

## 长期施肥下红壤旱地的固碳效率<sup>①</sup>

柳开楼, 叶会财, 李大明, 黄庆海\*, 余喜初, 胡志华, 徐小林,  
胡惠文, 周利军, 王赛莲

(国家红壤改良工程技术研究中心/江西省红壤研究所, 南昌 330046)

**摘要:** 红壤旱地的有机碳含量普遍较低, 通过外源添加有机肥是增加土壤有机碳含量的重要手段。本研究以红壤旱地长期肥料试验为基础, 研究了不同施肥处理的土壤有机碳含量和储量的变化规律, 并进一步探讨碳投入与玉米产量及土壤碳储量的量化关系。结果表明: 施用有机肥可以大幅提升红壤旱地的有机碳含量, 氮磷钾+有机肥(NPKM)和有机肥(OM)处理在 27 年间的增加速率分别为 0.08 g/(kg·a)和 0.06 g/(kg·a), 有机碳储量的增加速率分别为 0.24 t/(hm<sup>2</sup>·a) 和 0.16 t/(hm<sup>2</sup>·a); 与不施肥(CK)处理相比, NPKM 和 OM 处理的土壤有机碳含量分别增加了 51.5% 和 42.0%, 有机碳储量则分别增加 57.1% 和 45.7%。进一步分析表明, 有机碳投入量与土壤有机碳储量变化速率之间存在显著的正相关关系( $R^2 = 0.9715$ ,  $P < 0.001$ ), 且线性拟合方程( $y = -0.158 + 0.086x$ )表明, 双季玉米种植下红壤旱地的固碳效率为 8.6%, 当有机碳投入量为 1.84 t/(hm<sup>2</sup>·a) 时, 红壤旱地的有机碳储量保持平衡。因此, 施用有机肥是提高红壤旱地有机碳储量的有效途径, 固碳效率和土壤有机碳平衡点则可以有效指导红壤旱地有机肥的管理措施。

**关键词:** 土壤有机碳; 红壤旱地; 长期施肥; 有机碳投入量; 拟合方程

中图分类号: S156.6 文献标识码: A

红壤是我国南方地区重要的土地资源, 总面积 5 690 万 hm<sup>2</sup>, 其中以红色黏土发育的红壤面积分布最广, 其自然特性为土层深厚、酸性强、黏重板结、有机质含量低、保肥保水性能差、生产力水平较低。再加上近年来不合理的土地利用, 导致红壤肥力进一步下降, 严重制约了该地区粮食增产潜力的发挥<sup>[1]</sup>。

土壤有机碳是陆地碳库的重要组成部分, 其分解和积累的变化一方面直接影响了全球的碳平衡, 另一方面影响了土壤肥力和植物生长, 从而间接影响粮食产量<sup>[2-3]</sup>。大量研究表明, 通过施用有机肥、秸秆覆盖、还田和种植绿肥等措施可以同时实现增加作物产量和土壤有机碳含量<sup>[4-6]</sup>。但土壤是一个复杂的系统, 有机碳在土壤中矿化、固定等周转过程受微生物、根系以及环境等诸多因素的影响, 在以往的研究中, Kong 等<sup>[7]</sup>和 Liu 等<sup>[8]</sup>研究发现土壤有机碳固定与累积碳投入存在显著的线性关系。Zhang 等<sup>[9]</sup>研究认为这种线性关系主要适用于那些土壤有机碳含量尚未达到饱和点的土壤, 且认为这些土壤具有较大的潜力

固定大气的 CO<sub>2</sub>。因此, 通过构建碳投入和固定的量化关系是研究土壤有机碳平衡的重要途径, 但这些研究多集中在小麦、玉米、水稻等粮食主产区<sup>[8-11]</sup>。在红壤旱地上, 虽然已有研究表明作物产量与土壤有机碳含量呈显著的正相关关系<sup>[4]</sup>, 但有关土壤固碳效率对不同施肥措施的响应规律仍不明确<sup>[5]</sup>, 尤其是双季玉米连作模式下。而研究不同培肥措施的固碳效率对于指导红壤旱地的有机肥管理意义重大。因此, 本研究以双季玉米种植模式的红壤旱地长期肥料试验为基础, 通过分析不同施肥处理的土壤有机碳含量和储量的变化规律, 并进一步探讨了碳投入与玉米产量及土壤碳储量的相互关系, 以期明确红壤旱地的固碳效率及碳投入的平衡点, 从而指导该地区的玉米生产和肥料管理。

