

网络出版时间:2016-02-02 09:37

DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2016.03.015

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20160202.0937.030.html>

不同有机培肥对黑土团聚体含量及特征的影响

宋金红, 吴景贵

(吉林农业大学 资源与环境学院, 吉林 长春 130118)

【摘要】 **【目的】**研究不同有机培肥处理对土壤团聚体形成和稳定性的影响。**【方法】**以吉林中部地区黑土为供试土壤,通过 3 年培肥盆栽试验,以不施用任何肥料为对照(CK),研究不同有机肥料(牛粪、鸡粪、树叶、猪粪、菌渣、秸秆、稻糠、草炭)及化肥对土壤团聚体含量、稳定性参数(团聚体平均质量直径(MWD)、平均几何直径(GMD))以及分形维数(D)的影响。**【结果】**各处理粒径 ≥ 0.25 mm 机械稳定性团聚体含量为 77.82%~89.18%,表现为:草炭>牛粪>鸡粪>树叶>化肥>菌渣>秸秆>稻糠>CK>猪粪;各处理粒径 ≥ 0.25 mm 水稳性团聚体含量为 47.04%~62.18%,表现为:秸秆>稻糠>树叶>牛粪>菌渣>猪粪>草炭>化肥>CK>鸡粪。各处理土壤机械稳定性团聚体 MWD 和 GMD 值大小顺序均为:草炭>猪粪>化肥>秸秆>牛粪>菌渣>树叶>稻糠>鸡粪>CK;各处理土壤水稳性团聚体 MWD 由大到小的顺序为:牛粪>菌渣>鸡粪>秸秆>稻糠>草炭>猪粪>树叶>化肥>CK, GMD 由大到小的顺序为:秸秆>牛粪>菌渣>稻糠>鸡粪>草炭>猪粪>树叶>化肥>CK。各处理机械稳定性团聚体的分形维数为 2.441~2.626,表现为:CK>稻糠>猪粪>菌渣>秸秆>鸡粪>树叶>化肥>牛粪>草炭。各处理水稳性团聚体分形维数由高到低的顺序为:CK>化肥>草炭>鸡粪>猪粪>菌渣>牛粪>树叶>稻糠>秸秆,所有培肥处理均显著低于 CK。**【结论】**培肥处理有利于提高土壤机械稳定性和水稳性团聚体含量,增加土壤稳定性,改善土壤结构状况。

【关键词】 土壤团聚体;有机培肥;分形维数;团粒结构

【中图分类号】 S152.3

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2016)03-0103-06

Effects of different organic fertilizers on content and characteristics of black soil aggregates

SONG Jin-hong, WU Jing-gui

(College of Resources and Environment, Jilin Agricultural University, Changchun, Jilin 130118, China)

Abstract: **【Objective】** The influence of different organic fertilizers on the formation and stability of soil aggregates was studied. **【Method】** The black soil in Central Jilin was tested through 3 years' fertilization experiment. Comparing with no fertilizer (CK) and chemical fertilizers, the influence of different organic fertilizers (cattle manure, chicken manure, leaves, pig manure, mushroom residue, straw, rice chaff, and peat) on stability of soil aggregates, parameters (MWD and GMD) and fractal dimension was analyzed. **【Result】** The contents of mechanical stable aggregates with diameter of ≥ 0.25 mm were 77.82%~89.18% with the decreasing order of peat>cow dung>chicken manure>leaves>fertilizers>mushroom residue>straw>rice straw>CK>pig manure. The contents of water stable aggregates with diameter of ≥ 0.25 mm were 47.04%~62.18%, and the decreasing order was straw>rice straw>leaves>cow dung>

【收稿日期】 2014-07-16

【基金项目】 松辽平原农牧结合循环技术集成与示范项目(2012BAD14B05);东北与黄淮海粮食主产区适应气候变化技术研发与应用项目(2013BAC09B01);吉林农业大学科研启动基金项目(201322)

