

南方三种典型水稻土长期试验下有机碳积累机制研究^{*}

团聚体物理保护作用

周 萍¹ 宋国菡^{1,2} 潘根兴^{1†} 李恋卿¹ 张旭辉¹ Laosheng Wu³

(1 南京农业大学农业资源与生态环境研究所, 南京 210095)

(2 山东省济南市烟草专卖局, 济南 250100)

(3 Department of Environmental Sciences, University of California Riverside, CA 92521, USA)

摘 要 选取我国南方三种典型水稻土的长期试验田,采集长期不同处理下的未破坏土壤样品,采用低能量超声波分散法分离得到不同粒径的团聚体颗粒组,研究不同处理下这些团聚体颗粒组中的有机碳 (Soil organic carbon, SOC)含量及其分配变化,探讨土壤有机碳积累与团聚体物理保护的关系。结果表明:供试三种水稻土团聚体颗粒组的组成以 200~20 μm 和 20~2 μm 粒径为主,分别占 22%~43% 和 27%~44%,微团聚化作用较强。SOC 含量以 2000~200 μm 和 <2 μm 粒组中最高;而易氧化态碳 (Labile organic carbon, LOC)主要富集于 2000~200 μm 粗团聚体颗粒组中,其占 SOC 的比例 (LOC/SOC)也是以该粒径中明显最高。直径为 2000~200 μm 的粗团聚体颗粒组作为新增有机碳的主要载体,随不同耕作和施肥等长期处理的变化最为强烈,其中又以红壤性水稻土的 SOC 和 LOC 随不同施肥的变化最为强烈,说明其良好管理下的有机碳累积效应最为显著。统计分析表明,全土的有机碳积累量与 2000~200 μm 粗团聚体的有机碳积累量之间的关系可用抛物线拟合 ($R^2 = 0.95, n = 8$)。由此看来,长期试验下新固定的有机碳积累及其粗团聚体保护可能存在某种饱和机理。计算表明,供试水稻土的粗团聚体保护在长期试验期内还未达到其饱和限,本研究结果支持了我国学者对于近 20 年来南方水稻土特别是红壤丘陵区水稻土有机碳固定速率较高的认识。同时,红壤性水稻土的粗团聚体保护作用最强,仍然具有明显的固碳潜力,这也提示土壤中氧化铁对水稻土中有机碳的固定和化学稳定可能有重要贡献,水稻土固碳的团聚体保护作用与团聚体中有机碳的化学结合机制有关。

关键词 土壤固碳;长期试验;团聚体;水稻土;物理保护;有机碳

中图分类号 S152 **文献标识码** A

土壤团聚体颗粒组的有机碳 (Soil organic carbon, SOC)分配是土壤碳的重要生物地球化学行为之一^[1],团聚体中的物质组成及其有机碳结合机制已成为土壤学的基础科学问题^[2~4]。土壤中固定新碳的团聚体归宿和分配是研究有机碳固定机制的重要内容。研究认为有机碳的团聚体物理保护在有机碳积累中有重要的意义^[5],并且 SOC 固定中团聚体的保护机制可用以说明 SOC 的固定效应^[6]。近年来,关于水稻土团聚体颗粒组有机碳分布及其与土壤生境的关系的研究较为活跃^[7~16],这些研究认识到水稻土积累的新碳主要分配于粗团聚体中。

近年来的一些研究报告也提出,南方水稻土有机碳积累明显较快,且矿化稳定性较高^[16~18]。但是,对于这种有机碳积累的机理还未有深入的探讨,特别是与土壤团聚体层面的过程的关系还了解较少。

本研究选取我国南方三种典型水稻土的长期定位试验田,利用低能量探针型超声波仪分散-湿筛-冷冻干燥法,获得最大限度保存其土壤生境的土壤团聚体颗粒组,分析其水稻土中有机碳固定与团聚体的物理保护作用的关系,为充实与水稻土碳循环有关的土壤学理论积累科学资料,并为发展稻田固碳技术提供科学依据。

^{*} 国家自然科学基金重点项目 (40231016) 和国际合作重大项目 (40710019002) 资助

[†] 通讯作者, E-mail: pangexing@yahoo.com.cn

作者简介:周萍 (1982~), 女, 江苏滨海人, 博士研究生, 主要从事土壤有机碳及其组分化学研究

宋国菡 (1963~), 女, 山东泰安人, 博士, 主要从事农业土壤有机碳库研究

收稿日期: 2007-07-17; 收到修改稿日期: 2007-10-07

1 材料与方法

1.1 供试土壤

我国 90% 的水稻土分布在淮河以南的南方地区^[16],而四川盆地水稻区、华南水稻区、长江中下游水稻区是主要的水稻土分布地区^[19]。因此,本研究选择紫色土发育的紫色水稻土、红壤丘陵区红壤性水稻土及太湖地区水稻土,这些水稻土种植水稻的历史均超过 100 a。分别选取长期农业管理(施肥或耕作措施)定位试验条件下的土壤进行研究,这些长期试验下土壤有机碳的积累趋势已分别有研究报道^[20~22]。

1.1.1 紫色水稻土 重庆北碚区西南农业大学试验农场的稻田长期耕作定位试验田,土壤为中生代侏罗系沙溪庙灰棕紫色沙泥岩母质上发育的潜育型中性紫色水稻土,属钙质筒育水耕人为土(Cabhaplic Stagnic Anthrosols)^[23],为冲沟田。当地年均降雨量 1 105 mm,其中 70% 集中于 5 月至 9 月。长期耕作定位试验始于 1990 年,试验前一直采用一季中稻+冬水耕作制。试验设计如下:(1)冬水田平作(中稻-冬水田,CT-r),按传统方法每年三犁三耙翻耕植稻,水稻收获后灌冬水;(2)稻油轮作平作(中稻-油菜,CT-rr),平作水稻收获后,排干稻田积水,翻耕种油菜,油菜收获后灌水犁耙种水稻;(3)垄作免耕(中稻-冬水田,RT-r),作垄规格为:一垄一沟 55 cm,垄顶宽 25 cm,沟宽 30 cm,沟深 35 cm,每小区作 5 垄,水稻收获后免耕灌冬水,全年不耕不翻。

