

长期不同施肥处理对设施土壤团聚体组成及其稳定性的影响

杜立宇^{1,2}, 李天来¹, 梁成华², 赵宇光², 吴岩²

(1. 沈阳农业大学 园艺学院, 辽宁 沈阳 110161; 2. 沈阳农业大学 土地与环境学院, 辽宁 沈阳 110161)

摘要: 通过设施土壤长期定位, 试验研究了不同施肥处理对土壤团聚体含量、分布及其稳定性的影响。结果表明, 有机肥处理的设施土壤水稳性团聚体的优势粒级均为 0.125~0.250 mm, 而未施用有机肥处理的设施土壤水稳性团聚体的优势粒级均为 0.053~0.125 mm。设施土壤中 >0.25 mm 粒级水稳性团聚体含量明显低于 <0.25 mm 粒级水稳性团聚体。在 >0.125 mm 的粒级中, 有机肥(AN0)及其有机无机肥配施(ANPK)处理土壤水稳性团聚体比重均高于无机肥(BNPK)及其不施用肥料(BN0)处理土壤。长期施用有机肥具有促进水稳性微团聚体向水稳性大团聚体形成的趋势。设施土壤团聚体稳定指数大小依次为: ANPK>AN0>BNPK>BN0。分形维数 D、几何平均直径 GMD、平均重量直径 MWD 均适用于该设施土壤水稳性团聚体评价。

关键词: 团聚体; 设施土壤; 水稳性; 施肥

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2012)01-0038-04

中图分类号: S152

Effects of Long-term Different Fertilizations on Composition and Stability of Soil Aggregates in a Greenhouse Soil

DU Li-yu^{1,2}, LI Tian-lai¹, LIANG Cheng-hua², ZHAO Yu-guang², WU Yan²

(1. College of Horticulture, Shenyang Agricultural University, Shenyang, Liaoning 110161, China;

2. College of Land and Environment, Shenyang Agriculture University, Shenyang, Liaoning 110161, China)

Abstract: The effects of different fertilizations on the content, distribution, and stability of soil aggregates were studied by a long-term fertilization experiment in a greenhouse soil. Results showed that the greatest size of wet stable aggregates of the greenhouse soil with organic fertilizer was in the 0.125~0.25 mm fraction, while the greatest size of wet stable aggregates of the greenhouse soil without organic manure was in the 0.053~0.125 mm fraction. The content of wet stable aggregates in >0.25 mm fraction was significantly lower than that in the <0.25 mm fraction. In the >0.125 mm fraction, the contents of wet stable aggregates with organic fertilization(AN0) and the combined organic and inorganic fertilization(ANPK) were higher than those with(BNPK) and without(BN0) inorganic fertilizer. The long-term application of organic fertilizer could enhance the formation of wet stable aggregates from macro-aggregates to micro-aggregates. The stability index of soil aggregates in different treatments was in the order of ANPK > BNPK > AN0 > BN0. Fractal dimension(D), geometric mean diameter(GMD), and mean weight diameter(MWD) were all suitable to evaluating wet stable aggregates of the greenhouse soil.

Keywords: soil aggregates; facility vegetable soil; water-stability; long-term fertilization

团聚体是土壤结构的基本单位,其大小含量及稳定性直接反应土壤结构性的优劣,并成为土壤质量高低的主要指标^[1-2]。土壤团聚体状况是诸多因子综合作用的结果,而在同一质地、种植制度和环境条件相对一致的前提下,不同施肥管理措施就成为影响土壤

物理性质的关键因素^[3-5]。

长期定位施肥试验是研究土壤结构变化的极为有效的土壤管理信息系统,目前国内外关于长期定位施肥对土壤结构影响的研究报道已有很多^[6-9]。设施栽培特有水热条件是影响土壤各级团聚体组成及稳

收稿日期:2011-05-06

修回日期:2011-06-07

资助项目:国家自然科学基金项目“设施蔬菜栽培对土壤有机无机复合体性状的影响”(35071266)