【作者简介】 宋金红(1983—),女,河北保定人,讲师,在读博士,主要从事资源环境与遥感技术研究。E-mail:157613090@qq.com

【通信作者】 吴景贵(1965—),男,吉林长春人,教授,博士,博士生导师,主要从事土壤学及土壤有机培肥研究。

mushroom residue>pig manure>peat>fertilizers>CK>chicken manure. The order of MWD and GMD of mechanical stable aggregates was peat>pig manure>fertilizers>straw>cow dung>mushroom residue>leaves>rice straw>chicken manure>CK. The order of MWD of water stable aggregates was cow dung>mushroom residue>chicken manure>straw>rice straw>peat>pig manure>leaves>fertilizers>CK, while that of MWD of water stable aggregates was straw>cow dung>mushroom residue>rice straw>chicken manure>peat>pig manure>leaves>fertilizers>CK. Fractal dimension of mechanical stable aggregates was 2.441–2.626 with a decreasing order of CK>rice straw>pig manure>mushroom residue>straw>chicken manure>leaves>fertilizers>cow dung>peat, while the order of fractal dimension of water stable aggregates was CK>fertilizers>peat>chicken manure>pig manure>mushroom residue>cow dung>leaves>rice straw>straw. 【Conclusion】 Fertilization treatments improved stability of mechanical stable aggregates and contents of water stable aggregates, increased soil stability, and enhanced soil structure.

Key words: soil aggregate; organic fertilizers; fractal dimension; aggregate structure

土壤团聚体作为土壤最基本的物质基础,是土壤养分的贮存库和各种土壤微生物的生境^[1]。不同级别团聚体在养分的保持和供应过程中的作用不同^[2],其数量分布和空间排列方式决定了土壤孔隙的分布和连续性,进而决定了土壤的水力特征,影响土壤生物的活动^[3]。随着农业集约化程度的提高,有机肥施用量减少,导致土壤结构恶化加剧,土壤物理性状不良,成为农业发展的主要限制因子^[4]。因此,如何改良土壤物理性状,进而提高作物产量成为现代农业研究的重要内容。施用有机肥有利于土壤团聚体内细颗粒有机碳的积累,促进土壤团聚体的形成,提高其稳定性。

有研究者提出,可将平均质量直径作为评价土壤团聚体分布的指标^[5]; Van Bavel^[6]认为,平均质量直径和直径>0.25 mm 水稳性团聚体的含量是评价土壤结构的重要指标;有研究认为,土壤团聚体具有一定的分形特征,分形理论已成为定量描述土壤团聚体的新方法^[7]。本研究通过盆栽试验,综合运用平均质量直径、平均几何直径、大于 0.25 mm 团聚体含量、土壤结构破坏率和分形维数(D)等指标,分析了不同有机培肥条件下黑土团聚体粒级、含量和稳定性等特征,研究不同有机肥料对土壤团聚体和结构特征的影响,为合理利用有机肥资源及指导吉林中部地区农业生产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

试验地选择在吉林农业大学试验站,供试土壤为黑土,采集于吉林农业大学西南区,其基本理化性质为:pH 值 6.36,有机质含量 26.7 g/kg,全氮含量

1.26 g/kg,全磷含量 1.07 g/kg,碱解氮含量 90.44 g/kg,速效磷含量 34.15 g/kg,速效钾含量 92.50 g/kg。

1.2 盆栽试验设计

试验用盆为高 40 cm、平均直径 30 cm 的塑料盆。将准备好的土壤和不同类型的有机物料(牛粪、鸡粪、树叶、猪粪、菌渣、秸秆、稻糠、草炭)风干,粉碎过 0.85 mm 筛,测定土壤和有机物料的含水量。给塑料盆装入风干土 14.5 kg/盆,施入风干土质量 1.5%的有机物料,各盆均施入化肥,其中 N、P₂O₅和 K₂O 分别为 10,5 和 7 g/盆,以不施用任何肥料(CK)及施用化肥(N、P₂O₅、K₂O 用量同上)为对照,试验共设 10 个处理,每个处理 3 次重复,共计 30 盆。供试有机物料均采自吉林农业大学附近;供试氮肥选用尿素(含氮量 45.8%),磷肥选用过磷酸钙(含 P₂O₅ 14%),钾肥选用氯化钾(K₂O 50%)。盆栽试验在室外连续进行 3 年,每年按照当地时令统一种植大豆,空气湿度控制在 50%~60%。

