

## 施猪粪对水稻土有机碳剖面分布的影响

宋哲岳<sup>1</sup>, 宋照亮<sup>2</sup>, 单胜道<sup>2</sup>

(1. 浙江农林大学 林业与生物技术学院, 浙江 临安 311300; 2. 浙江农林大学 环境与资源学院, 浙江 临安 311300)

**摘要:** 基于持续 10 a 的浙江省平湖地区水稻土长期定位试验, 研究了长期施肥下水稻土剖面总有机碳(TOC), 各粒级有机碳和热水溶性有机碳(HWOC)分布特征, 阐明施猪粪影响下土壤有机碳的积累和演化规律。结果表明: ①在 0~45 cm 土层, 施猪粪地块土壤总有机碳显著高于对照, 且随土层深度的增加, 施有机肥使土壤有机碳质量分数提高的幅度越大; ②总有机碳和砂粒碳、粉粒碳之间呈显著的正相关性关系( $P<0.05$ ), 且受土壤粉粒和黏粒对有机碳物理保护容量控制, 0~45 cm 土层土壤有机碳以砂粒碳为主, 45~85 cm 土层则以粉粒碳和黏粒碳为主; ③施猪粪可提高土壤热水溶性有机碳。图 2 表 4 参 28

**关键词:** 土壤肥料学; 猪粪; 水稻土; 有机碳; 粒级; 热水溶性有机碳

中图分类号: S152 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2013)02-0157-08

## Distribution of organic carbon with pig manure amendments in a paddy soil

SONG Zheyue<sup>1</sup>, SONG Zhaoliang<sup>2</sup>, SHAN Shengdao<sup>2</sup>

(1. School of Forestry and Biotechnology, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China; 2. School of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China)

**Abstract:** To improve paddy soil fertility, the effects of fertilization on the distribution of total organic carbon along with fractionation and hot water-solubility in paddy field soil profiles were studied. This work included accumulation of soil organic carbon and its soil profile evolution from a 10-year fertilization experiment with pig manure amendments in Pinghu County, Zhejiang Province. Results showed that in the 0–45 cm horizon soil organic carbon content differed greatly between pig manure treatments and no pig manure amendments. With organic fertilizer amendments, soil organic carbon increased with the increase of soil profile. Total organic carbon differed greatly from sandy carbon and amylaceous carbon ( $P<0.05$ ). Soil organic carbon in the 0–45 cm horizon consisted mainly of sandy carbon; whereas in the 45–85 cm horizon it was comprised mainly of amylaceous carbon and sticky carbon. Also, with the pig manure amendments, hot water-soluble organic carbon content of the soil increased. [Ch, 2 fig. 4 tab. 28 ref.]

**Key words:** soil fertilizer; pig manure; paddy soil; organic carbon; size fractionation; hot water-soluble organic carbon

土壤有机质在陆地生态系统演变和功能方面起着至关重要的作用<sup>[1-2]</sup>。土壤有机碳可根据土壤颗粒的大小分为砂粒(50~2 000  $\mu\text{m}$ ), 粉粒(2~50  $\mu\text{m}$ )和黏粒(<2  $\mu\text{m}$ )<sup>[3]</sup>有机碳。砂粒有机碳主要是处于新鲜的动植物残体和腐殖化有机物之间暂时的或过渡的有机碳, 对土壤环境和管理措施的变化十分敏感。土壤粉粒有机碳和黏粒有机碳周转较慢<sup>[4-5]</sup>, 其比例大小可间接表征土壤有机碳的抗氧化程度与难利用

---

收稿日期: 2012-04-03; 修回日期: 2012-06-08

基金项目: 浙江省自然科学基金资助项目(Z5080203, Y5080110)

作者简介: 宋哲岳, 从事环境生态研究。E-mail: sss-11.00@163.com。通信作者: 单胜道, 教授, 博士, 从事循环经济、环境科学的研究。E-mail: shanshd@vip.sina.com