作者简介:杜立宇(1974—),女(汉族),辽宁省葫芦岛市人,博士,主要从事土壤肥力方面的研究工作。E-mail:duliyu74@163.com。

通信作者:李天来(1955—),男(汉族),辽宁省绥中县人,博士,教授,研究方向为设施蔬菜栽培与生理研究。E-mail:tianlaili@126.com。

定性的关键因素,因此研究设施条件下,不同施肥处理对土壤团聚体特性的影响对于进一步探讨和理解设施条件下土壤肥力特征的变化及科学管理设施土壤具有重要的理论意义。

1 材料与方 法

1.1 试验区概况

本试验是在沈阳农业大学园艺学院蔬菜保护地长期定位肥料试验基地进行的,其位于辽宁省沈阳市东陵区沈阳农业大学,地理坐标为:北纬 $41^{\circ}31'$,东经 $123^{\circ}24'$,土壤类型为草甸土。1988—1996 年 8 a 时间完成了 2 个露地蔬菜栽培轮作循环,1996 年将定位土壤分层搬到塑料大棚开始设施蔬菜栽培微区定位试验,试验连续进行至今。试验采用完全随机区组设计,3 次重复,在重复中设 A, B 两组,其中 A 为施有机肥组, B 为不施有机肥组,分别在施有机肥和不

施有机肥的基础上设 N, P, K 配施试验。供试土壤于 2007 年 4 月采自沈阳农业大学园艺学院蔬菜保护地长期定位肥料试验基地,各取其 3 个平行小区,每个小区 4 点取样,取样深度为 0—20 cm,风干,备用。本研究的供试土壤:BN0(不施肥),BNPK(只施 N, P, K 肥);AN0(只施有机肥),ANPK(有机肥与 N, P, K 肥配施)。土壤理化性质如表 1 所示。

1.2 测定方法

土壤团聚体分组采用 Elliott(1986)的湿筛分组法,将各粒级水稳性团聚体迅速淹没于顶层为 2 mm 筛子水中,静置 5 min,之后进行筛分。团聚体的分离通过用手上下移动筛子 5 cm,震荡 30 次,于 1 min 内完成,收集土壤团聚体,置 105°C 烘干,测定团聚体重量。试验 2 次重复,结果取平均值。土壤团聚体粒级:10~2, 2~1, 1~0.5, 0.5~0.25, 0.25~0.125, 0.125~0.053, <0.053 mm。

表 1 土壤的基本性质

处 理	机械组成/%				土壤有机质/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	pH 值 (水浸)	阳离子交换量/ ($\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$)
	2~0.2 mm	0.20~0.02 mm	0.02~0.002 mm	<0.002 mm			
AN0	29.77	39.02	16.78	16.09	37.30	6.99	12.75
BN0	29.62	44.60	12.35	15.73	18.00	7.07	9.85
APNK	29.42	41.43	15.22	16.23	36.90	6.20	14.49
BNPK	25.83	45.01	14.14	16.58	17.20	5.68	12.24

1.3 土壤团聚体稳定性评价方法

描述土壤团聚体分形特征可采用平均重量直径(mean weight diameter, MWD);几何平均直径(geometric mean diameter, GMD)以及分形维数(fractal dimension, D),其计算公式如下:

$$\text{MWD} = \sum_{i=1}^n X_i W_i \quad (1)$$

$$\text{GWD} = \exp\left[\frac{\sum_{i=1}^n w_i \lg x_i}{\sum_{i=1}^n w_i}\right] \quad (2)$$

$$V(\delta > d_i) = A\left[1 - \left(\frac{d_i}{k}\right)^{3-D}\right] \quad (3)$$

$$\frac{W(\delta > \bar{d}_i)}{W_0} = 1 - \left(\frac{\bar{d}_i}{d_{\max}}\right)^{3-D} \quad (4)$$

