

苏打型草甸碱土团聚体特征对长期 有机培肥措施的响应

李玉珠,李欣伦,屈晓泽,孟庆峰,周 铭,张泽慧,熊 峰,唐欣田

(东北农业大学资源与环境学院,黑龙江 哈尔滨 150030)

摘 要:松嫩平原西部苏打草甸碱土具有碱性强、结构性差的特点。本研究以长期定位试验为基础,开展长期施用有机肥措施下苏打型草甸碱土团聚体特征的研究。根据有机肥施用年限,设置4个处理,分别为:施用有机肥5a(S5)、9a(S9)、12a(S12),以不施用有机肥作为对照(CK),每个处理重复3次,重点研究土壤水稳性团聚体分布特征、平均重量直径、几何平均直径、分形维数。结果表明:苏打草甸碱土经过有机培肥处理,大团聚体数量增加,小团聚体数量减少,有机培肥9a处理大团聚体含量(35.20%)最高;各有机培肥处理水稳性团聚体平均重量直径(27.54~54.22 mm)、几何平均直径(0.13~0.17 mm)均优于对照(13.48mm、0.08mm),分形维数(2.86~2.88)均小于对照(2.95),有机培肥9a处理土壤结构稳定性(平均重量直径54.22 mm、几何平均直径0.17 mm、分形维数2.86)最好;经回归分析,水稳性大团聚体含量与平均重量直径、几何平均直径呈正相关,与分形维数呈负相关。综合结果来看,有机培肥处理均促进了表层土壤大团聚体的形成,并提高了其结构稳定性,而有机培肥9a处理效果最好。

关键词:有机肥;长期施肥;草甸碱土;水稳性团聚体;结构稳定性

中图分类号:S152.4 **文献标志码:**A

Response of soda-type meadow alkali soil aggregates to long-term organic fertilization

LI Yu-zhu, LI Xin-lun, QU Xiao-ze, MENG Qing-feng, ZHOU Ming,
ZHANG Ze-hui, XIONG Feng, TANG Xin-tian

(College of Resources and Environment, Northeast Agricultural University, Harbin, Heilongjiang 150030, China)

Abstract: Sodic meadow alkaline soils in western Songnen Plain are characterized by strong alkaline and poor structure. Based on long-term location test, this study explored the aggregate characteristics of soda-type meadow alkali soil under long-term application of organic fertilizer. According to the organic fertilizer application stage, 4 treatment was set: organic treatment was performed for 5 years (S5), 9 years (S9), 12 years (S12), and treatment with no fertilizer was used as control (CK), each process was replicated for three times. Distribution characteristics of soil water stable aggregates, the average weight diameter, the geometric mean diameter and the fractal dimension were studied. The results showed that the number of large aggregates of soda meadow alkaline soil increased after organic fertilizer treatment, and the number of small aggregates decreased. The highest content (35.20%) of large aggregates was from treatment by organic fertilizer 9 years; The average weight diameter (27.54~54.22 mm) and geometric mean diameter (0.13~0.17 mm) of the water-stable aggregates were both higher than that of CK (13.48 mm, 0.08 mm). The fractal dimension (2.86~2.88) was lower than that of CK (2.95), the best stability of soil structure (average weight diameter 54.22 mm, geometric mean diameter 0.17 mm, fractal dimension 2.86) was from 9 years' organic fertilization. The regression analysis showed that the content of water-stable macro aggregates was positively correlated with average weight diameter and geometric mean diameter, and negatively cor-

收稿日期:2017-01-16

修回日期:2018-04-16

基金项目:国家自然科学基金(41501315,41501316);东北农业大学“青年才俊”(14QC31和16QC11);黑龙江科技计划省院科技合作项目(YS15B15)

作者简介:李玉珠(1995-),女,辽宁北票人,研究方向为盐渍化土壤改良与利用,E-mail:yuzhu_li@163.com。

通信作者:孟庆峰,主要从事土壤退化及其环境效应研究。E-mail:qfengmeng@yeah.net。

related with fractal dimension. We can conclude that organic fertilization treatment promoted the formation of large aggregates in the surface soil and improved its structural stability, and it was best after 9 years' organic fertilization.