1.3 样品测定与分析

分别采集 0~20 cm 土层的原状土样和扰动土样,原状土样在风干过程中沿自然裂隙掰成 1 cm 大小的小样块,扰动土样供土壤有关化学组成项目的测定。

1.3.1 有机质含量测定 有机质含量采用重铬酸钾-浓硫酸外加热法^[8]测定。

1.3.2 团聚体含量测定 (1)机械稳定性团聚体含量。采用干筛法^[7]测定。取 500 g 土样,用振荡式机械筛分仪进行测定,以 210 r/min 的速度振荡 5 min,将土壤团聚体粒级分为 10~7,7~5,5~2,2~1,1~0.5,0.5~0.25 mm^[8],再将各级筛网上的土

样分别收集,然后测定质量,精确至 0.01 g,计算各粒级机械稳定性团聚体的含量。

(2)水稳定性团聚体含量。采用湿筛法^[8]测定。将干筛各级土壤团聚体按比例配成 50 g 风干土样,置于孔径分别为 5,2,1,0.5 和 0.25 mm 的团粒分析仪上,将各粒级水稳性团聚体慢慢淹没于顶层设有孔径为 5 mm 筛子水中,静置 5 min,以 3 cm 的振幅筛分 2 min,收集土壤团聚体,置 105 ℃烘干,测定团聚体质量,计算各粒级水稳性团聚体含量。

1.4 数据处理

采用平均质量直径(MWD)、平均几何直径(GMD)、土壤团聚体结构破坏率(PAD)以及分形维数(D)描述土壤团聚体分形特征,其计算公式如下^[9]:

$$MWD=\frac{\sum_{i=1}^n(x_iw_i)}{\sum_{i=1}^nw_i}, \tag{1}$$

$$GMD=\exp\frac{\sum_{i=1}^nw_i\ln x_i}{\sum_{i=1}^nw_i}, \tag{2}$$

$$\left(\frac{\bar{d}_i}{\bar{d}_{\max}}\right)^{3-D}=\frac{W}{W_0}, \tag{3}$$

$$PAD=(DR_{0.25}-WR_{0.25})/DR_{0.25}\times100\%。 \tag{4}$$

式中: x_i 为任一级别范围内团聚体的平均直径, w_i 为对应于 x_i 的团聚体百分含量, $\bar{d}_i$ 为 d_i 和 d_{i+1} 粒级团聚体的平均直径, $\bar{d}_{\max}$ 为最大级别团聚体的平均直径, D 为土壤团聚体的分形维数, W 为粒径小于 $\bar{d}_i$ ($\delta<\bar{d}_i$)的团聚体的质量, W_0 为土壤团聚体的总质量, $DR_{0.25}$ 为粒径 >0.25 mm 机械稳定性团聚

体含量, $WR_{0.25}$ 为粒径 >0.25 mm 水稳性团聚体含量。

采用 Excel 2003、SPSS 17.0 分析软件对试验数据进行统计分析。运用回归分析法,计算团聚体含量与分形维数的相关系数。

2 结果与分析

2.1 有机培肥对黑土团聚体含量的影响

表 1 显示,10 个处理粒径 ≥0.25 mm 机械稳定性团聚体含量为 77.82%~89.18%,各种培肥处理粒径 ≥0.25 mm 机械稳定性团聚体含量大多高于 CK,且各培肥处理间亦有一定差异,其中草炭处理土壤机械稳定性团聚体含量最高,较 CK 提高 6.72%,猪粪处理土壤机械稳定性团聚体含量最低,较 CK 降低了 4.46%。总体看来,10 种处理的粒径 ≥0.25 mm 机械稳定性团聚体含量大小顺序为草炭>牛粪>鸡粪>树叶>化肥>菌渣>秸秆>稻糠>CK>猪粪。

从表 2 可以看出,10 个处理粒径 ≥0.25 mm 水稳性团聚体含量为 47.04%~62.18%,各培肥处理粒径 ≥0.25 mm 水稳性团聚体含量大多高于 CK,且各培肥处理间亦有一定差异,其中秸秆处理的水稳性团聚体含量最高,较 CK 提高 15.00%,鸡粪处理的水稳性团聚体含量最低。总体看来,10 种处理中粒径 ≥0.25 mm 水稳性团聚体含量由大到小的顺序为:秸秆>稻糠>树叶>牛粪>菌渣>猪粪>草炭>化肥>CK>鸡粪。