### 1 材料与方法

#### 1.1 试验地概况

长期试验地位于江西省进贤县张公镇江西省红

基金项目: 江西现代农业科研协同创新专项(JXXTCX2015003-005), 江西省科技支撑计划项目(20141BBF60050), 公益性行业(农业)科研专项经费(201203030)和国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2011CB100501)资助。

\* 通讯作者(hqh0791@vip.sina.com)

作者简介: 柳开楼(1984—), 男, 河南滑县人, 硕士, 助理研究员, 主要从事土壤肥力演变的研究。E-mail: liukailou@163.com

壤研究所内(116°17'23"E、28°35'15"N)，地处中亚热带，年均气温 18.1 °C，≥10 °C 积温 6 480 °C，年降雨量 1 537 mm，年蒸发量 1 150 mm，无霜期约为 289 d，年日照时数 1 950 h。供试土壤为红壤，成土母质为第四纪红黏土。长期试验从 1986 年开始，初始时耕层土壤基本性质为：有机碳 9.39 g/kg，全氮 0.98 g/kg，碱解氮 60.3 mg/kg，全磷 0.62 g/kg，有效磷 5.6 mg/kg，全钾 11.36 g/kg，速效钾 70.25 mg/kg，pH 6.0。

## 1.2 试验设计

本研究共选取 7 个施肥处理：①不施肥处理(CK)；②氮(N)；③氮磷钾(NPK)；④两倍氮磷钾(HNPK)；⑤氮磷钾+有机肥(NPKM)；⑥有机肥(OM)。每处理重复 3 次，小区面积 22.2 m<sup>2</sup>，随机排列，各小区之间用 60 cm 深水泥埂隔开。种植方式为春玉米-秋玉米-冬闲制。玉米品种自试验开始后每季均为掖单 13 号。具体肥料用量详见表 1，氮肥、磷肥和钾肥的种类分别为尿素(N 为 46.2%)、钙镁磷肥(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 为 46.2%)和氯化钾(K<sub>2</sub>O 为 60%)。磷肥、钾肥和有机肥在玉米种植前作基肥一次性施用，氮肥分基肥(70%)和追肥(30%)施用。玉米种植中采用河水灌溉，其他管理措施同农民习惯。

表 1 红壤旱地不同施肥处理的肥料投入量  
Table 1 Fertilizer inputs of drylands of red soil under different treatments

处理	每季的施肥量(kg/hm <sup>2</sup> )			
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	鲜猪粪
CK				
N	60			
NPK	60	30	60	
HNPK	120	60	120	
NPKM	60	30	60	15 000
OM				15 000

注：猪粪的含水率为 70.8%，烘干基的有机碳 340 g/kg，氮磷钾含量分别为 12.0、9.0 和 10.0 g/kg。

## 1.3 测定指标和方法

**1.3.1 样品采集** 每年在秋玉米收获后的 11 月中旬随机采集 0~20 cm 土壤，每小区取 5 个点混合成一个样，室内风干，磨细过 1 mm 和 0.25 mm 筛，装瓶保存待分析。在每季玉米成熟期，每个小区采集 3 棵有代表性的植株样，将籽粒和秸秆分开后烘干，研磨以备分析。

**1.3.2 土壤和植株养分测定** 土壤有机碳(SOC)采用 K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 氧化法测定，土壤全氮(TN)用半微量凯氏法测定，土壤全磷(TP)为 HF-HClO<sub>4</sub> 消煮

-钼锑抗比色法测定，土壤全钾(TK)用 HF-HClO<sub>4</sub> 消煮-火焰光度计法测定，碱解氮(AN)采用碱解扩散法测定，有效磷(AP)采用 NaHCO<sub>3</sub> 浸提-钼锑抗比色法测定，速效钾(AK)采用 NH<sub>4</sub>OAc 浸提-火焰光度计法测定。植株样品用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 消化，凯氏法测氮，钼锑抗比色法测磷，火焰光度计法测钾。具体测定方法见参考文献[12]。

