

连续种植超级稻对土壤有机碳及团聚体稳定性的影响

孟远夺, 潘根兴*

(南京农业大学农业资源与生态环境研究所, 南京 210095)

摘要: 分别在长江中下游地区 3 处超级稻育种试验基地, 选择多年连续种植超级稻和未种植超级稻的稻田, 于水稻收获后采集表土未破坏土壤样品, 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, 研究超级稻连续种植后有机碳含量变化及其有机碳在团聚体颗粒组中的分配, 探讨连续种植超级稻对土壤有机碳和团聚体稳定性的影响。结果表明: 连续种植超级稻后, 水稻土表土有机碳含量均下降, 降幅介于 3%~14%; 团聚体颗粒组组成以 2 000~200 μm 和 200~20 μm 粒径为主, 有机碳在 2 000~200 μm 和 <2 μm 两个粒径中最高; 连续种植超级稻后 2 000~200 μm 大团聚体颗粒组质量分数提高, 土壤团聚体稳定性增强。连续种植超级稻后有机碳含量下降可能是土壤短期的一种响应机制, 长期来看并不改变水稻土的固碳潜力。

关键词: 超级稻; 水稻土; 有机碳; 团聚体稳定性

中图分类号: X53 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2011)09-1822-08

Effects of Continuous Super Rice Planting on Organic Carbon and Aggregates Stability

MENG Yuan-duo, PAN Gen-xing*

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

Abstract: In this study, Soil organic carbon (SOC), soil aggregates and SOC distribution in aggregates were investigated using cross-site study, the top-soil samples were from three sites of continuous super-rice planting experiments in the mid-lower Yangtze River. Undisturbed top-soil samples were separated to different size aggregates by low-energy ultra-sonic dispersion procedure. Soil aggregates, variation of SOC and SOC distribution in aggregates were analyzed to illuminate the effects on aggregates stability and SOC reserves after continuous super-rice planting. The content of SOC decreased in three sampling sites after continuous super-rice planting, decreasing from 3% to 14%; SOC content was higher in aggregate of 2 000~200 μm and <2 μm than in the others, and the content of SOC decreased after continuous super-rice planting in these aggregates. The distribution of aggregates was dominated by 2 000~200 μm and 200~20 μm fractions, and the content of 2 000~200 μm macro-aggregates and soil aggregate stability increased after continuous super-rice planting. Decreasing SOC was a soil dynamics after continuous super-rice planting in short time, but did not change the carbon storage potential in long time.

Keywords: super rice; paddy soil; SOC; aggregate stability

土壤结构是维持土壤功能的关键要素, 而土壤团聚体稳定性常作为土壤结构的一个重要指标。土壤有机碳在团聚体中的分配是团聚体形成和稳定的重要条件, 反过来也是土壤中有机碳稳定性的重要影响因素^[1-2]。以往研究认识到, 水稻土中新积累的碳主要分配于粗团聚体中, 因而粗团聚体的物理保护是水稻土

固碳的重要机制之一^[3]。近年来, 关于水稻土团聚体颗粒组有机碳分配^[4]及其与地上部植被的关系^[5]的研究较为活跃, 这些研究认识到新鲜有机碳(凋落物和根系)输入土壤之后强烈影响有机碳的固定和分配。

水稻土是水稻及其影响下的土壤相互作用的产物。水稻的品种及其生长和生物量生产是水稻土土壤-作物碳流通交换的重要物质来源, 作为新的微生物碳源物质也可能影响原有有机碳的更新。超级稻作为根系活力更强的品种得到推广是我国水稻生产的发展趋势。

目前对于超级稻种植下土壤有机质及物理性质的

收稿日期: 2011-03-19

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(40830528)

作者简介: 孟远夺(1985—), 男, 硕士研究生, 主要从事土壤质量研究。

E-mail: yuanduo1012@163.com

* 通讯作者: 潘根兴 E-mail: panggenxing@yahoo.com.cn

变化少有报道,因而严重制约超级稻对水稻土性质影响的判断以及相应土壤管理措施的建立。本研究选取长江中下游地区3个不同地点超级稻育种推广单位的超级稻连续试验种植3a以上的基地田和未种植超级稻的稻田,采集表土0~15 cm深度土壤样品,利用低能量探针型超声波仪分散-湿筛-分组-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,研究了连续种植超级稻对土壤有机碳含量及其团聚体分布的影响,为明确超级稻对水稻土质量以及超级稻对于水稻土碳循环过程的潜在影响提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

我国水稻土90%分布在淮河以南的南方地区,而长江中下游地区是我国主要的水稻土分布地区之一。本研究选择超级稻种植较广的安徽巢湖、湖南浏阳和江苏兴化3个地区,在当地超级稻育种和技术推广单位试验基地选择连续种植超级稻3a以上的田块,并选择附近未种超级稻的相应稻田土壤进行对比研究。3个供试超级稻种植基地情况如下:

(1)安徽省农科院水稻所高产水稻示范基地,位于安徽省巢湖市居巢区中埠镇建华村(E:117°47',N:31°39'),土壤为湖积母质发育的潜育型水稻土。2005—2009年大田试验各小区连续种植同一水稻品种,轮作制度为稻油轮作(水稻-悬耕-油菜)。3个超级稻品种按随机区组设计,每个小区3次重复,分别为:新两优6号(简称CH-X6)、丰两优4号(CH-F4)、扬两优6号(CH-Y6),其中农田常规稻品种为皖稻153(CH-CK),3个超级稻品种和常规稻施肥、管理和轮作制度相似,施氮量约160 kg N·hm⁻²。

(2)湖南省浏阳市永安镇农技站实验农场(E:113°17',N:28°13'),为国家超级水稻试验推广示范

基地,土壤为红壤性水稻土。田间试验设计如下:①双季常规稻(CS-CK),早晚稻均为当地品种,采用双季稻-冬闲的轮作方式,连续种植5a;②超级稻+油菜(CS-CY),早稻品种为Y优2号,稻油轮作,连续种植4a;③双季超级稻(CS-CJ),早稻品种为819,晚稻为丰源优299,采用双季稻-冬闲的轮作方式,连续种植6a。

(3)江苏省兴化市钓鱼镇高效农业示范基地(E:197°57',N:33°05'),土壤为沼泽土发育的脱潜水稻土。田间试验开始于2006年,3个超级稻品种分别为宁粳3号(XH-N3)、甬优8号(XH-Y8)和南粳44(XH-N4),常规稻为淮稻5号(XH-CK)。稻-油轮作制度,施氮量205 kg·hm⁻²,按随机区组设计,每个品种3次重复。

1.2 样品采集

样品采集于2009年水稻收获后进行。采样时每小区按“蛇形”随机5点采集0~15 cm土壤样品,田间混合后装袋,将土样盛于不锈钢密封罐内带回实验室,分出一半鲜样置于4℃冰箱中冷藏,另一半样品剔除可见的植物残体和石块后,风干,过2 mm筛备用。在1个样点连续种植超级稻的不同品种小区随机选1个重复土样,与种植常规稻的3个小区同时测定土壤的基本理化性质,供试3个样点水稻土连续种植超级稻与未种植超级稻后的基本理化性质见表1。

1.3 土壤团聚体颗粒组分离

采用国际制土壤颗粒分级标准划分土壤团聚体颗粒组,依据Stemmer等^[6]的方法分离并略作修改。称取鲜土样50.0 g,置于盛有250 mL蒸馏水的烧杯中,浸泡过夜。用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

表1 供试水稻土(0~15 cm)基本理化性质

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

采样点 sampling site	代号 Code	pH(H ₂ O)	SOC/g·kg ⁻¹	全氮 Total N/g·kg ⁻¹	POC/g·kg ⁻¹	粘粒 Clay/g·kg ⁻¹
安徽巢湖 Chaohu Anhui	a	6.59±0.11	23.79±0.33	1.84±0.02	4.70±0.65	594.67±2.31
	b	6.91±0.11	22.28±1.02	1.72±0.15	5.27±0.90	612.00±22.90
湖南浏阳 Liuyang Hunan	a	5.73±0.14	21.57±0.28	1.67±0.06	3.05±0.13	412.67±34.08
	b	5.52±0.14	20.02±0.32	1.66±0.10	3.66±0.37	365.00±36.96
江苏兴化 Xinghua Jiangsu	a	7.22±0.09	14.56±0.24	1.16±0.01	2.76±0.23	340.67±12.86
	b	7.25±0.13	13.53±0.60	1.14±0.06	2.95±0.34	326.89±12.17

注:“a”表示种植常规稻;“b”表示连续种植超级稻。

Note: "a" means planting conventional rice; "b" means planting super rice.

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,称重。将 2 000~200 μm 粒径的颗粒组过 100 目筛,备用。

1.4 土壤有机碳含量和其他性质的测定^[7]

全土和团聚体颗粒组有机碳含量采用重铬酸钾外加热法;颗粒态有机碳测定参照周萍的方法^[8];土壤 pH(水土比 2.5:1)值用 pH 计测定;土壤全氮用半微量开氏法;机械组成用沉降法。具体方法步骤见文献^[7]。

1.5 计算和统计检验

团聚体质量分形维数(D_m)和平均重量直径(MWD)都是反映土壤结构稳定性的指标。团聚体质量分形维数(D_m)的计算利用 Tyler 等^[9]建立的质量分形模型:

$$M(r<\bar{x})/M_t=(\bar{x}/x_{\max})^{3-D_m}$$

式中: $\bar{x}$ 表示某粒级的平均直径, $M(r<\bar{x})$ 为平均直径小于 $\bar{x}$ 的积累土粒重量, M_t 为土壤各粒级质量的总和, $x_{\max}$ 为土粒的最大直径。 D_m 为质量分形维数,通过对上式进行非线性回归获得。