$$\text{ASI} = 100 \times M_{\text{usa}} / M_{\text{ta}} \quad (5)$$

式中:MWD——平均重量; X_i ——团聚体的重量百分数; W_i ——平均直径; GWD——几何平均直径; d_i ——两筛分粒级 d_i 与 d_{i+1} 间的平均值; $W(\delta > d_i)$ ——粒级大于 d_i 的重量; W_0 ——土壤各粒级重量的总和; d_{\max} ——最大粒级; ASI——评价土壤结构性的抗糊化指数; M_{usa} ——土壤团聚体分散后 >0.25 mm 团聚体颗粒重量; M_{ta} ——未分散土壤团聚体颗粒重量^[10]。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理水稳性团聚体含量分布

图 1 为不同施肥处理土壤水稳性团聚体含量分布图。从图 1 中可以看出,不同施肥处理设施土壤水稳性团聚体的优势粒级为 0.053~0.125 和 0.125~0.250 mm,无机肥处理土壤水稳性团聚体的优势粒级为 0.053~0.125 mm,有机肥处理使水稳性团聚体在 0.125~0.25 mm 粒级含量较高。可见土壤有机质有利于 0.125~0.25 mm 粒级的水稳性团聚体的形成。2~10, 1~2, 0.5~1 mm 粒级上的各处理土壤水稳性团聚体含量较小,都低于总量的 10%,平均含量分别为 2.72%, 3.32%, 7.20%。0.25~0.50 mm 与 <0.053 mm 这 2 个粒级的平均水平较为接近,其平均含量分别为 11.77% 与 18.83%。同时可以看出设施土壤的 >0.25 mm 粒级水稳性团聚体含量明显低于 <0.25 mm 粒级。按粒级,设施土壤水稳性团聚体平均含量从大到小依次为:0.125~0.25, 0.053~0.15, 0~0.053, 0.25~0.5, 0.5~1, 1~2, 2~10 mm。

在 2~10 mm 粒级中,水稳性团聚体含量大小依

次为 ANPK>AN0>BNPK>BN0,有机无机肥料配施土壤 AP,ANPK 水稳性团聚体含量分别为 4.49%,4.01%,与 AN0 比较,存在显著差异。而 AN0 与 BN0,BP,BNPK 之间水稳性团聚体含量未见显著差异。1~2 mm 粒级中,ANPK 处理设施土壤仍保持较大的水稳性团聚体含量(4.79%),而其他处理之间的大小依次为:AN0>BN0=BNPK,通过显著性检验发现结果相互差异性不显著。对于 0.5~1,0.25~0.5 mm 粒级,各处理土壤的水稳性团聚体含量均明显高于 2~10 与 1~2 mm 粒级,但不同施肥处理之间差异性同上 2 个粒级趋势相似。

0.125~0.25 与 0.053~0.125 mm 粒级是设施土壤的水稳性团聚体的优势粒级。在 0.125~0.25 mm 粒级中,AN0>ANPK>BN0>BNPK。有机肥的施用提高了该粒级土壤水稳性团聚体含量。而在 0.053~0.125 mm 粒级中,土壤水稳性团聚体的含量分布趋势出现变化,BNPK>BN0>AN0>ANPK,同样在<0.053 mm 粒级中,BN0>BNPK>AN0>ANPK。

