

# 垄作免耕下紫色水稻土有机碳的分布特征<sup>\*</sup>

唐晓红<sup>1,2</sup> 邵景安<sup>1,2</sup> 黄雪夏<sup>1</sup> 魏朝富<sup>1,2†</sup> 谢德体<sup>1,2</sup> 潘根兴<sup>3</sup>

(1 西南大学资源环境学院,重庆 400716)

(2 重庆市数字化农业重点实验室,重庆 400716)

(3 南京农业大学农业资源与生态环境研究所,南京 210095)

**摘 要** 土壤有机碳的空间分布特征是研究土壤有机碳储量及其动态的重要内容之一。本文从土壤团聚体、剖面和田块等尺度研究了四川盆地紫色水稻土在垄作免耕下有机碳的分布特征。结果表明:紫色水稻土团聚体含碳量在大团聚体(2~0.25 mm)中最高,但有机碳总量主要分布在0.25~0.02 mm,其次是0.02~0.002 mm;垄作免耕下团聚体有机碳主要富集在0~10 cm土层的大团聚体(>0.25 mm)中(富集系数>1.5),而常规平作、水旱轮作和垄作翻耕下,剖面中土壤有机碳含量分布自上而下缓慢降低;实验田表层土壤有机碳含量及相关土壤特性的空间分布呈条带状和斑块状格局,具有明显的空间变异性。土壤有机碳含量在垄作免耕处最高,达30.71 g kg<sup>-1</sup>,在常规平作处最低,为16.50 g kg<sup>-1</sup>左右。长期垄作免耕会导致有机碳向土壤表层大团聚体的相对富集及在土壤剖面的层次分异。

**关键词** 紫色水稻土;有机碳;分布;垄作免耕  
中图分类号 S714 文献标识码 A

土壤有机碳分布具有高度的空间异质性,研究的尺度不同,其影响因子和变化规律也随之变化。大尺度上的土壤有机碳空间分布一般与土壤质地变异、地形变化有关,而小尺度情况,农业管理措施对土壤有机碳库的调控起着关键性作用<sup>[1~3]</sup>。保护性耕作措施,如免耕、秸秆还田、长期施用有机肥和轮作等已成为减少农业土壤碳损失战略之一<sup>[4,5]</sup>。出现于20世纪80年代的稻田保护性措施(诸如垄作免耕、秸秆还田、合理轮作、有机肥的施用等)影响水稻土理化特性、作物根系生长及作物残茬数量和质量、土壤微生物数量和活性,维持和提高土壤碳含量水平<sup>[6]</sup>。长期免耕增加土壤有机碳含量,增强土壤颗粒胶结作用,促进土壤的团聚作用<sup>[7~10]</sup>,从而影响土壤有机碳在团聚体、剖面和田块等尺度上的分布格局。而传统耕作破坏富碳大团聚体,增加贫碳的小团聚体,使土壤有机碳暴露而被微生物分解,提高土壤碳矿化率而增加向大气的CO<sub>2</sub>通量<sup>[11~13]</sup>。

中国大面积的水稻土自1980年以来显示出的土壤有机碳库增加现象,说明农业生产对大气CO<sub>2</sub>

可能产生汇效应。但对于水稻土中有机碳的分布和赋存状态与农业管理措施、水稻土质量变化、农业生态环境变化的关系仍不清楚<sup>[14]</sup>。紫色水稻土是四川盆地广泛分布的耕作土壤,以往的研究集中于紫色水稻土团聚作用<sup>[15]</sup>、土壤肥力<sup>[16]</sup>、区域碳库储量估算<sup>[17]</sup>。本文采用稻田垄作免耕定位试验,从土壤团聚体、剖面、田块等尺度研究了四川盆地紫色水稻土在垄作免耕下有机碳的分布特征,为揭示稻田保护性措施下有机碳变化及其固定机理提供科学数据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

垄作免耕定位试验始于1990年,设在重庆市北碚区西南大学试验农场。该场地处东径106°26′,北纬30°26′,海拔230 m。年平均气温18.3℃,年平均降雨量1105 mm,5~9月的降雨量占全年降雨量70%,年日照1277 h,无霜期年均约334 d,属“川东

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金项目“中国主要水稻土有机碳的固定机制、稳定性与碳汇效应”(40231016)资助

<sup>†</sup> 通讯作者, E-mail: weicf@swau. cq. cn

作者简介:唐晓红(1974~),女,四川人,博士,主要从事土壤结构和碳循环的研究

收稿日期:2005-12-06;收到修改稿日期:2006-05-18

平行岭谷区北碚向斜的中部。土壤为中生代侏罗系沙溪庙组灰棕紫色沙泥岩母质上发育的中性紫色水稻土(筒育水耕人为土),其基本理化性质为:pH7.1;有机质  $23.1 \text{ g kg}^{-1}$ ;全氮  $1.7 \text{ g kg}^{-1}$ ;全磷  $0.8 \text{ g kg}^{-1}$ ;全钾  $22.7 \text{ g kg}^{-1}$ ;碱解氮  $120.1 \text{ mg kg}^{-1}$ ;有效磷  $7.5 \text{ mg kg}^{-1}$ ;速效钾  $71.1 \text{ mg kg}^{-1}$ ;粘粒  $144.2 \text{ g kg}^{-1}$ 。