平均重量直径(MWD)的计算^[10]公式如下:

$$MWD=\frac{\sum_{i=1}^n\frac{r_i-1+r_i}{2}\times w_i}{\sum_{i=1}^nw_i}$$

式中: r_i 是第 i 级团聚体的粒径, $r_0=r_1$, w_i 是第 i 级团聚体重量, n 为团聚体粒级数。

数据在 Microsoft Excel 2003 平台处理,采用 SPSS 16.0 软件包进行方差分析,不同土壤之间、不同处理之间和不同颗粒组间的多重比较采用 LSD (Least-

significant difference)法,显著性概率定为($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 土壤有机碳(SOC)及颗粒态碳(POC)的变化

如表 2 所示,供试 3 个样点的水稻土全土 SOC 的含量介于 13~25 g·kg⁻¹ 之间,其中安徽巢湖水稻土 SOC 在 20~25 g·kg⁻¹ 之间,湖南浏阳和江苏兴化分别在 19~22 g·kg⁻¹ 和 12~15 g·kg⁻¹ 之间。连续种植超级稻后,除扬两优 6 号(CH-Y6)外,与常规稻相比土壤有机碳含量均显著降低($P<0.05$,下同),以安徽巢湖样点降低幅度最大,降幅为 10%~14%。土壤颗粒态碳(POC)含量在连续种植超级稻后有增加趋势,但没有达到显著水平。连续种植超级稻后,3 个样点 SOC/POC 值比种植常规稻有所降低,说明种植超级稻后土壤有机碳含量的下降与 POC 含量密切相关。从颗粒态有机碳看,超级稻种植下新碳输入土壤增多趋势明显。

2.2 土壤团聚体颗粒组分布

表 3 表明,耕层土壤团聚体均以 2 000~200 μm 和 200~20 μm 团聚体颗粒组所占的比例最大,分别介于 36%~63%和 14%~43%之间,其次是 20~2 μm 颗粒组,介于 14%~28%之间,<2 μm 微团聚体颗粒组所占的比例最小,仅为 4%~13%。说明大团聚体较多是供试地区水稻土团聚体分布的特征,团聚化作用较为明显。连续种植超级稻后,安徽巢湖地区水稻土 2 000~200 μm 粗团聚体与常规稻对照相比显著增加,20~2 μm 和<2 μm 团聚体颗粒组显著减少,而 200~20 μm 颗粒组变化不明显,尽管湖南浏阳和江苏兴化 2 000~200 μm 粗团聚体质量分数增加没有达到

表 2 不同水稻品种处理下土壤 TOC 及 SOC 含量
Table 2 Contents of soil SOC and POC under different rice species

采样点 Sampling site	处理代号 Treatment code	SOC/g·kg ⁻¹	POC/g·kg ⁻¹	SOC/POC
安徽巢湖 Chaohu, Anhui	CH-CK	23.79±0.33 c	4.70±0.65 a	5.12±0.66
	CH-X6	20.46±0.69 b	5.17±0.33 a	3.96±0.16
	CH-F4	21.24±0.73 b	5.54±0.38 a	3.86±0.38
	CH-Y6	25.14±0.61 a	5.48±0.26 a	4.60±0.33
湖南浏阳 Liuyang, Hunan	CS-CK	21.57±0.98 a	3.65±0.47 a	6.47±0.68
	CS-CY	19.09±0.59 b	3.39±0.30 a	5.60±0.31
	CS-CJ	20.94±0.45 ab	3.92±0.21 a	5.36±0.36
江苏兴化 Xinghua, Jiangsu	XH-CK	14.56±0.24 a	2.76±0.23 a	5.30±0.50
	XH-N3	12.90±0.32 b	2.60±0.14 a	4.97±0.31
	XH-Y8	14.04±0.23 a	3.05±0.32 a	4.46±0.43
	XH-N4	13.64±0.59 ab	3.22±0.19 b	4.26±0.44

注:不同小写字母表示同一样点不同土壤之间显著差异($P<0.05$)。下同。
Note: Different small letters in the same site indicate significant differences in different soil at $P<0.05$. The same below.

表 3 不同水稻品种处理下土壤各粒级团聚体质量百分比(%)

Table 3 Percentage of different particle-size fractions under different rice species