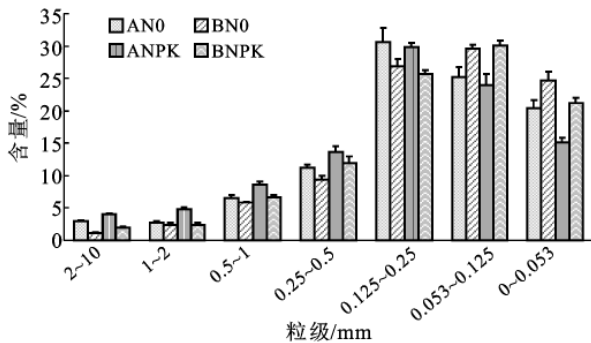


图 1 不同施肥处理水稳性团聚体含量分布

综上所述,在水稳性团聚体中的各个粒级中,有机肥及有机无机肥配施与单施用无机肥及不施用肥料的土壤之间存在规律性差异。在>0.125 mm 的粒级中,有机肥及有机无机肥配施处理土壤水稳性团聚体含量均高于无机肥及不施用肥料处理土壤,而在<0.125 mm,其结果相反。由此可知,有机肥的施用有利于水稳性大团聚体的形成与稳定。

2.2 不同施肥处理对设施土壤结构性定量化指标的影响

本试验基于不同施肥处理设施土壤各粒级团聚体含量分布状况,对设施农业利用模式下土壤结构进行定量化分析(表 2)。从表 2 中可以看出,不同施肥处理的设施土壤中,水稳性团聚体粒径分布的分形维数 D 在 2.753 8~2.847 2,其中 AN0>BN0>BNPK>ANPK,由此判定的土壤结构优劣次序为 ANPK>BNPK>BN0>AN0。GMD 指数在 0.115 4~0.196 5,次序为:ANPK>AN0>BNPK>BN0。

MWD 指数在 0.268 7~0.539 1,次序为:ANPK>AN0>BNPK>BN0。而用 ASI 指数在对土壤结构的判断为:ANPK>BNPK>AN0>BN0。使用各指标评价水稳性团聚体粒级分布结果具有一定的相似性。在各指标中,作为化肥与有机肥配施处理的 ANPK 在 3 个指标中均有较好的反映。ANPK 处理的土壤水稳性结构始终优于 AN0 以及未施用有机肥处理土壤。ANPK 与 AN0 比较,分形维数由 2.847 2 降至 2.753 8,2.778 1,GMD 由 0.1421 增至 0.196 5,0.181 0,MWD 由 0.395 1 增至 0.539 1,0.508 6。由此可以看出,在湿筛破碎的过程中,有机质维持团聚体稳定性的作用凸显出来^[10-13]。

表 2 土壤结构性指标

处理	结构性指标			
	D	GMD	MWD	ASI
AN0	2.847 2	0.142 1	0.395 2	3.257 2
BN0	2.846 3	0.115 5	0.268 7	2.901 1
ANPK	2.778 1	0.181 0	0.508 6	3.934 6
BNPK	2.828 5	0.130 5	0.329 8	3.369 7

BNPK 处理的土壤结构水稳性始终优于 BN0 处理。在湿筛处理中,考虑化肥施用的影响,BN0 的结构指数(D :2.846 3,GMD:0.115 46,MWD:0.268 734)BNPK(D :2.828 5,GMD:0.130 46,MWD:0.329 8)。分形维数下降,而 GMD,MWD 分别上升。3 个指数同样显著表明了湿筛条件下土壤结构稳定性得以改善。

在 AN0 与 BN0 的比较中,GMD 与 MWD 从 BN0 水平的 0.115 4,0.269 7 增至 AN0 水平的 0.142 1,0.395 19,表明了有机肥料对土壤结构水稳性的改善作用。可以看出分形维数,重量平均指数,几何平均指数应用于水稳性团聚体以判断土壤结构性具有较好的效果。ASI 做为土壤团聚体的结构性指标,对土壤结构性也具有较好的指示功能。

2.3 土壤结构性评价指标与土壤团聚体含量分布相关性分析

ASI, D ,GMD,MWD 与各粒级水稳性团聚体比重之间的相关性较强。由表 3 可知,ASI,GMD,MWD 指数均与 0.25~0.5,0.5~1,1~2,2~10 mm 粒级水稳性团聚体含量呈显著或极显著正相关,而与<0.053 mm 粒级水稳性团聚体呈极显著负相关。此外,MWD 同 0.125~0.25 mm 粒级水稳性团聚体分别呈显著正相关(相关系数:0.812),MWD 与 GMD 同 0.053~0.125 mm 粒级水稳性团聚体呈显著负相关(相关系数:-0.916,-0.861),而 ASI 指数与 0.053~0.125 和 0.125~0.25 mm 粒级水稳性团聚体相关性不显著。