1.1.2 红壤性水稻土 江西省进贤县江西省红壤研究所的一个长期肥料定位试验田,土壤为第四纪红色黏土发育的潜育型水稻土,属酸性筒育水耕人为土(Acihaplic Stagnic Anthrosols)^[23]。当地属亚热带季风气候,年均降雨量 1 400 mm。长期定位试验始于 1981 年,本研究选择其中的 4 个施肥处理,

即:无肥区(CK)、化肥区(NPK)、有机肥区(OM)和有机无机肥配施区(NPKM)。每个处理 3 次重复,随机排列。除 CK 外,NPK 和 NPKM 每年化肥施用量均为 N 90 kg hm⁻²、P₂O₅ 45 kg hm⁻²、K₂O 75 kg hm⁻²;NPKM 每年早稻加施 22 500 kg hm⁻²紫云英(鲜重)、晚稻加施 22 500 kg hm⁻²猪粪(鲜重)。OM 每年早稻施 22 500 kg hm⁻²紫云英(鲜重)、晚稻施 22 500 kg hm⁻²猪粪(鲜重)。

1.1.3 太湖地区黄泥土 江苏省吴江市金家坝镇的长期肥料定位试验站,土壤为太湖地区湖积母质发育的典型潜育型水稻土黄泥土,属普通铁聚水耕人为土(Typical Fe-accumulic Stagnic Anthrosols)^[23]。当地属亚热带季风气候,年均降雨量 1 100 mm。该长期定位试验始于 1987 年,本研究选择其中的 4 个施肥处理,即:无肥区(NF)、化肥区(CF)、化肥与猪粪配施区(CFM)和化肥与秸秆配施区(CFS)。每个处理 3 次重复,随机排列。除 NF 外,各小区每年化肥施用量均为 N 427.5 kg hm⁻²、P₂O₅ 45 kg hm⁻²、K₂O 54 kg hm⁻²。CFS 每年加施 4 500 kg hm⁻²秸秆(鲜重),秸秆还田为每季作物各占 50%,作物收获后打碎翻入土壤。CFM 则每年加施 16 800 kg hm⁻²猪粪肥(鲜重),在秋季水稻收割后表施。种植制度为水稻-油菜轮作,水稻收割后免耕栽种油菜。

1.2 土壤样品采集

红壤性水稻土与紫色水稻土于 2002 年 12 月水稻收获后,黄泥土于 2003 年 12 月水稻收获后采集土样(0~15 cm),所有处理小区都进行三次重复采样。每个样品区按蛇形采样法随机 3 点采集混合样品(其中垄作免耕样品在垄畦采集),盛于不锈钢密封罐带回实验室,分出部分样品冷冻,其余样品置于 0~4℃ 冷藏。供试三种水稻土试验前的基本理化性状见表 1。

表 1 供试水稻土(0~15 cm)试验前的基本性质

Table 1 Initial basic properties of paddy soils studied (0~15 cm)

供试土壤 ¹⁾ Tested soil	测定年份 Year of measurement	pH (H ₂ O)	黏粒 Clay <2 μm (g kg ⁻¹)	CEC (cmol kg ⁻¹)	有机碳 Organic carbon (g kg ⁻¹)	全氮 Total N (g kg ⁻¹)
紫色水稻土 (PP) Cabhaplic SA	1990	7.10	144.2	26.02	13.40	1.74
红壤性水稻土 (RP) Acihaplic SA	1981	6.90	259.0	9.38	16.22	0.95
黄泥土 (TP) Typfec SA	1987	5.60	302.9	20.5	16.13	1.70

1) 土壤分类按龚子同等^[23] Soil classification following Gong *et al.*^[23], SA:水耕人为土^[23] Stagnic Anthrosols^[23]

1.3 样品分析测定方法

1.3.1 土壤团聚体颗粒组样品的分离制备 采用国际制土壤颗粒分级标准划定土壤团聚体颗粒组,依据 Stemmer等^[24]的方法分离并略作修改。称取土样 50.0 g,置于盛有 250 ml蒸馏水的烧杯中,浸泡过夜。探针式超声波发生器(JYD-650,上海之信仪器有限公司,2001)低能量(170 J min^{-1})超声分散 5 min。湿筛法分离出 2 000~200 μm 粒径的颗粒组,然后用沉降虹吸法分离出 200~20 μm 粒径的颗粒组,继而采用离心法分离出 20~2 μm 和 <2 μm 粒径的颗粒组。制得的颗粒组样品冷冻干燥后备用。

1.3.2 土壤有机碳含量的测定 全土和团聚体颗粒组的总有机碳用元素分析仪(Elementar Vario-max CNS Analyser,德国 Elementar公司,2003年)测定,无机碳用 High TOC(型)分析仪(德国 Element公司)测定,全碳与无机碳之差即为有机碳。所有样品均 2次平行测定。

1.3.3 土壤易氧化态有机碳含量的测定 采用 KMnO_4 氧化法测定^[25]。称取过 0.25 mm 筛的土壤样品(2次平行),含碳约 15 mg,于塑料离心管中,加入 $1/3 \text{ mol L}^{-1}$ 的 KMnO_4 溶液 25 ml,将离心管盖紧,振荡 1 h,然后以 $2 000 \text{ r min}^{-1}$ 离心 5 min,取上清液加水稀释 2 500倍后,分光光度计比色(565 nm 波长),同时设置空白样品并用同样的方法配制标准曲线。按每消耗 1 mmol KMnO_4 溶液相当于氧化 9 mg碳计算其含量。

1.4 数据统计

数据处理和统计分析在 Microsoft Excel 2 000 上进行。土壤间和不同处理间的差异采用 SPSS 1 110 软件进行方差分析,显著性检验设 $p < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 土壤团聚体颗粒组的分布

图 1 表明,供试三种水稻土耕层土壤的团聚体颗粒组成中,均以 200~20 μm 和 20~2 μm 颗粒组所占的比例最大,分别介于 22%~43% 和 27%~44% 之间;其次是 2 000~200 μm 粗团聚体颗粒组,介于 13%~28% 之间;<2 μm 微团聚体颗粒组所占的比例最小,仅为 4%~16%。说明 200~2 μm 微团聚体较多是南方典型水稻土团聚体分布的特点,水