采样点 Sampling Site	处理代号 Treatment code	2 000~200 μm	200~20 μm	20~2 μm	<2 μm
安徽巢湖 Chaohu, Anhui	CH-CK	37.26 $\pm$ 1.20 a	21.10 $\pm$ 1.62 a	28.53 $\pm$ 1.90 a	13.11 $\pm$ 2.23 a
	CH-X6	43.20 $\pm$ 1.33 b	24.66 $\pm$ 0.77 a	22.82 $\pm$ 0.50 b	9.32 $\pm$ 0.77 a
	CH-F4	55.94 $\pm$ 4.10 c	18.91 $\pm$ 1.18 a	16.94 $\pm$ 1.30 c	8.21 $\pm$ 2.74 b
	CH-Y6	63.87 $\pm$ 2.87 d	14.76 $\pm$ 1.42 b	14.38 $\pm$ 0.93 c	6.99 $\pm$ 0.53 b
湖南浏阳 Liuyang, Hunan	CS-CK	36.03 $\pm$ 4.73 a	28.67 $\pm$ 4.03 a	25.28 $\pm$ 7.42 a	10.02 $\pm$ 0.98 a
	CS-CY	36.94 $\pm$ 6.14 a	30.97 $\pm$ 4.19 a	28.55 $\pm$ 2.71 a	3.54 $\pm$ 0.31 c
	CS-CJ	43.67 $\pm$ 2.60 a	28.10 $\pm$ 4.18 a	23.06 $\pm$ 1.18 a	5.17 $\pm$ 0.50 b
江苏兴化 Xinghua, Jiangsu	XH-CK	40.03 $\pm$ 5.18 a	32.71 $\pm$ 3.24 a	19.57 $\pm$ 1.61a	7.69 $\pm$ 0.33 a
	XH-N3	43.18 $\pm$ 4.38 a	28.66 $\pm$ 2.27 a	19.31 $\pm$ 2.80 a	8.86 $\pm$ 2.39 a
	XH-Y8	44.38 $\pm$ 1.78 a	34.21 $\pm$ 0.95 a	17.40 $\pm$ 1.96 a	4.01 $\pm$ 0.78 b
	XH-N4	47.29 $\pm$ 4.68 a	31.53 $\pm$ 4.94 a	17.24 $\pm$ 3.58 a	3.95 $\pm$ 1.06 b

显著水平, 但<2 μm 团聚体颗粒组质量分数显著减少, 200~20 μm 和 20~2 μm 变化不明显。因此, 超级稻种植下团聚体形成作用没有受到影响, 反而可能得到促进。这是否与新碳输入较多有关还不得而知。

2.3 土壤团聚体颗粒组有机碳含量

如图 1 所示, 团聚体颗粒组中的 SOC 含量依粒径大小而异, 3 个样点的水稻土中均以 2 000~200 μm 和<2 μm 粒组中的含量最高, 分别在 17~28 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 19~26 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 即 SOC 主要向 2 000~200 μm 和<2 μm 颗粒组富集。此结果与李恋卿等^[11]研究的太湖地区 3 种水稻土和周萍等^[12]研究的南方 3 种水稻土团聚体颗粒组中有机碳的分布特征相似。连续种植超级稻后, 安徽巢湖地区水稻土有机碳含量在 2 000~200 μm 和<2 μm 颗粒组中减少, 在 200~20 μm 和 20~2 μm 没有明显变化; 而江苏兴化团聚体颗粒组有机碳在 200~20 μm 和 20~2 μm 粒组中的含量减少, 2000~200 μm 和<2 μm 没有明显变化; 湖南浏阳各个团聚体中的有机碳均没有明显变化。这可能是因为不

同地区的水热条件不同, 湖南浏阳地处亚热带地区, 水热条件加速了有机碳的氧化分解。种植超级稻粗团聚体有机碳减少可能是大团聚体中较易被微生物利用而分解, 也可能是因为新碳刺激了微生物分解。

3 讨论

3.1 连续种植超级稻对耕层土壤有机碳含量和储量的影响

连续种植超级稻后耕层土壤有机碳含量和储量均下降(表 2、表 4)。3 个样点种植超级稻后土壤有机碳平均每年下降 0.39 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 安徽巢湖的新两优 6 号(CH-X6)降幅达到了每年 0.67 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。主要原因可能是新输入的有机碳引起了土壤有机质分解的起爆效应。当植物残体、生物根系等外源有机物碳源输入量超过土壤有机碳的分解速率的时候, 土壤有机碳就表现为累积; 反之则表现为损失^[13]。有机碳源的数量、质量以及有机碳对微生物的可接近性被认为是决定土壤有机碳增减的主要原因^[14]。前人的研究也指出, 新

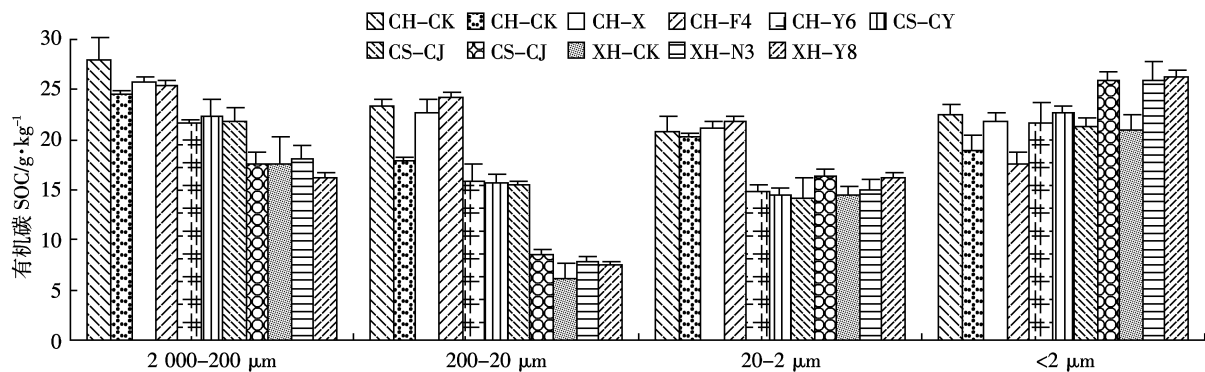


图 1 供试水稻土团聚体颗粒组有机碳含量变化

Figure 1 Variation of SOC content of particle-size fractions of aggregates in the studied paddy soils