表 3 土壤水稳性团聚体含量与土壤团聚体特征相关分析

指数	粒级/mm						
	2~10	1~2	0.5~1	0.25~0.50	0.125~0.250	0.053~0.125	<0.053
ASI	0.946**	0.906*	0.982**	0.984**	0.655	-0.786	-0.963**
D	-0.841*	-0.917*	-0.966**	-0.884*	-0.609	0.652	0.954**
GMD	0.974**	0.937**	0.982**	0.937**	0.793	-0.861*	-0.980**
MWD	0.995**	0.917*	0.960**	0.942**	0.812*	-0.916*	-0.951**

注: *表示相关性显著水平达 5%; **表示相关显著水平达 1%。下同。

分形维数 D 同各粒级水稳性团聚体的相关性与 ASI, GMD, MWD 不同。 D 同 0.25~0.5, 0.5~1, 1~2, 2~10 mm 粒级水稳性团聚体含量呈显著或极显著负相关, 而与 <0.053 mm 粒级水稳性团聚体呈极显著正相关。与 0.053~0.125 和 0.125~0.25 mm 粒级水稳性团聚体相关性不显著。

水稳性团聚体粒径分布的结构指数之间相关性分析见表 4。通过湿筛分析表明, ASI 与 MWD,

GMD 具有显著正相关性。ASI, MWD, GMD 与 >0.25 mm 粒级水稳性团聚体呈显著正相关, >0.25 mm 水稳性团聚体含量越多, ASI, MWD, GMD 的值越大, 而 ASI, MWD, GMD 与 <0.053 mm 粒级水稳性团聚体呈显著负相关, <0.053 mm 粒级水稳性团聚体含量越高, 则 ASI, MWD, GMD 的值越小, 代表土壤结构性越差, 土壤呈紧实状态, 不利于作物生产^[14-15]。

表 4 水稳性团聚体结构性指标及团聚体含量的相关性分析

指数	ASI	D	MWD	GMD	粒级/mm		
					>0.25	0.053~0.25	<0.053
ASI	1				0.992**	-0.534	-0.963**
D	-0.945**	1			-0.928**	0.344	0.954**
MWD	0.964**	-0.822*	1		0.986**	-0.549	-0.951**
GMD	0.976**	-0.94**	0.989**	1	0.988**	-0.471	-0.98**

从表 4 中可以看出 >0.25 mm 水稳性团聚体的含量越高, 平均重量直径、几何平均直径、土壤团聚体稳定指数越大, 分形维数则越小, 从而增强土壤团聚体稳定性和改善土壤结构。综上可以看出, 在评价该设施土壤结构水稳性中, MWD, GMD 指数能更好地参考各粒级水稳性团聚体含量比重在土壤结构中的作用。

分形维数 D 与 ASI, MWD, GMD 呈显著负相关性。 D 与 >0.25 mm 粒级水稳性团聚体呈显著负相关, <0.053 mm 粒级水稳性团聚体呈显著正相关。土壤中颗粒越细小, 分形维数 D 越大, 表明土壤结构性差。

由相关分析可见, ASI 与水稳性团聚体结构性指标属于同一体系, 对反映土壤结构水稳性具有互为补充作用。 >0.25 mm 土壤水稳性团聚体含量与土壤结构性指数有极显著相关性, 证明了这一粒径的团聚体对土壤结构性的积极作用。同时, 在风干土壤团聚体的分析中, ASI 与分形维数 D 都不明显指示土壤结构性优劣。

