

施肥对黑土有机无机复合体组成及 有机碳分布特征的影响

刘淑霞¹, 赵兰坡¹, 刘景双², 吴景贵¹, 秦治家³

(1 吉林农业大学 资源与环境学院, 吉林 长春 130118; 2 中国科学院 东北地理与农业生态研究所,
吉林 长春 130012; 3 吉林省东辽县金洲农业站, 吉林 东辽 136615)

摘要:利用长期定位试验研究了施肥对黑土有机无机复合体组成及有机碳在土壤有机无机复合体中分配的影响, 试验设不施肥(CK)、单施化肥(NPK)、有机肥与化肥配施(NPKM)和秸秆与化肥配施(NPKS)4个处理. 结果表明:施肥有利于土壤有机碳及有机碳各组分含量的增加. 不同的施肥处理中,施用有机物料处理对黑土有机碳在有机无机复合体中分配影响最为突出,有利于土壤粉粒级和细砂粒级复合体的形成,使土壤中这2个粒级的复合体含量增加,粘粒复合体含量减少. 同时使土壤有机碳在粉粒级和细砂粒级复合体中的分配量增加,在粘粒复合体中的分配量减少. 施肥使有机碳的各组分在不同的复合体中含量都趋于增加,其中HA-C增加的幅度要大些. 不同施肥处理中,有机肥与化肥配合(MNPK)施用的效果最好.

关键词:黑土; 施肥处理; 有机碳; 有机无机复合体

中图分类号:S153.62

文献标识码:A

文章编号:1001-411X(2008)03-0011-05

Organo-Mineral Complex Component and Distribution Character of Organic Carbon of Phaeozem Under Various Fertilization Treatments

LIU Shu-xia¹, ZHAO Lan-po¹, LIU Jing-shuang², WU Jing-gui¹, QIN Zhi-jia³

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

2 Northeast Institute of Geography and Agricultural Ecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130012, China;

3 Jinzhou Agriculture Stands in the Dongliao County of Jilin Province, Dongliao 136615, China)

Abstract: A long-term field experiment to study the effect of fertilization on organo-mineral complex component and distribution character of organic carbon was carried out. The experiment included four treatments: (1) Zero fertilization (CK), (2) chemical fertilizers alone (NPK), (3) combination of organic manure and chemical fertilizers (NPKM), (4) combination of straw manure and chemical fertilizers (NPKS). The results showed that the fertilization tended to increase the contents of soil organic carbon and the component of soil organic carbon. The effect of applying organic matter on the distribution of organic carbon in phaeozem in organo-mineral complex was the most significant in the different fertilization treatments and applying organic matter improved the formation of silt-size fraction and fine sand-size fraction complex, increased their contents, therefore decreased the content of clay-size fraction complex. At the same time applying organic matter could increase the content of the distribution of organic carbon in silt-size fraction and fine sand-size fraction complex, therefore could decrease the content of distribution of organic carbon in clay-size fraction complex. In addition, the treatment of combination organic manure and chemical fertilizers (NPKM) treatment was better than other fertilizer treatment. All fertilization treatments could increase the content of the composition in different complex, especially HA - C content,

收稿日期:2007-09-11

作者简介:刘淑霞(1969—),女,副教授,博士; 通讯作者:赵兰坡(1955—),男,教授,E-mail:zhaolanpo12@163.com

基金项目:国家自然科学基金(30370846);国家863计划(2006AA10A309);吉林农业大学博士后基金

and the treatment of NPKM was the best in all fertilization treatments.