的程度。目前，国内外对旱地不同粒级有机碳的形成、稳定性以及与土壤肥力关系的研究已取得了一定的进展<sup>[5-6]</sup>，但猪粪等有机肥施加对水稻土等土壤各粒级有机碳分布及稳定性的影响研究鲜见报道。土壤中水溶性有机碳(water soluble organic carbon, WSOC)的变化及其结构特征的研究对了解土壤有机质质量以及土壤养分循环方面有着重要的作用<sup>[7-9]</sup>。近年，土壤热水溶性有机碳(hot water organic carbon, HWOC)的损失预示易氧化有机养分及微生物量的降低，也表明土壤结构的可能退化。因此，土壤热水溶性有机碳是土壤质量测定的重要组成部分<sup>[10]</sup>。在中国，施肥(化肥和有机肥)对粮食增产的贡献率已占到50%以上<sup>[11]</sup>，然而长期养分非均衡施用及连续施用无机肥料将导致土壤结构的破坏以及土壤的物理、化学、生物化学质量与生产力的下降和有机碳的亏损<sup>[12]</sup>。畜禽粪便是一种优质的有机肥料源，它在栽培食用菌、加工饲料、生产沼气及提升土壤有机碳等方面有很大的用途<sup>[13]</sup>。本试验通过长期的不同施猪粪处理，了解土壤总有机碳、土壤热水溶性有机碳的剖面分布特征，以及有机碳在不同粒级土壤中的分布特征，为农业可持续发展及畜禽废弃物的循环利用提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验地位于浙江省平湖市，属北亚热带季风气候，年平均气温为16.0℃，年平均日照时数为2 000.0 h，年平均降水量1 170.0 mm，全年无霜期225 d左右。为了解施猪粪对水稻土有机碳的影响，在平湖市开展了水稻土施猪粪试验。供试水稻土田间(黄斑田)表层土(0~15 cm)基本情况：pH 6.40，总有机碳为20.95 g·kg<sup>-1</sup>；粒级组成：砂粒占52.87%，粉粒占44.23%，黏粒占2.90%(表1)。试验时间为1999年4月至2009年4月，施干质量猪粪量3.75 kg·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>于地面上。面积为667 m<sup>2</sup>·地块<sup>-1</sup>，试验共设3个处理：①施猪粪0 a的地块(L<sub>0</sub>)；②施猪粪5 a的地块(L<sub>5</sub>)；③施猪粪10 a的地块(L<sub>10</sub>)。重复3次·处理<sup>-1</sup>，随机排列。除猪粪外无其他肥料施加。供试肥料为纯猪粪，其有机碳、全磷、有效磷平均质量分数分别为252.60，14.70和870.80 mg·kg<sup>-1</sup>。

### 1.2 样品采集与处理

2009年4月，人工开挖土壤剖面到地下水水位为止，自下而上采集土壤剖面样品(不少于1.0 kg·样品<sup>-1</sup>)。采样深度为85 cm(分6层，上5层15 cm，第6层10 cm)。样品现场用聚乙烯塑料袋密封包装。样品自然风干后，去掉植物根须及植物残枝和腐叶，粉碎，过筛。用于测pH值和粒度分级的样品过10目筛，用于其他项目测试的土样过200目筛。

### 1.3 样品测试方法及数据处理

样品常规分析测定方法见参考文献[14]。按水土比为2.5:1.0测定土壤pH值。土壤碱熔后，用钼蓝比色法测定二氧化硅和总磷。重铬酸钾法测土壤有机碳(organic carbon, OC)。采用沉降方法<sup>[14]</sup>，将土壤有机矿质复合体物理分级，然后得到砂粒(50~2 000 μm)，粉粒(2~50 μm)和黏粒(<2 μm)各粒级，各粒级有机碳质量分数(各粒级中的有机碳量/土壤总量)测定采用重铬酸钾法。回收率为各粒级有机碳之和与总有机碳的比值。

采用Microsoft Office Excel 2003软件处理数据、做图，采用SPSS 13.0软件进行统计分析，所有测定数据以平均值±标准差的形式表示，不同施肥处理之间采用Duncan's新复极差法进行多重比较。

## 2 结果

### 2.1 施猪粪对水稻土pH值和总有机碳的影响

从表2可以看出：与L<sub>0</sub>处理相比，L<sub>5</sub>处理的0~15，15~30，30~45 cm土层总有机碳分别增加28.1%，35.1%和29.5%，L<sub>10</sub>处理的0~15，15~30，30~45 cm土层总有机碳则分别增加47.6%，105.3%

表1 供试土壤的粒级分布

Table 1 Distribution of different sized particles of the soil used in the experiment

深度/cm	砂粒比例/%	粉粒比例/%	黏粒比例/%
0~15	52.87	44.23	2.90
15~30	30.60	59.81	9.59
30~45	12.84	68.88	18.28
45~60	6.61	72.86	20.53
60~75	6.40	72.68	20.92
75~85	5.36	73.81	20.83

和 171.7%。以上分析表明：在 0~45 cm 土层的总有机碳随施猪粪年限的增加而增加，且随深度的增加其增加的幅度逐渐提高。在底土层(45~85 cm)，施猪粪对其有机碳的分布影响不大。 $L_0$ 、 $L_5$ 、 $L_{10}$  各处理在 0~45 cm 土层范围内随剖面深度的增加土壤总有机碳逐渐降低，而 45~85 cm 土层的总有机碳变化不大。 $L_5$  的 45 cm 以下土壤的有机碳少于对照处理，可能是初始土壤不均一所致。

pH 值随剖面深度的增加呈逐渐增加的趋势。 $L_5$  和  $L_0$  相比较，除表层 0~15 cm 土壤 pH 值差异不显著，其他各土层 pH 值差异均达到显著水平( $P<0.05$ )。 $L_{10}$  和  $L_0$  相比较，15~30, 30~45, 75~85 cm 土层之间 pH 值差异不显著，其他各土层差异达显著水平( $P<0.05$ )。 $L_{10}$  和  $L_5$  相比较，0~15, 15~30 cm 间 pH 值差异不显著，其他各土层 pH 值间差异均达到显著水平( $P<0.05$ )。施猪粪地块的 pH 值普遍高于无猪粪地块，其中施加 5 a 的 pH 值最大。

