号: S156.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2016)05-0337-05

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2016.05.056

Effects of Soil Amendments on Characteristics and Fractal Dimension of Clay Soil Aggregates

MA Zheng^{1,2}, ZHANG Bosong^{1,2}, XU Changying^{1,2}, DONG Xiaoxia¹, BIAN Wenfan^{1,2}, ZHENG Fuli^{1,2}

(1. Agricultural Resources and Environment Institute, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Jinan 250100;

2. Shandong Province Key laboratory of Plant Nutrition and Fertilizer, Shandong Academy of Agricultural Science, Jinan 250100)

Abstract: By taking clay soil in Binzhou as research objects, pot experiments were conducted in order to evaluate the effects of nutritive soil amendments on compacted soil. Soil bulk density, soil specific gravity, porosity and soil aggregate were investigated, and stability of soil aggregate were calculated to study the effects of NSA on characteristics and fractal dimension of clay soil aggregates. The result showed that NSA could decrease pH, soil bulk density and soil specific gravity, and increase porosity. NSA significantly increased the content of 0.5~1 mm and 0.25~0.5 mm soil aggregate, while significantly reduced the content of <0.05 mm soil aggregate. The amount of water-stable macroaggregates ($R_{0.25}$) of 0.5% NSA and 1.0% NSA were significantly higher than the control (CK), with an increase of 67.14% and 141.58%. With soil amendments application, larger soil aggregates were formed to improve soil condition. Mean weight diameter (MWD), geometric mean diameter (GMD) and fractal dimension (D) were significantly higher than the control, and the soil unstable aggregate index (E_{LT}) decreased with amount of NSA which was the lowest in T_3 treatment. The results indicated that applying NSA could improve surface soil structures through increasing water-stable macroaggregates contents and stability. This research provides academic and instructive bases for developing soil amendments.

Keywords: soil amendments; mean weight diameter; geometric mean diameter; soil aggregate; fractal dimension

土壤团聚体是土壤结构的基本单元,影响着土壤的孔隙性、持水性、通透性和抗侵蚀的能力^[1],其数量和大小是决定土壤侵蚀、压实、板结等物理过程的关键指标之一,因此土壤团聚体对评价土壤质量具有重

要意义。近年来,由于自然原因和人为原因造成的土壤质量退化现象严重,施用土壤改良剂能有效改善土壤物理性状,提高土壤肥力^[2]。目前,国内外关于改良剂的研究较多,大多研究集中在单一土壤改良剂对

收稿日期:2016-05-04

资助项目:山东省农业科学院青年科研基金(2014QNM56);华北平原中南部旱地两熟区高强度利用退化及盐碱耕地培肥与合理农作制技术集成与示范(201503121-06);省粮丰工程三期(2013BAD07B06);黄河三角洲盐碱地快速改良技术(2014ZZCX07401)

第一作者:马征(1982—),女,硕士,助研,主要从事植物营养与肥料方向研究。E-mail:mazheng15@163.com

通信作者:张柏松(1962—),男,研究员,主要从事植物营养与肥料方向研究。E-mail:zhangbosong1962@163.com

作物产量和品质的提高^[3]和对土壤性状及微生物的影响上^[4],而有关复合功能改良剂对土壤团聚体数量、稳定性的研究鲜有报道。

本文以山东省北部、黄河三角洲腹地的滨州市滨海盐化潮土为研究对象,该地区土壤质地粘重,有机质、氮、磷含量低,透气性差,极易板结。随着人口增加及对粮食需求的加剧,不合理的耕地利用、无节制的化肥和农药使用以及长期的大水漫灌,更加重了对土壤结构的破坏。针对其特点利用保水剂、腐殖酸、生化黄腐酸钾(BFA)为原料并添加尿素,合成新型营养型土壤改良剂(NSA),综合应用水稳性大团聚体($R_{0.25}$)、平均重量直径(mean weight diameter, MWD)、几何平均直径(geometric mean diameter, GMD)、土壤不稳定团粒指数(E_{LT})和分形维数 D 等指标,来探讨复合功能改良剂对土壤团聚体分布变化及其水稳性的影响,以期表征改良剂对土壤质量的影响,为筛选滨海潮土适宜的土壤改良剂及研究其作用机制提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验用土取自山东省滨州市无棣县柳堡镇潭庄子村渤海粮仓试验田,该地区土壤类型是粘质潮土,取 0—20 cm 耕层土壤,其有机质含量为 12.16 g/kg,碱解氮为 43.06 mg/kg,有效磷 19.13 mg/kg,速效钾 393 mg/kg, pH 8.86,盐分 1.8 g/kg。