Key words: phaeozem; fertilization treatment; organic carbon; organo-mineral complex

吉林中部黑土区是我国重要的商品粮生产基地。由于黑土区地势平坦,土壤肥沃,便于开垦,因此垦植指数较高、种植年限较长。黑土耕垦以后,肥力状况发生了很大的变化,虽有部分土壤是向着不断培肥熟化过程发展,但多数土壤则有土壤肥力下降的趋势。这主要是由于长期不合理耕作施肥所造成的^[1]。不同耕作施肥措施对黑土土壤肥力状况的影响,已经引起广泛的关注^[2]。土壤有机碳一般不是单独存在的,而是同矿物结合在一起形成土壤有机无机复合体^[3]。土壤中有 52%~98% 的有机碳是同粘粒及粉粒结合在一起的,腐殖质与粘粒的结合主要通过水桥作用和金属离子的盐桥联系在一起,余下的几乎全部同氧化物结合在一起^[4]。土壤有机无机复合体的形成是土壤发生与肥力形成的重要过程^[5]。它是土壤肥力的重要物质基础,对养分转化、土壤中污染物的富集和迁移具有重要作用^[6-7]。通过对有机无机复合体组成、含量等进行研究,有助于阐明土壤肥力的形成、土壤发生分类等问题,进而为土壤的改良培肥提供理论依据^[8]。土壤有机无机复合体的形成、组成特性以及作用功能是十分复杂的,它既受土壤本身物质组成的影响,又受人为因素(耕作施肥措施等)和环境因素(温度、水分、土壤微生物等)影响^[9-13]。本研究以不同施肥方式下黑土为对象,研究了有机无机复合体的变化及有机碳在复合体中的分布特征,目的在于探讨施肥方式对土壤有机无机复合体的影响,为黑土培肥提供理论依据。

1 材料与方法

供试土壤采自吉林省农业科学院长期定位试验地,为中层黑土,成土母质为第四纪黄土状沉积物,地势平坦。随机采样,重复 3 次。定位试验始于 1980 年。土壤有机质 $23.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, pH 7.6, 碱解氮、速效磷和速效钾分别为 114.0 、 27.0 和 $190 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

定位试验设置不施肥(CK)、单施化肥(NPK)、有机肥(常量)与化肥配施(NPKM)、秸秆与化肥配施(NPKS)4 个处理,顺序区组排列。供试作物为玉米,1990—1993 年为丹玉 13,1994—1996 年为吉单 304,1997—2000 年为吉单 209。施肥量:每公顷施 N 165 kg 、 P_2O_5 82.5 kg 、 K_2O 82.5 kg 、有机肥 23 t 100 kg (常量)、秸秆 7 t 500 kg 。全部有机肥和磷、钾肥(总量的 $2/3$)作底肥,磷、钾和氮肥(总量的 $1/3$)作口肥,

其余氮肥于拔节前追施于表土下 10 cm 处。每年 4 月下旬播种,按常规管理,9 月下旬收获,按 $w = 18\%$ 水分测产。

不同粒径复合体样品的提取:超声分散法。应用探针型超声发生器,在功率 50 W 、频率 9 Hz 、温度 $13 \sim 15 \text{ }^\circ\text{C}$ 条件下,超声 1 h ,根据司笃克斯定律用虹吸法分离提取不同复合体^[14]。

腐殖物质的提取和分离测定:以 $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 焦磷酸钠和 $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 氢氧化钠的混合液提取腐殖物质,体积比为 1:1 的 HCl 的分离胡敏酸(HA)和富里酸(FA),用重铬酸钾-硫酸容量法(外加热)测定有机碳的质量分数^[14]。

土壤机械组成用吸管法测定^[15]。土壤有机碳总量用重铬酸钾-硫酸容量法(外加热)测定^[15]。数据处理采用 DPS3.01 软件,采用 Duncan's 新复极差法进行多重比较及显著性分析。

2 结果与分析

2.1 施肥对黑土有机无机复合体组成的影响

不同施肥方式下土壤的有机无机复合体组成如表 1 所示。从总体上看,不同处理的土壤有机无机复合体组成均以粉粒复合体质量分数最高,其变幅为 $39.59\% \sim 42.79\%$;其次是细砂复合体,变幅为 $35.35\% \sim 37.89\%$;而粘粒复合体的质量分数较低,变幅为 $13.56\% \sim 19.13\%$ 。