表 1 不同有机培肥对黑土机械稳定性团聚体含量的影响

有机物料 Organic material	径级 Diameter								%
	≥10 mm	≥7 mm~ <10 mm	≥5 mm~ <7 mm	≥3 mm~ <5 mm	≥2 mm~ <3 mm	≥1 mm~ <2 mm	≥0.5 mm~ <1 mm	≥0.25 mm~ <0.5 mm	≥0.25 mm
牛粪 Cow dung	8.50	5.90	8.88	11.52	5.28	19.32	20.78	8.60	88.78
鸡粪 Chicken manure	4.50	5.30	6.84	12.36	5.38	21.78	23.78	6.26	86.20
树叶 Leaf	5.36	6.50	7.26	12.66	5.00	19.98	22.46	6.52	85.74
猪粪 Pig manure	14.28	9.36	7.58	11.06	3.82	16.02	10.10	5.60	77.82
菌渣 Mushroom residue	7.34	5.98	7.10	11.72	4.24	19.28	22.24	6.56	84.46
秸秆 Straw	9.78	6.64	6.60	11.52	5.10	19.32	19.46	5.10	83.52
稻糠 Rice chaff	4.84	5.44	6.96	11.84	5.04	20.22	21.86	6.74	82.94
草炭 Peat	20.84	12.04	9.74	10.48	4.18	14.08	13.40	4.42	89.18
化肥 Fertilizer	10.98	11.82	8.20	10.92	4.16	15.76	17.56	5.68	85.08
CK	2.80	6.12	8.34	11.22	5.38	21.52	17.30	9.78	82.46

2.2 有机培肥对黑土团聚体稳定性参数的影响

由表 3 可知,各处理机械稳定性团聚体平均质量直径(MWD)和平均几何直径(GMD)均明显高

于水稳性团聚体,可知各培肥处理土壤团聚体中水稳性团聚体所占比例较小。各处理土壤机械稳定性团聚体 MWD 和 GMD 值大小顺序均为:草炭>猪

粪>化肥>秸秆>牛粪>菌渣>树叶>稻糠>鸡粪>CK,除鸡粪和稻糠处理土壤机械稳定性团聚体 MWD 和 GMD 与 CK 差异不显著外,其余处理均显著高于 CK 处理。

表 2 不同有机培肥对黑土水稳性团聚体含量的影响

Table 2 Effects of different organic fertilizers on content of water stable aggregates						%
有机物料 Organic material	径级 Diameter level					
	≥5 mm	≥2 mm~<5 mm	≥1 mm~<2 mm	≥0.5 mm~<1 mm	≥0.25 mm~<0.5 mm	≥0.25 mm
牛粪 Cow dung	4.98	5.46	7.90	21.22	15.64	55.20
鸡粪 Chicken manure	2.36	4.36	5.18	24.16	10.98	47.04
树叶 Leaf	1.14	5.86	6.24	27.64	14.62	55.50
猪粪 Pig manure	1.70	4.90	5.82	24.46	14.50	51.38
菌渣 Mushroom residue	2.42	5.68	6.20	25.46	12.00	51.76
秸秆 Straw	1.66	6.90	12.38	32.54	8.70	62.18
稻糠 Rice chaff	2.02	6.90	8.58	29.04	14.10	60.64
草炭 Peat	0.94	4.94	4.74	26.42	11.22	48.26
化肥 Fertilizer	0.46	3.70	3.76	24.62	16.36	48.90
CK	3.98	4.82	3.90	21.06	13.42	47.18

由表 3 还可知,各培肥处理土壤水稳性团聚体 MWD 值较 CK 均有一定程度提高,其中牛粪处理提高幅度最大,达 76.67%,化肥处理提高幅度最小,仅为 1.67%;MWD 由大到小的顺序为:牛粪>菌渣>鸡粪>秸秆>稻糠>草炭>猪粪>树叶>化肥>CK。各培肥处理土壤水稳性团聚体 GMD 值亦较 CK 明显提高,其中秸秆处理增幅最大,为 47.73%,化肥处理增幅最小,为 9.09%;GMD 由大到小的顺序为:秸秆>牛粪>菌渣>稻糠>鸡粪>草炭>猪粪>树叶>化肥>CK。分析各处理土壤水稳性团聚体 MWD 和 GMD 值可知,除了化肥处理与 CK 处理差异不显著外,其余处理均较 CK 显著提高。