鲜有机物输入土壤之后增加了微生物生物量^[5],增强了土壤纤维素酶、蔗糖酶和 FDA 水解酶的活性^[6],改变了土壤微生物区系^[7]。超级稻收获后比常规稻输入土壤的残茬和根系多,且不同品种的作物根系碳沉积的量和碳基质不同^[8],可能引起了土壤微生物区系和酶活的改变,刺激了土壤微生物活动而加速有机质矿化分解,其机理需要进一步研究。

连续种植超级稻后,耕层有机碳储量减少(表4),安徽巢湖地区减少的主要为<200 μm 3 个颗粒组中的有机碳,而湖南浏阳和江苏兴化的减少量没有指向特定的颗粒组。可见 3 个样点有机碳储量减少的机制因土壤类型不同存在差异,这种差异可能与土壤的机械组成有关,安徽巢湖水稻土粘粒含量分别是湖南浏阳和江苏兴化两样点的 1.60 倍和 1.84 倍,而以上两样点的砂粒含量分别是安徽巢湖的 2.12 倍和 2.31 倍。Spaccini 等^[9]在对森林开垦为农田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富氧化铁铝黏质土中。从有机碳储量的比例分析,2 000~200 μm 团聚体中储存有机碳的比例增加了,占了土壤有机碳的 43%~60%,增加的有机碳是团聚体的增加带来了更多的有机碳而非该级团聚体有机碳含量增加的结果;200~20 μm 团聚体中储存了土壤 15%~27% 的土壤有机碳。Wright 等的研究说明大量的有机碳储存在 2 000~250 μm 团聚体中^[20],Jastraw 等也利用 ¹³C 示踪法进一步证实大团聚体比微团聚体含更多的有机碳^[21]。所以大团聚体中有机碳的微小变化可能引起土壤有机碳存量的较大变化。

3.2 连续种植超级稻对团聚体稳定性及有机碳物理保护的影响

连续种植超级稻后,3 个样点水稻土 2 000~200 μm 粗团聚体颗粒组均增加(表 5),200~20 μm 增加不明显,<20 μm 两级团聚体都明显降低。这主要是因为超级稻比常规稻的根系生物量大,水稻收获后输入到土

表 4 耕层土壤全土及不同团聚体颗粒组有机碳储量及分配比例

Table 4 Reserves and distribution proportions of organic carbon in bulk soil and different size aggregates for topsoil(0~15 cm)

采样点 Sampling site	处理代号 Treatment	全土	2 000~200 μm		200~20 μm	
	code	储量/t·hm ⁻²	储量/t·hm ⁻²	比例/%	储量/t·hm ⁻²	比例/%
安徽巢湖 Chaohu, Anhui	CH-CK	43.84±0.55	19.14±0.27	42.86±0.81	9.06±0.85	20.28±0.94
	CH-X6	38.31±1.16	18.23±0.62	47.42±1.97	8.24±0.40	21.42±0.85
	CH-F4	39.62±1.21	26.85±0.56	59.82±0.71	8.02±0.66	17.86±1.20
	CH-Y6	46.02±0.99	29.77±0.82	67.23±2.10	6.53±0.31	14.74±0.72
湖南浏阳 Liuyang, Hunan	CS-CK	40.48±0.29	15.59±2.81	45.73±6.64	9.11±1.14	26.91±4.42
	CS-CY	35.70±1.02	17.88±3.39	51.83±3.98	9.13±0.92	26.55±2.29
	CS-CJ	39.17±0.91	14.88±2.30	43.08±2.35	8.13±1.10	23.46±1.75
江苏兴化 Xinghua, Jiangsu	XH-CK	27.91±0.31	15.24±1.22	53.52±4.64	5.31±0.40	18.77±2.40
	XH-N3	25.04±0.41	16.49±0.87	47.72±2.98	5.20±1.39	22.17±5.33
	XH-Y8	27.11±0.23	15.02±1.16	54.92±1.75	5.22±0.49	19.18±2.59
	XH-N4	26.39±1.07	14.90±1.80	55.39±5.91	4.59±0.56	17.12±2.49

