

不同施肥处理对红壤性水稻土微团聚体有机碳汇的影响

袁颖红¹, 李辉信^{1*}, 黄欠如², 胡 锋¹, 潘根兴¹

(1. 南京农业大学资源环境科学学院, 南京 210095; 2. 江西红壤研究所, 进贤 331717)

摘要:在田间定位试验区,研究了不同施肥处理对表层红壤性水稻土微团聚体组成以及土壤有机碳在各级微团聚体中分布和赋存的影响。结果表明,红壤性水稻土中 0.02~0.05mm 微团聚体所占比例最大,达 40%;其次是 0.002~0.02mm 和 0.05~0.1mm 的微团聚体;>0.2mm 微团聚体占的比例最小。长期施用无机肥(NPK)、有机肥(猪粪+紫云英绿肥)(OM)、无机肥与有机肥配施(NPKM),能显著增加 0.002~0.02mm 微团聚体的含量而降低<0.002mm 微团聚体的含量。土壤有机碳含量与 0.002~0.02mm 微团聚体含量之间呈显著正相关关系;而与<0.002mm 微团聚体含量呈显著负相关关系。各级微团聚体有机碳含量从高到低顺序为:>0.2mm, 0.1~0.2mm, <0.002mm, 0.05~0.1mm, 0.002~0.02mm, 0.02~0.05mm。OM、NPKM 处理能显著增加>0.002mm 各级微团聚体有机碳的赋存量,新增加的有机碳主要向微团聚体 0.1~0.05mm, 0.05~0.02mm 和 0.02~0.002mm 富集,它们是土壤有机碳的主要载体。3 种施肥处理对提高土壤有机碳赋存效果高低顺序为:NPKM>OM>NPK。

关键词:土壤微团聚体;有机碳;有机碳固定;红壤性水稻土

Effects of different fertilization on soil organic carbon distribution and storage in micro-aggregates of red paddy topsoil

YUAN Ying-Hong¹, LI Hui-Xin¹, HUANG Qian-Ru², HU Feng¹, PAN Gen-Xing¹ (1. College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095; 2. Jiangxi Institute of Red Soil, Jinxian 331717). *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(12): 2961~2966.

Abstract: A long-term field experiment was set in Jinxian County, Institute of Red Soil of Jiangxi Province (N28°15' 30", E116°20' 44"). One of the aims of the experiment was to study soil organic carbon (SOC) distribution and storage in different size groups of micro-aggregate in surface layer (0-17cm) of red paddy soil impacted by different fertilizers. Treatments were: (1) zero fertilization (CK), (2) chemical fertilizers along (NPK), (3) organic fertilizers along (OM) and (4) a combination of chemical and organic fertilizers (NPKM). A modified method was used for separating micro-aggregates. Results showed that soil micro-aggregate in size group 0.02~0.05mm occupied >40% of the total from all treatments. The percentage of the rest size group decreased in the following order: 0.002~0.02mm, 0.05~0.1mm, 0.1~0.2mm, <0.002mm and >0.2mm. Long-term application of different fertilizers significantly increased the micro-aggregate size group of 0.002~0.02mm and decreased the size group <0.002mm as compared with zero fertilization (CK). Results also showed that soil organic carbon increased in all fertilized treatments and the concentration decreased in the sequence of NPKM>OM>NPK>CK. The amount of SOC and the amount of size group of 0.002~0.02mm had positively linear relationship, while the relationship with the quantity of size group <0.002mm was negatively linear. The content of SOC in different size groups decreased in the sequence of >0.2mm, 0.1~0.2mm, <0.002mm, 0.05~0.1mm, 0.002~0.02mm, 0.02~0.05mm. However, compared to the SOC content in all size groups among treatments, the OM and NPKM were significantly higher than those in corresponding size group of micro-aggregate of NPK and CK. As to the treatment of NPK, only the SOC content of >0.2mm group was

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(40231016)