营养型土壤改良剂的制备:将一定量保水剂溶于 33.33% 的尿素溶液中,形成凝胶尿素;按一定比例将腐殖酸与之混合搅拌均匀,80~90 °C 烘干后粉碎至 40~50 目;将所得产物按一定比例与 BFA 混合均匀,即得到新型营养型土壤改良剂(NSA),其养分含量为:全氮 3.21%,全磷 0.03%,全钾 0.05%,有机质 34.47%。

试验所选小白菜品种为京优小白菜,由北京澳硕丰农业科技有限公司提供;保水剂是由北京汉力森新技术有限公司提供的聚丙烯酰胺—丙烯酸型高吸水性树脂,规格为 L 型。BFA 及腐殖酸由天津市东升复混肥有限公司提供;尿素((NH_2)₂CO 含 N 46%),重过磷酸钙($\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 含 P 44%)。

1.2 试验方法

试验采用盆栽法,花盆规格为 30 cm×25 cm(直径×高),每盆装土 12 kg,将肥料和 NSA 与一部分土壤混合,然后与剩余土壤混合装盆使用。试验共设 4 个处理,分别为纯空白对照 CK(不施肥), T_1 (NP), T_2 (NP+0.5%NSA), T_3 (NP+1.0%NSA),每个处理 3 个重复。氮肥施用量为 225 kg/hm²,磷肥施用量为 150 kg/hm²,保持施肥处理氮磷钾施入量一致。

小白菜于 2015 年 5 月 5 日播种,每盆均匀点播小白菜种子 10 粒,干籽播种,播种前浇足底水,5 月 8 日出苗,6 月 24 日收获。小白菜在生长期未受病虫害影响,常规田间管理一致。

1.3 测试方法

土样采集于收获后当天进行,用直径 5 cm 的环刀于盆内采集 0—20 cm 原状土,根据 NY/T 1121.4-2006^[5]测定土壤容重;在另一侧取样,根据《土壤农业化常规分析方法》测定土壤比重、有机质、pH^[6];土壤水稳定性团聚体含量采用 Elliott 湿筛法测定^[7],具体方法为:把 50 g 样品放置于孔径自上而下为 2 mm,1 mm,0.5 mm,0.25 mm 和 0.053 mm 的套筛之上,再将套筛缓慢放入水中,保持最顶层筛的上边缘低于水面,浸润 10 min,使用团聚体分析仪进行分析,转速 30 r/min,定时 20 min,然后将各级孔径筛层上团聚体转移至铝盒,烘干称重得,计算得到各级团聚体的质量百分比。

1.4 数据处理

不同粒级水稳性团聚体的质量百分比:

$$\omega_i = \frac{W_{\omega_i}}{50} \times 100\% \quad (1)$$

式中: ω_i 为 i 粒级团聚体质量百分比(%); W_{ω_i} 为 i 粒级团聚体重量(g)。

大于 0.25 mm 团聚体含量:

$$R_{0.25} = \frac{M_{r>0.25}}{M_T} \quad (2)$$

式中: $R_{0.25}$ 为粒径大于 0.25 mm 团聚体含量(%); $M_{r>0.25}$ 为粒径大于 0.25 mm 团聚体重量(g); M_T 为团聚体总重量(g)。

平均重量直径(MWD):

$$\text{MWD} = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x}_i \omega_i)}{\sum_{i=1}^n \omega_i} \quad (4)$$

式中: \bar{x}_i 为 i 粒级的平均直径。

几何平均直径(GMD):

$$\text{GMD} = \exp \left[\frac{\sum_{i=1}^n (\omega_i \ln \bar{x}_i)}{\sum_{i=1}^n \omega_i} \right] \quad (4)$$