采样点 Sampling site	处理 Treatment	20~2 μm		<2 μm	
		储量/t·hm ⁻²	比例/%	储量/t·hm ⁻²	比例/%
安徽巢湖 Chaohu, Anhui	CH-CK	10.95±1.37	24.48±2.19	5.48±1.16	12.38±1.27
	CH-X6	8.67±0.33	22.55±0.74	3.31±0.27	8.61±0.59
	CH-F4	6.68±0.51	14.88±0.93	3.33±0.26	7.44±1.01
	CH-Y6	5.73±0.31	12.94±0.66	2.26±0.57	5.10±0.25
湖南浏阳 Liuyang, Hunan	CS-CK	5.86±2.01	17.23±3.64	1.50±0.24	4.38±0.76
	CS-CY	7.80±0.98	22.94±2.73	1.51±0.17	4.43±0.21
	CS-CJ	9.51±1.77	27.47±2.41	2.05±0.14	5.99±0.87
江苏兴化 Xinghua, Jiangsu	XH-CK	5.52±0.32	19.48±1.80	2.33±0.07	8.23±0.64
	XH-N3	8.08±0.86	24.65±3.99	3.59±0.95	15.44±1.27
	XH-Y8	5.07±0.36	18.53±0.47	2.02±0.20	7.37±0.37
	XH-N4	5.38±1.14	20.00±4.15	2.01±0.55	7.49±1.12

壤的新鲜有机物增加,并且根系分泌物相应增加,因而促进土壤表层的生物活动,包括真菌生长,根和土壤动物的活动,有助于大团聚体形成及其内部结合形成微团聚体^[22],增加其结构稳定性。本文分析中超级稻种植下颗粒态碳的增加即是这种作用的良好佐证。Six 等^[23]指出植物根系对土壤团聚体的形成除了根系穿插切割和缠绕的物理作用和根系分泌物的胶结作用之外,根系和凋落物分解后的有机残体的粘结作用有利于大团聚体的形成。也就是说,连续种植超级稻促进了微团聚体胶结形成粗粒径的团聚体。如表 5 所示,连续种植超级稻后,土壤团聚体的分形维数(D_m)有不同程度的降低,平均重量直径(MWD)有所增加,说明连续种植超级稻后土壤团聚体稳定性增强。丁文峰等^[7]的研究指出分形维数越小,土壤容重越小,土壤越疏松,土壤结构性越好。平均重量直径(MWD)的增加说明大粒径团聚体数量的增加^[24],该值越大表示土壤团聚体的团聚度越高,稳定性越好^[25-26]。

从以上分析可知,连续种植超级稻后,土壤有机碳、团聚体颗粒组组成和耕层有机碳储量均发生了变化。将 2 000~200 μm 团聚体颗粒组增加的质量分数分别与土壤有机碳减少量和 2 000~200 μm 团聚体颗粒组有机碳储量变化量作统计相关分析,结果表明:2 000~200 μm 团聚体颗粒组增加的质量分数与土壤有机碳减少量存在明显负相关关系,与 2 000~200 μm 团聚体颗粒组有机碳储量变化量存在正相关关系。可见,连续种植超级稻后增加了土壤有机碳在大团聚体中的储量,对土壤有机碳有一定的保护作用。安徽巢湖地区土壤粘粒含量较高,微团聚体结合形成大团聚体的作用较强,其黏粒结合的有机碳达到饱和

的时间较长,有机碳向大团聚体的积累比较缓慢,这可能是该地区团聚体增加明显,粗团聚体有机碳下降明显的原因。湖南浏阳粗团聚体颗粒组及其有机碳含量变化不明显,这可能与该红壤性水稻土中丰富的氧化物与有机碳的稳定结合有关。

以上分析可知,长期种植超级稻并没有改变水稻土粗团聚体对有机碳的保护。Six 等^[14]也指出,团聚体形成作用是土壤固碳最重要的机制。李恋卿等^[11]对退化红壤和太湖地区黄泥土、张旭辉等^[27]对白浆土和周萍等^[12]对南方 3 种水稻土的研究均表明,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^[19]也把耕作引起的总碳损失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侵蚀流失所致。

3.3 超级稻种植对土壤固碳的长期效应

由上述分析可知,连续种植超级稻后,3 个样点土壤团聚体的稳定性并没有被破坏,虽然全土有机碳储量有所下降,但 2 000~200 μm 粗团聚体中有机碳的储量和占总碳储量的比例没有显著减少,在安徽巢湖样点还出现了增加的趋势,全土有机碳储量减少可能是因为超级稻种植后引起了土壤微生物群落结构发生了变化,从而引起了土壤有机碳的起爆效应,加速了有机碳的矿化分解,其机理需要进一步的研究。因此这种现象并不能否认粗团聚体对有机碳的物理保护作用。

近年来,对南方稻田有机碳固定的水平和潜力的研究表明,近 20 a 来水稻土普遍具有固碳趋势^[28],且固碳潜力巨大^[29]。对我国南方几个长期试验的稻田土壤^[12]和全国有机碳动态资料^[30]的研究分析表明,水稻