施肥处理与 CK 相比,粘粒级复合体的质量分数均有不同程度的降低,而粉粒及细砂粒级复合体的质量分数相应有所提高,这种变化在有机物料与化肥配施处理中表现尤为明显,而单施化肥处理则变化小些;同样,有机物料和化肥配施处理与单施化肥处理相比,粉粒级或细砂级复合体质量分数均有提高的趋势,这是由于有机物料中往往含有较多的多糖及腐殖质等有机成分,可通过各种方式与土壤颗粒相结合,形成有机无机复合体。同时,由于粗粒复合体的形成往往是以细粒物质为基础的,所以,粗粒复合体增加,必然会导致细粒复合体的减少^[16-17],这一点从复合体与机械组成分析的差值变化也可得到证明。各处理土壤的粘粒复合体质量分数都低于去除有机质后机械分析测得的无机粘粒的质量分数;而粉粒复合体和细砂复合体的质量分数又都大于无机粉粒和细砂的质量分数;粗砂质复合体与无机粗

砂的质量分数相近,二者差值较小。

随着种植年限的增加,不施肥处理粒粘级复合体的质量分数趋于增加,粉粒复合体及细砂复合体质量分数趋于减少;而施肥处理与CK正好相反,粘粒级复合体的含量趋于减少,粉粒复合体及细砂复

合体含量趋于增加。不同施肥处理对黑土有机无机复合体组成的影响均达到了5%的显著性水平,而且NPKM处理更有利于粉粒及细砂复合体含量的增加(表1)。从有利于提高土壤团聚性的角度出发,有机肥与化肥配施是一种比较好的施肥方式。

表1 不同施肥方式下黑土有机无机复合体组成¹⁾

Tab. 1 The composition of organo-mineral complex in phaeozem in different fertilizer treatment

w/%

年份 year	处理 treatments	机械组成 mechanical composition (A)				有机无机复合体组成 organo-mineral complex composition (B)				B - A			
		<2	2~20	20~200	>200	<2	2~20	20~200	>200	<2	2~20	20~200	>200
1990	CK	22.15	38.28	34.29	5.28	18.71aC	40.39cA	35.35cB	5.55aD	-3.44	2.11	1.06	0.27
	NPK	21.71	38.74	34.40	5.15	18.52bC	40.64bA	35.66bB	5.18bD	-3.19	1.90	1.26	0.03
	NPKM	21.70	38.89	34.07	5.34	17.12dC	41.17aA	36.31aB	5.40abD	-4.58	2.28	2.24	0.06
	NPKS	21.13	38.48	34.89	5.50	17.64cC	41.03aA	35.82bB	5.51bD	-3.49	2.55	0.93	0.01
1996	CK	21.34	38.67	34.68	5.31	18.88aC	39.96dA	35.87cB	5.29bD	-2.46	1.29	1.19	-0.02
	NPK	22.04	38.54	34.02	5.40	17.72bC	40.88cA	35.99bB	5.41abD	-4.32	2.34	1.97	0.01
	NPKM	21.24	38.75	34.63	5.38	14.83dC	42.49aA	37.19aB	5.49abD	-6.41	3.74	2.56	0.11
	NPKS	21.21	38.65	34.59	5.55	15.08cC	42.23bA	37.09aB	5.60aD	-6.13	3.58	2.50	0.05
2000	CK	21.20	38.46	34.78	5.56	19.13aC	39.59dA	35.69dB	5.59aD	-2.07	1.13	0.91	0.03
	NPK	21.01	38.38	34.98	5.63	16.69bC	41.39cA	36.19cB	5.73aD	-4.32	3.01	1.21	0.10
	NPKM	21.34	38.58	34.34	5.74	13.56dC	42.79aA	37.89aB	5.76aD	-7.78	4.21	3.55	0.02
	NPKS	21.48	38.66	34.08	5.78	14.08cC	42.58bA	37.55bB	5.79aD	-7.4	3.92	3.47	0.01