收稿日期:2003-11-16; **修订日期:**2004-05-15

作者简介:袁颖红(1974~),男,江西宜春人,硕士生,主要从事土壤生态学研究。

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: huixinli@njau.edu.cn

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 40231016)

Received date: 2003-11-16; **Accepted date:** 2004-05-15

Biography: YUAN Ying-Hong, Master candidate, mainly engaged in soil ecology.

prominently higher than that in relevant group of CK. The storage of total SOC increased in the sequence of CK < NPK < OM < NPKM. Compared to SOC storage in different size groups, it was significantly decreased in <0.002mm group but was increased in the group of >0.002mm among treatments. The newly enriched organic carbon mostly appeared in size groups of 0.1~0.05mm, 0.05~0.02mm and 0.02~0.002mm, so they were main carriers of SOC storage. Results indicated that long-term application of organic fertilizer, or combination of organic and inorganic fertilizer significantly promotes soil organic carbon sequestration in red paddy soil.

Key words: soil micro-aggregates; soil organic carbon; soil organic carbon sequestration; red paddy soil

文章编号:1000-0933(2004)12-2961-06 中图分类号:S153.6 文献标识码:A

有机碳是有机质的重要组成部分,有机碳的转化将会影响到全球碳循环和气候变化,对全球生态环境具有深远的影响^[1,2]。我国土壤有机碳储库为 50Pg,约占全球土壤有机碳的 1/20^[3],因而我国土壤有机碳库将对全球碳循环产生重要影响。最近几年潘根兴等对中国土壤有机碳库进行了统计研究^[4,5],表明中国表层土壤有机碳库约 20 Pg,其中有 6 种土壤表层有机碳库在 1.0 Pg 以上,水稻土达 1.1 Pg。水耕土壤的表层有机碳库含量都高于相应的旱地土壤,根据《全国第二次土壤普查数据》,中国水耕地土壤的有机碳含量平均是旱耕地的 137%,水稻土水耕熟化过程中有机碳的积累是普遍趋势^[6,7]。20 世纪 80 年代以来,中国尤其是江苏省水稻土呈现出土壤有机碳库的增长,因此土壤有机碳固定效应十分显著^[8]。

土壤微团聚体有机碳分配是土壤中的重要地球化学性质之一^[9]。由于土壤微团聚体是土壤的重要物质基础,关于有机碳在微团聚体的分布及其变化备受关注^[10]。迄今为止,对土壤微团聚体有机碳分布的研究集中于旱地土壤^[11]和有机物料处理后的土壤^[12],对水稻土中有机碳的微团聚体分布资料不多,关于不同施肥处理对表层红壤性水稻土及微团聚体有机碳赋存影响的报导甚少。根据潘根兴等^[8]的研究,白浆土微团聚体有机碳含量的分布与白浆土的粒度组成有关。本文研究了不同施肥处理对红壤水稻土微团聚体组成及其有机碳含量、分布和赋存的影响,试图阐明施肥处理对于水稻土有机碳存储的影响程度和可能的机制,为农业土壤对全球碳循环的影响提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验处理与供试土壤

试验区设在江西省红壤研究所(进贤县高桥)内,是从 1981 年开始实施、到目前已进行 22a 的长期肥料定位实验点。试验处理分为:① CK(不施肥);② NPK;③ OM(有机肥);④ NPKM(无机肥和有机肥配施)。

肥料用量以 NPK 处理每季作物施 N 90kg/hm²、P₂O₅ 45kg/hm²、K₂O 75kg/hm²;OM 处理早稻施 22500kg/hm² 紫云英、晚稻施 22500kg/hm² 猪粪;NPKM 处理早稻施 N 90kg/hm²、P₂O₅ 45kg/hm²、K₂O 75kg/hm² 和 22500kg/hm² 紫云英,晚稻施 N 90kg/hm²、P₂O₅ 45kg/hm²、K₂O 75kg/hm² 和 22500kg/hm² 猪粪。小区随机排列,3 次重复,小区面积 46.67m²。土壤为第四纪红色粘土发育的潯育型水稻土。于 2002 年晚稻收获后采取土样,采样深度为 0~17cm(耕作层)。土壤基本性状如表 1 所示。