Keywords: organic fertilizer; long-term fertilization; meadow alkaline soil; water-stable aggregates; structural stability

苏打草甸碱土在松嫩平原西部有广泛的分布面积^[1]。盐碱土作为后备土地资源,为保证 18 亿亩耕地“红线”,其改良治理战略意义重大。苏打草甸碱土结构性差,主要是因为 NaHCO₃和 Na₂CO₃,土壤呈强碱性^[1],Na⁺使土壤分散,不利于大团聚体形成,致使大团聚体含量低。

土壤团聚体是土壤结构的基本单位,其形成与稳定与土壤肥力和健康状况息息相关,而不同的农业措施也会对土壤团聚体分布造成影响^[2]。良好的土壤结构有助于土壤肥力的提高,进而帮助作物获得高产^[3],而土壤结构变差不利于农业的可持续发展^[4]。水稳性团聚体的组成对探讨土壤肥力、土壤结构变化有着重要的理论和实践意义^[5]。杨明等^[6]研究发现有机培肥对改良盐碱土具有显著效果,赵晶等^[7]研究表明施用有机肥使土壤 pH 降低,对土壤团聚体结构形成有利的 Ca²⁺浓度增加,而致使土壤分散的 Na⁺含量减少,从而改善土壤结构,加快土壤脱盐、脱碱。

本研究以松嫩平原长期施用有机肥的苏打盐碱土壤为研究对象,利用平均重量直径、几何平均直径、分形维数,探讨长期施用有机肥措施对土壤结构的影响,为土壤的盐碱化治理提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区设在黑龙江省大庆市肇州县,东经 125°27",北纬 45°7",地处黑龙江省西部。研究区域气候类型为北温带大陆性季风气候,属第一积温带,年均活动积温 2800℃,无霜期 143 d,年降水量约 457.6 mm。其特点是春季多风、少雨、干旱;夏季酷热、多雨;秋季凉爽,易发生早霜;冬季寒冷、干燥。成土母质为第四纪河湖沉积物,质地黏重。

1.2 试验设计

草甸碱土有机培肥长期定位试验开始于 1995 年,有机肥种类为腐熟牛粪,施用量为每年秋整地前施用牛粪 45 m³·hm⁻²,供试作物为玉米,在玉米拔节期施用 375 kg·hm⁻²尿素作为追肥。根据有机肥的不同施用年限,共设置 4 个处理,分别为:施用有机肥 5a(S5),9a(S9),12a(S12),以不施用有机肥的处理作为对照(CK)。试验小区垄宽为 0.65 m(每小区 10 垄),长为 10 m,小区面积 65 m²。试验

采用完全随机区组设计,3 次重复。

1.3 样品采集与分析

土壤采样时间为 2016 年 4 月,每个采样点用环刀法分别取 0~20 cm 和 20~40 cm 土层深度原状土带回,自然风干后,去掉石砾和残根等,将土壤沿自然断裂面掰成直径 1 cm 左右的小土块,用于土壤水稳性团聚体的测定。

土壤水稳性团聚体采用湿筛法进行测定。湿筛分析使用团聚体分析仪,套筛孔径分别为 5,2,1,0.5,0.25,0.106 mm。先将土样倒入套筛,用水缓慢湿润约 10 min,调整套筛高度,使得仪器开动时套筛上沿始终保持在水面以下。开启团聚体分析仪,设置上下震荡 60 次/min,定时 30min。筛分结束后,将各级筛子上的团聚体分别洗入蒸发皿,<0.106 mm 的团聚体则在筛分桶内放置沉降后,弃去上清液转移至蒸发皿中。将蒸发皿放在烘箱内 55℃烘干后称重。粒径>0.25 mm 的土壤团聚体为大团聚体(R_{0.25}),粒径<0.25 mm 为小团聚体^[8]。