1) NPK: 单施化肥, NPKM: 常量有机肥与化肥配施, NPKS: 秸秆与化肥配施; <2, 2~20, 20~200, >200 为复合体粒径大小(μm), 分别代表粘粒、粉粒、细砂和粗砂; 相同年份同列数据后小写字母不同者表示处理间差异显著, 同列数据后大写字母不同者表示复合体组成间差异显著($P < 0.05$, Duncan's 法)

2.2 施肥对黑土有机碳在有机无机复合体中分配的影响

从表2列出的土壤有机碳测定值来看, 随复合体粒径的增加, 各处理土壤有机碳含量均趋于减少($A1 > A2 > A3$)。黑土有机碳主要存在于粘粒复合体中。各处理土壤有机碳在不同的复合体中分配情况不同(表2)。在粘粒复合体中, 施肥使土壤有机碳的绝对含量($A1$ 和 $B1$)增加, 这一变化趋势与粘粒复合体含量变化正好相反, 这种结果可能是由于在低粘粒含量土壤中, 有机质相对于粘粒的存在量增大, 促使单位质量的粘粒结合较多的有机碳, 造成粘粒含碳量提高; 反之, 在高粘粒含量的土壤中, 有机碳相对于粘粒的存在量减少, 单位质量的粘粒与有机碳的结合量也相对降低, 因而粘粒的含碳量减少^[2]。土壤有机碳在复合体中的比例($C1$)呈下降的趋势, 与粘粒复合体的变化趋势是一致的。不同处理中, 土壤有机碳在粘粒复合体中分配量的大小顺序为: NPKM < NPKS < NPK。在粉粒和细砂复合体中, 施肥使土壤有机碳的绝对含量和相对含量都有所增加, 不同处理的分配量的大小顺序为: NPKM > NPKS > NPK。

随着种植年限的增加, 不施肥处理土壤有机碳

在各复合体中的绝对含量与相对含量均减少; 施肥处理土壤有机碳在粉粒和细砂复合体中的绝对含量和相对含量均有所增加, 在粘粒复合体中绝对含量减少, 而相对含量却在逐渐增加。除了个别年份, 不同施肥处理对土壤有机碳在有机无机复合体中分配的影响均达到了5%显著水平(表2), 而且NPKM处理更有利于土壤有机碳向粉粒和细砂复合体中分配。这说明合理的施肥有利于土壤有机碳向大粒级复合体中分配积累。在提高土壤有机碳含量及大粒级复合体中有机碳的贮量方面, 有机肥与化肥配合施用效果最好。

2.3 施肥对不同黑土有机碳组分在复合体中分配的影响

表3为不同施肥方式下黑土有机无机复合体中的有机碳组成。从分析结果来看, 随着复合体粒径的增大, 有机碳各组分的质量分数趋于减少, HA/FA增加(表4); 腐殖质碳主要集中在粉砂粒以下的复合体中, 尤其是小于 $2\mu\text{m}$ 的粘粒复合体中。而且复合体的粒径越小, HA所占比重越大, 这说明施肥有利于HA类胶结物质向小粒级复合体中分配, 这与已有的研究结果是一致的^[18]。不同组分相比, 均表现为 $\text{Hu} - \text{C} > \text{HA} - \text{C} > \text{FA} - \text{C}$ 。

表2 施肥对黑土有机碳在有机无机复合体中分配的影响¹⁾

Tab. 2 Effect of different fertilizer method on distribution of organic carbon in organo-mineral complex in phaeozem