不稳定团粒指数 E_{LT} :

$$E_{LT} = \frac{(M_T - M_{r>0.25})}{M_T} \times 100\% \quad (5)$$

分形维数(D)的计算,国内一般沿用了杨培岭^[8]等推导的公式:

$$\frac{M(r < x_i)}{M_T} = \left(\frac{x_i}{x_{\max}} \right)^{3-D} \quad (6)$$

式中: x_i 为两筛分粒级粒径的平均直径; x_{\max} 为团聚体的最大粒径; $M(r < x_i)$ 为粒径小于 x_i 的团聚体的

重量。

对公式(6)两边取对数,即得:

$$\lg \frac{M(r < x_i)}{M_T} = (3-D) \lg \left(\frac{x_i}{x_{\max}} \right) \quad (7)$$

分别以 $\lg(x_i/x_{\max})$ 和 $\lg(M(r < x_i)/M_T)$ 为横、纵坐标,使用最小二乘法进行直线拟合,计算其斜率,最后由斜率计算出分形维数(D)。

试验所得数据采用 Excel 2007 处理。数据分析采用 DPS7.05 数据分析系统进行方差分析,采用 SPSS 19.0 进行相关性分析。

2 结果与分析

2.1 营养型土壤改良剂对土壤基本性质的影响

土壤容重是反映土壤质量的重要指标,由表 1 可知,施用 NSA 土壤改良剂降低了土壤容重, T_2 与 T_3 处理的容重比 CK 分别显著降低 6.04% 和 5.37%,这主要是由于 NSA 所使用的养分载体聚丙烯酰胺一丙烯酸属于高吸水性树脂,当树脂吸持水分后会使其自身溶胀,起到降低容重的效果。 T_2 与 T_3 两处理间并无明显差异,这是由于聚丙烯酰胺一丙烯酸的量在 NSA 中仅占很小比例,所以土壤容重并不随着改良剂施用量增加而明显减小。

表 1 NSA 对土壤基本性质的影响

处理	容重/ ($g \cdot cm^{-3}$)	比重	有机质/ ($g \cdot kg^{-1}$)	总孔 隙度/%	pH
CK	1.49 a	2.52 ab	12.69 c	40.77 a	8.39 a
T_1	1.47 a	2.57 a	12.64 c	42.64 a	8.38 a
T_2	1.40 b	2.46 b	14.59 b	43.08 a	8.05 b
T_3	1.41 b	2.44 b	16.66 a	42.35 a	7.91 b

注:同一列数据后不同小写字母表示不同处理间含量差异显著 ($P < 0.05$),下同。

虽然土壤比重的变化范围较小,但其大小与土壤质地、结构和有机质含量等均有密切关系。由于土壤改良剂 NSA 中添加了腐殖酸等成分, T_2 有机质含量较 CK 明显提高 14.97%,当增加 NSA 施用量后, T_3 有机质含量较 CK 和 T_2 分别明显提高 31.28% 和 14.19%。通过分析土壤有机质与土壤比重关系,建立两者的回归方程, $y = 0.011x^2 - 0.3471x + 5.1722$,其中 x 为有机质含量, y 为土壤比重, $R^2 = 0.9138$ 。随着土壤有机质含量的降低,土壤比重呈总体上升趋势。NSA 通过提高土壤有机质含量,使土壤比重较单纯施肥处理 T_1 明显减小。

此外,NSA 中含有一定量的 BFA,其有效成分为黄腐酸、氨基酸、有机质等,可改善土壤物理性能,并降低土壤碱性。 T_2 和 T_3 的 pH 分别比 CK 明显降低 4.05% 和 5.72%。

2.2 营养型土壤改良剂对土壤中水稳性团聚体的影响

2.2.1 不同处理下水稳性团聚体分布特征 稳定的

土壤团聚体结构可促进根系的发育和作物的生长,对土壤肥力、质量及土壤可持续利用等有着重要意义。根据团聚体形成的多级团聚理论,一般把湿筛法获得大于 0.25 mm 的团聚体称为土壤水稳性大团聚体 ($R_{0.25}$),小于 0.25 mm 的团聚体称为土壤水稳性微团聚体,两者互为基础,又相互转化。其中,水稳性大团聚体对保持土壤结构的稳定性有重要的贡献,是判定土壤质量好坏的重要标准^[9]。