表 2 供试红壤水稻土表层土壤基本性状
Table 2 The basic properties of red paddy topsoil

pH	有机 C Organic C (g/kg)	全 N Total N (g/kg)	全 P Total P (g/kg)	全 K Total K (g/kg)	水解 N Hydrolyzable N (mg/kg)	有效 P Available P (mg/kg)	有效 K Available K (mg/kg)
6.9	16.22	0.952	0.052	1.07	143.7	5.9	71.2

1.2 分析方法

1.2.1 土壤微团聚体分离方法 土壤微团聚体分离方法是依据 Buyanovsky 和潘根兴^[8,13,14]等的方法,并略作修改。称取土样 80g,置于盛有 500ml 蒸馏水的大烧杯中,浸泡过夜,在超声波发生器清洗槽中超声(型号 KQ-250B)分散 30min。用尼龙筛湿筛法分离出>0.2mm、0.1~0.2mm 粒径的微团聚体颗粒,然后用沉降虹吸法分离出 0.05~0.1 mm、0.02~0.05mm 粒径的微团聚体颗粒,继而采用离心法分离出 0.002~0.02mm、<0.002. mm 粒径的微团聚体颗粒。制得样品置于红外灯下 60℃烘干称重。

1.2.2 有机碳测定 H₂SO₄-K₂Cr₂O₇ 外加热法^[15],土壤容重用环刀法^[15]测定。

2 结果与分析

2.1 施肥处理对水稻土不同粒级微团聚体分布的影响

2.1.1 施肥处理对水稻土微团聚体分布的比较 表 2 结果表明,土壤中 0.02~0.05mm 的微团聚体占的比例最大,达 40%,其次是 0.002~0.02mm 和 0.05~0.1mm 的微团聚体颗粒,>0.2mm 微团聚体颗粒占的比例最小。各级微团聚体颗粒的含量在 4 种处理的土壤中趋势一致。富含氧化铁的江西旱地红壤,团聚体粒组以 2~0.25mm 粒组为主,其含量达 50%左右^[16];淮北白浆

土中以 0.25~0.02mm 粒组为主,大于 0.02mm 的团聚体粒组占 60%~80%^[8];而太湖地区黄泥土、乌泥土、白土 3 种土壤中团聚体粒组以 2~0.25mm 为主,含量分别为 40.8%,38.3%,49.9%^[9]。本研究红壤性水稻土大于 0.02mm 的微团聚体粒组占 71.1%~72.6%,与淮北白浆土相当。

水田土壤在长期淹水和粘闭条件下,耕层中土壤多呈微团聚体^[17]。从表 2 可以看出,NPK、OM 和 NPKM 3 种施肥处理与 CK 处理相比,0.02~0.05mm、0.05~0.1mm、0.1~0.2mm 及>0.2mm 各级微团聚体含量虽有增加的趋势,但无显著性差异;<0.002mm 微团聚体的含量明显降低,差异达显著水平,0.002~0.02mm 微团聚体的含量则增加,差异显著。这主要是由于长期施肥提高了土壤有机碳的含量(表 3),有机质转化过程中新形成的腐殖质首先与<0.002mm 的粘粒矿物结合,再经胶结后复合为 0.002~0.02mm 的微团聚体^[11,18]。

表 2 的结果还表明,不同施肥处理对<0.002mm 和 0.002~0.02mm 两级微团聚体组成的影响程度不同。各处理与 CK 处理相比,<0.002mm 微团聚体均有降低,但施无机肥处理仅降低了 2.6%,有机肥处理降低了 4.6%,有机无机配施处理则降低了 6.4%,处理之间均达到了显著性差异。NPK、OM 和 NPKM 处理与 CK 处理相比,0.02~0.002mm 微团聚体分别增加了 1.9%、3.9%和 5.0%,除 OM 和 NPKM 处理之间无显著性差异外,其它各处理间均有显著差异。上述结果表明施用有机肥以及有机无机肥配施能更明显地减少<0.002mm微团聚体的含量并增加 0.02~0.002mm 微团聚体的含量。