稻土的微团聚化作用较为明显。黄雪夏⁽¹⁾、唐晓红等^[26]对该紫色水稻土团聚体分布的研究结果也表明,250~20 μm 粒组是优势团聚体。三种水稻土 2 000~200 μm 粗团聚体颗粒组的比例表现为红壤性水稻土>黄泥土>紫色水稻土,即红壤性水稻土和太湖地区黄泥土的粗团聚体形成作用较强,而紫色水稻土较弱。这可能是因为红壤性水稻土属于第四纪红色黏土,含有较多的胶结力很强的(铁铝)氧化物,黄泥土为湖积母质,其黏粒含量较高,有利于粗团聚体的形成;而紫色水稻土为紫色沙泥岩母质,黏粒和氧化铁铝含量均较低,因而其粗团聚体的形成作用相对较弱^[19]。

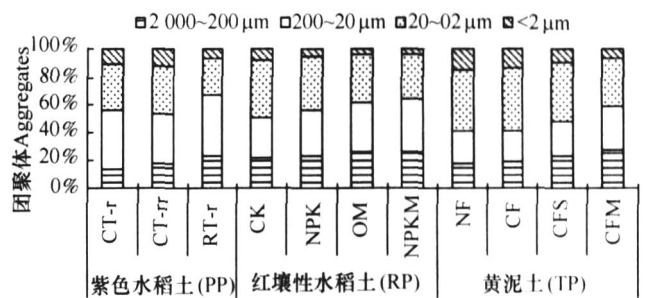


图 1 供试水稻土团聚体颗粒组的质量分数分布

Fig. 1 Distribution of particle-size fractions of aggregates in the studied paddy soils

2.2 全土与土壤团聚体颗粒组有机碳含量

如图 2 所示,供试三种水稻土全土 SOC 的含量介于 $17 \sim 27 \text{ g kg}^{-1}$ 之间,其中紫色水稻土在 $18 \sim 23 \text{ g kg}^{-1}$ 之间,其他两种酸性和微酸性水稻土在 $17 \sim 27 \text{ g kg}^{-1}$ 之间。团聚体颗粒组中的 SOC 含量依粒径大小而异,三种水稻土中均以 2 000~200 μm 和 <2 μm 粒组中 SOC 含量最高,分别介于 $19 \sim 34 \text{ g kg}^{-1}$ 和 $19 \sim 41 \text{ g kg}^{-1}$ 之间,即 SOC 主要向 2 000~200 μm 和 <2 μm 颗粒组中富集。这与李恋卿等^[7, 8]所研究的旱地红壤和太湖地区三种水稻土的团聚体颗粒组有机碳的分布特征相似。在 2 000~200 μm 粗团聚体颗粒组中, SOC 含量表现为紫色水稻土>红壤性水稻土>黄泥土。值得注意的是,紫色水稻土<2 μm 粒组中的 SOC 含量小于 2 000~200 μm 粗团聚体颗粒组中,而红壤性水稻土和黄泥土则相反,说明紫色水稻土<2 μm 颗粒组固定 SOC 的能力低于红壤性水稻土和黄泥土。前人研究报道^[27~29],紫色水稻土、黄泥土的黏土矿物组成分别以 2 1 型蒙脱石和 2 1 型水云母为主,而红壤性水

(1)黄雪夏. 紫色水稻土有机碳固定及碳汇效应. 西南农业大学博士学位论文, 2005

稻土则以 1 1型高岭石为主,其黏粒保护活性并不如紫色水稻土。可见,水稻土有机碳的微团聚体保护作用并不能用黏粒保护理论来解释,可能还与有机碳的结合机制有关。潘根兴等^[6]的研究已经指出,水稻土中有机碳不符合黏粒物理保护,而氧化铁可能在有机碳保护与稳定中有重要作用。

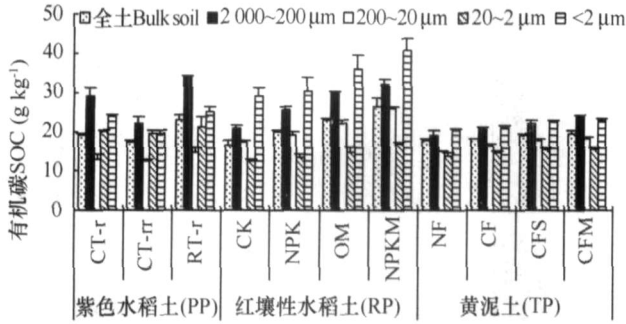


图 2 供试水稻土全土与团聚体颗粒组有机碳含量变化

Fig. 2 Variation of SOC content of bulk soil and particle-size fractions of aggregates in the studied paddy soils

2.3 全土与土壤团聚体颗粒组易氧化态有机碳含量

图 3表明,供试三种水稻土全土易氧化态有机碳 (Labile organic carbon, LOC)的含量介于 $7 \sim 11 \text{ g kg}^{-1}$ 之间,其中紫色水稻土在 $8 \sim 10 \text{ g kg}^{-1}$ 之间,其余两种水稻土介于 $7 \sim 11 \text{ g kg}^{-1}$ 之间。这与李恋卿等^[7]的太湖地区三种水稻土表层 LOC含量 ($9 \sim 12 \text{ g kg}^{-1}$)、徐秋芳等^[30]的阔叶林土壤和灌木林土壤的 LOC含量 (分别为 8 g kg^{-1} 和 10 g kg^{-1}) 结果相近。

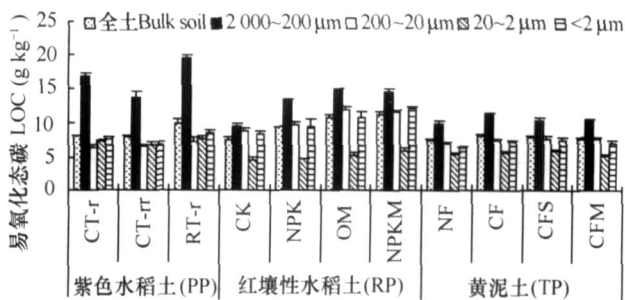


图 3 供试水稻土全土与团聚体颗粒组易氧化态碳含量变化

Fig. 3 Variation of LOC content of bulk soil and particle-size fractions of aggregates in the studied paddy soils