3 结论

(1) 各有机肥处理的设施土壤水稳性团聚体的

优势粒级均为 0.125~0.25 mm 粒级, 而未施用有机肥处理的设施土壤水稳性团聚体的优势粒级均为 0.053~0.125 mm 粒级。设施土壤中 >0.25 mm 粒级水稳性团聚体含量(平均含量 25%)明显低于 <0.25 mm 粒级水稳性团聚体(平均含量 74.99%)。在 >0.125 mm 的粒级中, 有机肥及其有机无机肥配施处理土壤水稳性团聚体比重均高于无机肥及其不施用肥料处理土壤。而在 <0.125 mm, 其效果相反。

(2) 长期施用有机肥具有促进水稳性微团聚体向水稳性大团聚体形成的趋势。设施土壤团聚体稳定指数大小依次为: ANPK > AN0 > BNPK > BN0。

(3) 分形维数 D , 几何平均直径 GMD, 平均重量直径 MWD 均适用于该设施土壤水稳性团聚体评价, 与土壤团聚体稳定指数 ASI 评价结果相一致。GMD, MWD, ASI 与 >0.25 mm 粒级水稳性团聚体呈显著正相关, 与 <0.053 mm 粒级水稳性团聚体呈显著负相关。而 D 与 >0.25 mm 粒级水稳性团聚体呈显著负相关, 与 <0.053 mm 粒级水稳性团聚体呈显著正相关。

(下转第 76 页)

- forests in Jinyun Mountain, Chongqing City, southwest China[J]. *Frontiers of Forestry in China*, 2009, 4(2): 171-177.
- [9] 张守红,刘苏峡,莫兴国,等. 降雨和水保措施对无定河流域径流和产沙量影响[J]. *北京林业大学学报*, 2010, 32(4):161-168.
- [10] Cattani P, Ruy S M, Cabidoche Y M, et al. Effect on runoff of rainfall redistribution by the impluvium-shaped canopy of banana cultivated on an Andosol with a high infiltration rate [J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 368(1/2/3/4): 251-261.
- [11] 屈丽琴,雷廷武,赵军,等. 室内小流域降雨产流过程试验[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(12):25-30.
- [12] 李广,黄高宝. 雨强和土地利用方式对黄土丘陵区水土流失的影响[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(11):85-90.
- [13] 张升堂,康绍忠,张楷. 黄土高原水土保持对流域降雨径流的影响分析[J]. *农业工程学报*, 2004, 20(6):56-59.
- [14] 琚彤军,刘普灵,徐学选,等. 不同次降雨条件对黄土区主要地类水沙动态过程的影响及其机理研究[J]. *泥沙研究*, 2007(4):65-71.
- [15] 潘成忠,上官周平. 黄土区次降雨条件下林地径流和侵蚀产沙形成机制:以人工油松林和次生山杨林为例[J]. *应用生态学报*, 2005, 16(9):1597-1602.
- [16] 张建军,朱金兆,魏天兴. 晋西黄土区坡面水土保持林地产流产沙的观测分析[J]. *北京林业大学学报*, 1996, 18(3):14-20.
- [17] 王万忠,焦菊英. 黄土高原坡面降雨产流产沙过程变化的统计分析[J]. *水土保持通报*, 1996, 16(5):21-27.
- [18] 张建军,董煌标,纳磊,等. 晋西黄土区不同尺度小流域降雨径流过程的对比分析[J]. *北京林业大学学报*, 2008, 30(2):106-112.
- [19] 段青松,吴伯志,字淑慧. 滇中地区小流域治理前后水土流失变化规律的研究[J]. *农业工程学报*, 2005, 21(5):42-46.
- [20] 卫伟,陈利顶,傅伯杰,等. 半干旱黄土丘陵沟壑区降水特征值和下垫面因子影响下的水土流失规律[J]. *生态学报*, 2006, 26(11):3847-3853.
- [21] 朱新军,王中根,夏军,等. 基于分布式模拟的流域水平衡分析研究:以海河流域为例[J]. *地理科学进展*, 2008, 27(4):23-27.
- [22] 毕华兴,李笑吟,李俊,等. 黄土区基于土壤水平衡的林草覆被率研究[J]. *林业科学*, 2007, 43(4):17-23.
- [23] 朱金兆,魏天兴,张学培. 基于水分平衡的黄土区小流域防护林体系高效空间配置[J]. *北京林业大学学报*, 2002, 24(5/6):5-13.
- [24] 黄明斌,刘贤赵. 黄土高原森林植被对流域径流的调节作用[J]. *应用生态学报*, 2002, 13(9):1057-1060.
- [25] 宋艳华,马金辉. SWAT 模型辅助下的生态恢复水文响应:以陇西黄土高原华家岭南河流域为例[J]. *生态学报*, 2008, 28(2):636-644.
- [26] 王盛萍,张志强,孙阁,等. 黄土高原流域土地利用变化水文动态响应:以甘肃天水吕二沟流域为例[J]. *北京林业大学学报*, 2006, 28(1):48-54.