本研究涉及4个处理:(1)CK<sub>1</sub>:常规平作(中稻-冬水田),代表四川盆地稻田传统耕作方法,稻田终年处于淹水状态,保持水层深度为3 cm左右;水稻收获后将稻茬(50~60 cm) ( $3\ 850\sim\ 4\ 100 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ )和杂草( $2\ 750\sim\ 3\ 150 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ )翻入土中,春季再翻耕种植中稻,耕作深度为25~30 cm。(2)CK<sub>2</sub>:水旱轮作(中稻-油菜),代表四川盆地稻田传统耕作方法,淹水平作种植水稻,水稻收获后,四边开沟排干稻田积水,翻耕,将稻茬(50~60 cm) ( $3\ 850\sim\ 3\ 900 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ )翻入土中,种油菜。油菜生长期间,尽可能地保持四边沟内无积水。油菜收获后,淹水,翻耕将油菜残茬( $2\ 750\sim\ 3\ 000 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ )和杂草( $1\ 850\sim\ 2\ 100 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ )翻入土中,种水稻。(3)T<sub>1</sub>:垄作免耕(中稻-油菜),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。水稻移栽到成活期间水面与垄顶齐平,全年其余时间保持沟内水深25~30 cm(即垄露出水面5~10 cm);水稻收获后排水降低水位,将沟内的稀泥扶到垄上,稻茬(50~60 cm) ( $4\ 700\sim\ 4\ 850 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ )覆盖,种植油菜。油菜生长期间,沟内水位5~10 cm(即垄露出水面20~25 cm),保持垄埂浸润,第二年油菜收获后将油菜残茬( $1\ 400\sim\ 1\ 750 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ )和杂草( $1\ 650\sim\ 1\ 800 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ )埋在沟底,灌水,水面与垄顶齐平,种植水稻。(4)T<sub>2</sub>:垄作翻耕(中稻-油菜),作垄规格、水分管理和水稻种植及稻茬(50~60 cm) ( $4\ 700\sim\ 4\ 850 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ )管理与T<sub>1</sub>相同。油菜收获后,翻耕将油菜残茬( $2\ 500\sim\ 2\ 750 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ )和杂草( $1\ 650\sim\ 1\ 800 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ )翻入土中,重新作垄种稻。

每个处理小区面积为20 m<sup>2</sup>,4次重复,区组排列。各处理施肥量均为:尿素  $273.1 \text{ kg hm}^{-2}$ ;过磷酸钙  $500.3 \text{ kg hm}^{-2}$ ;氯化钾  $150.1 \text{ kg hm}^{-2}$ 。每年的小麦和水稻都是过磷酸钙作底肥一次施用;尿素用量的2/3作底肥,1/3作追肥;氯化钾底肥和追肥各1/2。播种、施肥、水分管理一致。

## 1.2 样品采集

水稻收获后(2003年9月26日)采取土壤样品。

剖面土壤规格为:宽1.0 m,长1.5~2.0 m,深0.7~1.0 m的剖面。在0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm和40~60 cm采集剖面原状土样,用硬质盒将土样带回实验室风干。当土壤样品含水量达到塑限时,用手沿土壤自然破碎面掰碎至小于3 cm。

田块尺度土壤样品,按2 m×2 m网格取样,采用相对坐标,即直接用皮尺按照设计图纸在田间测量确定采样点,每个点以网格节点为中心,半径为1.0 m取6个点的混合土样,取样深度为0~20 cm,共采集土壤样品48份。完成采样后,在Arcview中将相对坐标矢量化,建立田块尺度土壤有机碳及相关土壤特性的空间数据库。

## 1.3 分析方法

**1.3.1 土壤团聚体测定** 参照水稳性团聚体分离方法<sup>[18]</sup>。取原状风干土50 g于1 000 ml三角瓶中,加入蒸馏水(水土比10:1),浸泡过夜(16 h)后,在恒温振荡器(DHZ-C型)以210 r min<sup>-1</sup>的转速振荡2.5 h,使其充分分散,再转移到1 000 ml量筒中,将量筒上下倒转10次后,用湿筛法分离出>2 mm和2~0.25 mm的团聚体。继而把过筛土壤悬液用吸管法分离得0.25~0.02 mm、0.02~0.002 mm及<0.002 mm。最后将所有提取的样品在电热恒温干燥箱中40~50 °C烘干、称重、待测。

**1.3.2 土壤基本理化性状分析** 有机碳:K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>氧化法;土壤pH:用1:1水土比悬液,pHS-4C酸度计电位法测定;土壤机械组成:吸管法;土壤含水量:烘干法;土壤容重测定:环刀法<sup>[19]</sup>。

## 1.4 统计分析

用SPSS10.0软件进行方差分析(ANOVA)及其显著性水平( $p < 0.05$ )通过最小显著差数法(LSD)进行检验。利用ArcGIS进行田块土壤有机碳的空间分析,应用普通克里格插值(Kriging)制作田块尺度下土壤有机碳的空间分布图,分析土壤有机碳及相关土壤特性的空间分布格局<sup>[4]</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 土壤团聚体中有机碳的分布

长期垄作免耕定位试验稻田土壤团聚体含量呈双峰分布。0.25~0.02 mm含量最高,为45%~54%;其次为0.02~0.002 mm,占29%~38%。土壤团聚体含碳量呈单峰分布,2~0.25 mm有机碳含量最高,但有机碳总量(团聚体含量×团聚体的含碳量)主要存在于0.25~0.02 mm,其次是0.02~0.002 mm

(表 1)。垄作免耕( $T_1$ )下土壤大团聚体( $>0.25$  mm)含碳量随着深度的增加而急剧减少,而其余处理没有明显的变化趋势。团聚体含碳量对有机碳总量的贡献率不同,使得团聚体中有机碳含量分异明显。0~10 cm 土层,垄作免耕( $T_1$ )与常规平作( $CK_1$ )有机碳总量的差异主要来源于垄作免耕( $T_1$ )大团聚体( $>0.25$  mm)含碳量的增加,占有有机碳总量的 54%;10~20 cm 土层,与常规平作( $CK_1$ )比较,垄作免耕( $T_1$ )和水旱轮作( $CK_2$ )有机碳总量的差异主要来源于 $<0.002$  mm 含碳量的增加,分别占有有机碳总量的 23%和 17%。20~30 cm 土层,垄作免耕( $T_1$ )除 $>2$  mm含碳量较常规平作( $CK_1$ )增加外,占有有机碳总量的 15%,其余团聚体含碳量均减少,但对有机碳总量的贡献率相似;30~40 cm 土层有机碳总量差异