各团聚体颗粒组中 LOC的含量及其占 SOC的比例 (LOC/SOC)仍以 $2 000 \sim 200 \mu\text{m}$ 粒径中最高,分别为 $9 \sim 20 \text{ g kg}^{-1}$ 和 $44\% \sim 58\%$,即 LOC在

$2 000 \sim 200 \mu\text{m}$ 粗团聚体颗粒组中明显富集。该粒径 LOC在不同类型水稻土中的含量存在差异,表现为紫色水稻土 >红壤性水稻土 >黄泥土。该粒径粗团聚体中 LOC/SOC也是以紫色水稻土中明显最高,红壤性水稻土中最低。这些均与 SOC的团聚体分布类似,但该粒径团聚体颗粒组的比例却是以红壤性水稻土中最高,紫色水稻土中最低。可见,虽然紫色水稻土中单位的粗团聚体保护的 SOC、LOC含量较高,但这并未推动其粗团聚体的建成。这在讨论团聚体有机碳的物理保护与团聚体稳定性的关系时,值得进一步研究^[31]。

3 讨论

3.1 耕作施肥对土壤团聚体颗粒组成及其有机碳、易氧化态有机碳积累的影响

紫色水稻土中,垄作免耕 (RT-r)处理明显增加了 $2 000 \sim 200 \mu\text{m}$ 粗团聚体颗粒组的比例 (表 2),其增加幅度高达 82% ,远远高于稻油轮作平作 (CT-rf)处理 (34%)。这是因为免耕对水稻土的扰动作用较小,使得粗团聚体的周转较慢,促进微团聚体的形成,并促使土壤有机碳包裹在微团聚体中,进而形成更多的粗团聚体^[5]。黄雪夏⁽¹⁾、唐晓红等^[26]已经报道了垄作免耕对这种水稻土团聚体形成的促进作用。在太湖地区黄泥土和红壤性水稻土中,施肥明显增加了 $2 000 \sim 200 \mu\text{m}$ 和 $200 \sim 20 \mu\text{m}$ 较大粒径团聚体颗粒组的比例,且以有机无机肥配合施用下增加最多,其增加幅度在 $20\% \sim 50\%$ 之间,而单施化肥下其增加幅度还不到 10% 。这主要是因为有机无机肥配施下作物产量的增加带来了更多新鲜残茬,有利于较大粒径团聚体的形成。而对该两种水稻土长期试验点的历年稻谷产量的数据分析也表明,有机无机肥配施下稻谷历年产量均明显高于单施化肥处理^[32,33]。耕作施肥在促进较大粒径团聚体形成的同时,都伴随有更小粒径的微团聚体的减少。也就是说,耕作和施肥促进了微团聚体胶结形成较大粒径的团聚体。

由表 3、表 4 可见,紫色水稻土中,垄作免耕 (RT-r)明显增加了全土和 $2 000 \sim 200 \mu\text{m}$ 粗团聚体颗粒组的 SOC和 LOC含量,而对其他粒径团聚体的影响较小;稻油轮作平作 (CT-rf)下 SOC、LOC的含量并未增加,甚至在部分粒组有减少的趋势。表明

(1)黄雪夏. 紫色水稻土有机碳固定及碳汇效应. 西南农业大学博士学位论文, 2005

垄作免耕能够促进水稻土有机碳的增加,而稻油轮作平作处理并不利于有机碳的积累。在红壤性水稻土和黄泥土中,单施化肥(NPK)处理仅增加了较大粒径团聚体颗粒组中的SOC和LOC含量,而有机

表 2 耕作施肥长期处理下供试水稻土团聚体颗粒组质量分数的积累变化

Table 2 Variation of aggregate particle-size fractions in studied paddy soils under long term fertilization

土壤类型 Soil type	处理代号 Treatment code	团聚体颗粒组积累 Accumulation of aggregates (%)			
		2 000 ~ 200 μm	200 ~ 20 μm	20 ~ 2 μm	<2 μm
紫色水稻土 (PP) Cabhaplic SA	CT-r	—	—	—	—
	CT-rr	4.42 ±0.09	- 5.85 ±0.29	- 0.85 ±0.10	2.28 ±0.71
	RT-r	10.82 ±0.00	0.80 ±0.17	- 7.51 ±0.30	- 4.11 ±0.64
	CK	—	—	—	—
红壤性水稻土 (RP) Acihaplic SA	NPK	1.87 ±0.20	2.96 ±0.93	- 2.76 ±0.76	- 2.07 ±0.68
	OM	3.57 ±0.23	6.88 ±0.13	- 7.27 ±0.08	- 3.18 ±0.09
	NPKM	4.22 ±0.18	9.27 ±0.15	- 9.23 ±0.07	- 4.26 ±0.28
	NF	—	—	—	—
黄泥土 (TP) Typfec SA	CF	1.12 ±0.39	- 1.06 ±0.42	1.46 ±0.32	- 1.52 ±0.20
	CFS	5.21 ±0.61	1.54 ±0.04	0.01 ±0.00	- 6.76 ±0.03
	CFM	9.39 ±0.54	8.57 ±0.38	- 9.73 ±0.29	- 8.23 ±0.68

表 3 耕作施肥长期处理下供试水稻土有机碳的积累变化

Table 3 Accumulation of SOC in studied paddy soils under long term cultivation and fertilization

土壤类型 Soil type	处理代号 Treatment code	有机碳积累 Accumulation of SOC (g kg ⁻¹)				
		全土 Bulk soi	2 000 ~ 200 μm	200 ~ 20 μm	20 ~ 2 μm	<2 μm
紫色水稻土 (PP) Cabhaplic SA	CT-r	—	—	—	—	—
	CT-rr	- 1.68 ±0.20	- 7.17 ±0.08	- 0.31 ±0.06	- 0.46 ±0.03	- 4.65 ±0.68
	RT-r	3.72 ±1.05	4.71 ±1.09	1.69 ±0.01	1.66 ±0.59	1.42 ±0.41
红壤性水稻土 (RP) Acihaplic SA	CK	—	—	—	—	—
	NPK	3.50 ±0.77	4.67 ±0.13	1.55 ±0.38	0.52 ±0.02	1.07 ±0.36
	OM	6.16 ±0.44	9.55 ±0.84	4.75 ±0.33	1.95 ±0.28	6.95 ±1.49
	NPKM	9.88 ±0.75	11.59 ±0.20	8.40 ±0.31	4.33 ±0.06	11.72 ±0.99
黄泥土 (TP) Typfec SA	NF	—	—	—	—	—
	CF	0.40 ±0.03	1.57 ±0.48	1.25 ±0.45	0.74 ±0.03	1.00 ±0.01
	CFS	1.61 ±0.43	2.69 ±0.13	2.56 ±0.24	1.73 ±0.25	2.23 ±0.05
	CFM	2.00 ±0.09	4.57 ±0.61	2.92 ±0.42	1.73 ±0.27	2.53 ±0.05