## 2.2 施猪粪对水稻土颗粒有机碳分布的影响

从表 3 得知：砂粒碳的分布特征和总有机碳的分布特征非常相似。对于砂粒碳，施猪粪显著增加了各处理 0~45 cm 土层中的砂粒碳。 $L_5$  处理的 0~15, 15~30, 30~45 cm 土层有机碳分别增加 39.8%, 68.0% 和 150.8%， $L_{10}$  处理的 0~15, 15~30, 30~45 cm 土层有机碳分别增加 36.1%，155.1% 和 616.4%。 $L_{10}$  处理与  $L_5$  处理相比增加幅度分别为-2.6%，51.9% 和 185.6%。对于粉粒碳， $L_{10}$  处理的 0~45 cm 土层显著高于对照  $L_0$ ( $P<0.05$ )，且 0~15, 15~30, 30~45 cm 土层有机碳分别增加 38.3%，77.3% 和 88.5%。 $L_{10}$  处理与  $L_5$  处理相比，各土层含量值间差异显著( $P<0.05$ )，0~15, 15~30, 30~45, 45~60, 60~75, 75~85 cm 土层有机碳分别增加 42.8%，79.5%，69.7%，12.5%，12.0% 和 18.0%，说明施猪粪年限的增加有利于粉粒中有机碳的积累；对于黏粒碳，各土层有机碳含量差异不大。

从图 1 得知：对于各个处理剖面，砂粒碳相对百分比随剖面深度的增加而呈现逐渐降低的趋势，其范围为 7%~77%，是变化范围最大的；而黏粒碳的百分比例则呈现逐渐增加的趋势，其范围为 3%~42%；粉粒碳范围为 18%~56%。

## 2.3 施猪粪对热水溶性有机碳的影响

从表 4 中得知：各处理的热水溶性有机碳随剖面深度的增加先降低后增加的趋势。表层土热水溶性有机碳较高，其原因主要与植物凋落物和根系分布特征有关。30~60 cm 土层，根系难以分布，该土层土壤热水溶性有机碳较低且变化平缓，这与 Flessa<sup>[15]</sup>的研究结果一致；60 cm 以下土层土壤热水溶性有机碳又逐渐升高，这是受地下水位影响的结果<sup>[15]</sup>，且随施猪粪年限的增加土壤热水溶性有机碳逐渐增加。土壤中水溶性有机碳不仅与土壤肥力、植被类型、施肥和季节等因素有关，而且受提取方法不同的影响<sup>[16]</sup>。本研究中不同处理不同层次土壤热水溶性有机碳占总有机碳比例范围为 2.31%~27.36%。下层土

表 2 不同土层次的土壤 pH 值和总有机碳

Table 2 Total organic carbon contents and pH in the different soil depths

处理	深度/cm	pH 值	总有机碳 /( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )
$L_0$ (0 a)	0~15	$6.40 \pm 0.52$ a	$20.95 \pm 0.6$ 9 a
	15~30	$7.23 \pm 0.32$ a	$14.14 \pm 0.73$ a
	30~45	$7.59 \pm 0.04$ a	$6.11 \pm 0.7$ 7 a
	45~60	$7.68 \pm 0.05$ a	$3.97 \pm 0.23$ ab
	60~75	$7.69 \pm 0.04$ a	$3.88 \pm 0.14$ b
	75~85	$7.74 \pm 0.09$ a	$4.74 \pm 0.73$ b
	85~95	$7.74 \pm 0.09$ a	$4.74 \pm 0.73$ b
$L_5$ (5 a)	0~15	$7.16 \pm 0.42$ ab	$26.84 \pm 0.87$ b
	15~30	$7.82 \pm 0.24$ b	$19.11 \pm 0.73$ b
	30~45	$8.12 \pm 0.05$ b	$7.91 \pm 0.60$ b
	45~60	$8.23 \pm 0.06$ c	$3.04 \pm 0.20$ a
	60~75	$8.40 \pm 0.11$ c	$2.82 \pm 0.03$ a
	75~85	$8.64 \pm 0.13$ b	$2.96 \pm 0.17$ a
	85~95	$8.64 \pm 0.13$ b	$2.96 \pm 0.17$ a
$L_{10}$ (10 a)	0~15	$7.29 \pm 0.04$ b	$30.93 \pm 0.52$ c
	15~30	$7.48 \pm 0.15$ ab	$29.03 \pm 0.86$ c
	30~45	$7.84 \pm 0.21$ a	$16.60 \pm 0.81$ c
	45~60	$7.99 \pm 0.05$ b	$4.27 \pm 0.76$ b
	60~75	$7.90 \pm 0.03$ b	$3.82 \pm 0.31$ b
	75~85	$7.80 \pm 0.06$ a	$4.52 \pm 0.39$ b
	85~95	$7.80 \pm 0.06$ a	$4.52 \pm 0.39$ b