由图 1 可以看出,CK 与 T_1 处理间各粒径数值稍有变化但差异不明显,可见短期内施肥与不施肥对土壤团聚体数量及分布影响不大。对于水稳性大团聚体来说,添加 NSA 后, T_2 在 2~5 mm 和 1~2 mm 的团聚体数较 CK 分别增加 36.31% 和 46.03%,在 0.5~1 mm 和 0.25~0.5 mm 的团聚体数较 CK 分别显著增加了 61.81% 和 93.64%, $R_{0.25}$ 比 CK 显著增高 67.14%。由此可见,添加 NSA 可有效提高土壤水稳性大团聚体数量。增大 NSA 添加量后, T_3 在 2~5 mm 的团聚体数较 CK 增加 7.26%,在 1~2 mm, 0.5~1 mm, 0.25~0.5 mm 的团聚体数较 CK 分别显著增加了 92.86%, 179.90% 和 206.07%。与 T_2 相比, T_3 处理在 0.5~1 mm, 0.25~0.5 mm 的团聚体数和 $R_{0.25}$ 值分别显著上升了 72.98%, 58.06% 和 44.54%。

对于水稳性微团聚体来说,各处理间 0.05~0.25 mm 的土壤水稳性微团聚体含量差异并不显著,但施用 NSA 可显著降低 <0.05 mm 的团聚体数量, T_3 影响最为显著。

总体来说,施用 NSA 显著增加了 0.5~1 mm 和 0.25~0.5 mm 的水稳性团聚体含量,显著降低了 <0.05 mm 的水稳性团聚体含量。随着施用量的增加,NSA 的影响逐渐扩大至 1~2 mm 的水稳性团聚体。可见,NSA 主要是通过将水稳性团聚体聚合为更大粒径的水稳性团聚体来实现对土壤结构的改良。

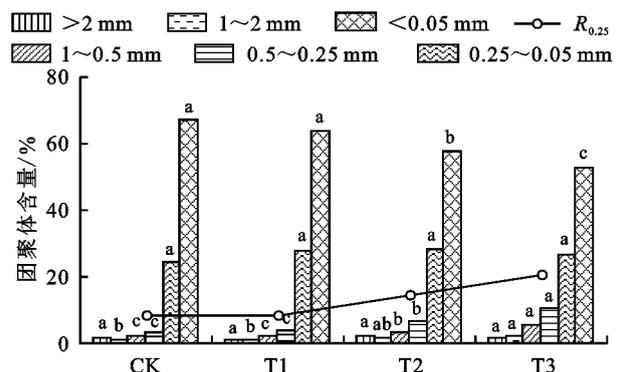


图 1 NSA 对土壤水稳性团聚体分布情况的影响

2.2.2 营养型土壤改良剂对团聚体及水稳性大团聚体稳定性的影响

MWD 和 GMD 已成为反映土壤团聚体大小分布状况及稳定性的常用指标, MWD 和 GMD 值越大,表示团聚体的平均粒径团聚度越高,

稳定性越强^[10]。

由表 2 可看出, NSA 处理的 MWD 与未添加 NSA 处理相比均达到了显著差异, T_2 和 T_3 分别较 CK 增加 37.5% 和 50%。NSA 处理的 GMD 值与未添加 NSA 处理相比亦达到了显著差异, T_2 和 T_3 分别较 CK 增加 20.7% 和 37.8%, 且增加施用量对 GMD 值的增加作用明显。添加 NSA 使 MWD 和 GMD 值均显著提高, 说明 NSA 使土壤团聚状态好于对照。采用相同方法计算粒径大于 0.25 mm 团聚体的 MWD 和 GMD 值, 分别以 $MWD_{0.25}$ 和 $GMD_{0.25}$ 表示。计算发现, 添加 NSA 后对 $MWD_{0.25}$ 值影响不显著, 但可显著降低 T_3 的 $GMD_{0.25}$ 。土壤改良剂的添加, 虽使土壤整体稳定性明显上升, 但导致水稳定性大团聚体的稳定性下降了, 这与刘恩科等^[11]的研究相一致。此外, 添加 NSA 均可明显降低 E_{LT} 值, T_2 和 T_3 的 E_{LT} 值较 CK 分别降低 6.23% 和 13.14%。