表 4 耕作施肥长期处理下供试水稻土易氧化态碳的积累变化

Table 4 Accumulation of LOC in studied paddy soils under long term cultivation and fertilization

土壤类型 Soil type	处理代号 Treatment code	易氧化态碳积累 Accumulation of LOC (g kg ⁻¹)				
		全土 Bulk soil	2 000 ~ 200 μm	200 ~ 20 μm	20 ~ 2 μm	<2 μm
紫色水稻土 (PP) Cabhaplic SA	CT-r	—	—	—	—	—
	CT-rr	- 0.27 ±0.06	- 3.01 ±0.26	0.14 ±0.01	- 0.45 ±0.10	- 1.18 ±0.33
	RT-r	1.82 ±0.62	2.78 ±0.15	0.75 ±0.13	0.39 ±0.09	0.78 ±0.18
红壤性水稻土 (RP) Acihaplic SA	CK	—	—	—	—	—
	NPK	2.10 ±0.36	3.97 ±0.32	0.85 ±0.16	0.13 ±0.05	1.19 ±0.58
	OM	3.52 ±0.03	5.49 ±0.26	3.16 ±0.01	0.69 ±0.13	2.49 ±0.52
	NPKM	3.83 ±0.08	5.19 ±0.12	2.80 ±0.02	1.28 ±0.09	3.82 ±0.26
黄泥土 (TP) Typfec SA	NF	—	—	—	—	—
	CF	0.68 ±0.04	1.42 ±0.26	0.57 ±0.05	0.18 ±0.09	0.88 ±0.12
	CFS	0.34 ±0.04	0.53 ±0.02	0.80 ±0.11	0.45 ±0.09	1.15 ±0.25
	CFM	0.16 ±0.05	0.65 ±0.25	0.68 ±0.07	- 0.22 ±0.01	0.72 ±0.22

无机肥配施处理下全土和各粒径团聚体颗粒组中的 SOC、LOC 均有明显增加,其积累有机碳的效果明显优于单施化肥处理。三种水稻土以红壤性水稻土粗团聚体颗粒组中积累的有机碳较多,表明红壤性水稻土在良好的施肥管理下团聚体积累有机碳的能力较快较高,这可能与红壤性水稻土有机碳的结合机制有关。垄作免耕 (RT-r) 下紫色水稻土全土 SOC 的积累优于施肥下黄泥土全土 SOC 的积累,但其余微团聚体颗粒组中 SOC 的积累却不如黄泥土,说明紫色水稻土有机碳的积累主要通过垄作下粗团聚体的形成而积累^[34],而黄泥土中由于黏粒含量较多,各粒级微团聚体均有可能保护并积累了有机碳。

3.2 土壤固碳与团聚体保护作用

由上述分析可知,耕作和施肥的长期处理下供试水稻土中粗团聚体颗粒组含量、SOC 和 LOC 含量均出现了强烈的变化。将各粒径团聚体颗粒组增加的质量分数分别与全土 SOC 和 LOC 的积累量作统计相关性分析,结果表明:水稻土全土 SOC 积累量与 2 000 ~ 200 μm 和 200 ~ 20 μm 粗团聚体颗粒组增加的质量分数均存在明显的正相关关系,与 20 ~ 2 μm 和 < 2 μm 微团聚体颗粒组的质量分数变化表现为负相关关系,以红壤性水稻土的关系斜率最大。可见,土壤微团聚体胶结成粗团聚体的过程贡献于有机碳的积累,以红壤性水稻土粗团聚体的团聚作用较好,对有机碳的保护作用较强;黄泥土由于其黏粒含量较高,各级微团聚体均可保护并积累有机碳,其黏粒结合的有机碳达到饱和的时间较长,有机碳向粗团聚体的积累比较缓慢。良好的耕作和施肥下水稻土新增有机碳主要向粗团聚体颗粒组富集,这些粗团聚体颗粒组是土壤新增有机碳的主要载体。并且红壤性水稻土中的粗团聚体形成更加敏感地响应于新鲜有机碳的增加,这可能与该土壤中丰富的氧化物与有机碳的稳定结合有关。可以表明,合理的耕作施肥下土壤有机碳积累的主要原因是粗团聚体的物理保护作用得到了保障。Six 等^[5]也指出,团聚体形成作用是土壤碳固定的最重要的机制。李恋卿等^[7-9]对退化红壤和太湖地区黄泥土的研究,张旭辉等^[35]对白浆土的研究均表明,新固定的有机碳主要分布于 2 000 ~ 250 μm 粗团聚体颗粒组中。Spaccini 等^[36]在对热带非洲森林和森林开垦为农地的土壤团聚体颗粒组中有机碳和碳水化合物含量的变化研究中指出,耕作引起的总碳损失在砂质土中明显高于黏质土(酸性,富氧

化铁铝)中,并把这归结于耕作引起团聚体破坏,使土壤失去了物理保护,细的富有机碳和碳水化合物颗粒(键合稳定态碳)侵蚀流失所致。Unger^[37]对旱地土壤团聚体和有机碳的研究也表明,旱地土壤中有有机碳积累特别是免耕条件下的有机碳快速积累主要是因为团聚体形成、稳定和更新的保护,从而降低土壤的侵蚀破坏及由此导致的有机碳损失。