2.1.2 水稻土微团聚体含量与土壤有机碳关系

土壤有机碳能促进土壤微团聚体的形成。资料表明,土壤有机质、黏粒及碳酸钙是影响土壤水稳性团聚体含量的主导因子^[7,19,20],其中土壤有机质与微团聚体之间存在着密切的相关关系,它是土壤微团聚体的主要胶结剂^[21]。如上所述,不同施肥处理 0.02~0.05mm、0.05~0.1mm、0.1~0.2mm 及>0.2mm 各级微团聚体含量的变化不明显,因此将变化明显的<0.002mm 和 0.002~0.02mm 微团聚体的百分含量分别与其土壤有机碳做相关分析,相关方程分别为:

$$y_1 = -0.865x + 24.057, R_2 = 0.8951 \ast \ast (n = 12); \quad y_2 = 0.7008x + 7.436, R_2 = 0.9196 \ast (n = 12)$$

式中,y₁,y₂ 为分别表示<0.002mm 和 0.002~0.02mm 微团聚体百分含量;x 为土壤有机碳含量;R 为相关系数。由以上统计分析结果可以看出,随着土壤有机碳含量增加,0.002~0.02mm 微团聚体含量也随之增加,呈显著正相关关系;而<0.002mm微团聚体含量随之减少,呈显著负相关关系。因此,随着施用不同肥料,特别是有机-无机肥配施,能有效地提高 0.002~0.02mm 微团聚体含量,促进土壤中微团聚体的形成。

2.2 施肥处理对水稻土以及不同粒级微团聚体有机碳含量的影响

2.2.1 施肥处理对水稻土有机碳含量的影响 不同的施肥处理对红壤性水稻土有机碳含量有很大的影响。从表 3 可以看出,3 种施肥处理与 CK 处理相比有机碳含量都有不同程度的增加,增加的顺序为:NPKM>OM>NPK。NPK 处理与 CK 处理相比土壤有机碳含量有增加趋势,但差异不显著,这可能主要是由于两个处理间根茬量的差异导致土壤有机碳含量的不同。OM 和 NPKM 处理与 CK 处理相比,土壤有机碳明显增加,差异达显著水平,原因是施有机肥直接提高了土壤有机碳的含量。

表 3 不同施肥处理下水稻土及各级微团聚体有机碳的含量(0~100cm)

Table 3 SOC contents in soil micro-aggregates of paddy soil applied with different fertilizer

处理 Treatments	有机碳含量 Content of SOC (g · kg ⁻¹)						
	全土 Soil	各级微团聚体 Soil micro-aggregates (mm)					
		<0.002	0.002~0.02	0.02~0.05	0.05~0.1	0.1~0.2	>0.2
CK	17.4b	23.4b	14.7b	13.6b	14.8b	29.2b	32.2d
NPK	18.1b	24.7b	15.6b	14.0b	15.0b	31.3b	35.4c
OM	22.4a	33.5a	19.6a	16.7a	22.7a	35.1a	44.7b
NPKM	23.4a	34.2a	20.1a	18.3a	23.3a	37.2a	49.5a

2.2.2 施肥处理对水稻土各级微团聚体有机碳含量的影响 同一施肥处理各级微团聚体有机碳含量从高到低顺序为:>0.2mm,0.1~0.2mm,<0.002mm,0.05~0.1mm,0.002~0.02mm,0.02~0.05mm(表 3),这种分布趋势在 4 种施肥处理中是一致的。土壤各级微团聚体中的有机碳含量是土壤有机质平衡和矿化速率的微观表征,在土壤肥力中具有重要意义^[17]。本试验结果表明,<0.05mm 的各级微团聚体,粒径愈细,比表面积愈大,与有机碳的结合能力增强,有机碳含量愈高。>0.05mm