表 2 NSA 对土壤团聚体及水稳性大团聚体稳定性的影响

处理	MWD/ mm	GMD/ mm	$MWD_{0.25}$ / mm	$GMD_{0.25}$ / mm	E_{LT} / %
CK	0.16 b	0.082 c	1.28 a	0.770 b	91.51 a
T_1	0.15 b	0.085 c	1.07 a	0.712 ab	91.55 a
T_2	0.22 a	0.099 b	1.14 a	0.700 ab	85.81 b
T_3	0.24 a	0.113 a	0.90 a	0.624 a	79.49 c

2.3 营养型土壤改良剂对土壤颗粒分形维数的影响

2.3.1 不同处理对分形维数的影响

分形理论已成为描述自然界中复杂和不规则空间形体特征的一个有效工具, 土壤是具有分形特征的系统^[12]。Turcotte 首先研究了分形维数的计算方法, 后经 Tyler 等、杨培岭等的改进, 使 D 更便于计算。土壤分形维数能够反映土壤结构、土壤退化程度、土壤属性和肥力、土壤质地的均一程度等^[13]。

采用公式(7)分别计算和的值, 并分别以其为横、纵坐标做双对数曲线, 将各处理土壤粒径分布的数据拟合成一条直线, 并计算其斜率 a , 通过 $D=3-a$ 计算出各处理的分形维数。未添加 NSA 处理 CK 和 T_1 的分形维数分别为 2.907 8, 2.894 4, 平均值为 2.901 1; 添加 NSA 处理 T_2 和 T_3 的分形维数分别为 2.870 4, 2.844 9, 平均值为 2.857 6。

2.3.2 分形维数与土壤颗粒组成的关系

分形维数与各粒径的重量分布均显著相关, 但分形维数与不同粒径级颗粒含量的相关性有所不同。分形维数与砂粒含量 (>0.05 mm) 呈极显著负相关, $r=-0.998^{**}$ ($P<0.002$), 而与粉粒和黏粒 (<0.05 mm) 呈极显著正相关, $r=0.997^{**}$ ($P<0.003$)。因此, 0.05 mm 粒径物质含量是反映该类土壤分形维数的临界粒径, 大于这一粒径的颗粒含量越高, D 值越小, 反之则越高。

砂粒的组成包括极粗砂、粗砂、中砂和细砂与极细砂, 通过进一步分析相关性表明, 分形维数与极粗砂 (1~2 mm) 呈极显著负相关, $r=-0.991^{**}$ ($P<0.009$), 与粗砂 (0.5~1 mm) 呈显著负相关, $r=-0.964^*$ ($P<0.036$), 与中砂 (0.25~0.5 mm) 呈显著负相关, $r=-0.979^*$ ($P<0.036$), 但与细砂和极细砂 (0.05~0.25 mm) 无显著相关性, $r=-0.498$ ($P<0.502$)。分形维数能很好地定量反映土壤各粒径颗粒物质状况与施用 NSA 后土壤质地的变化, 可作为评价改良剂对土壤质量改良效果的指标。

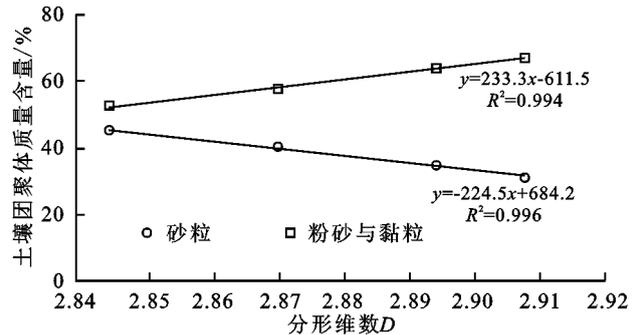


图 2 分形维数与粒径间的相关关系

3 讨论

滨海盐化潮土具有紧实板结、通透性差等特点, 新型土壤改良剂 NSA 含有聚丙烯酰胺—丙烯酸型高吸水性树脂成分, 吸水后膨胀, 不但能增加土壤持水量, 还可使土壤容重显著降低 5.37%~6.04%。容重是土壤物理特性的重要指标, 容重的降低可带来总孔隙度和大孔隙度的增加, 从而可能增大土壤水分入渗速率, 使土壤结构得到改善。