主要来源于水旱轮作( $CK_2$ )大团聚体( $>0.25$  mm)含碳量的增加及垄作免耕( $T_1$ )大团聚体( $>0.25$  mm)和微团聚体( $<0.002$  mm)含碳量的增加,分别占有有机碳总量的 62%、42%和 20%。40~60 cm 土层,垄作免耕( $T_1$ )与水旱轮作( $CK_2$ )在有机碳总量相近的情况下,垄作免耕( $T_1$ )表现为大团聚体( $>2$  mm)含碳量所占比例较大,为 24%,而水旱轮作( $CK_2$ )则是微团聚体( $<0.25$  mm),占有有机碳总量的 59%。因此,不同土层不同大小团聚体含碳量对有机碳总量的贡献率是不同的。这与魏朝富等研究紫色水稻土有机碳分布的结果一致<sup>[20]</sup>。与太湖地区水稻土的有机碳分布有一定的差异,其耕层有机碳主要存在于 2~0.25 mm和 0.25~0.02 mm 团聚体中,而底土层有机碳主要存在于 0.25~0.02 mm 团聚体中<sup>[21]</sup>。

表 1 紫色水稻土团聚体大小分布及其有机碳含量变化

Table 1 Particle size distribution of soil aggregates (%) and change in soil organic carbon content ( $g\ kg^{-1}$ ) in purple paddy soil

深度 Depth (cm)	处理代号 Treatment code	土壤团聚体 Soil aggregates									
		$>2$ mm		2~0.25 mm		0.25~0.02 mm		0.02~0.002 mm		$<0.002$ mm	
		团聚体 含量	团聚体 含碳量	团聚体 含量	团聚体 含碳量	团聚体 含量	团聚体 含碳量	团聚体 含量	团聚体 含碳量	团聚体 含量	团聚体 含碳量
		Aggregates content (%)	Aggregates C content ( $g\ kg^{-1}$ )	Aggregates content (%)	Aggregates C content ( $g\ kg^{-1}$ )	Aggregates content (%)	Aggregates C content ( $g\ kg^{-1}$ )	Aggregates content (%)	Aggregates C content ( $g\ kg^{-1}$ )	Aggregates content (%)	Aggregates C content ( $g\ kg^{-1}$ )
0~10	$CK_1$	1.7	13.69	10.9	39.34	50.1	21.23	30.1	21.22	0.3	16.53
	$CK_2$	0.7	13.47	9.1	23.93	49.0	12.90	36.9	12.86	0.7	10.89
	$T_1$	0.6	31.66	13.9	37.29	47.5	16.56	31.9	15.18	0.3	27.93
	$T_2$	1.4	18.36	13.6	28.64	45.1	11.61	35.6	13.60	0.8	10.42
10~20	$CK_1$	1.2	18.31	12.0	34.65	50.8	12.36	33.4	18.00	0.7	13.20
	$CK_2$	0.5	12.44	7.9	19.02	46.6	9.69	41.0	11.70	0.7	10.89
	$T_1$	1.6	13.93	10.2	24.33	44.0	13.11	39.1	14.80	0.1	19.92
	$T_2$	0.6	9.69	9.8	22.21	45.8	12.76	39.5	12.13	1.0	11.87
20~30	$CK_1$	2.0	4.18	12.2	25.98	50.7	17.20	31.3	19.41	0.2	21.13
	$CK_2$	0.7	3.26	6.3	8.53	45.0	7.33	43.2	9.47	0.5	9.96
	$T_1$	0.8	12.20	7.0	22.07	48.9	15.03	37.8	13.52	0.4	16.37
	$T_2$	0.9	12.13	9.5	17.58	45.4	7.30	39.1	12.91	1.7	11.05
30~40	$CK_1$	1.1	5.78	8.2	15.38	46.1	10.24	39.2	13.39	0.4	17.07
	$CK_2$	1.0	20.71	11.8	26.96	46.8	14.07	33.2	12.43	1.7	3.25
	$T_1$	0.6	12.82	10.0	14.20	43.2	9.43	40.9	14.56	0.1	13.10
	$T_2$	1.2	5.89	6.5	9.63	45.4	7.30	42.9	11.15	1.3	10.45
40~60	$CK_1$	1.1	4.04	5.1	9.59	48.5	11.29	36.3	16.27	0.6	15.74
	$CK_2$	1.1	7.47	12.1	10.53	42.3	3.77	36.2	12.15	0.2	10.10
	$T_1$	0.6	12.82	7.8	7.31	45.8	6.03	38.1	13.20	0.7	14.10
	$T_2$	0.9	4.40	5.5	8.38	42.3	3.77	36.2	12.15	1.8	10.14

将组分在某团聚体中含量与其土壤含量之比称为该组分的颗粒富集系数 (Enrichment coefficient, EC)<sup>[22]</sup>。土壤有机碳的富集系数 (EC) 代表了该团聚体对有机碳富积的强度指标。EC > 3 强烈富集, 当 EC = 1.5 时相对富集, 0.5 < EC < 1.5 二者属同一水平, EC < 0.5 相对贫化, EC < 0.1 时强烈贫化。从表 2 中可以看出不同大小团聚体有机碳的富集系数变化趋势不同。垄作免耕 (T<sub>1</sub>) > 2 mm 团聚体有机碳在