1.4 团聚体稳定性指标计算

平均重量直径 MWD^[9]

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

几何平均直径 GMD^[9]

$$GMD = \exp \left(\frac{\sum_{i=1}^n W_i \ln X_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \right) \tag{2}$$

式中,X_i为*i*粒级的平均直径,W_i为X_i相对应的粒级团聚体占总重的百分比。

分形维数 D^[10]

$$(3 - D) \lg \left[\frac{d_i}{d_{\max}} \right] = \lg \left[\frac{W_{(\delta \leq d_i)}}{W_0} \right] \tag{3}$$

式中,d_i为*i*粒级团聚体的平均直径;d_{max}为团聚体的最大粒径;W(δ≤d_i)为粒径小于d_i的团聚体重量;W₀为各粒级团聚体的总重量。分形维数D可通过回归分析方法得到。

1.5 数据处理

所有测定结果用 Excel 进行整理和初步分析,用 SPSS 进行方差分析,多重比较采用 Duncan 法检验,显著水平 P<0.05。

2 结果与分析

2.1 土壤水稳性团聚体的分布

由图 1 可知,不同有机培肥年限处理下土壤水稳性团聚体的分布情况。0~20 cm 土层水稳性大团聚体含量处理 S9 (35.20%)>S12 (31.82%)>S5 (26.06%)>CK(9.77%)。经有机培肥处理,大团聚体含量均优于对照。与对照相比,处理 S5 (增加 16.29%)、处理 S12(增加 22.05%)、处理 S9 增加了 25.43%,大团聚体含量最高。这一结果表明,有机培肥后大团聚体数量增加,小团聚体数量减少。这与汪景宽等^[13]的研究基本一致,即有机培肥 9 a 处理效果最好。

0~20 cm 土层的大团聚体中,0.5~1 mm 团聚体含量处理 S5 (12.67%) 和 S9 (12.55%) 高于其它处理;0.25~0.5 mm 团聚体主要分布在处理 S12 (15.12%)。而对 CK 来说,主要集中在粒径<0.106 mm (74.79%) 的团聚体。

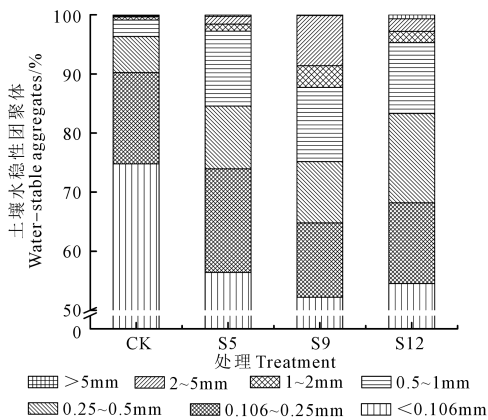


图 1 不同有机培肥年限处理 0~20cm 土层土壤水稳性团聚体的分布

Fig.1 Distribution of water-stable aggregates in 0~20cm soil depth under different organic fertilization treatments

同一粒径不同处理的团聚体含量差异较大。在 0~20 cm 土层,>5 mm 和 0.25~0.5 mm 团聚体含量处理 S12 最高,分别占 0.70%和 15.12%;2~5 mm 和 1~2 mm 团聚体中 S9 (8.50%, 3.69%)>S12 (2.10%, 1.91%)>S5 (1.30%, 1.20%)>CK (0.19%, 0.53%);0.5~1 mm 团聚体中 S5 (12.67%) 处理团聚体含量最高。

2.2 土壤结构稳定性分析

对比分析不同处理下土壤水稳性团聚体平均重量直径,如图 2 所示。0~20 cm 土层土壤团聚体的 MWD 变化趋势为处理 S9 (54.22 mm)>S12 (34.36 mm)>S5 (27.54 mm)>CK (13.48 mm)。各处理均大于对照,处理 S9 比 CK 大 40.74 mm,并且