研究发现, 施用 NSA 一方面可显著降低土壤 pH 值 4.05%~5.72%, 这主要是腐殖酸和 BFA 通过吸附、交换和酸碱中和的作用; 另一方面, NSA 富含有机物质, 可提高土壤有机质含量, 土壤有机质具有巨大生物比表面积和亲水基团, 可改善土壤有效持水量, 影响着土壤的物理、化学和生物性质, 使板结土壤的透水性、通透性、蓄水性和根系生长环境得到改善^[14]。

土壤团聚体的形成对保持土壤结构有着重要意义。土壤团聚体结构是土壤肥力的物质基础, 关系到土壤养分、水分和空气的传输, 对种子发芽、根系发育、作物生长以及有机碳保护有着重要的影响。王雪等^[15]将聚丙烯酰胺 (PAM) 溶液用作改良剂改良沙土, 发现喷施 1.5~2.0 g/kg 后, 土壤中 >0.25 mm 的水稳性团粒结构含量均有显著上升, 土壤淋洗液中氮、磷、钾的淋出量显著降低。柴文静等^[16]、王永敏等^[17]分别将 PAM 改良剂应用于紫色土和潮土, 也发现改良剂可促进土壤 >0.25 mm 的水稳性团聚体的形成。李丛蕾等^[18]在旱地红壤上应用生物质炭和过氧化物改良剂, 研究发现 C_1Ca_2 (生物质炭 758 kg/

hm²与过氧化钙 121 kg/hm²)处理可提高 > 0.25 mm 的团聚体含量 64.46%。本研究在施用 NSA 改良剂后发现, T₂ 处理土壤大团聚体中各粒径含量分别增加 36.31%, 46.03%, 61.81% 和 93.64%, 其中 0.5~1 mm 和 0.25~0.5 mm 的粒径含量较 CK 明显增加, R_{0.25} 显著增大 67.14%; 当加大 NSA 施用量后, T₃ 处理土壤大团聚体中各粒径含量较 CK 分别增加 7.26%, 90.47%, 179.90% 和 206.07%, 其中 1~2 mm, 0.5~1 mm 和 0.25~0.5 mm 的粒径含量较 CK 均有明显增加, R_{0.25} 较 CK 显著增大 141.58%, 较 T₂ 处理显著增大 44.54%。可见, NSA 由于含有腐殖酸, 具有胶体性的有机物质, 有利于链接土壤中不同大小单粒和复粒, 促使土壤团聚体的形成, 特别是水稳性大团聚体的形成。CK 与 T₁ 两处理间各粒径数值稍有变化但差异不明显, 可见短期内施肥与不施肥对土壤团聚体数量及分布影响不大。

土壤团聚体稳定性被认为是土壤质量或土壤健康的一个关键指标, 土壤水稳性团聚体对保持土壤结构的稳定性有重要贡献, 了解水稳性团聚体的组成对探讨土壤肥力、土壤结构变化有重要的理论和实践意义, 用 GMD、MWD 和分形数 *D* 等定量化的结构参数比仅用容重、孔隙度等指标更好地反映土壤结构的变化。本试验中, 添加 NSA 使 MWD 和 GMD 值均显著提高, 说明 NSA 使得土壤团聚状态整体好于 CK, 但 T₂ 的 MWD_{0.25} 和 GMD_{0.25} 分别比 CK 降低 10.94% 和 10.34%, T₃ 的 MWD_{0.25} 和 GMD_{0.25} 分别比 CK 降低 29.69% 和 24.14%, 说明土壤改良剂的添加虽使土壤整体稳定性明显上升, 但导致水稳性大团聚体的稳定性下降了, 这主要是水稳性大团聚体的稳定性低于水稳性微团聚体造成的。