40 ~ 60 cm 土层富集系数为 1.5, 表明有机碳在该层相对富集; 2 ~ 0.25 mm 团聚体有机碳在 0 ~ 10 cm 土层富集系数最高为 1.58, 并随着土层深度的增加而减小; 0.25 ~ 0.02 mm 团聚体有机碳富集系数在整个剖面中富集系数均小于 1; 0.02 ~ 0.002 mm 和 < 0.002 mm 团聚体有机碳富集系数均在 40 ~ 60 cm 土层最大, 分别为 1.31 和 1.39, 并且 < 0.002 mm 微团聚体中有机碳富集系数随着土层深度的增加而增加。

表 2 紫色水稻土团聚体中有机碳富集系数分布

Table 2 Distribution of soil organic carbon enrichment coefficient of soil aggregates in purple paddy soil

深度 Depth (cm)	处理代号 Treatment code	富集系数 Enrichment coefficient				
		> 2 mm	2 ~ 0.25 mm	0.25 ~ 0.02 mm	0.02 ~ 0.002 mm	< 0.002 mm
0 ~ 10	CK <sub>1</sub>	0.60	1.72	0.71	1.21	0.72
	CK <sub>2</sub>	0.69	1.22	0.96	0.99	0.55
	T <sub>1</sub>	1.06	1.58	0.75	1.06	0.93
	T <sub>2</sub>	1.05	1.61	0.74	1.15	0.38
10 ~ 20	CK <sub>1</sub>	0.95	1.79	0.64	1.24	0.68
	CK <sub>2</sub>	1.05	1.60	0.82	0.99	0.84
	T <sub>1</sub>	0.99	1.42	0.87	1.00	1.01
	T <sub>2</sub>	1.10	1.38	0.77	1.16	0.44
20 ~ 30	CK <sub>1</sub>	0.22	1.36	0.90	1.02	1.11
	CK <sub>2</sub>	0.37	0.96	0.82	1.06	1.01
	T <sub>1</sub>	0.79	1.44	0.98	0.88	1.07
	T <sub>2</sub>	0.74	1.08	1.13	0.79	0.68
30 ~ 40	CK <sub>1</sub>	0.46	1.23	0.82	1.07	1.36
	CK <sub>2</sub>	1.39	1.81	0.94	0.83	0.22
	T <sub>1</sub>	1.01	1.12	0.74	1.15	1.28
	T <sub>2</sub>	0.60	0.98	0.75	1.14	1.07
40 ~ 60	CK <sub>1</sub>	0.30	0.71	0.83	1.20	1.16
	CK <sub>2</sub>	0.85	1.20	0.43	1.39	1.15
	T <sub>1</sub>	1.50	0.72	0.60	1.31	1.39
	T <sub>2</sub>	0.49	0.94	0.75	1.11	1.14

14 年不同耕作方式对土壤微团聚体的影响最明显的是土壤有机碳的增减及由此造成的微团聚体的变化(表 1)。剖面土壤微团聚体组成呈双峰分布: 粒径峰值在 0.25 ~ 0.02 mm, 占 42 % ~ 53 %, 含量随着深度增加而递减; 其次是 0.02 ~ 0.002 mm, 占 30 % ~ 44 %, 含量随着深度增加而增加。因此, 0.25 ~ 0.002 mm 微团聚体较多是紫色水稻土团聚体分布的特点。这与太湖地区水稻土团聚体组成结果一致<sup>[21]</sup>。这种微团聚体的变化是通过有机碳含

量的变化来实现的。垄作免耕 (T<sub>1</sub>) 和垄作翻耕 (T<sub>2</sub>) 大团聚体 (> 0.25 mm) 比例相近, 但是垄作免耕 (T<sub>1</sub>) > 2 mm 和 2 ~ 0.25 mm 有机碳含量较垄作翻耕 (T<sub>2</sub>) 相应大小团聚体中有机碳含量分别高 70 % 和 30 %。垄作免耕 (T<sub>1</sub>) < 0.002 mm 有机碳含量较垄作翻耕 (T<sub>2</sub>) 相应大小团聚体中有机碳含量高 168 %, 而垄作翻耕 (T<sub>2</sub>) < 0.002 mm 有机碳含量低于常规平作 (CK<sub>1</sub>)。因此, 不论是平作翻耕还是垄作翻耕均不利于大团聚体的形成及其有机碳的积累, 而 14 年垄

作免耕增加了表层土壤大团聚体的比例及其有机碳含量。翻耕将土层上下翻动,人为干扰了有机碳在剖面中的分布是不同处理大团聚体差异的主要原因。免耕大团聚体周转慢,其稳定的微团聚体较翻耕高 2 倍多,因为大团聚体周转慢促使土壤有机碳包裹在微团聚体中,其微团聚体较翻耕相应大小的微团聚体就截存更多物理保护性有机碳,在团聚体中就形成更多大团聚体和微团聚体有机碳<sup>[23]</sup>。随着深度增加到 30~40 cm,垄作免耕与翻耕对微团聚体大小分布及其有机碳含量的影响没有明显差异。

## 2.2 剖面中土壤有机碳的分布

剖面中土壤有机碳含量随深度增加而降低。除垄作免耕外,自上而下有机碳含量降低较为平稳(表 3),这与冲积母质发育的土壤剖面相似<sup>[24]</sup>,但各处理土壤有机碳分布的层次性不同。各处理表层土壤有机碳介于 16~23 g kg<sup>-1</sup>,垄作免耕(T<sub>1</sub>)表层土壤有机碳含量最高,为 23.06 g kg<sup>-1</sup>,水旱轮作(CK<sub>2</sub>)最