年份 year	处理 treatments	粘粒级复合体 clay-size fraction complex			粉粒级复合体 silt-size fraction complex			细砂级复合体 fine sand-size fraction complex			有机碳 organic carbon		
		A1	B1	C1	A2	B2	C2	A3	B3	C3	D	E	F/%
1990	CK	36.30d	6.79d	52.94a	12.30d	4.97d	38.73c	1.87b	0.66b	5.15b	12.83c	12.42d	3.18a
	NPK	36.92c	6.84c	52.64a	12.48c	5.07c	39.05bc	1.98b	0.71b	5.44b	12.99c	12.62c	2.87ab
	NPKM	46.41a	7.95a	52.49a	14.78a	6.08a	40.20a	2.41a	0.88a	5.78a	15.14a	14.91a	1.53b
	NPKS	44.42b	7.84b	52.56a	14.30b	5.87b	39.35b	2.34a	0.84a	5.62a	14.91b	14.54b	2.47ab
1996	CK	34.94d	6.60d	52.65a	12.12d	4.84d	38.66d	1.72d	0.62d	4.93d	12.53d	12.06d	3.76d
	NPK	41.69c	7.39b	52.03b	13.68c	5.59c	39.39c	2.16c	0.78c	5.48c	14.20c	13.76c	3.11c
	NPKM	52.07a	7.72a	46.69c	16.12a	6.85a	41.42a	3.05a	1.13a	6.86a	16.54a	15.71a	5.03 b
	NPKS	48.30b	7.28c	46.93c	15.03b	6.35b	40.90b	2.63b	0.98b	6.29b	15.52b	14.61b	5.88a
2000	CK	33.39d	6.39c	51.60a	12.12d	4.80d	38.7c	1.56d	0.56d	4.50c	12.38d	11.74d	5.14 b
	NPK	43.58c	7.27b	51.12a	13.56c	5.61c	39.45b	2.16c	0.78c	5.50b	14.23c	13.67c	3.94b
	NPKM	60.75a	8.24a	41.14b	20.20a	8.64a	43.16a	3.91a	1.48a	7.40a	20.03a	18.36a	8.31 a
	NPKS	58.82b	8.28a	42.44c	19.73b	8.40b	43.05a	3.79b	1.42b	7.29a	19.52b	18.11b	7.22a

1) A1、A2、A3 分别为粘粒、粉粒、细砂复合体的有机碳质量分数($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$); B1、B2、B3 分别为每千克土壤中存在粘粒、粉粒、细砂复合体中的有机碳量($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$),即分别为每千克土壤中粘粒、粉粒、细砂复合体质量分数与其有机碳质量分数的乘积; C1、C2、C3 分别为 B1、B2、B3 占土壤有机碳(测定值)的比例(%); D 为土壤有机碳的测定值($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$); E 为土壤有机碳的计算值,即 B1、B2、B3 三者之和; F 为土壤有机碳的损失率, $F = (D - E) / D \times 100\%$; 相同年份同列数据后字母不同者表示处理间差异显著($P < 0.05$, Duncan's 法)

表3 不同施肥方式下黑土有机无机复合体中有机碳组成¹⁾

Tab. 3 The composition of organic carbon phaeozem in organo-mineral complex in different fertilizer treatments

年份 year	处理 treatments	粘粒级复合体 clay-size fraction complex				粉粒级复合体 silt-size fraction complex				细砂级复合体 fine sand-size fraction complex			
		O. M	HA	FA	Hu	O. M	HA	FA	Hu	OM	HA	FA	Hu
1990	CK	36.30d	12.35d	9.10b	14.85c	12.30d	3.79c	2.56c	5.95b	1.87b	0.53b	0.46ab	0.88b
	NPK	36.92c	12.65c	9.33b	14.94c	12.48c	4.06b	2.72b	5.70b	1.98b	0.57b	0.41 b	1.00b
	NPKM	46.41a	16.63a	11.28a	18.50a	14.78a	4.96a	3.28a	6.54a	2.41a	0.73a	0.49 a	1.19a
	NPKS	44.42b	16.05b	10.98a	17.39b	14.30b	4.78a	3.19a	6.33a	2.34a	0.68a	0.48 a	1.18a
1996	CK	34.94d	12.50d	9.15d	13.29c	12.12d	3.24c	2.33c	6.53bc	1.72d	0.45d	0.31 c	0.96c
	NPK	41.69c	14.31c	10.16c	17.22b	13.68c	4.22b	2.77b	6.69b	2.16c	0.56c	0.38 c	1.22b
	NPKM	52.07a	19.53a	12.27a	20.27a	16.12a	5.44a	3.28a	7.40a	3.05a	0.99a	0.59a	1.47a
	NPKS	48.30b	16.74b	10.88b	20.68a	15.03b	5.33a	3.35a	6.35c	2.63b	0.81b	0.51b	1.31b
2000	CK	33.39d	11.46d	8.22c	13.71d	12.12d	3.78d	2.78c	5.56c	1.56d	0.35d	0.25d	0.75c
	NPK	43.58c	15.11c	10.64b	17.83c	13.56c	4.69c	3.24b	5.63c	2.16c	0.66c	0.46c	0.79c
	NPKM	60.75a	22.87a	13.24a	24.64a	20.20a	6.99a	3.65a	9.56b	3.91a	1.39a	0.71a	1.92b
	NPKS	58.82b	22.07b	13.25a	23.50b	19.73b	5.95b	3.18b	10.6a	3.79b	1.11b	0.60b	2.20a