各级微团聚体有机碳含量随粒径增加而递增,这可能主要是由于受粗有机残体的影响,导致了较大微团聚体有机碳含量的增加。

不同施肥处理促进了土壤各级微团聚体中有机碳含量增加,但增幅因各级微团聚体而异(表 3)。NPK 处理与 CK 处理相比,各级微团聚体有机碳含量都略有增加,除>0.2mm 微团聚体有明显差异外,其它各级微团聚体的差异不显著。OM、NPKM 处理与 CK 处理相比,各级微团聚体有机碳含量都有增加、差异显著,增幅在 20.4%~57.1%之间。OM、NPKM 处理与 NPK 处理相比,各级微团聚体有机碳含量也有增加、差异达显著水平。NPKM 与 OM 处理相比,各微团聚体有机碳含量有增加趋势,但只有>0.2mm 微团聚体的有机碳含量的差异达显著水平。

2.3 施肥处理对水稻土以及不同粒级微团聚体有机碳赋存的影响

2.3.1 施肥处理对水稻土有机碳赋存量的影响 根据表 2、表 3 和土壤容重的数据计算得出有机碳的赋存量(表 4),结果表明不同施肥处理土壤有机碳的赋存有不同的变化。NPK 与 CK 处理之间,土壤有机碳的赋存差异不显著,分别为 34119kg/hm², 33781kg/hm²。OM 处理、NPKM 处理与 CK 处理相比,赋存的有机碳显著增加,差异显著,其中 OM 处理有机碳含量增加 6930kg/hm²(*P*<0.05),增幅为 20.5%;NPKM 处理有机碳含量增加 7247kg/hm²(*P*<0.01),增幅为 21.5%。

2.3.2 施肥处理对水稻土各级微团聚体有机碳赋存量的影响 表 4 数据显示,不同施肥处理对不同粒级微团聚体有机碳赋存有不同影响。各施肥处理中,<0.002mm 微团聚体有机碳赋存量与对照相比均显著降低,其它各级微团聚体有机碳赋存量与对照相比都有增加趋势。NPK 处理与对照相比,0.002~0.02mm 和 0.1~0.2mm 微团聚体中有机碳赋存量显著增加,其它各级微团聚体有机碳赋存量无明显增加。OM、NPKM 处理与对照及 NPK 处理相比,>0.002mm 各级微团聚体有机碳赋存量显著增加,差异显著。NPKM 处理中 0.02~0.05mm 和>0.2mm 微团聚体有机碳赋存量显著大于 OM 处理中相应微团聚体有机碳赋存量。

从土壤各级微团聚体赋存的有机碳百分比看,5.0%~13.3%有机碳分布在<0.002mm 微团聚体,这一结果远较 Schulten 等报道的低^[22],这可能与土壤类型及气候条件有关。16.1%~20.2%的有机碳与中、细粉砂粒相结合而存在于 0.002~0.02mm 微团聚体中。尽管 0.02~0.05mm 微团聚体中有机碳含量最低,但由于该粒组占土壤总重量的近 40%(表 2),约 1/3 土壤有机碳贮存在该级微团聚体中。此外,由于粗有机碎屑的残留,>0.05mm 微团聚体中的有机碳在土壤有机碳总量中也占一定的比例,其中 12.7%~15.5%有机碳分布在 0.05~0.1mm 微团聚体中;15.7%~17.8%有机碳分布在 0.1~0.2mm 微团聚体中;9.3%~11.3%的有机碳分布在>0.2mm 微团聚体中。而据潘根兴等报导的太湖地区黄泥土、乌泥土、白土 3 种土壤中耕层有机碳主要存在于 2~0.25mm 和 0.25~0.02mm 粒组^[9]。

表 4 不同施肥处理下/hm²(0~17cm)各级微团聚体赋存的有机碳

Table 4 SOC stock in soil micro-aggregates of paddy soil applied with different fertilizer