在紫色水稻土和红壤性水稻土中,全土新增 LOC 与团聚体颗粒组的质量分数的变化关系与 SOC 一致,也是在粗团聚体中呈正相关关系,而在 < 20 μm 团聚体中呈负相关关系。并且以红壤性水稻土的响应更为敏感;而黄泥土中两者的关系正好相反,LOC 一直呈下降的趋势。可见,新形成的粗团聚体对 LOC 的保护因土壤类型的不同而存在差异,以红壤性水稻土的保护作用较强,而黄泥土新形成的粗团聚体并不能促进 LOC 的积累,LOC 呈现减少的趋势。这与其保护机制的关系如何还有待于进一步的分析。

3.3 土壤有机碳积累的饱和限

有研究表明,土壤有机碳固定中的团聚体保护机制可能说明有机碳的固定效应^[38, 39],团聚体保护能力或容量是土壤固碳的自然潜力的物理基础^[31]。本研究结果也表明,良好的耕作和施肥下新增有机碳主要集中于水稻土的粗团聚体颗粒组中。本研究中将供试所有样点的全土和 2 000 ~ 200 μm 粗团聚体的 SOC 积累量(与对照相比)进行综合统计(图 4),结果表明,全土 SOC 的积累量与 2 000 ~ 200 μm 粗团聚体中的 SOC 的积累量之间存在一元二次的抛物线方程关系,拟合方程为: $Y = -0.1238X^2 + 2.5067X - 1.3703$, $R^2 = 0.9464$, $n = 8$ 。式中, Y 为粗团聚体中的 SOC 积累量 (g kg^{-1}), X 为全土 SOC 积累量 (g kg^{-1})。对此一元二次方程求解得到,当 $X = 10.12$ 时, Y 将达到最大值 11.32。也就是说,当土壤有机碳积累量达到 10.12 g kg^{-1} 时,粗团聚体所保护的有机碳将达到其饱和点。亦即,粗团聚体所保护的有机碳将不再随着本体土壤有机碳积累而增加。而 2 000 ~ 200 μm 粗团聚体颗粒组与全土 SOC 积累量间并不存在相关性。由上述分析可见,农业管理措施下土壤有机碳积累中的团聚体保护作用存在着一个饱和限,这可能是土壤碳汇饱和的机制。图 4 还示明,除了红壤性水稻土 NPKM 处理下团聚体保护接近饱和状态外(图中最右端对应点),供试水稻土其余所有样点的粗团聚体有机碳还未达到其饱和限,本研究不同处理下的土壤中,

粗团聚体的有机碳含量的最大变化量也仅为 9.55 g kg^{-1} , 远远小于其饱和点 11.32 g kg^{-1} , 粗团聚体依然具有明显的保护潜力, 其土壤有机碳含量有望有较大幅度的增长。

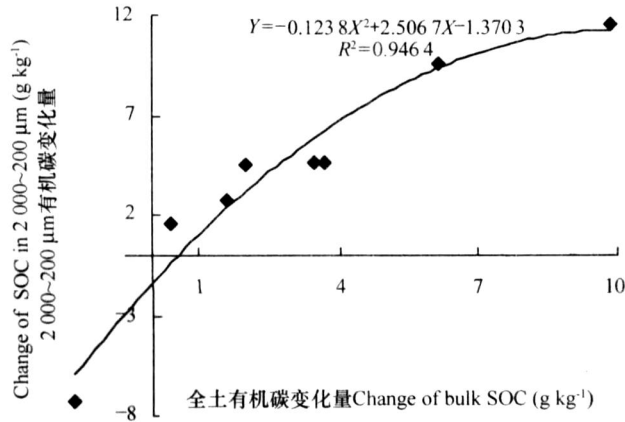


图 4 水稻土全土新积累有机碳与粗团聚体颗粒组有机碳增加的关系

Fig. 4 Relationship between newly accumulated SOC in bulk soil and increment of SOC in coarse fraction of aggregates

4 结 论

供试南方三种典型水稻土团聚体颗粒组的组成以 $200 \sim 20 \mu\text{m}$ 和 $20 \sim 2 \mu\text{m}$ 粒径为主。土壤有机碳主要向 $2000 \sim 200 \mu\text{m}$ 和 $< 2 \mu\text{m}$ 颗粒组中聚集, 土壤易氧化态有机碳主要向 $2000 \sim 200 \mu\text{m}$ 粗团聚体颗粒组中聚集。垄作免耕和有机无机配合施肥促进了微团聚体胶结形成较大粒径的粗团聚体, 该粗团聚体是水稻土新增有机碳的主要载体, 并且以红壤性水稻土中的粗团聚体形成更加敏感地响应于新鲜有机碳的增加, 这可能与该土壤中丰富的氧化物与有机碳的稳定结合有关。土壤粗团聚体的物理保护对有机碳积累起着重要的作用, 其对新增有机碳的团聚体保护作用存在着一个饱和限。供试南方典型水稻土的粗团聚体有机碳还未达到其饱和限, 粗团聚体依然具有巨大的保护潜力。但土壤有机碳与土壤易氧化态有机碳在团聚体中的分布因土壤类型而异, 需要进一步研究其积累机制。