1) OM: 有机碳, HA: 胡敏酸, FA: 富里酸, Hu: 胡敏素; 相同年份每列数据后字母不同者表示处理间差异显著($P < 0.05$, Duncan's 法)

施肥使有机碳的各组分在不同的复合体中含量都趋于增加,其中 HA - C 增加的幅度较大,具体表现在 HA/FA 与 HA/Hu 都趋于增加. 有研究表明^[18], HA 类有机胶体形成的复合体的稳定性和对养分的贮存能力较高. 这说明施肥有利于土壤有机碳的保持和积累,促进土壤肥力的提高. 不同施肥处

理对黑土有机无机复合体中有机碳组分的影响不同(表3),其中对 HA - C 的影响,除了1990年以外,均达到了5%显著性水平;对 FA 的影响不同年份间不同,但与 CK 相比有机无机配施处理达到了5%显著性水平.

表4 不同施肥方式下黑土有机碳组分在复合体中分配及 HA/FA¹⁾

Tab. 4 The rate of HA and FA in organo-mineral complex in different manure method

处理 treatment	粘粒级复合体 clay-size fraction complex				粉粒级复合体 silt-size fraction complex				细砂级复合体 fine sand-size fraction complex			
	HA	FA	Hu	HA/FA	HA	FA	Hu	HA/FA	HA	FA	Hu	HA/FA
CK	18.19a	13.26a	20.97b	1.37c	11.45d	8.15b	19.11b	1.41c	1.26d	1.16ab	2.45b	1.09b
NPK	17.91a	12.83b	21.28a	1.40c	12.83c	8.63a	17.82c	1.49b	1.55c	1.30a	2.61b	1.20b
NPKM	17.31b	10.79c	18.60d	1.60a	14.17a	8.32b	19.15b	1.70a	2.23a	1.21ab	3.29a	1.85a
NPKS	17.13b	10.96c	19.59c	1.56b	13.49b	8.16b	19.55a	1.65a	1.92b	1.08b	3.46a	1.77a

1)表中数据是由表3计算而来,指每千克土壤中存在粘粒、粉粒、细砂复合体中的有机碳各组分含量占土壤有机碳(测出值)的比例,即每千克土壤中粘粒、粉粒、细砂复合体与其有机碳含量的乘积除以土壤有机碳的含量再乘以100%;同列数据后字母不同者表示处理间差异显著($P < 0.05$, Duncan's法)

3 结论

黑土土壤有机无机复合体组成以粉粒复合体为主,施肥有利于土壤粉粒级和细砂粒级复合体的形成,使土壤中这2个粒级的复合体含量增加,粘粒复合体含量减少。不同施肥处理中,有机肥与化肥配合施用效果最好。