处理 S9 与 CK 的 MWD 达到差异显著($P<0.05$)水平,其余处理之间差异不显著。在本研究中,截止到有机培肥 12 a 处理,随有机培肥年限增加,土壤水稳性团聚体平均重量直径先增大再减小。

对比分析不同处理下土壤水稳性团聚体几何平均直径,如图 3 所示。0~20 cm 土层土壤团聚体的 GMD 变化趋势为 S9(0.17 mm)>S12(0.14 mm)>S5(0.13 mm)>CK(0.08 mm),这和 MWD 变化趋势一致,>0.25 mm 的水稳性团聚体含量大小顺序为 S9>S12>S5>CK,表明 MWD、GMD 的增加与大团聚体含量增加有关。这一结果显示,0~20 cm 土层团聚体稳定性为处理 S9>S12>S5>CK,截止到有机培肥 12 a 处理,随有机培肥年限增加,土壤结构稳定性先增大再减小。

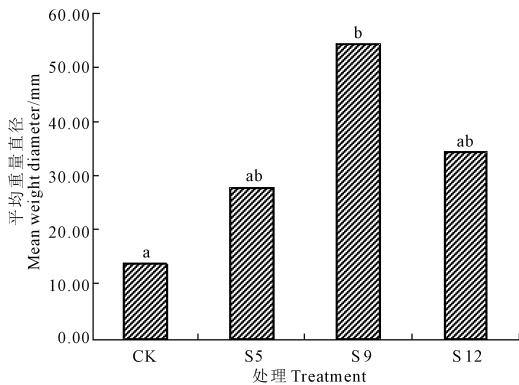


图 2 不同有机培肥年限处理土壤团聚体平均重量直径
Fig.2 MWD of soil aggregates under different organic fertilization treatments

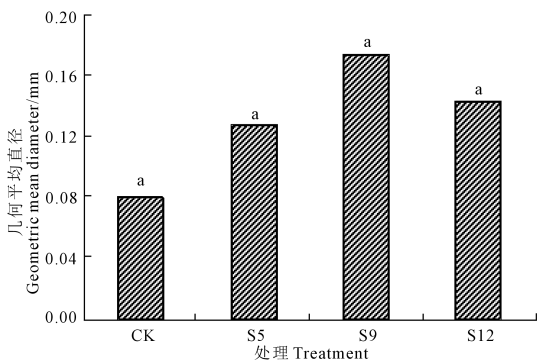
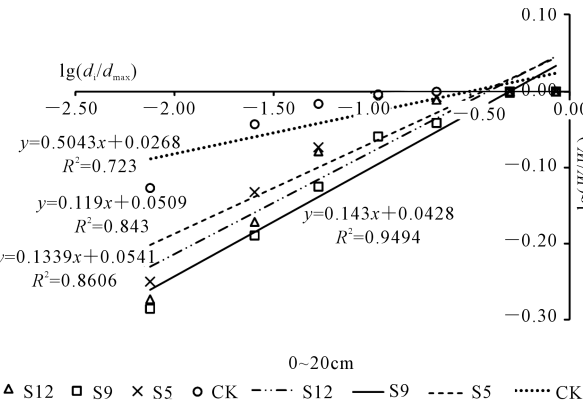


图 3 不同有机培肥年限处理土壤团聚体几何平均直径
Fig.3 GMD of soil aggregates under different organic fertilization treatments

2.3 土壤水稳性团聚体分形维数分析

不同有机培肥年限土壤团聚体分形维数的计算见图 4。本研究中,分形维数随还田年限的增加有明显下降的趋势,0~20 cm 土层 CK (2.95)>S5 (2.88)>S12(2.87)>S9(2.86),说明有机肥的施用,使土壤分形维数降低,土壤结构得到改善。



注:图例中点代表处理,线代表各处理分形维数计算公式的回归直线。
Note: The point of example represents the treatment, and the line represents the regression line of the fractol dimension calculation formula.