参 考 文 献

- [1] 潘根兴. 地球表层系统土壤学. 北京: 地质出版社, 2000. 70~81. Pan G X. Soil Science of Earth Surface System (In Chinese). Beijing: China Geology Press, 2000. 70~81
- [2] Pulleman M M, Marinissen J C Y. Physical protection of mineralizable C in aggregates from long-term pasture and arable soil. *Geoderma*, 2004, 120: 273~282
- [3] Mikutta R, Kleber M, Margarets T, *et al*. Stabilization of soil organic matter: Association with minerals or chemical recalcitrance. *Biogeochemistry*, 2006, 77: 25~56
- [4] Blanco-Canqui H, Lal R. Mechanisms of carbon sequestration in soil aggregates. *Critical Reviews in Plant Science*, 2004, 23(6): 481~504
- [5] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32: 2099~2103
- [6] 潘根兴, 李恋卿, 张旭辉, 等. 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. Pan G X, Li L Q, Zhang X H, *et al*. Soil organic carbon storage of China and the sequestration dynamics in agricultural lands (In Chinese). *Advances in Earth Science*, 2003, 18(4): 609~618
- [7] 李恋卿, 潘根兴, 龚伟, 等. 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. Li L Q, Pan G X, Gong W, *et al*. Organic carbon storage in selected paddy soils in Taihu Lake region and their occurrence (In Chinese). *Bulletin of Science and Technology*, 2000, 11(6): 421~426
- [8] 李恋卿, 潘根兴, 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. Li L Q, Pan G X, Zhang X H. Change in organic carbon storage in aggregates of the surface horizon in a degraded Paleudlt upon vegetation recovery (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 2000, 31(5): 193~195
- [9] 李恋卿, 潘根兴, 张旭辉, 等. 土壤团聚体有机碳稳定性同位素组成. *南京农业大学学报*, 2000, 23(1): 114~116. Li L Q, Pan G X, Zhang X H, *et al*. Stable isotopic composition of organic carbon in soil aggregates (In Chinese). *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2000, 23(1): 114~116
- [10] 李恋卿, 潘根兴, 张平究, 等. 植被恢复对退化红壤表层土壤颗粒中有机碳和 Pb、Cd 分布的影响. *生态学报*, 2001, 21(11): 1769~1774. Li L Q, Pan G X, Zhang P J, *et al*. Vegetation recovery in degraded red earth: effect on organic carbon and Pb and Cd partitioning in soil particle size fractions (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(11): 1769~1774
- [11] 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. *中国农业科学*, 2000, 33(5): 65~71. Xu Y C, Shen Q R. Influence of long-term application of manure on the contents and distribution of organic C, total N and P in soil particle-sizes (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 2000, 33(5): 65~71
- [12] Pan G X, Li L Q, Zhang X H, *et al*. Storage and sequestration of organic carbon in major paddy soils of China: Mechanism, stability and the impact on global change. *Journal of Environment Society*, 2005, 17(1): 7~16
- [13] 张平究, 李恋卿, 潘根兴, 等. 长期不同施肥下太湖地区黄

- 泥土表土微生物碳氮量及基因多样性变化. 生态学报, 2004, 24(12): 2 818 ~ 2 824. Zhang P J, Li L Q, Pan G X, *et al* Influence of long-term fertilizer management on top soil microbial biomass and genetic diversity of a paddy soil from the Tai Lake region, China (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(12): 2 818 ~ 2 824
- [14] Li L Q, Zhang X H, Zhang P J, *et al* Variation of organic carbon and nitrogen in aggregate size fractions of a paddy soil under fertilization practices from Tai Lake region, China. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2007, 87: 1 052 ~ 1 058
- [15] Zhang P J, Zheng J F, Pan G X, *et al* Changes in microbial community structure and function within particle size fractions of a paddy soil under different long-term fertilization treatments from the Tai Lake region, China. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2007, 58: 264 ~ 270
- [16] Pan G X, Li L Q, Wu L S, *et al* Storage and sequestration potential of top soil organic carbon in China's paddy soils. *Global Change Biology*, 2003, 10: 79 ~ 92
- [17] Huang Y, Sun W J. Tendency of SOC change in cropland soils of China over the last 20 years. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(15): 1 785 ~ 1 803
- [18] 李忠佩, 吴大付. 红壤水稻土有机碳库的平衡值确定及固碳潜力分析. 土壤学报, 2006, 43(1): 46 ~ 51. Li Z P, Wu D F. Organic carbon content at a steady state and the potential of C sequestration of paddy soils in subtropical China (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(1): 46 ~ 51
- [19] 李庆逵. 中国水稻土. 北京: 科学出版社, 1992. 145 ~ 161. Li Q K. *Paddy Soils of China* (In Chinese). Beijing: Science Press, 1992. 145 ~ 161
- [20] Huang X X, Gao M, Wei C F, *et al* Tillage effect on organic carbon in a purple paddy soil. *Pedosphere*, 2006, 16(5): 660 ~ 667
- [21] 周萍, 张旭辉, 潘根兴. 长期不同施肥对太湖地区黄泥土总有机碳及颗粒态有机碳含量及深度分布的影响. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(6): 765 ~ 771. Zhou P, Zhang X H, Pan G X. Effect of long-term fertilization on content of total and particulate organic carbon and their depth distribution of a paddy soil: An example of huangnitu from the Tai Lake region, China (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(6): 765 ~ 771
- [22] 袁颖红, 李辉信, 黄欠如, 等. 不同施肥处理对红壤性水稻土微团聚体有机碳汇的影响. 生态学报, 2004, 24(12): 2 961 ~ 2 966. Yuan Y H, Li H X, Huang Q R, *et al* Effects of different fertilization on soil organic carbon distribution and storage in micro-aggregates of red paddy top soil (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(12): 2 961 ~ 2 966
- [23] 龚子同, 等. 中国土壤系统分类—理论. 方法. 实践. 北京: 科学出版社, 1999. 109 ~ 164. Gong Z T, *et al* *Soil Taxonomic Classification of China: Theory, Methodology and Applications* (In Chinese). Beijing: Science Press, 1999. 109 ~ 164
- [24] Stemmer M, Gerzabek M H, Kandeler E. Organic matter and enzyme activity in particle-size fractions of soils obtained after lower energy sanitation. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, 30: 9 ~ 18
- [25] Blair J G, Lefroy R D, Lisle L. Soil carbon fractions based on the degree of oxidation and the development of a carbon management index for agricultural systems. *Austrian Journal of Agricultural Research*, 1995, 46: 1 459 ~ 1 466
- [26] 唐晓红, 邵景安, 黄雪夏, 等. 垄作免耕下紫色水稻土有机碳的分布特征. 土壤学报, 2007, 44(2): 235 ~ 243. Tang X H, Shao J A, Huang X X, *et al* Distribution of soil organic carbon in purple paddy field under long-term non-tillage ridge culture (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(2): 235 ~ 243
- [27] 范本兰, 杜国华. 江西低丘红壤性水稻土的主要化学特性研究. 土壤学报, 1985, 22(2): 183 ~ 190. Fan B L, Du G H. Studies on the principal chemical properties of paddy soil from red earth (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 1985, 22(2): 183 ~ 190
- [28] 王军, 陈世正. 四川紫色水稻土胶体比表面及其主要影响因素研究. 西南农业大学学报, 1991, 13(3): 296 ~ 301. Wang J, Chen S Z. Studies of specific surface area (SSA) of Sichuan purple paddy soil colloids and the factors affecting it (In Chinese). *Journal of Southwest Agricultural University*, 1991, 13(3): 296 ~ 301
- [29] 邓时琴, 徐梦熊. 中国土壤颗粒研究 II 太湖地区黄泥土型水稻土及其各级颗粒的理化特性. 土壤学报, 1986, 23(1): 57 ~ 68. Deng S Q, Xu M X. Studies on soil particles in China II Some physical and chemical properties of soil particles of different size fractions in the permeable paddy soil of Tai Lake basin (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 1986, 23(1): 57 ~ 68
- [30] 徐秋芳, 姜培坤, 沈泉. 灌木林与阔叶林土壤有机碳库的比较研究. 北京林业大学学报, 2005, 7(2): 18 ~ 22. Xu Q F, Jiang P K, Shen Q. Comparison of organic carbon pool of soil in bush and broad-leaved forests (In Chinese). *Journal of Beijing Forestry University*, 2005, 7(2): 18 ~ 22
- [31] 潘根兴, 周萍, 李恋卿, 等. 固碳土壤学的核心科学问题与研究进展. 土壤学报, 2007, 44(2): 327 ~ 337. Pan G X, Zhou P, Li L Q, *et al* Core issues and research progresses of soil science of C sequestration (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(2): 327 ~ 337
- [32] 黄欠如, 胡锋, 李辉信, 等. 红壤性水稻土施肥的产量效应及与气候、地力的关系. 土壤学报, 2006, 43(6): 926 ~ 933. Huang Q R, Hu F, Li H X, *et al* Crop yield response to fertilization and its relations with climate and soil fertility in red paddy soil (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(6): 926 ~ 933
- [33] 潘根兴, 周萍, 张旭辉, 等. 不同施肥对水稻土作物碳同化与土壤碳固定的影响—以太湖地区黄泥土肥料长期试验为例. 生态学报, 2006, 26(11): 3 704 ~ 3 710. Pan G X, Zhou P, Zhang X H, *et al* Effect of different fertilization practices on crop carbon assimilation and soil carbon sequestration: A case of a paddy under a long-term fertilization trial from the Tai Lake region, China (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(11): 3 704 ~ 3 710
- [34] 高明, 李阳兵, 魏朝富, 等. 稻田长期垄作免耕对土壤肥力