说明：所列数值间的差异比较为同一深度不同处理之间的比较，不同字母表示数值间差异显著( $P<0.05$ )。

表3 土壤有机碳在各粒级中的分布

Table 3 Distribution of soil organic carbon in different sized soil particles

处理	深度/cm	砂粒碳/(g·kg <sup>-1</sup> )	粉粒碳/(g·kg <sup>-1</sup> )	黏粒碳/(g·kg <sup>-1</sup> )	有机碳回收/%
L <sub>0</sub> (0 a)	0~15	14.38 ± 0.82 a	5.43 ± 0.96 a	0.72 ± 0.17 a	98.00
	15~30	6.62 ± 0.94 a	5.03 ± 0.83 a	1.37 ± 0.49 a	92.08
	30~45	1.22 ± 0.18 a	2.97 ± 0.69 a	1.73 ± 0.13 a	96.89
	45~60	0.40 ± 0.00 a	2.19 ± 0.09 b	1.53 ± 0.07 b	103.78
	60~75	0.37 ± 0.03 a	2.11 ± 0.02 ab	1.67 ± 0.20 b	106.96
	75~85	0.39 ± 0.05 a	2.40 ± 0.27 b	1.94 ± 0.08 c	99.79
L <sub>5</sub> (5 a)	0~15	20.11 ± 0.89 b	5.26 ± 0.17 a	0.72 ± 0.03 a	97.21
	15~30	11.12 ± 0.95 b	4.97 ± 0.45 a	1.16 ± 0.13 a	90.27
	30~45	3.06 ± 0.41 b	3.30 ± 0.65 a	1.22 ± 0.07 a	95.83
	45~60	0.58 ± 0.11 ab	1.99 ± 0.08 a	1.17 ± 0.02 a	123.03
	60~75	0.39 ± 0.05 a	2.00 ± 0.09 a	1.12 ± 0.07 a	124.47
	75~85	0.43 ± 0.08 a	2.05 ± 0.04 a	1.20 ± 0.16 a	124.32
L <sub>10</sub> (10 a)	0~15	19.58 ± 0.83 b	7.51 ± 0.89 b	1.93 ± 0.60 b	93.82
	15~30	16.89 ± 0.33 c	8.92 ± 0.06 b	2.64 ± 0.11 b	98.00
	30~45	8.74 ± 0.58 c	5.60 ± 0.96 b	1.89 ± 0.86 a	97.77
	45~60	0.66 ± 0.15 b	2.24 ± 0.10 b	1.09 ± 0.06 a	93.44
	60~75	0.39 ± 0.01 a	2.24 ± 0.10 b	1.29 ± 0.14 a	102.62
	75~85	0.53 ± 0.15 a	2.42 ± 0.08 b	1.54 ± 0.11 b	99.34

说明：所列数值间的差异比较为同一深度不同处理之间的比较，不同字母表示数值间差异显著( $P<0.05$ )。

壤热水溶性有机碳占土壤总有机碳的比例高，可能是总有机碳在土壤剖面下层分布少的缘故。

### 3 讨论

本试验表明：施猪粪主要增加土壤0~45 cm土层有机碳，且随施加年限的增加而增加。很多研究者也得出有机无机肥料配施能显著提高不同类型、气候条件和利用方式的土壤有机碳含量<sup>[4,6,17~19]</sup>。如马力等<sup>[19]</sup>对长期(26 a)不同施肥处理条件下水稻土有机碳分布变异及其矿化动态的研究表明，长期施肥使水稻土表层有机碳显著升高，施有机肥和秸秆还田较单施化肥更能促进土壤表层有机碳累积。又如周萍等<sup>[4]</sup>对太湖地区长期(16 a)不同施肥处理(化肥与秸秆配施、化肥与猪粪配施、单施化肥和不施肥)下黄泥土总有机碳及深度分布特征的研究表明，不同施肥处理主要增加耕作层土壤的总有机碳，但是不同施肥处理并没有改变总有机碳的深度分布格局。这与本研究结果相符。

本研究0~45 cm土层的砂粒为有机碳主要储存体，且随施猪粪年限的增加其有机碳增加。而在45~85 cm土层，有机碳主要储存于粉粒和黏粒上。许多研究者对有机肥等不同施肥处理条件下黑垆土<sup>[20]</sup>、黄泥土<sup>[4]</sup>、乌泥土<sup>[21]</sup>、白土<sup>[22]</sup>、红壤性水稻土<sup>[6]</sup>耕作层各粒级团聚体中有机碳分布研究也表明，有机碳主要存在于土壤砂粒上，施加有机肥能显著提高砂粒碳含量。周萍等<sup>[4]</sup>对太湖地区长期(16 a)有机肥等不同施肥处理下黄泥土砂粒有机碳深度分布进一步研究表明，不同施肥处理主要影响耕作层土壤的砂粒有机碳及改变砂粒碳的分配比例，但并没有改变砂粒有机碳的深度分布格局。对土壤有机碳的团聚体物理保护作用研究<sup>[23]</sup>表明，砂粒作为新增有机碳的主要载体，主要受土壤管理方式的影响；粉粒、黏粒具有保护有机碳的能力，但其保护容量有限，主要受土壤质地的影响。本研究土壤质地是以粉粒和黏粒为主，粉粒和黏粒本身具有保护有机碳的能力。当土壤中施加过量的外源有机物时，耕作层的粉粒和黏粒保护有机碳的容量会达到饱和状态，多余的外源有机物被分配到砂粒部分，所以在土壤耕作层中砂粒碳在各粒级碳中所占的比例最大，且随外源有机物施加年限的增加而增加；而在非耕作层，由于粉粒和黏