图 4 0~20cm 不同有机培肥年限土壤团聚体分形维数计算
Fig.4 Fractal dimension calculation of 0~20 cm soil aggregates under different organic fertilization treatments

在盐碱土改良初期土壤团聚体分形维数较大,之后,随着有机培肥年限增加到 9 a 处理,团聚体分形维数逐渐降低,从 2.95 降低到 2.86 左右,之后并没有出现随着有机培肥年限增加而继续减小的规律,处理 S12(2.87)大于 S9(2.86)而小于 S5(2.88)。

0~20 cm 土层 D 的变化规律($CK>S5>S12>S9$)与 $R_{0.25}$ 含量、 MWD 、 GMD ($S9>S12>S5>CK$)相反,对 0~20 cm 土层水稳性大团聚体含量与 MWD 、 GMD 、 D 进行回归分析(如表 1 所示)。 $R_{0.25}$ 与 MWD 、 GMD 呈显著正相关; $R_{0.25}$ 与 D 呈显著负相关。这说明随大团聚体含量增加,分形维数变小。

表 1 $R_{0.25}$ 与 MWD 、 GMD 、 D 的关系
Table 1 Relationship between $R_{0.25}$ and MWD , GMD , D

稳定性指标 Stability index	大团聚体含量 Macro-aggregates contents	线性回归模型 Linear regression model	相关系数 r
MWD	$R_{0.25}$	$Y = 1.36x - 2.5709$	0.91 *
GMD	$R_{0.25}$	$Y = 0.0034x + 0.0443$	0.97 *
D	$R_{0.25}$	$Y = -0.0036x + 2.9821$	0.99 *

注: * 代表在 $P<0.05$ 水平上相关。
Note: * represent the correlation is significant at $P<0.05$.

3 讨论

通常认为不同粒级的团聚体对土壤养分的储备和供应、孔隙分布、持水性具有不同的作用^[11]。在一定程度上不同粒级水稳性团聚体的分布比例能反映出土壤的结构性能,大团聚体含量高,土壤孔隙多,通气性好,持水性低,土壤水稳定性大团聚体含量的高低还能够很好地反映土壤保持和供应养分能力的强弱^[5]。国内外许多研究表明,施有机肥对土壤团聚体的影响一般首先体现在大团聚体

上^[12~13],王晓娟^[14]等认为有机肥处理能显著提高土壤水稳性大团聚体含量。本文研究结果表明,各施用有机肥处理在 0~20 cm 土层土壤水稳性大团聚体含量均优于 CK,处理 S9(35.20%)>处理 S12(31.82%)>处理 S5(26.06%)>CK(9.77%),处理 S9 与 CK 大团聚体含量之差高达 25.43%。这可能是由于有机肥能不断为土壤供给腐殖质及有机质,加强了土壤颗粒之间有机质的胶结作用,从而导致土壤中较小团聚体向较大团聚体的转化^[15],同时有机肥的分解残体激发微生物活性,真菌和放线菌等以菌丝将土壤彼此机械地缠绕在一起而形成团聚体,而另一些类群代谢产生多糖等有机物质,这些物质胶结土壤颗粒形成大团聚体^[16]。

Zhao 等^[17]研究表明,有机质对团聚体稳定性和分布具有显著影响。有机碳绝大部分储存在团聚体中,因此团聚体的稳定对于土壤有机碳的保持作用关键^[18],付鑫等^[19]研究表明,表层土壤大部分有机碳存储于机械稳定的大团聚体中,团聚体对有机碳的物理保护主要通过大团聚体来实现。陈晓芬等^[20]认为有机质是土壤团聚体形成的重要胶结物,其含量与水稳性大团聚体的数量呈正相关关系。本研究中,通过对不同处理 0~20 cm 土层水稳性大团聚体含量与有机质量进行回归分析如图 5 所示,水稳性大团聚体含量与有机质量相关系数 $r=0.90$,呈显著正相关。这与上述研究结果相符。