表 3 不同有机培肥对黑土团聚体平均质量直径(MWD)和平均几何直径(GMD)的影响

Table 3 Effects of different organic fertilizer on MWD and GMD					mm
有机物料 Organic material	机械稳定性团聚体 Mechanical stable aggregates		水稳性团聚体 Water stable aggregates		
	MWD	GMD	MWD	GMD	
牛粪 Cow dung	2.862 6 b	1.566 9 b	1.055 4 a	0.640 5 a	
鸡粪 Chicken manure	2.323 7 c	1.318 8 d	0.861 6 a	0.586 0 bc	
树叶 Leaf	2.521 8 b	1.409 9 c	0.740 8 c	0.546 4 c	
猪粪 Pig manure	3.977 8 a	2.257 2 a	0.777 4 c	0.547 6 c	
菌渣 Mushroom residue	2.680 5 b	1.447 4 b	0.877 5 a	0.600 0 a	
秸秆 Straw	3.022 4 b	1.648 2 b	0.850 5 ab	0.645 8 a	
稻糠 Rice chaff	2.406 9 c	1.350 4 d	0.833 9 b	0.593 8 b	
草炭 Peat	4.520 1 a	2.626 1 a	0.780 7 b	0.560 1 b	
化肥 Fertilizer	3.533 1 a	1.938 6 b	0.610 2 d	0.475 8 cd	
CK	2.299 4 c	1.310 5 d	0.604 3 d	0.439 1 d	

注:同列数据后标不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。下表同。
Note: Different small letters indicate significant difference ($P<0.05$). The same below.

2.3 有机培肥处理对黑土团聚体组成分维特征、结构破坏率的影响

供试土样的结构破坏率、分形维数和团聚体与分形维数的相关系数如表 4 所示。从表 4 可以看出,CK 的机械稳定性团聚体的分形维数最大,为 2.626,草炭处理的机械稳定性团聚体的分形维数最小,为 2.441,其余 8 个处理的分形维数为 2.540~2.618,分形维数由大到小排列的次序为:CK>稻糠>猪粪>菌渣>秸秆>鸡粪>树叶>化肥>牛

粪>草炭。总的来看,各培肥处理土壤机械稳定性团聚体的分形维数均低于 CK,除猪粪、稻糠处理与 CK 差异不显著外,其余培肥处理均显著低于 CK。
表 4 显示,各处理水稳性团聚体的分形维数由高到低的顺序为:CK>化肥>草炭>鸡粪>猪粪>菌渣>牛粪>树叶>稻糠>秸秆,除了化肥处理与 CK 差异不显著外,其余培肥处理均显著低于 CK。
团聚体的结构破坏率是反映土壤团聚体结构稳定性的指标,结构破坏率越小,代表土壤团聚体稳定

性越高。由表 4 可知,各处理团聚体的结构破坏率由大到小的排列次序是:CK>鸡粪>草炭>化肥>菌渣>牛粪>树叶>猪粪>稻糠>秸秆。

利用相关分析评价 ≥ 0.25 mm 团聚体含量与

分形维数的关系,结果表明, ≥ 0.25 mm 团聚体含量与分形维数呈正相关关系,说明分形维数能够客观地反映团粒结构的性状,进一步证明其可以作为土壤通透性、抗蚀性以及肥力的表征指标。

表 4 不同有机培肥黑土团聚体分形维数(D)及结构破坏率

Table 4 Fractal dimension (D) and structural damage rate of black soil aggregates with different organic fertilizers

有机物料 Organic material	机械稳定性团聚体 Mechanical stable aggregates		水稳性团聚体 Water stable aggregates		结构破坏率/% Structure damage rate
	分形维数 (D)	团聚体含量与分形 维数的相关系数(R)	分形维数 (D)	团聚体含量与分形 维数的相关系数(R)	
	Fractal dimension	Correlation coefficient of aggregate and fractal dimension	Fractal dimension	Correlation coefficient of aggregate and fractal dimension	
牛粪 Cow dung	2.540 bc	0.966	2.801 c	0.943	36.05
鸡粪 Chicken manure	2.575 b	0.943	2.834 b	0.903	45.44
树叶 Leaf	2.571 b	0.912	2.799 c	0.891	35.29
猪粪 Pig manure	2.612 ab	0.924	2.819 b	0.899	33.96
菌渣 Mushroom residue	2.589 b	0.943	2.809 bc	0.908	38.72
秸秆 Straw	2.579 b	0.906	2.736 c	0.896	25.58
稻糠 Rice chaff	2.618 a	0.913	2.760 c	0.904	26.92
草炭 Peat	2.441 c	0.956	2.848 b	0.911	45.29
化肥 Fertilizer	2.543 bc	0.899	2.850 ab	0.865	42.52
CK	2.626 a	0.942	2.863 a	0.921	48.98