处理 Treatments	有机碳总量 Content of SOC(kg)						
	全土 Soil	各级微团聚体 Soil micro-aggregates (mm)					
		<0.002	0.002~0.02	0.02~0.05	0.05~0.1	0.1~0.2	>0.2
CK	33781b	4478a (13.3%)*	5412c (16.1%)	10628c (31.6%)	4349b (12.9%)	5631c (16.7%)	3141c (9.3%)
NPK	34119b	3411b (10.0%)	6163b (18.1%)	10658c (31.3%)	4331b (12.7%)	6070b (17.8%)	3416c (10.0%)
OM	40711a	3192b (7.5%)	8181a (19.3%)	12286b (29.0%)	6444a (15.2%)	6642a (15.7%)	4313b (10.2%)
NPKM	41028a	2075c (5.0%)	8425a (20.2%)	13096a (31.4%)	6447a (15.5%)	6900a (16.6%)	4701a (11.3%)

* 括号内数据表示各级微团聚体有机碳量占全土的百分比 Numbers in bracket means the percentage of SOC in different micro-aggregates to total soil

OM、NPKM 处理与对照 CK 处理相比,<0.002mm 微团聚体中赋存有机碳占全土有机碳总量的比例降低;而>0.002mm 各粒级赋存有机碳的比重则增加。造成这种现象的原因是土壤中粘粒含量相对较低,而有机质给源又较丰富,当粘粒结合的有机质达到饱和后,有机质向较大颗粒中的积累便增多^[23]。

若以公式(某处理某粒级有机碳总量—CK 处理某粒级有机碳总量)/(某处理全土有机碳总量—CK 处理全土有机碳总量)×100%^[24],分别计算 OM 和 NPKM 处理中各级微团聚体中的新增有机碳量对全土有机碳总量的贡献率。OM 和 NPKM 处理中 0.002~0.02mm 微团聚体新增有机碳量的贡献率分别为 39.9%、41.6%;0.02~0.05mm 微团聚体的贡献率分别为 23.9%和 34.1%;0.05~0.1 微团聚体的贡献率分别为 30.2%和 30.3%。所以新碳主要向微团聚体 0.1~0.05mm、0.02~0.05mm 和 0.02~0.002mm 富集,这些微团聚体是土壤有机碳的主要载体。而退化红壤植被恢复改良和白浆土恢复中新固定的有机碳主

要分布于 2~0.25mm 微团聚体中^[8,16]。本结果表明,OM 和 NPKM 处理的水稻土有机碳出现快速存储,这意味着我国广泛开展的区域农业综合开发与生态恢复对提高全球陆地系统碳截存有重要贡献^[25~28]。

3 结论

(1)红壤性水稻土中 0.02~0.05mm 微团聚体所占比例最大,达 40%,其次是 0.002~0.02mm 和 0.05~0.1mm 的微团聚体,>0.2mm 微团聚体占的比例最小。不同施肥处理对<0.002mm 和 0.002~0.02mm 微团聚体的含量影响最大,<0.002mm 微团聚体的含量明显降低,各处理之间差异显著;0.002~0.02mm 微团聚体的含量则增加,除 OM 和 NPKM 处理之间差异不显著外,其它各处理之间差异显著。土壤有机碳含量与 0.002~0.02mm 微团聚体含量之间呈显著正相关关系;而与<0.002mm 微团聚体含量呈显著负相关关系。

(2)不同施肥处理对各级微团聚体有机碳含量有不同影响。OM、NPKM 处理与 CK、NPK 处理相比,不同粒级微团聚体有机碳含量显著增加;NPK 和 CK 处理之间,NPKM 和 OM 处理之间只有>0.2mm 微团聚体有机碳含量差异显著。

(3)OM、NPKM 处理能显著增加>0.002mm 各级微团聚体有机碳的赋存量。新增加的有机碳主要向微团聚体 0.05~0.1mm、0.02~0.05mm 和 0.02~0.002mm 富集,这些微团聚体是土壤有机碳的主要载体。施有机肥,无机肥和有机肥配施能显著提高红壤性水稻土对有机碳的截存。

References:

- [1] Ni Jian. Carbon storage in terrestrial ecosystem of China: Estimates at different spatial resolution and response to climatic change. *Climatic Change*, 2001, **49** (3): 339~358.
- [2] Arrouays D, Balesdent J. Increasing carbon stocks in French agricultural soils [EB/OL]. Scientific Assessment Unit for Expertise, INRA. <http://WWW.inra.fr/actualites/rapport-carbone.html>, 2002.
- [3] Pan G X. Pedogenic carbonates in arid soils of China and the significance in terrestrial carbon transfer. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 1999, **22**(1): 51~57.
- [4] Pan G X. Study on carbon reservoir in soils of China. *Bulletin of Science and Technology*, 1999, **15**(5): 330~332.
- [5] Pan G X. *Soil science of earth surface system*. Beijing: Geology Press, 2000. 30~37.
- [6] State soil survey service. *Soils of China*. Beijing: Chinese Agricultural Press, 1998. 1023~1045.
- [7] Li Q K. *Paddy soils of China*. Beijing: Science Press, 1992. 11~16.
- [8] Zhang X H, Li L Q, Pan G X. Effect of different crop rotation systems on the aggregates and their SOC accumulation in paludals in North Huai region. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, **20**(2): 16~19.
- [9] Li L Q, Pan G X, Zhang X H. Organic carbon storage in selected paddy soils in Tai Hu Lake region and their occurrence. *Bulletin of Science and Technology*, 2000, **11**(6): 421~426.
- [10] Puget P, Chenu C, Balesdent J. Carbon and young carbon in soil aggregates of silty cultivated soil. In: *Trans. of 15th world Congr. of Soil Sci.*, 9, Acapulco, Mexico, 1994. 288~290.
- [11] Zhao L P, Yang X M, Lu L P. Composition of organo-mineral complexes and SOC distribution. *Chinese Journal of Soil Science*, 1996, **27**(3): 120~123.
- [12] Gregorich E G, Ellert B H, Drury C F, et al. Fertilization effects on soil organic matter turnover and corn residue C storage. *Soil Science Society of America Journal*, 1996, **60**: 472~476.
- [13] Buyanovsky G A, Wagner G H. Residue decomposition and carbon in physical fractions of soil. In: *Trans. of 15th world Congr. of Soil Sci.*, 9, Acapulco, Mexico, 1994. 253~262.
- [14] Zhang M K, He Z L, Calvert D V, et al. Phosphorus and heavy metal attachment and release in sandy soil aggregate fractions. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, **67**: 1158~1167.
- [15] Lu R K. *Analytical methods for soil agricultural chemistry*. Beijing: Science Press, 2000. 106~110, 269~271.
- [16] Pan G X, Li L Q, Zhang X H. Change of soil particle size fractions and SOC contents after vegetation recovery in a degraded soil. *Chinese Journal of Soil Science*, 2000, **31**(5): 193~195.
- [17] Yao X L, Xu X Y, Liu K Y, et al. Influence of long-term application of organic material on physical characters in paddy soils. *Soils*, 1996, **2**: 57~61.
- [18] Hernandez R M, Lopez-Hernandez D. Microbial biomass, mineral nitrogen and carbon content in Savanna soil aggregates under conventional and no-tillage. *Soil Biology & Biochemistry*, 2002, **34**: 1563~1570.
- [19] Yang P N. Study of organo-mineral complexes and aggregate in limy soil. *Acta Pedologica Sinica*, 1984, **21**(2): 144~152.
- [20] Yao X L, Yu D F. Problem of soil structure on intensivism tillage system. *Acta Pedologica Sinica*, 1985, **22**(3): 241~250.