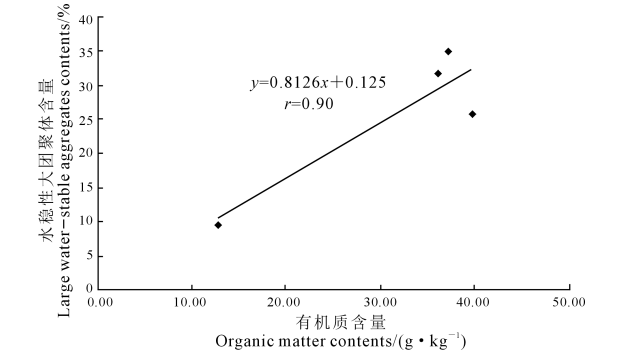


图 5 水稳性大团聚体含量与有机质含量关系
Fig.5 Relationship between water-stable macro-aggregates content and organic matter content

MWD 和 GMD 是反映土壤团聚体稳定性的常用指标,其值越大,团聚体的粒径团聚度越高,稳定性也越强。本文研究结果显示,施用有机肥使土壤大团聚体数量增加,这与 Du 等^[21]的研究一致;经有机培肥处理土壤团聚体 MWD 和 GMD 增大,且有机培肥 9 a 处理的 MWD 显著($P<0.05$)高于 CK。然而,随有机培肥年限继续增加,有机培肥 12 a 处理 1~2mm、2~5mm 粒级大团聚体含量较有机培肥 9 a 处理减少,导致处理 S12 的 MWD 和 GMD 小于处理

S9,这主要是因为有机肥 K^+ 的分散作用。随有机肥施用年限的增加, K^+ 呈现出累积的趋势。

我们研究发现,0~20 cm 土层内土壤团聚体的分形维数 CK 最大,其次是培肥 5 a 处理,再次是培肥 12 a 处理,培肥 9 a 处理最小。有机培肥 12 a 处理的分形维数大于有机培肥 9 a 处理的原因可能也是由于有机肥中的 K^+ 的分散作用导致大团聚体数量减少,分形维数增大。梁爱珍等^[22] 研究表明,土壤团聚体分形维数与其结构及稳定性关系密切,团聚体分形维数愈小,土壤愈具有良好的结构与稳定性。谢贤健等^[23] 研究发现土壤分形维数越大,土壤稳定性越弱。本文研究结果表明,施用有机肥前,土壤分形维数最大,稳定性弱;施用有机肥后,土壤分形维数减小,稳定性增强。通过长期有机培肥处理,苏打草甸碱土分形维数减小,土壤结构稳定性增强。

4 结 论

(1)苏打草甸碱土经过有机培肥处理,大团聚体数量增加,小团聚体数量减少。不同培肥年限处理 0~20cm 土层水稳性大团聚体含量处理 S9 (35.20%)最大,处理 S12 (31.82%) 次之,其次是处理 S5 (26.06%),对照 (9.77%) 最小。

(2)各有机培肥处理水稳性团聚体平均重量直径、几何平均直径均优于对照,有机培肥 9 a 处理对土壤结构稳定性(平均重量直径 54.22 mm,几何平均直径 0.17 mm,分形维数 2.86)效果最好。

(3)土壤有机质量与水稳性大团聚体含量呈正相关关系($r=0.90$),土壤中有有机质含量越高,水稳性大团聚体越多;水稳性大团聚体含量与平均重量直径($r=0.91$)、几何平均直径($r=0.97$)呈显著正相关,与分形维数($r=0.99$)呈显著负相关。

综上,苏打草甸碱土经有机培肥 9 a 处理后大团聚体含量最高,平均重量直径、几何平均直径最大,分形维数最小,即土壤结构最佳,改良效果最好。土壤有机质含量与土壤结构指标相关性很强,这为盐碱土改良效果评价提供理论参考。

参 考 文 献:

[1] 张唤,黄立华,李洋洋,等.东北苏打盐碱地种稻研究与实践[J].土壤与作物,2016,5(3):191-197.