- 性状的影响研究. 水土保持学报, 2005, 19(3): 29~33.
- Gao M, Li Y B, Wei C F, *et al* Effects of long-term no-tillage ridge culture on soil properties of paddy field (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19(3): 29~33
- [35] 张旭辉, 李恋卿, 潘根兴. 不同轮作制度对淮北白浆土团聚体及其有机碳的积累和分布的影响. 生态学杂志, 2001, 20(2): 16~19. 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, China (In Chinese). Chinese Journal of Ecology, 2001, 20(2): 16~19
- [36] Spaccini R, Zena A, Iqbal C A, *et al* Carbohydrates in water-stable aggregates and particle size fractions of forested and cultivated soils in two contrasting tropical ecosystems. Biogeochemistry, 2001, 53: 1~22
- [37] Unger P W. Aggregate and organic carbon interrelationships of a Torric Paleustoll. Soil and Tillage Research, 1997, 42: 95~113
- [38] Bear M H, Cabrera M L, Hendrix P F, *et al* Aggregate protected and unprotected organic matter pools in conventional and no-tillage soils. Soil Science Society of American Journal, 1994, 58: 787~795
- [39] Jastrow J D. Soil aggregate formation and the accrual of particulate and mineral associated organic matter. Soil Science Society of American Journal, 1996, 60: 801~807

SOC ACCUMULATION IN THREE MAJOR TYPES OF PADDY SOILS UNDER LONG-TERM AGRO-ECOSYSTEM EXPERIMENTS FROM SOUTH CHINA . PHYSICAL PROTECTION IN SOIL MICRO-AGGREGATES

Zhou Ping¹ Song Guohan^{1,2} Pan Genxing^{1†} Li Lianqing¹ Zhang Xuhui¹ Laosheng Wu³

(1 Institute of Resources, Ecosystem and Environment of Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

(2 Jinan Tobacco Monopoly Administration, Jinan 250100, China)

(3 Department of Environmental Sciences, University of California Riverside, CA 92521, USA)

Abstract In this study, physical protection of soil organic carbon (SOC) in particle size fractions of paddy soils was investigated using cross-site study of top soil samples from three sites of long term soil-agro-ecosystem experiments from South China. Undisturbed top soil samples collected at 0~15 cm were used for size fractions of micro-aggregates by low-energy ultra-sonic dispersion procedure. SOC content and its distribution in particle-size fractions under different fertilization and cultivation treatments were analyzed to address the relationship between SOC accumulation and physical protection of aggregates. The results were as follows: the distribution of particle-size fractions of three tested paddy soils was dominated by 200~20 μm and 20~2 μm fractions (22%~43% and 27%~44%), showing prominent micro-aggregation in these paddy soils. SOC content was higher in fractions of 2000~200 μm and <2 μm than in the other fractions, while labile organic carbon (LOC) content and LOC/SOC ratio higher in the coarse fraction of 2000~200 μm only. The newly accumulated young SOC found its fate mainly in the coarse fraction of 2000~200 μm in active response to tillage and fertilization treatments. Of the three studied paddy soils, SOC and LOC in the red-earth derived paddy soil showed most intense response to fertilization treatments, exerting a most prominent trend of SOC accumulation under well management practices. Furthermore, statistic analysis indicated significant parabola relationship between SOC accumulation in bulk soil and in 2000~200 μm coarse fraction. Therefore, it is inferred that accumulation of young SOC of top soil may reach a saturation controlled by the physical protection in the coarse particle-size fractions. However, as shown by the calculation using the curve obtained, the maximum protection capacity by the coarse micro-aggregates of the three tested paddy soils had not yet realized, still possessing obviously a potential of carbon sequestration. The higher potential in the red-earth derived paddy soil suggests that C sequestration had been mostly obvious in paddy soils from South China especially those in the Red soil region. Physical protection in soil aggregates and carbon sequestration of paddy soil may also involve the binding of physically protected SOC in aggregates and chemical stabilization of SOC in the paddy soils rich in iron oxy-hydrates.

Key words C sequestration; Long-term experiment; Micro-aggregates; Paddy soils; Soil organic carbon