土壤分形维数 *D* 是反映土壤结构几何形状的参数, 不仅能够表征土壤粒径的大小组成, 还能反映质地的均一程度^[19], 即分形维数越小, 土壤越具有良好的结构与稳定性^[20], 反之, 分形维数越大, 土壤结构稳定性越差。本试验结果表明, 施入 NSA 后, >0.05 mm 粒径物质含量的增加和 <0.05 mm 粒径物质含量的降低共同使得分形维数减小, 土壤结构更加稳定, 说明分形维数可以很好地定量反映土壤各颗粒物质的状况和添加不同量 NSA 后滨海盐化潮土土壤质地的变化程度。

参考文献:

[1] 王仁杰, 强久次仁, 薛彦飞, 等. 长期有机无机肥配施改变了土团聚体及其有机和无机碳分布[J]. 中国农业科学, 2015, 48(23): 4678-4689.

- [2] 尚杰, 耿增超, 赵军, 等. 生物炭对壤土水热特性及团聚体稳定性的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(7): 1969-1976.
- [3] 司贤宗, 张翔, 孙大伟, 等. 氮肥与土壤改良剂配施对烤烟供肥特性和产质量的影响[J]. 中国农学通报, 2015, 31(13): 56-61.
- [4] 刘慧军, 刘景辉, 于健, 等. 聚丙烯酸盐类土壤改良剂对燕麦土壤微生物量氮及酶活性的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2013(1): 25-31.
- [5] 农业标准出版研究中心. NY/T1121. 4-2006 土壤检测第 4 部分: 土壤容重的测定[S]. 北京: 中国农业出版社, 2011.
- [6] 李西开. 土壤农业化常规分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 1983: 15-22.
- [7] Elliott E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen and phosphorus in native and cultivated soil[J]. Soil Science Society of America Journal, 1986, 50(3): 627-633.
- [8] 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[J]. 科学通报, 1993, 38(20): 1896-1899.
- [9] 王小红, 杨智杰, 刘小飞, 等. 中亚热带山区土壤不同形态铁铝氧化物对团聚体稳定性的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(9): 2588-2596.
- [10] Zheng Z C, Li T X, He S Q. Characteristics and stability of soil aggregates in tea plantation[J]. Advanced Materials Research Vols, 2011, (343/344): 968-974.
- [11] 刘恩科, 赵秉强, 梅旭荣, 等. 不同施肥处理对土壤水稳性团聚体及有机碳分布的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(4): 1035-1041.
- [12] 魏茂宏, 林慧龙. 江河源区高寒草甸退化序列土壤粒径分布[J]. 应用生态学报, 2014, 25(3): 679-686.
- [13] 李红丽, 万玲玲, 董智, 等. 沙柳沙障对沙丘土壤颗粒粒径及分形维数的影响[J]. 土壤通报, 2012, 43(3): 540-545.
- [14] 陈红霞, 杜章留, 郭伟, 等. 施用生物炭对华北平原农田土壤容重、阳离子交换量和颗粒有机质含量的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(11): 2930-2934.
- [15] 王雪, 李菊梅, 徐明岗, 等. 聚丙烯酰胺对沙土改土保肥的作用[J]. 生态环境, 2008, 17(5): 2086-2089.
- [16] 柴文晴, 陈晓燕, 徐金英. 聚丙烯酰胺对紫色土水稳性团聚体的改良效果[J]. 贵州农业科学, 2009, 37(1): 98-100.
- [17] 王永敏, 李俊颖, 王定勇. PAM 对潮土水稳性团聚体的影响[J]. 中国农学通报, 2010, 26(6): 297-299.
- [18] 李丛蕾, 周际海, 袁颖红, 等. 改良剂对旱地红壤团聚体及有机碳分布的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(3): 112-116.
- [19] 王展, 张玉龙, 虞娜, 等. 冻融作用对土壤微团聚体特征及分形维数的影响[J]. 土壤学报, 2013, 50(1): 83-88.
- [20] 刘毅, 李世清, 李生秀. 黄土高原不同生境土壤结构体分形维数研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2008, 36(1): 86-92, 100.