表 5 供试水稻土团聚体颗粒组积累变化及其稳定性指标

Table 5 Variation of aggregate and aggregates stability index in studied soil

采样点 Sampling Site	处理代号 Treatment code	团聚体颗粒组积累 Accumulation of aggregates/%				D_m	MWD
		2 000~200 μm	200~20 μm	20~2 μm	<2 μm		
安徽巢湖 Chaohu, Anhui	CH-CK	—	—	—	—	2.70	0.44
	CH-X6	5.13±1.63	0.97±0.32	-2.98±0.82	-1.40±0.34	2.64	0.57
	CH-F4	6.18±2.21	-0.28±0.20	-3.90±0.34	-1.34±0.34	2.64	0.61
	CH-Y6	8.47±3.08	1.37±0.43	-4.40±0.29	-1.36±0.33	2.63	0.67
湖南浏阳 Changsha, Hunan	CS-CK	—	—	—	—	2.51	0.47
	CS-CY	2.76±1.38	-0.90±0.25	-3.98±0.79	-0.58±0.13	2.51	0.48
	CS-CJ	1.02±1.13	1.01±0.35	3.76±0.65	0.32±0.20	2.46	0.51
江苏兴化 Xinghua, Jiangsu	XH-CK	—	—	—	—	2.53	0.51
	XH-N3	1.22±1.12	4.18±0.41	-4.41±1.32	2.03±0.34	2.63	0.65
	XH-Y8	1.03±0.20	-1.42±0.48	0.23±0.46	-0.12±0.30	2.51	0.53
	XH-N4	0.80±0.27	-0.55±0.42	0.98±0.45	-0.34±0.19	2.51	0.56

土有机碳饱和值约为 $27 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 本文研究的水稻土有机碳远远没有达到饱和值, 仍具有较大的固碳潜力。超级稻作为新型高产高效农作物被广泛推广, 一定时期内降低了土壤碳储量可能是土壤的一种响应机制, 随着超级稻种植年限的增加, 水稻土有机碳储量仍将缓慢增加。

4 结论

连续种植超级稻后, 大团聚体颗粒组 ($2\ 000 \sim 200 \mu\text{m}$) 增加, 小颗粒组 ($20 \sim 2 \mu\text{m}$ 和 $< 2 \mu\text{m}$) 减少, 连续种植超级稻后土壤团聚体稳定性增加, 土壤结构趋于优化。土壤团聚体颗粒组中的 SOC 仍以 $2\ 000 \sim 200 \mu\text{m}$ 和 $< 2 \mu\text{m}$ 粒组中最高, 连续种植超级稻后土壤 SOC 储量下降, 减少的有机碳在各个样点中来自不同的颗粒组中储存的有机碳, 但 $2\ 000 \sim 200 \mu\text{m}$ 团聚体中有机碳的储量没有显著变化, 团聚体对有机碳的物理保护作用没有被破坏。连续种植超级稻后全土有机碳储量的减少可能是土壤的一种短期响应机制, 不能改变水稻土长期的固碳潜力。

参考文献:

- [1] 潘根兴. 地球表层系统土壤学[M]. 北京: 地质出版社, 2000: 70–81.
PAN Gen-xing. Soil science of earth surface system[M]. Beijing: China Geology Press, 2000: 70–81.
- [2] 李忠佩, 林心雄, 车玉萍. 中国东部主要农田土壤有机碳库的平衡与趋势分析[J]. 土壤学报, 2002, 39(3): 351–360.
LI Zhong-pei, LIN Xin-xiong, CHE Yu-ping. Analysis for the balance of organic carbon pools and their tendency in typical arable soils of eastern China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(3): 351–360.
- [3] Beare M H, Cabrera M L, et al. Aggregate-protected and unprotected organic matter pools in conventional and no-tillage soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, 12(8): 345–351.
- [4] ZHANG Ping-jiu, FENG Ju-feng, PAN Gen-xing, 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 [J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2007, 58: 264–270.
- [5] 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[J]. 生态学报, 2004, 24(12): 2961–2966.
YUAN Ying-hong, LI Hui-xin, HUANG Qian-ru, et al. Effects of different fertilization on soil organic carbon distribution and storage in micro-aggregates of red paddy top soil [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(12): 2961–2966.
- [6] Stemmer M, Gerzabek M H, Kandeler E. Organic matter and enzyme activity in particle-size fractions of soils obtained after lower-energy sanitation[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, 30: 9–18.
- [7] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
- LU Ru-kun. Analytical methods of soil and agro-chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999.
- [8] 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 [J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(6): 765–771.
ZHOU Ping, ZHANG Xu-hui, PAN Gen-xing. 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[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(6): 765–771.
- [9] Tyler S W, Wheatcraft S W. Fractal scaling of soil particle size distributions: Analysis and limitations[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56: 362–369.
- [10] 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): 2177–2183.
PENG Xin-hua, ZHANG Bin, ZHAO Qi-guo. Effect of soil organic carbon on aggregate stability after vegetative restoration on severely eroded red soil[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(10): 2177–2183.
- [11] 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[J]. 科技通报, 2000, 11(6): 421–426.
LI Lian-qing, PAN Gen-xing, GONG Wei, et al. Organic carbon storage in selected paddy soils in Taihu Lake region and their occurrence [J]. *Bulletin of Science and Technology*, 2000, 11(6): 421–426.
- [12] 周 萍, 宋国菡, 潘根兴, 等. 长期试验下三种典型水稻土有机碳积累机制研究 I. 团聚体保护作用[J]. 土壤学报, 2008, 45(6): 1063–1071.
ZHOU Ping, SONG Guo-han, PAN Gen-xing, et al. SOC accumulation in three major types of paddy soils under long-term agro-ecosystem experiments from South China I. Physical protection in soil micro-aggregates[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(6): 1063–1071.
- [13] Ghani A, Dexter M, Perrott K W. Hot-water extractable carbon in soils: a sensitive measurement for determining impacts of fertilization, grazing and cultivation[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, 35(9): 1231–1243.
- [14] Six J, Conant R T, Paul E A, et al. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils[J]. *Plant and Soil*, 2002, 241(2): 155–176.
- [15] 张奇春, 王雪芹, 时亚南, 等. 不同施肥处理对长期不施肥区稻田土壤微生物生态特性的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(1): 118–123.
ZHANG Qi-chun, WANG Xue-qin, SHI Ya-nan, et al. Effects of different fertilizer treatments on ecological characteristics of microorganism in chemical fertilizer omission paddy soil[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(1): 118–123.
- [16] 牛文静, 李恋卿, 潘根兴. 太湖地区水稻土不同粒级团聚体中酶活性对长期施肥的响应[J]. 应用生态学报, 2009, 20(9): 2181–2186.
NIU Wen-jing, LI Lian-qing, PAN Gen-xing, et al. Responses of enzyme activities in different particle-size aggregates of paddy soil in Taihu Lake region of China to long-term fertilization [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(9): 2181–2186.