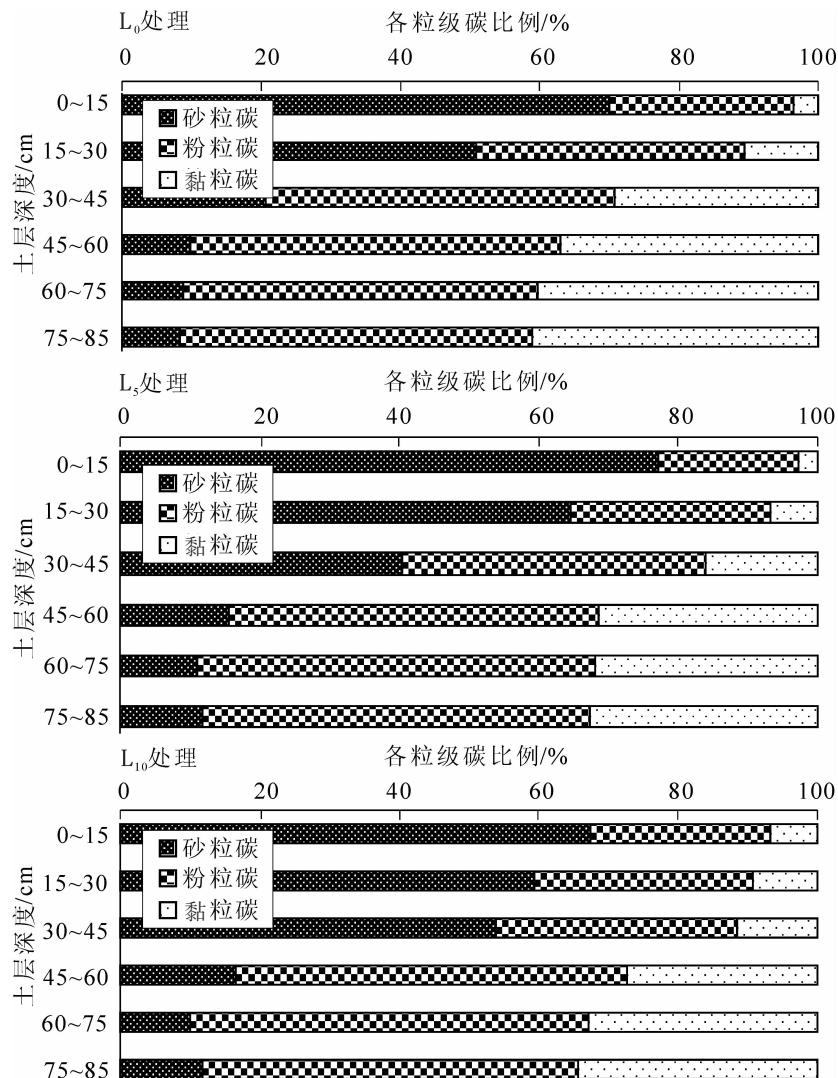


图1 不同剖面不同层次土壤各粒级碳的相对百分比

Figure 1 Percentages of OC in different sized soil particles account for TOC

粒与有机碳结合能力比砂粒强且自身保护有机碳的容量没有达到饱和，所以在该层以粉粒碳和黏粒碳为主。由图2可知：总有机碳和砂粒碳、粉粒碳之间呈极显著的正相关性，且随施猪粪年限的增加相关性越好，说明土壤总有机碳的增加主要是通过砂粒碳、粉粒碳的增加而增加的。而总有机碳和黏粒碳相关性不显著，说明由于物理保护作用，黏粒碳比较稳定，受外源碳输入影响较小。