3 讨 论

团粒结构是土壤肥力的物质基础,影响着土壤养分、水分和空气的传输及作物的产量^[10-11]。本研究结果表明,3 年不同培肥处理对土壤结构产生了明显的影响,各培肥处理土壤机械稳定性和水稳性团聚体状况均显著优于 CK,这是因为培肥处理后土壤有机质含量提高,体积质量降低,孔隙度增加,作物根系及土壤微生物的活动能力增强,有助于团聚体的形成^[12]。王兴祥等^[12]发现,施用有机肥更有利于大直径团聚体含量的增加。刘京等^[13]发现,土壤机械稳定性大团聚体含量上升是由土壤中有机质含量的增加与胶结物质的改变所致。本试验中,经过连续 3 年培肥后,土壤大粒径团聚体的含量及其稳定性均得到了提高。

Nemati 等^[14]提出,平均质量直径可作为反映土壤团聚体分布特征的指标。姜灿烂等^[15]研究表明,施有机肥处理的红壤旱地团聚体平均质量直径均大于对照。从本研究结果来看,土壤团聚体 MWD 值和 GMD 值总体上可以反映各培肥处理下不同级别团聚体的分布特征,各培肥处理 MWD 值与 GMD 值均高于 CK。

分形维数作为评价土壤结构分布的一个综合指标,其值越高,表明土壤质地越黏重,通透性越差^[16]。很多研究表明,团聚体分布具有分形特征^[17-18]。分形维数不仅能够描述团聚体的分布,而

且能够反映不同培肥条件下团聚体的变化^[19]。本研究结果表明,各培肥条件下土壤水稳性团聚体和机械稳定性团聚体的分形维数均小于 CK,这可能是因为施用有机物料和化肥后显著增加了土壤中的有机质含量^[20],提高了土壤内胶结物质的比例,使土壤团聚体含量增加所致。

4 结 论

1)各培肥处理的土壤机械稳定性团聚体含量大多高于 CK,其中草炭处理的土壤机械稳定性团聚体含量最高,大于 89.18%;牛粪、鸡粪、化肥、树叶、菌渣次之,在 84.46%~88.78%,猪粪、秸秆、稻糠含量较低,为 77.82%~83.52%。除鸡粪外,其余各种培肥处理土壤的水稳性团聚体含量均高于 CK,其中以秸秆处理最高,达 62.18%;稻糠、树叶、牛粪、菌渣、猪粪处理次之,为 51.38%~60.64%,草炭、化肥处理较低,为 47.04%~48.26%。

2)各培肥处理土壤机械稳定性团聚体 MWD 和 GMD 较 CK 均有不同程度的提高,其中草炭处理 MWD、GMD 增幅最大,较 CK 分别提高了 96.52%和 97.63%;鸡粪处理 MWD、GMD 增幅最小,较 CK 分别提高了 0.87%和 0.76%。各培肥处理土壤水稳性团聚体 MWD 和 GMD 较 CK 也有不同程度的提高。

3)各培肥处理土壤机械稳定性团聚体和水稳性团聚体的分形维数均低于 CK,但各培肥处理水稳

性团聚体与机械稳定性团聚体的分形维数在排序上有一定差异。

[参考文献]