低,为 16.98 g kg<sup>-1</sup>。与常规平作(CK<sub>1</sub>)0~10 cm 有机碳含量比较,水旱轮作(CK<sub>2</sub>)和垄作翻耕(T<sub>2</sub>)该层有机碳含量分别降低 17.5%和 7.6%,垄作免耕(T<sub>1</sub>)增加 12.0%。垄作免耕(T<sub>1</sub>)在 10~20 cm 土层迅速降低 7%,而常规平作(CK<sub>1</sub>)、水旱轮作(CK<sub>2</sub>)和垄作翻耕(T<sub>2</sub>)则分别降低 1.47%、0.12%和 3.92%。14 年垄作免耕土壤有机碳主要积累于表层(不仅是作物残茬,而且根系亦在表层分布较多),耕翻体系中有有机碳随耕作较均匀地分布于整个耕层。Castro 等发现免耕下大量的植物残体输入和没有扰动影响是有机碳趋向于表层富集,而翻耕表现为均一分布的原因<sup>[25]</sup>。土壤有机质的深度分布特征与土壤剖面的发育过程密切相关,随深度增大,有机质的来源数量不断减少,而成土时间增加,分解作用导致的有机质含量降低幅度增大,有机质含量不断减少<sup>[30]</sup>。因此,有机碳在表层富集是垄作免耕土壤剖面有机碳分布的主要特征之一。

表 3 耕作方式对紫色水稻土有机碳剖面分布的影响

Table 3 Effect of farming system on SOC distribution in profile in purple paddy soil

处理代号 Treatment code	有机碳 Organic carbon (g kg <sup>-1</sup> )				
	0~10 cm	10~20 cm	20~30 cm	30~40 cm	40~60 cm
CK <sub>1</sub>	20.35 ±1.14 b	19.17 ±0.96 a	14.44 ±0.81 ab	11.64 ±0.92 b	9.86 ±0.86 b
CK <sub>2</sub>	16.78 ±0.86 c	16.74 ±0.85 b	11.29 ±0.98 c	11.43 ±0.90 b	10.10 ±0.99 b
T <sub>1</sub>	23.34 ±0.94 a	16.06 ±0.77 b	15.32 ±0.95 a	14.36 ±1.64 a	11.38 ±0.88 ab
T <sub>2</sub>	19.12 ±0.97 b	15.21 ±1.07 b	13.35 ±0.99 b	11.95 ±1.67 ab	12.34 ±1.21 a

在 0~10 cm,垄作免耕(T<sub>1</sub>)有机碳含量较常规平作(CK<sub>1</sub>)、水旱轮作(CK<sub>2</sub>)和垄作翻耕(T<sub>2</sub>)分别高 15%、39%和 22%。20~30 cm,与常规平作(CK<sub>1</sub>)、水旱轮作(CK<sub>2</sub>)和垄作翻耕(T<sub>2</sub>)比较,垄作免耕(T<sub>1</sub>)分别高 6%、36%和 15%,有机碳含量差异均达到显著水平( $p < 0.05$ )。而在 10~20、30~40、40~60 cm,垄作免耕(T<sub>1</sub>)和常规平作(CK<sub>1</sub>)、水旱轮作(CK<sub>2</sub>)及垄作翻耕(T<sub>2</sub>)有机碳含量差异不显著(表 3)。14 年垄作免耕(T<sub>1</sub>)对土壤结构扰动强度和频率都很小,减少了耕作的侵蚀和水蚀作用,使 0~10 cm 土层水稳性团聚体增多。而耕翻降低土壤含水量,机械破坏水稳性团聚体,压实导致气孔数量减少,从而使土壤有机碳的含量明显低于长期垄作免耕土壤,但这往往仅限于土壤表层。Chan 经过 19 年的不同耕作和秸秆管理后,研究表明 0~20 cm 土层总有机碳变化显著,而最大的差异在表层 0~5 cm,为

8.0 g kg<sup>-1</sup> (5.2 t hm<sup>-2</sup>)。在 0~5 cm 土层,耕作对总碳减少的影响大于残茬的影响,占到处理间总差异的 80%<sup>[26]</sup>。Pinheiro 等<sup>[27]</sup>研究巴西砖红壤有机碳分布时发现,在 0~5 cm,免耕较传统耕作有机碳总量高 39%,而在 5~10 cm 没有显著差异。土壤有机碳分层比率反映了土壤有机碳含量对土壤管理的响应<sup>[28]</sup>。因此,免耕有利于提高表层有机碳的含量,改善其分布格局。

## 2.3 田块土壤有机碳的空间分布

从表 4 可以看出耕层土壤中粘粒的变异系数最高,为 32.74%;砂粒的变异系数最低,为 9.58%;土壤有机碳的变异系数居中,为 14.07%。总的来看,土壤有机碳含量及相关土壤特性的变异程度较大,这与影响土壤有机碳含量及相关土壤特性的因素(如作物种植顺序、轮作、耕作和管理实践)较多,加剧土壤养分和物理特性转化与循环有关。

表 4 耕层土壤有机碳和土壤特性统计结果

Table 4 Statistics of SOC and soil properties in cultivated horizon

因子 Factor	平均值 Mean	中值 Mid-value	最小值 Min-value	最大值 Max-value	方差 Variance	标准差 Standard deviation	变异系数(%) Coefficient of variation
有机碳 Organic C ( $\text{g kg}^{-1}$ )	21.9	21.6	16.5	30.7	9.5	3.1	14.1
砂粒 Sand (1~0.05 mm, %)	32.0	31.3	27.7	38.8	9.4	3.1	9.6
粉粒 Silt (0.05~0.001 mm, %)	47.5	47.1	38.1	61.3	33.1	5.8	12.1
粘粒 Clay (<0.001 mm, %)	20.3	21.1	3.1	29.7	44.2	6.7	32.7
土壤水 Soil water (%)	67.6	47.5	47.5	99.4	160.7	12.7	18.8
容重 Bulk density ( $\text{g cm}^{-3}$ )	0.94	0.93	0.67	1.37	0.02	0.16	16.69