黑土有机碳主要存在于粘粒复合体中,且随着复合体粒径的增加,土壤有机碳的含量趋于减少。施肥对有机碳在不同复合体中分配的影响不同。在粘粒复合体中,施肥使土壤有机碳的绝对含量增加,而使土壤有机碳的百分含量呈下降的趋势,不同处理中,土壤有机碳在粘粒复合体中分配量的大小顺序为:NPKM < NPKS < NPK;在粉粒和细砂复合体中,施肥使土壤有机碳的绝对含量和相对含量都有所增加,不同处理的分配量的大小顺序为:NPKM > NPKS > NPK。

腐殖质碳主要集中在粉砂粒以下的复合体中,尤其是小于2 μm 的粘粒复合体中。随着复合体粒径的增大,有机碳各组分含量趋于减少,HA/FA增加,不同组分相比,均表现为Hu - C > HA - C > FA - C;而且复合体的粒径越小,HA所占比重越大。施肥使有机碳的各组分在不同的复合体中含量都趋于增加,其中HA - C增加的幅度较大。

施肥有利于HA类胶结物质向小粒级复合体中分配,有利于土壤有机碳的保持和积累,促进土壤肥力的提高。不同施肥处理中,有机肥与化肥配合施用效果最好。

参考文献:

- [1] 吉林省土壤肥料总站. 吉林土壤[M]. 北京:中国农业出版社,1998:145-162.
- [2] 赵兰坡,杨学明,王杰,等. 不同耕作施肥条件下玉米连作对黑土有机无机复合体性状的影响[J]. 吉林农业大学学报,1993,15(3):49-55.
- [3] 黄盘铭. 土壤化学[M]. 北京:科学出版社,1991:35.
- [4] 熊毅. 土壤胶体:第1册:土壤胶体的物质基础[M]. 北京:科学出版社,1983:290.

- [5] JASTROW J D. Soil aggregate formation and the accrual of particulate and mineral-associated organic matter [J]. Soil Biological Biochemistry, 1996, 28: 665-676.
- [6] 刘秀梅,冯兆滨,张树清,等. 纳米-亚微米级复合材料对褐潮土有机无机复合体含量及各粒级复合体中C、N、P含量与分布的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(1): 57-63.
- [7] 魏朝富,谢德林,李保国. 土壤有机无机复合体的研究进展[J]. 地球科学进展, 2003, 18(2): 221-225.
- [8] 熊毅,陈家坊. 土壤胶体:第3册:土壤胶体的性质[M]. 北京:科学出版社,1990:487-513.
- [9] CHRISTENSEN B T, OLESEN J E. Nitrogen mineralization potential of organo-mineral size separates from soils with annual straw incorporation [J]. European Journal of Soil Science, 1998, 49: 25-36.
- [10] 徐德福,黎成厚. 氧化铁和有机质对土壤有机无机复合状况的影响[J]. 贵州大学学报:农业与生物科学版, 2002, 21(6): 397-403.
- [11] 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]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(2): 131-136.
- [12] 王杰,赵兰坡. 两种培肥措施对黑钙土有机无机复合体腐殖质组成的影响[J]. 水土保持学报, 2004, 18(4): 53-56.
- [13] 徐阳春,沈其荣. 长期施用不同有机肥对土壤各粒级复合体中C、N、P含量与分配的影响[J]. 中国农业科学, 2000, 33(5): 1-7.
- [14] 严昶升. 土壤肥力研究方法[M]. 北京:农业出版社, 1988: 34-41.
- [15] 中国土壤学会农业化学专业委员会. 土壤农业化学常规分析方法[M]. 北京:科学出版社, 1983: 105-107.
- [16] RICHARDS A E, DALAL R C, SCHMIDT S S. Soil carbon turnover and sequestration in native subtropical tree plantations [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2007, 39(8): 2078-2090.
- [17] JULIA S L, SEEGER G U. Effects of land-use changes on humus forms on alpine pastureland [J]. Geoderma, 2005, 124(4): 215-222.
- [18] 关连珠,张伯泉,颜丽. 不同肥力土壤微团聚体形成与胶结特性的研究[J]. 土壤学报, 1991, 28(3): 15-19.

【责任编辑 周志红】