- [17] 尹睿, 张华勇, 黄锦法, 等. 保护地菜田与稻麦轮作田土壤微生物学特征的比较[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(1): 57–62.
YIN Rui, ZHANG Hua-yong, HUANG Jin-fa, et al. Comparison of microbiological properties between soils of rice-wheat rotation and vegetable cultivation [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2004, 10(1): 57–62.
- [18] Bader N E, Cheng W. Rhizosphere effect of populus fremontii roots masks the temperature sensitivity of soil organic carbon respiration[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39: 600–606.
- [19] Spaccini R, Zena A, Igwe C A, et al. Carbohydrates in water-stable aggregates and particle size fractions of forested and cultivated soils in two contrasting tropical ecosystems[J]. *Biogeochemistry*, 2001, 53: 1–22.
- [20] Wright A L, Hons F M. Carbon and nitrogen sequestration and soil aggregation under sorghum cropping sequences[J]. *Biology and Fertility Soils*, 2004, 43: 265–272.
- [21] Jastrow J D, Boutton T W, Miller R M. Carbon dynamics of aggregate-associated organic matter estimated by ^{13}C natural abundance[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1996, 60: 801–807.
- [22] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil macro-aggregate turnover and micro-aggregate formation: A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32: 2099–2103.
- [23] Six J, Bossuyt H, et al. A history of research on the link between micro-aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics[J]. *Soil & Tillage Research*, 2004, 79: 7–31.
- [24] 苏静, 赵世伟. 土壤团聚体稳定性评价方法比较[J]. 水土保持通报, 2009, 25(5): 114–118.
SU Jing, ZHAO Shi-wei. Comparison of the analysis methods for soil aggregate stability[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2009, 25(5): 114–118.
- [25] 郑子成, 李廷轩, 张锡洲, 等. 不同土地利用方式下土壤团聚体的组成及稳定性研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(5): 228–236.
ZHENG Zi-cheng, LI Ting-xuan, ZHANG Xi-zhou, et al. Study on the composition and stability of soil aggregates under different land use [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(5): 228–236.
- [26] 梁爱珍, 张晓平, 杨学明, 等. 耕作对东北黑土团聚体粒级分布及其稳定性的短期影响[J]. 土壤学报, 2009, 46(1): 154–158.
LIANG Ai-zhen, ZHANG Xiao-ping, YANG Xue-ming, et al. Short-term effects of tillage on soil aggregate size distribution and stability in black soil northeast China [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(1): 154–158.
- [27] 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[J]. 生态学杂志, 2001, 20(2): 16–19.
ZHANG Xu-hui, LI Lian-qing. Effect of different crop rotation systems on the aggregates and their SOC accumulation in Paludals in North Huai region, China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2001, 20(2): 16–19.
- [28] XIE Zhi-Bin, ZHU Jing-Peng, LIU Geng, et al. Soil organic carbon stocks in China and changes from 1980s to 2000s[J]. *Global Change Biology*, 2007, 13: 1989–2007.
- [29] 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[J]. 土壤学报, 2006, 43(1): 46–52.
LI Zhong-pei, WU Da-fu. Organic C content at steady state and potential of C sequestration of paddy soils in subtropical China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(1): 46–52.
- [30] PAN Gen-xing, XU Xin-wang, Smith P, et al. An increase in topsoil SOC stock of China's croplands between 1985 and 2006 revealed by soil monitoring[J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2010, 136: 133–138.