在研究区域上,土壤耕层中有机碳及相关土壤特性在空间上具有明显区别,随着距离增大,这种差别也在增加(表 5)。块金方差与基台值之比  $C_0/(C_0 + C)$  表明,土壤有机碳含量由随机因素引起的空间异质性占总空间异质性的 15.93%,而且主要表现在 2 m 以下的尺度上,而由空间自相关引起的空间异质性占总空间异质性的 84.07%,主要表现在 1~6.798 m 的中尺度范围内。土壤粉粒含量的

两种空间异质性分别为 34.94% 和 65.06%,表现在 2 m 以下的尺度和 2~13.829 m 的中尺度上,其块金效应较大,随机因素引起的空间异质性占总空间异质性的比例较大。砂粒、粘粒、土壤水和容重等的块金效应较小,空间自相关引起的空间异质性占 80% 左右或以上。但是有机碳含量的空间变化范围(6.798 m)明显地低于土壤粉粒等特性的(13.829 m)空间变异范围。

表 5 土壤有机碳和土壤特性的拟合模型和统计参数

Table 5 Simulating models and statistical parameter of SOC and soil properties

因子 Factor	模型 Model <sup>1)</sup>	$C_0$	$C_0 + C$	a	$C_0/(C_0 + C)$
有机碳 Organic C ( $\text{g kg}^{-1}$ )	S	1.69	10.6	6.80	0.159
砂粒 Sand (1~0.05 mm, %)	S	1.69	12.047	13.8	0.140
粉粒 Silt (0.05~0.001 mm, %)	S	14.6	41.82	13.8	0.349
粘粒 Clay (<0.001 mm, %)	E	10.0	46.24	13.8	0.217
土壤水 Soil water (%)	S	39.4	200.33	13.8	0.196
容重 Bulk density ( $\text{g cm}^{-3}$ )	S	0.005	0.035	13.8	0.143

1) S:球状模型 Spherical model; E:指数模型 Exponential model

耕层土壤有机碳含量及相关土壤特性均呈现较明显的空间分布格局,总趋势为大都具有条带状和斑块状的特点(图 1)。耕层土壤有机碳含量在垄作免耕处最高,达  $30.71 \text{ g kg}^{-1}$ ,而在常规平作处最低,为  $16.50 \text{ g kg}^{-1}$  左右,表明研究区土壤有机碳水平整体较高。免耕条件下,50% 以上新输入的碳集中在表层土壤,25 cm 以下土层为 20%,而传统耕作条件下的碳几乎全部集中在耕作层<sup>[29]</sup>。本研究结果证

明了在小尺度下耕作、轮作和秸秆覆盖还田等保护农业措施结合在影响土壤有机碳和土壤物理特性的空间分布格局上起着关键作用<sup>[1~3]</sup>。耕层土壤对气候变化最为敏感,也是受土地利用方式和利用程度影响最深的层次,是整个土壤圈与大气圈、水圈和生物圈间进行物质迁移与能量交换最活跃的场所。其土壤有机质含量的提高有助于培肥土壤、提高作物产量和增强土壤抗污染能力。