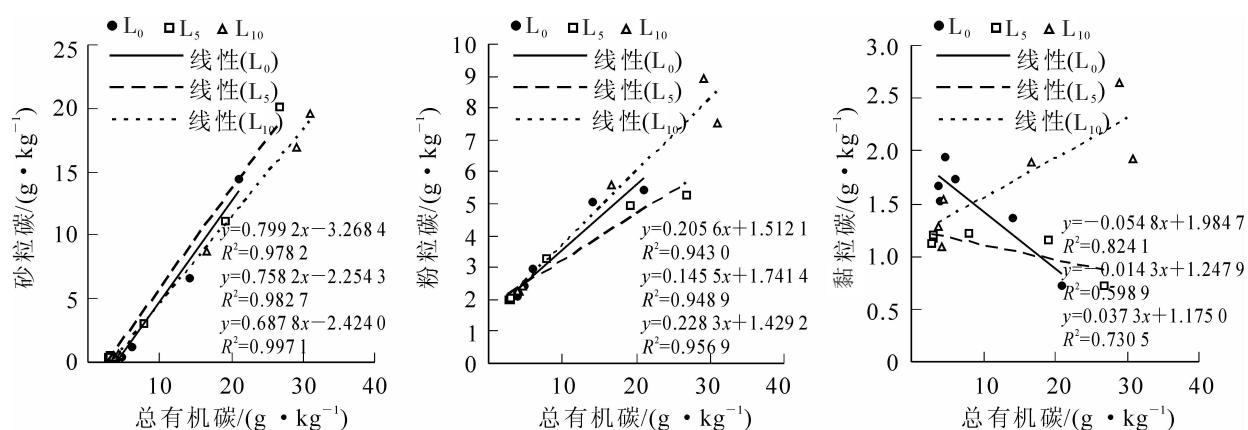


图2 土壤总有机碳和各粒级碳之间的关系

Figure 2 Relationship between soil TOC contents and OC contents in different sized soil particles

与对照处理相比, 随施猪粪年限的增加土壤热水溶性有机碳增加, 且各剖面土壤热水溶性有机碳随剖面深度增加先降低后升高。王连峰等<sup>[24]</sup>对长期不同施肥制度下的黑土热水提取态有机碳的变化研究表明, 与对照处理相比, 有机肥和2倍量有机肥都能提高土壤的热水溶性有机碳, 后者的增加幅度更大。对庐山地区部分阔叶林土壤研究也发现, 水溶性有机碳在0~40 cm土层降低, 而在40~80 cm土层升高<sup>[25]</sup>。王艳等<sup>[26]</sup>研究了长期施肥对设施蔬菜栽培土壤水溶性有机碳剖面分布的影响表明, 各处理水溶性有机碳在土壤剖面0~20, 20~40和40~60 cm等3个土层中呈高低高的趋势。王开峰等<sup>[27]</sup>研究了有机物循环对红壤稻田土壤有机碳和热水可提取碳的影响, 发现在有机物循环下稻田土壤热水溶性有机碳随时间先下降后缓慢上升或趋于稳定。许多研究<sup>[28]</sup>表明, 粽秆还田也能够增加土壤热水溶性有机碳。

有机肥的施入不仅能直接增加土壤有机碳, 还通过增加土壤的作物产量和微生物量而提高土壤作物凋落物、根系分泌物以及微生物量等输入, 所以, 高量有机肥的施入能大幅度提高土壤热水溶性有机碳<sup>[24]</sup>。

#### 4 结论

施猪粪增加了土壤的总有机碳, 且随着施加年限的增加而增加。不同处理的0~45 cm土层有机碳差异显著。随剖面深度的增加有机碳逐渐降低, 且0~45 cm土层中的各分层有机碳差异显著, 45~85 cm土层中的各分层差异不显著。

砂粒碳剖面分布规律与总有机碳的相似, 即0~45 cm土层与45~85 cm土层有机碳有显著差异。0~45 cm土层砂粒碳高, 且其中的各土层差异显著。总有机碳和砂粒碳、粉粒碳之间呈显著的正相关性关系。受土壤粉粒和黏粒对有机碳物理保护容量控制, 施猪粪土壤的0~45 cm土层以砂粒碳为主, 45~85 cm土层则以粉粒碳和黏粒碳为主。

土壤热水溶性有机碳随剖面深度增加先降低后增加, 且随施肥年限的增加而增加。土壤热水溶性有机碳与总有机碳的比值随剖面深度增加呈缓慢—快速—缓慢增加的趋势。施猪粪可提高土壤热水溶性有机碳。

#### 参考文献:

- [1] DIANA H, JOSE M F, CESAR P, et al. Water-soluble organic matter and biological activity of a degraded soil amended with pig slurry [J]. *Sci Total Environ*, 2007, **378**: 101–103.
- [2] POWELSON D S, BROOKES P C, CHRISTENSEN B T. Measurement of soil microbial biomass provided an early in-

表4 土壤中的热水溶性有机碳及其与总有机碳比值

Table 4 HWOC contents in the soil and the ratios of HWOC/TOC

处理	深度/cm	热水溶性有机碳/(g·kg <sup>-1</sup> )	热水溶性有机碳/总有机碳
$L_0(0\text{ a})$	0~15	0.55 ± 0.07 a	0.026
	15~30	0.45 ± 0.03 a	0.032
	30~45	0.42 ± 0.00 a	0.069
	45~60	0.51 ± 0.08 a	0.128
	60~75	0.58 ± 0.01 a	0.149
	75~85	0.55 ± 0.01 a	0.116
$L_5(5\text{ a})$	0~15	0.71 ± 0.06 b	0.026
	15~30	0.54 ± 0.04 b	0.028
	30~45	0.45 ± 0.03 a	0.057
	45~60	0.45 ± 0.03 a	0.148
	60~75	0.62 ± 0.02 a	0.220
	75~85	0.81 ± 0.01 b	0.274
$L_{10}(10\text{ a})$	0~15	0.89 ± 0.03 c	0.029
	15~30	0.67 ± 0.04 c	0.023
	30~45	0.61 ± 0.01 b	0.037
	45~60	0.64 ± 0.04 b	0.150
	60~75	0.91 ± 0.03 b	0.238
	75~85	1.12 ± 0.01 c	0.248