- [21] Liu J, Chang Q G, Li G, *et al.* Effect of Different fertilization on soil characteristics of aggregate. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2000, **8**(4): 24~26.
- [22] Chen E F. Soil self-regulation and resistance-athwart capability. *Acta Pedologica Sinica*, 1991, **28**(2): 168~176.
- [23] Schulten H R. Influence of long-term fertilization with farmyard manure on soil organic matter; characteristics of particle-size fractions. *Biol. Fertil. Soils*, 1991, **12**: 81~88. .
- [24] Xu Y C, Shen Q R. Influence of Long-term application of manure on the content sand distribution of organic C, total N and P in soil particle-sizes. *Scientia Agricultura Sinica*, 2000, **33**(5): 65~71.
- [25] Hassink J. Preservation of plant residues in soils differing in unsaturated protective capacity. *Soil Science Society of America Journal*, 1996, **60**: 487~491.
- [26] Pan G X, Li L Q, Zhang X H. Perspectives on issues of soil carbon pools and global change——with suggestions for studying organic carbon sequestration in paddy soils of China. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2002, **25**(3): 100~109.
- [27] Shi S L, Wen Q X. The content of fixed ammonium in main soil in China. *Soils*, 1987, **19**(2): 79~83.
- [28] Pan G X, Li L Q, Zhang X H. Soil organic carbon storage of China and the sequestration dynamics in agricultural lands. *Advance in Earth Sciences*, 2003, **18**(4): 609~618.

参考文献:

- [3] 潘根兴. 中国干旱性地区土壤发生性碳酸盐及其在陆地系统碳转移上的意义. 南京农业大学学报, 1999, **22** (1): 51~57.
- [4] 潘根兴. 中国土壤有机碳、无机碳库量研究. 科技通报, 1999, **15** (5): 330~332.
- [5] 潘根兴. 地球表层系统土壤学. 北京: 地质出版社, 2000. 30~37.
- [6] 全国土壤普查办公室. 中国土壤. 北京: 中国农业出版社, 1998. 1023~1045.
- [7] 李庆逵. 中国水稻土. 北京: 科学出版社, 1992. 11~16.
- [8] 潘根兴, 张旭辉, 李恋卿. 不同轮作制度对淮北白浆土团聚体及其有机碳的积累与分布的影响. 生态学杂志, 2001, **20** (2): 16~19.
- [9] 李恋卿, 潘根兴, 张旭辉. 太湖地区几种水稻土的有机碳储存及其分布特性. 科技通报, 2000, **11** (6): 421~426.
- [11] 赵兰坡, 杨学明, 路立平, 等. 长期连作玉米的黑钙土、风沙土中有机-无机复合体组成及有机碳分布的特征. 土壤通报, 1996, **27**(3): 120~123.
- [15] 鲁如坤主编. 土壤农业化学常规分析方法. 科学出版社, 2000. 106~110, 269~271.
- [16] 潘根兴, 李恋卿, 张旭辉. 退化红壤植被恢复中表层土壤团聚体及其有机碳的变化. 土壤通报, 2000, **31** (5): 193~195.
- [17] 姚贤良, 许绣云, 刘克樱, 等. 长期施用有机物料对红壤性水稻土的物理性质的影响. 土壤, 1996, **2**: 57~61.
- [19] 杨彭年. 石灰性土壤有机质矿质复合体及其团聚性的研究. 土壤学报, 1984, **21** (2): 144~152.
- [20] 姚贤良, 于德芬. 关于集约农作制下土壤结构问题. 土壤学报, 1985, **22** (3): 241~250.
- [21] 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. 水土保持通报, 2000, **8** (4): 24~26.
- [22] 陈恩凤. 土壤的自动调节性能与抗逆性能. 土壤学报, 1991, **28** (2): 168~176.
- [24] 沈其荣, 徐阳春. 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. 中国农业科学, 2000, **33** (5): 65~71.
- [26] 潘根兴, 李恋卿, 张旭辉. 土壤有机碳库与全球变化研究的若干前沿问题——兼开展中国水稻土有机碳固定研究的建议. 南京农业大学学报, 2002, **25** (3): 100~109.
- [27] 施书莲, 文启孝. 我国主要土壤中的固定态铵含量. 土壤, 1987, **19** (2): 79~83.
- [28] 潘根兴, 李恋卿, 张旭辉. 中国土壤有机碳库量与农业土壤碳固定动态的若干问题. 地球科学进展, 2003, **18** (4): 609~618.