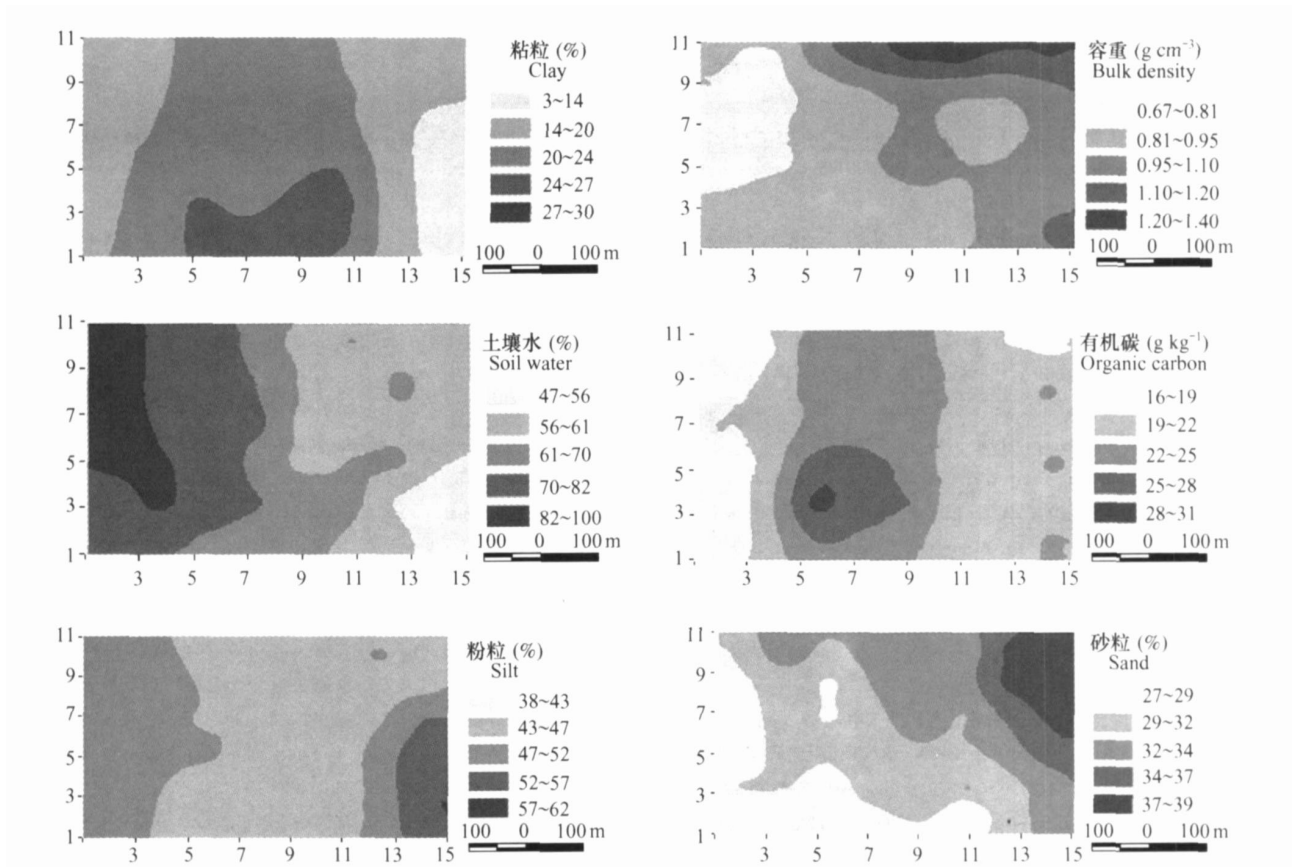


图1 土壤有机碳和相关土壤特性的空间分布

Fig.1 Spatial distributions of SOC and soil properties

### 3 结 语

长期垄作免耕定位试验稻田土壤团聚体组成以 0.25~0.02 mm 为主,其次为 0.02~0.002 mm。土壤团聚体含碳量以 2~0.25 mm 含碳量最高,有机碳总量主要存在于 0.25~0.02 mm,其次是 0.02~0.002 mm。垄作免耕剖面中有机碳含量趋向于 0~10 cm 土层大团聚体富集,而常规平作、水旱轮作和垄作翻耕剖面中有机碳含量自上而下降低较为平稳。田块土壤有机碳和相关土壤特性具有明显的空间分布格局,且土壤有机碳水平整体较高。稻田长期实行垄作免耕、轮作和秸秆覆盖还田缓解了耕作扰动,有利于土壤有机碳含量的提高及大团聚体的形成,影响土壤有机碳在团聚体、剖面和田块中的分布格局。随着农业土壤在全球碳循环中的作用日益重要,今后应进一步深入研究土壤团聚体形成过程与有机碳固定之间的关系及其对保护性农业管理在时空上的响应。

### 参 考 文 献

- [1] Paustian K, Cole C V, Sauerbeck D, *et al.* CO<sub>2</sub> mitigation by agriculture: An overview. *Climate Change*, 1998, 40: 135~162
- [2] Paustian K, Six J, Elliott E T, *et al.* Management options for reducing CO<sub>2</sub> emissions from agricultural soils. *Biogeochemistry*, 2000, 48: 147~163
- [3] 王政权. 地统计学及其在生态学中的应用. 北京: 科学出版社, 1999. 151~192. Wang Z Q. *Geo-statistics and Its Application in Ecology* (In Chinese). Beijing: Science Press, 1999. 151~192
- [4] Kern J S, Johnson M G. Conservation tillage impacts on national soil and atmospheric carbon levels. *Soil Science Society of America Journal*, 1993, 57: 200~210
- [5] Paustian K, Andren O, Janzen H R, *et al.* Agricultural soil as a C sink to offset CO<sub>2</sub> emissions. *Soil Manage*, 1997, 13: 230~244
- [6] 谢德体,陈绍兰,著. 水田自然免耕的理论与技术. 重庆: 重庆出版社, 2002. 65~168. Xie D T, Chen S L. *Theory and Technique of Paddy Field under Soil Virginization* (In Chinese). Chongqing: Chongqing Press, 2002. 65~168
- [7] Jastrow J D. Soil aggregate formation and the accrual of particulate and mineral-associated organic matter. *Soil Biology and Biochemistry*, 1996, 28: 656~676