说明: 所列数值间的差异比较为同一深度不同处理之间的比较, 不同字母表示数值间差异显著( $P<0.05$ )。

- dication of changes in total soil organic matter due to straw incorporation [J]. *Soil Biochem*, 1989, **19**: 159 – 164.
- [3] 朱书法. 贵州典型陆地生态系统土壤中有机碳含量及碳同位素组成[D]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 2006.  
ZHU Shufa. *Organic Carbon Content and Carbon Isotope Composition of Soil from Typical Terrestrial Ecosystem of Guizhou Province* [D]. Guiyang: Chinese Academy of Sciences. Institute of Geochemistry, 2006.
- [4] 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 Xuhui, PAN Genxing. 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 Taihu Lake region [J]. *Plant Nutrit Fert Sci*, 2006, **12** (6): 765 – 771.
- [5] CHRISTENSEN B T. Physical fraction of soil and organic matter in primary particle size and density separates [J]. *Adv Soil Sci*, 1992, **20**: 1 – 76.
- [6] 郭菊花, 陈小云, 刘满强, 等. 不同施肥处理对红壤性水稻土团聚体的分布及有机碳、氮含量的影响[J]. 土壤, 2007, **39** (5): 787 – 793.  
GUO Juhua, CHEN Xiaoyun, LIU Manqiang, et al. Effects of fertilizer management practice on distribution of aggregates and content of organic carbon and nitrogen in red paddy soil [J]. *Soils*, 2007, **39** (5): 787 – 793.
- [7] MCGILL W B, CANNON K R, ROBERTSON J A, et al. Dynamics of soil microbial biomass and water soluble organic C in Berton L after 50 years of cropping to two rotations [J]. *Can J Soil Sci*, 1986, **66**: 1 – 19.
- [8] DAVIDSON E A, GALLOWAY L F, STRAND M K. Assessing available carbon: comparison of techniques across selected forest soils [J]. *Commun Soil Sci Plant Anal*, 1987, **18**: 45 – 64.
- [9] CHANTIGNY M H, ANGERS D A, PREVOST D, et al. Dynamics of soluble organic C and C mineralization in cultivated soils with varying N fertilization [J]. *Soil Biol Biochem*, 1999, **31**: 543 – 550.
- [10] 吕国红, 周广胜, 周莉, 等. 土壤溶解性有机碳测定方法与应用[J]. 气象与环境学报, 2006, **22** (2): 51 – 55.  
LÜ Guohong, ZHOU Guangsheng, ZHOU Li, et al. Methods of soil dissolved organic carbon measurement and their applications [J]. *J Meteorol Environ*, 2006, **22** (2): 51 – 55.
- [11] 李华栋. 农业持续发展中的植物养分管理[M]. 南昌: 江西人民出版社, 2008.
- [12] 赖庆旺, 李茶苟, 黄庆海. 红壤性水稻土无机肥连施与土壤结构特性的研究[J]. 土壤学报, 1992, **29** (2): 168 – 174.  
LAI Qingwang, LI Chagou, HUANG Qinghai. Effect of continuous application of inorganic fertilizer on soil structure properties of paddy soil derived from red soil [J]. *Acta Ped Sin*, 1992, **29** (2): 168 – 174.
- [13] 段然, 王刚, 杨世琦, 等. 沼肥对农田土壤的潜在污染分析[J]. 吉林农业大学学报, 2008, **30** (3): 310 – 315.  
DUAN Ran, WANG Gang, YANG Shiqi, et al. Preliminary research of potential pollution on farmland soil after using Biogas [J]. *J Jilin Agric Univ*, 2008, **30** (3): 310 – 315.
- [14] 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, 2000.
- [15] FLESSA H, LUDWING B, HEIL B, et al. The origin of soil organic C, dissolved organic C and respiration in a long-term experiment in Halle, Germany, determined by  $^{13}\text{C}$  natural abundance [J]. *J Plant Nutr Soil Sci*, 2000, **163**: 157 – 163.
- [16] 李忠佩, 焦坤, 吴大付. 不同提取条件下红壤水稻土溶解有机碳的含量变化[J]. 土壤, 2005, **37** (5): 512 – 516.  
LI Zongpei, JIAO Kun, WU Dafu. Soluble organic C content of paddy soils in subtropical china in relation to extraction conditions [J]. *Soils*, 2005, **37** (5): 512 – 516.
- [17] 马成泽, 周勤, 何方. 不同肥料配合施用土壤有机碳盈亏分布[J]. 土壤学报, 1994, **31** (1): 34 – 40.  
MA Chengze, ZHOU Qin, HE Fang. Surplus-deficit distribution of organic carbon in soil under combined fertilization [J]. *Acta Ped Sin*, 1994, **31** (1): 34 – 40.
- [18] 张付申. 不同施肥处理对土娄土和黄绵土有机质氧化稳定性的影响[J]. 河南农业大学学报, 1996, **30** (1): 80 – 84.  
ZHANG Fushen. Effects of different applications of fertilizer to Lou soil and yellow Loamy soil on the oxidizable stability of soil [J]. *Acta Agric Univ Henan*, 1996, **30** (1): 80 – 84.
- [19] 马力, 杨林章, 慈恩, 等. 长期不同施肥处理对水稻土有机碳分布变异及其矿化动态的影响[J]. 土壤学报,