- [1] 李德成,张桃林.中国土壤颗粒组成的分形特征研究[J].土壤与环境,2000,9(4):263-265.
Li D C,Zhang T L. Fractal features of particle size distribution of soils in China [J]. Soil and Environmental Sciences,2000,9(4):263-265. (in Chinese)
- [2] 陈恩凤,周礼恺,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.
Chen E F,Zhou L K,Wu G Y. Performances of soil microaggregates in storing and supplying moisture and nutrients and role of their compositional proportion in judging fertility level [J]. Acta Pedologica Sinica,1994,31(1):18-25. (in Chinese)
- [3] Dexter A R. Advances in characterization of soil structure [J]. Soil and Tillage Research,1988,11:199-238.
- [4] 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(10):2176-2183.
Peng X H,Zhang B,Zhao Q G. Effect of soil originic carbon on aggregate stability after vegetative restoration on severely eroded red soil [J]. Acta Ecological Sinica,2003,23(10):2176-2183. (in Chinese)
- [5] 何传龙,李布青,殷 雄,等.PAA/PAM 共聚新型功能高分子材料对土壤结构性状的影响[J].土壤通报,2003,34(6):513-516.
He C L,Li B Q,Yin X,et al. Effects of PAA/PAM copolymer on structure and character of soil [J]. Chinese Journal of Soil Science,2003,34(6):513-516. (in Chinese)
- [6] Van Bavel C H M. Mean weight diameter of soil aggregates as a atatistica index of aggregation [J]. Soil Science Society of America Journal,1949,14:20-23.
- [7] 刘金福,洪 伟,吴承祯.中亚热带几种珍贵树种林分土壤团粒结构的分形维数特征[J].生态学报,2002,22(2):197-205.
Liu J F,Hong W,Wu C Z. Fractal features of soil aggregate structure of some precious species stand in the middle subtropical zone [J]. Acta Ecological Sinica,2002,22(2):197-205. (in Chinese)
- [8] 北京林业大学.土壤理化分析指导[M].北京:北京林业大学出版社,2002:108-126.
Beijing Forestry University. Soil physical and chemical analysis of instruction [M]. Beijing:Beijing Forestry University Press,2002:108-126. (in Chinese)
- [9] 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.
Yang P L,Luo Y P,Shi Y C. Use particle size distribution to characterize the fractal features of soil [J]. Chinese Science Bulletin,1993,38(20):1896-1899. (in Chinese)
- [10] Le Bissonnais Y. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility I [J]. European Journal of Soil Science,1996,47:425-437.
- [11] Tisdall J M,OAdes J M. Organic matter and water-stable aggregate in soil [J]. Journal of Soil Science,1982,33(2):141-163.
- [12] 王兴祥,张桃林,鲁如坤.施肥措施对红壤结构的影响[J].中国生态农业学报,2001,9(3):70-72.
Wang X X,Zhang T L,Lu R K. Effect of application of fertilizers on soil structure in red soil [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture,2001,9(3):70-72. (in Chinese)
- [13] 刘 京,常庆瑞,李 岗,等.连续不同施肥对土壤团聚性影响的研究[J].水土保持通报,2000,20(4):24-26.
Liu J,Chang Q R,Li G,et al. Effect of different fertilization on soil characteristics of aggregate [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2000,20(4):24-26. (in Chinese)
- [14] Nemati M R,Caron J,Gallichand J. Predicting hydraulic conductivity changes from aggregate mean weight diameter [J]. Water Resources Research,2002,38(9):141-156.
- [15] 姜灿烂,何园球,刘晓利,等.长期施用有机肥对旱地红壤团聚体结构与稳定性的影响[J].土壤学报,2010,47(4):715-722.
Jiang C L,He Y Q,Liu X L,et al. Effect of long-term application of organic manure on structure and stability of aggregate in upland red soil [J]. Acta Pedologica Sinica,2010,47(4):715-722. (in Chinese)
- [16] Huang G H,Jan W H. Fractal property of soil particle size distribution and its application [J]. Acta Pedologica Sinica,2002,39(4):490-496.
- [17] Anderson A N,Mcbratney A B. Soil aggregates as mass fractals [J]. Australian Journal of Soil Research,1995,33:757-772.
- [18] Guber A K,Pachepsky Y A,Levkovsky E V. Fractal mass-size scaling of wetting soil aggregates [J]. Ecological Modelling,2005,182:317-322.
- [19] Wu C Z,Hong W. Study on fractal features of soil aggregate structure under different management patterns [J]. Acta Pedologic Sinica,1999,36:162-167.
- [20] Six J,Elliott E T,Paustian K. Soil structure and soil organic matter: II. A normalized stability index and the effect of mineralogy [J]. Soil Science Society of America Journal,2000,64:1042-1049.