(上接第 41 页)

[参 考 文 献]

- [1] 陈恩凤. 土壤肥力物质基础及其调控[M]. 北京:科学出版社, 1990:118-134.
- [2] 赵京考,刘作新,韩永俊. 土壤团聚体的形成与分散及其在农业生产上的应用[J]. *水土保持学报*, 2003, 17(6):163-166.
- [3] 章明奎,何振立. 利用方式对红壤水稳定性团聚体形成的影响[J]. *土壤学报*, 1997, 34(4):359-365.
- [4] 李成亮,孔宏敏,何园球. 施肥结构对旱地红壤有机质和物理性质的影响[J]. *水土保持学报*, 2004, 18(6):116-119.
- [5] 姚贤良,许绣云,于德芬. 不同利用方式下红壤结构的形成[J]. *土壤学报*, 1990, 27(1):25-33.
- [6] Van Bavel C H M. Mean weighted-diameter of soil aggregates as a statistical index of aggregation[J]. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 1949, 14(6):20-23.
- [7] Jastrow J D, Miller R M, Lussenhop J. Contributions of interacting biological mechanisms to soil aggregate stabilization in restored prairie[J]. *Soil Biol. Biochem.*, 1998, 30(7):905-916.
- [8] 刘京,常庆瑞,李岗. 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, 8(4):24-26.
- [9] 史吉平,张夫道,林葆. 长期定位施肥对土壤有机无机复合状况的影响[J]. *植物营养与肥料报*, 2002, 8(2):131-136.
- [10] 杨培岭,罗远培,石元春. 用粒径重量分布表征土壤的分形特征[J]. *科学通报*, 1993, 38(20):1896-1899.
- [11] 黄欠如,胡锋,袁颖红. 长期施肥对红壤性水稻土团聚体特征的影响[J]. *土壤*, 2007, 39(4):614-613.
- [12] 徐阳春,沈其荣,郭泽圣. 长期施用有机肥对土壤及不同粒级中有机磷含量与分配的影[J]. *土壤学报*, 2003, 40(4):593-598.
- [13] Tisdall J M, Oades J M. Organic matter and water-stable aggregate in soil[J]. *J. Soil Sci.*, 1982, 33(2):141-163.
- [14] Six J, Elliott E T, Paustian K, Doran J W. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grass land soils[J]. *Soc. Am. J.*, 1998, 62(5):1367-1377.
- [15] 周虎,吕贻忠,杨志臣. 保护性耕作对华北平原土壤团聚体特征的影响[J]. *中国农业科学*, 2007, 40(9):1973-1979.
- [16] 陈恩凤,关连珠,汪景宽. 土壤特征微团聚体的组成比例与肥力评价[J]. *土壤学报*, 2001, 38(1):49-53.