- 2009, **46** (6): 1051 – 1058.
- MA Li, YANG Linzhang, CI En, *et al.* Effects of long-term fertilization on distribution and mineralization of organic carbon in paddy soil [J]. *Acta Ped Sin*, 2009, **46** (6): 1051 – 1058.
- [20] 高会议, 郭胜利, 刘文兆, 等. 不同施肥处理对黑垆土各粒级团聚体中有机碳含量分布的影响 [J]. 土壤学报, 2010, **47** (5): 931 – 938.
- GAO Huiyi, GUO Shengli, LIU Wenzhao, *et al.* Effect of fertilization on organic carbon distribution in various fractions of aggregates in caliche soils [J]. *Acta Ped Sin*, 2010, **47** (5): 931 – 938.
- [21] 王芳, 潘根兴, 李恋卿. 长期不同施肥处理下黄泥土原土和团聚体颗粒组的菲含量变化[J]. 土壤, 2009, **41** (3): 464 – 470.
- WANG Fang, PAN Genxing, LI Lianqing. Effects of long-term fertilization on phenanthrene contents of original paddy soil and aggregate fractions [J]. *Soils*, 2009, **41** (3): 464 – 470.
- [22] 李恋卿, 潘根兴, 张旭辉. 退化红壤植被恢复中表层土壤微团聚体及其有机碳的分布变化[J]. 土壤通报, 2000, **31** (5): 193 – 195.
- LI Lianqing, PAN Genxing, ZHANG Xuhui. Changes in organic carbon storage in aggregates of the surface horizon in a degraded Paleudult upon vegetation recovery [J]. *Chin J Soil Sci*, 2000, **31** (5): 193 – 195.
- [23] 周萍, 宋国菡, 潘根兴, 等. 南方3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[J]. 土壤学报, 2008, **45** (6): 1063 – 1071.
- ZHOU Ping, SONG Guohan, PAN Genxing, *et al.* Soc accumulation in three major types of paddy soils under long-term agro-ecosystem experiments from south china-physical protection in soil micro-aggregates [J]. *Acta Ped Sin*, 2008, **45** (6): 1063 – 1071.
- [24] 王连峰, 蔡延江, 张喜林, 等. 长期不同施肥制度下的黑土热水提取态有机碳的变化[J]. 土壤通报, 2009, **40** (2): 262 – 266.
- WANG Lianfeng, CAI Yanjiang, ZHANG Xilin, *et al.* Hot-water extractable carbon in black soil as affected by long-term fertilization [J]. *Chin J Soil Sci*, 2009, **40** (2): 262 – 266.
- [25] 王连峰, 潘根兴, 石盛莉, 等. 酸沉降影响下庐山森林生态系统土壤溶液溶解有机碳分布 [J]. 植物营养与肥料学报, 2002, **8** (1): 29 – 34.
- WANG Lianfeng, PAN Genxing, SHI Shengli, *et al.* Dissolved organic carbon in soil solution of paludalfs udalfs in Mt. Lushan forest under impact of acid deposition [J]. *Plant Nutr Fert Sci*, 2002, **8** (1): 29 – 34.
- [26] 王艳, 杨丽娟, 周崇峻, 等. 长期施肥对设施蔬菜栽培土壤水溶性有机碳含量及其剖面分布的影响 [J]. 中国农学通报, 2010, **26** (11): 178 – 181.
- WANG Yan, YANG Lijuan, ZHOU Congjun, *et al.* Long-term fertilization effect on content of WSOC in vegetable soil in greenhouse [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2010, **26** (11): 178 – 181.
- [27] 王开峰, 王凯荣, 彭娜, 等. 有机物循环对红壤稻田土壤有机碳和热水可提取碳的影响[J]. 土壤通报, 2007, **38** (3): 447 – 451.
- WANG Kaifeng, WANG Kairong, PENG Na, *et al.* Water extractable carbon in red-soil of paddy field [J]. *Chin J Soil Sci*, 2007, **38** (3): 447 – 451.
- [28] 郑立臣, 解宏图, 张威, 等. 稜秆不同还田方式对土壤中溶解性有机碳的影响[J]. 生态环境, 2006, **15** (1): 80 – 83.
- ZHENG Licheng, XIE Hongtu, ZHANG Wei, *et al.* Effects of different ways of returning straw to the soils on soluble organic carbon [J]. *Ecol Environ*, 2006, **15** (1): 80 – 83.