### 1.3.3 土壤有机碳投入和固定的相关指标计算

$$SOC_t = C_t \times BD_t \times d \times 10 \quad (1)$$

式中：SOC<sub>t</sub> 为耕层土壤有机碳储量(t/hm<sup>2</sup>)；C<sub>t</sub> 为耕层土壤有机碳含量(g/kg)；d 为耕层厚度(m)，本研究为 0.2 m；BD<sub>t</sub> 为土壤体积质量(g/cm<sup>3</sup>)；10 为单位转换系数。

$$S_C = \frac{C_t - C_0}{t} \quad (2)$$

式中：S<sub>C</sub> 为土壤有机碳含量的年均变化速率(t/(hm<sup>2</sup>·a))；t 为试验观测期限(a)，由试验观测的终止年与起始年的差值得到；C<sub>0</sub> 和 C<sub>t</sub> 分别为试验观测起始年和终止年的有机碳含量(g/kg)。

$$S_{SOC} = \frac{SOC_t - SOC_0}{t} \quad (3)$$

式中：S<sub>SOC</sub> 为土壤有机碳储量的年均变化速率(t/(hm<sup>2</sup>·a))；t 为试验观测期限(a)，由试验观测的终止年与起始年的差值得到；SOC<sub>0</sub> 和 SOC<sub>t</sub> 分别为试验观测起始年和终止年的有机碳储量(t/hm<sup>2</sup>)。

$$C_{input} = \left[ (Y_g + Y_s) \times R \times D_y + R_s \times Y_s \right] \times (1 - W) \times C_{crop} / 1000 \quad (4)$$

式中：C<sub>input</sub> 为根茬有机碳投入量(kg/hm<sup>2</sup>)，Y<sub>g</sub> 为作物籽粒产量(kg/hm<sup>2</sup>)；Y<sub>s</sub> 是秸秆产量(kg/hm<sup>2</sup>)；R 为光合作用进入地下部分的碳的比例(%)；D<sub>y</sub> 为作物根系生物量平均分布在 0~20 cm 土层的比例(%)；R<sub>s</sub> 为作物收割留茬占秸秆的比例(%)；W 和 C<sub>crop</sub> 分别为玉米地上部分风干样的含水量(%)和含碳量(g/kg)。

$$C_{input-M} = \frac{Manure_C \times (1 - W) \times A_m}{1000} \quad (5)$$

式中：C<sub>input-M</sub> 为有机肥的有机碳投入量(kg/hm<sup>2</sup>)，Manure<sub>C</sub> 是实测有机肥的有机碳含量(g/kg)；W 为有机肥含水量(%)；A<sub>m</sub> 为每年施用有机肥的鲜基重(kg/(hm<sup>2</sup>·a))。

对投入与土壤有机碳储量变化量之间进行线性回归

$$y = ax - b \quad (6)$$

式中：a 为固碳效率(%)，b 为土壤有机碳的年分解

速率 ( $t/(hm^2 \cdot a)$ )。

采用 Excel 2003 和 SPSS 16.0 进行数据的整理和分析,采用 Origin 8.1 软件作图,不同处理的差异显著性采用 LSD 进行比较( $P < 0.05$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 长期施肥对红壤旱地有机碳含量的影响

长期施肥条件下,红壤旱地不同肥料处理土壤有机碳含量变化见图 1。与不施肥处理(CK)相比,施肥处理的土壤有机碳含量显著提高,其中以氮磷钾+有机肥(NPKM)和有机肥(OM)处理最高,氮肥单独施用(N)处理的土壤有机碳在试验 27 年间均高于不施肥(CK),但与试验前相比则不存在显著提高;氮磷钾(NPK)和两倍氮磷钾(HNPK)处理在试验前 20 年间随着施肥年限的增加其土壤有机碳含量逐渐提高,但 20~27 年间则快速下降,在 27 年时与试验前不存在显著差异,但与 CK 处理相比,NPK、HNPK 处理的土壤有机碳含量在试验 27 年时分别增加了 17.4% 和 19.0%;在连续试验 27 年时,NPKM 和 OM 处理土壤有机碳含量分别比 CK 增加 51.5% 和 42.0%,且在 27 年间的增加量分别为 2.26 g/kg 和 1.53 g/kg,增加速率分别为 0.08 g/(kg·a) 和 0.06 g/(kg·a)。其中以 NPKM 处理的增幅最高。因此,在红壤旱地上,氮磷钾肥与有机肥配合施用可以持续稳定提高土壤有机碳含量。