- [ 8 ] Kandeler E, Stemmer M. Tillage change microbial biomass and enzyme activities in particle-size fraction of a Haplic Chernozem. *J. Soil Biology and Biochemistry*, 1999, 31: 1 253 ~ 1 264
- [ 9 ] Six L, Feller C, Denef K, *et al.* Soil organic matter, biology and aggregation in temperate and tropical soil- Effects of no-tillage. *Agronomie*, 2002, 22: 755 ~ 775
- [ 10 ] Pinheiro E F M, Pereira M G, Anjos L H C. Aggregate distribution and soil organic matter under different tillage systems for vegetable crops in a red Latosol from Brazil. *Soil Tillage Research*, 2004, 77: 79 ~ 84
- [ 11 ] Balesdent J, Mariotti A, Boissongier D. Effect of tillage on soil organic carbon mineralization estimated from  $^{13}\text{C}$  abundance in maize fields. *J. Soil Science*, 1990, 41: 587 ~ 596
- [ 12 ] 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: 2 099 ~ 2 103
- [ 13 ] Reicosky D C, Lindstrom M J. Fall tillage method- Effect on short-term carbon dioxide flux from soil. *J. Agronomie*, 1993, 85: 1 237 ~ 1 243
- [ 14 ] 潘根兴, 李恋卿, 张旭辉, 等. 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. Pan G X, Li L Q, Zhang X H, *et al.* Perspectives on issues of soil carbon pools and global change—With suggestions for studying organic carbon sequestration in paddy soil of China (In Chinese). *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2002, 25(3): 100 ~ 109
- [ 15 ] 魏朝富, 谢德体, 陈世正. 紫色水稻土有机无机复合与土粒团聚的关系. *土壤学报*, 1996, 33(1): 70 ~ 77. Wei C F, Xie D T, Chen S Z. Relationship between organic-mineral complexing developed from purple paddy soils (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 1996, 33(1): 70 ~ 77
- [ 16 ] 高明, 周保同, 魏朝富, 等. 不同耕作方式对稻田土壤动物、微生物及酶活性的影响研究. *应用生态学报*, 2004, 15(7): 1 177 ~ 1 181. Gao M, Zhou B T, Wei C F, *et al.* Effect of tillage system on soil animal, microorganism and enzyme activity in paddy field (In Chinese). *Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(7): 1 177 ~ 1 181
- [ 17 ] 黄雪夏, 倪九派, 高明, 等. 重庆市土壤有机碳库的估算及其空间分布特征. *水土保持学报*, 2005, 19(1): 54 ~ 58. Huang X X, Ni J P, Gao M, *et al.* Estimating soil organic carbon pool of Chongqing area and its spatial distribution (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(1): 54 ~ 58
- [ 18 ] 熊毅, 陈家坊. 土壤胶体(第二册)土壤胶体研究法. 北京: 科学出版社, 1985. Xiong Y, Chen J F. *Soil Colloid*. No. 2. *Methods of Soil Colloid* (In Chinese). Beijing: Science Press, 1985
- [ 19 ] 中国科学院南京土壤研究所编. 土壤理化分析. 上海: 上海科学技术出版社, 1978. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. ed. *Soil Physical and Chemical Analysis* (In Chinese). Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1978
- [ 20 ] 魏朝富, 陈世正, 谢德体. 长期使用有机肥料对紫色水稻土有机无机复合性状的影响. *土壤学报*, 1995, 32(2): 159 ~ 166. Wei C F, Chen S Z, Xie D T. Effects of long-term mature on organic-mineral properties in purple paddy soil (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 1995, 32(2): 159 ~ 166
- [ 21 ] 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, 16(6): 421 ~ 427. Li L Q, Pan G X, Gong W, *et al.* Organic carbon storage in selected paddy soil in Taihu Lake region and their Occurrence (In Chinese). *Bulletin of Science and Technology*, 2000, 16(6): 421 ~ 427
- [ 22 ] Christensen B T. Physical fractionation of soil organic matter in primary particular size and density separates. *Advances in Soil Science*, 1992, 20: 1 ~ 90
- [ 23 ] Six J, Paustian K, Elliott E T, *et al.* Soil structure and organic matter. I. Distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2000, 64: 681 ~ 689
- [ 24 ] 马毅杰, 陈家坊, 等著. 水稻土物质变化与生态环境. 北京: 科学出版社, 1999. 8 ~ 26. Ma Y J, Chen J F, *et al.* *Change in Paddy Soil Materials and Its Effect on Eco-environment* (In Chinese). Beijing: Science Press, 1999. 8 ~ 26
- [ 25 ] Castro F C, Lourenço A, Guimarães M F, *et al.* Aggregate stability under different soil management systems in a red latosol in the state of Parná, Brazil. *Soil and Tillage Research*, 2002, 65: 45 ~ 51
- [ 26 ] Chan K Y, Heenan D P, Oates A. Soil carbon fractions and relationship to soil quality under different tillage and stubble management. *Soil and Tillage Research*, 2002, 63: 133 ~ 139
- [ 27 ] Pinheiro E F, Pereira M G, Anjos L H C. Aggregate distribution and soil organic matter under different tillage systems for vegetable crops in a red latosol from Brazil. *Soil and Tillage Research*, 2004, 77: 79 ~ 84
- [ 28 ] Franzluebbers A J. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. *Soil and Tillage Research*, 2002, 66(2): 95 ~ 106
- [ 29 ] Beare M H, Cabrera M L, Hendrix P F, *et al.* Aggregate-protected and unprotected organic matter pools in conventional-tillage and no-tillage soil. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, 58: 787 ~ 795
- [ 30 ] 陈庆强, 沈承德, 孙彦闽, 等. 鼎湖山土壤有机质深度分布的剖面演化机制. *土壤学报*, 2005, 42(1): 1 ~ 8. Chen Q Q, Sun C D, Sun Y M, *et al.* Mechanism of distribution of soil organic matter with depth due to evolution of soil profiles at the Dinghushan Biosphere Reserve (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(1): 1 ~ 8



## DISTRIBUTION OF SOIL ORGANIC CARBON IN PURPLE PADDY FIELD UNDER LONG-TERM NON-TILLAGE RIDGE CULTURE

Tang Xiaohong<sup>1,2</sup> Shao Jingan<sup>1,2</sup> Huang Xuexia<sup>1</sup> Wei Chaofu<sup>1,2†</sup> Xie Deti<sup>1,2</sup> Pan Genxing<sup>3</sup>

(1 College of Resource and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China)

(2 Chongqing Key Lab. of Digital Agriculture, Chongqing 400716, China)

(3 Institute of Resources, Ecosystem and Environment of Agriculture, Nanjing Agric. Univ., Nanjing 210095, China)

**Abstract** Spatial distribution of soil organic carbon (SOC) is one of the key issues of the study on SOC sequestration, and plays a crucial role in understanding SOC storage dynamics. A research project on distribution of SOC in soil aggregates, profile, and field of purple paddy soil that is widely distributed in the Sichuan basin, was initiated in 1990. Results show that the highest organic carbon content in aggregates was discovered in the fraction of 2 ~ 0.25 mm in particle size, while total organic carbon (TOC) in aggregates was mainly distributed in the fractions of 0.25 ~ 0.02 mm and 0.02 ~ 0.002 mm. The content of SOC in aggregates tended to be greater (enrichment coefficient, EC > 1.5) in macroaggregates (> 0.25 mm) at depth of 0 ~ 10 cm under non-tillage ridge culture. In conventional fields under flat culture, paddy-upland rotation and ridge culture, SOC concentration decreased slowly with the increase in depth. Organic carbon content was significantly ( $p < 0.05$ ) different between treatments. Distribution of soil organic carbon and some related properties of the topsoil layer of the experiment field demonstrated significant spatial variation, forming stripes and patches. The treatment of non-tillage ridge culture was the highest in SOC content, reaching  $30.71 \text{ g kg}^{-1}$ , while the treatment of conventional flat culture the lowest being only around  $16.50 \text{ g kg}^{-1}$ . Long-term non-tillage ridge culture may lead to enrichment of SOC in macroaggregates of the surface soil layer and differentiation between layers of the soil profile.

**Key words** Purple paddy soil; Soil organic carbon; Distribution; Non-tillage ridge culture