[2] 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.

[3] 尚应妮,赵世伟,王子龙,等.植被恢复下土壤结构与功能的关系[J].水土保持研究,2016,23(5):370-375.

[4] 郑毅,张福锁.土壤结构和耕作对根际微生态系统的影响[J].云南农业大学学报(自然科学版),2003,18(2):193-197.

[5] 崔荣美,李儒,韩清芳.不同有机肥培肥对旱作农田土壤团聚体的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2011,39(11):124-132.

[6] 杨明,孙毅,高玉山,等.有机肥对苏打盐碱土的改良效果研究[J].吉林农业科学,2013,38(3):43-46,58.

[7] 赵晶,孟庆峰,周连仁,等.长期施用有机肥对草甸碱土土壤酶活性及养分特征的影响[J].中国土壤与肥料,2014,(2):23-26,34.

[8] 张翰林,郑宪清,何七勇,等.不同秸秆还田年限对稻麦轮作土壤团聚体和有机碳的影响[J].水土保持学报,2016,30(4):216-220.

[9] Barreto R C, Madari B E, Maddock J E L, et al. The impact of soil management on aggregation, carbon stabilization and carbon loss as CO₂ in the surface layer of a Rhodic Ferralsol in Southern Brazil[J].Agriculture Ecosystems & Environment, 2009,132(3/4):243-251.

[10] 陈文媛,徐学选,华瑞,等.黄土丘陵区林草退耕年限对土壤团聚体特征的影响[J].环境科学学报,2017,37(4):1486-1492.

[11] 曹晶晶,魏飞,马芳霞,等.秸秆还田与长期连作棉田土壤水稳性团聚体特征[J].干旱地区农业研究,2017,35(1):26-32.

[12] 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):100-106.

[13] 苗淑杰,周连仁,乔云发,等.长期施肥对黑土有机碳矿化和团聚体碳分布的影响[J].土壤学报,2009,46(6):1068-1075.

[14] 王晓娟,贾志宽,梁连友,等.旱地施有机肥对土壤有机质和水稳性团聚体的影响[J].应用生态学报,2012,23(1):159-165.

[15] 张星星. 土壤团聚体研究进展[J]. 绿色科技, 2017(24):138-139.

[16] Mikha M M, Rice C W. Tillage and manure effects on soil and aggregate-associated carbon and nitrogen[J].Soil Sci Soc Am J, 2004,68:809-816.

[17] Zhao J S, Chen S, Hua R G, Li Y Y. Aggregate stability and size distribution of red soils under different land uses integrally regulated by soil organic matter, and iron and aluminum oxides[J]. Soil & Tillage Research,2016,167(2017):73-79.

[18] 周振芳,胡雅杰,马灿,等. 长期传统耕作对土壤团聚体稳定性及有机碳分布的影响[J].干旱地区农业研究,2012,30(6):145-156.

[19] 付鑫,王俊,赵丹丹. 覆盖方式对旱作小麦田土壤团聚体有机碳的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(6):163-169,183.

[20] 陈晓芬,李忠佩,刘明,等.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.

[21] Du Z L, Wu W L, Zh Q Z, et al. Long-Term Manure Amendments Enhance Soil Aggregation and Carbon Saturation of Stable Pools in North China Plain [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2014, 13(10):2276-2285.

[22] 梁爱珍,张晓平,杨学明.耕作对东北黑土团聚体粒级分布及其稳定性的短期影响[J].土壤学报,2009,46(1):154-158.

[23] 谢贤健,张继.巨桉人工林下土壤团聚体稳定性及分形特征[J].水土保持学报,2012,26(6):175-179.