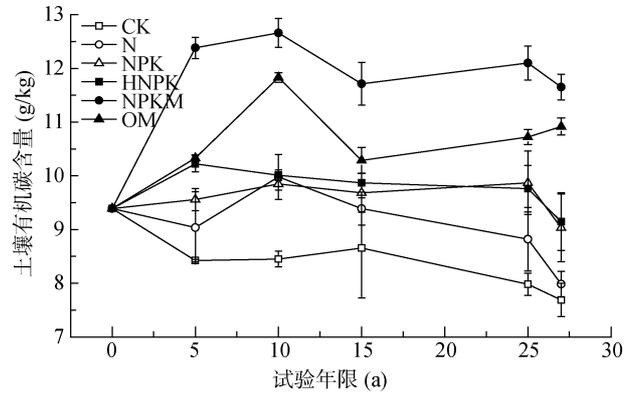


图 1 长期施肥下红壤旱地有机碳含量变化趋势  
Fig. 1 Changes of SOC contents in drylands of red soil under long-term fertilization

### 2.2 长期施肥对红壤旱地有机碳储量的影响

不同施肥措施可以显著影响红壤旱地的有机碳储量。表 2 显示,与试验前相比,试验 27 a 时,CK、N、NPK 和 HNPK 处理的有机碳储量分别下降 4.63、3.93、0.98 和 0.65  $t/hm^2$ ,而 NPKM 和 OM 处理的有机碳储量则分别提高了 6.36  $t/hm^2$  和 4.26  $t/hm^2$ 。在所有处理中,施用有机肥的土壤有机碳储量显著较高,与 CK 处理相比,27 a 时 NPKM 和 OM 处理有机碳储量则分别增加 57.1% 和 45.7%。进一步计算发现,NPKM 和 OM 处理的有机碳储量在 27 a 间的增加速率分别为 0.24 和 0.16  $t/(hm^2 \cdot a)$ 。这说明,施用有机肥是提高红壤旱地有机碳储量的有效途径。

表 2 长期施肥下红壤旱地有机碳储量和变化速率  
Table 2 Pools and changes of SOC in drylands of red soil under long-term fertilization

处理	土壤体积质量( $g/cm^3$ )	有机碳储量( $t/hm^2$ )		变化量( $t/hm^2$ )	变化速率( $t/(hm^2 \cdot a)$ )
	2012 年	1985 年	2012 年		
CK	1.36	25.51 a	20.88 c	-4.63	-0.17
N	1.40	26.21 a	22.29 c	-3.93	-0.15
NPK	1.37	25.79 a	24.81 b	-0.98	-0.04
HNPK	1.34	25.14 a	24.49 b	-0.65	-0.02
NPKM	1.41	26.44 a	32.80 a	6.36	0.24
OM	1.39	26.16 a	30.42 a	4.26	0.16

注:表中同列数据小写字母不同表示处理间差异达显著水平( $P < 0.05$ )。

### 2.3 红壤旱地有机碳投入与玉米产量的相互关系

在红壤旱地上,不同施肥处理下土壤的有机碳投入量存在明显差异(图 2),除了有机肥施用下土壤的有机碳投入量明显增加之外,由于不同施肥措施可以改变玉米的根系生物量,因此各处理的根茬碳呈现出 NPKM、HNPK > OM、NPK > N > CK。但综合计算得出,各处理的总有机碳投入量仍表现出 NPKM 和 OM 处理最高,分别比 CK 处理增加了 8.4 倍和 7.4 倍。

红壤旱地上增加有机碳投入可以提高玉米产量(图 3),且有机碳投入量与玉米产量的相互关系可以用米氏方程进行拟合: $y = -8.38 + 25.15x / (0.67 + x)$ ,  $R^2 = 0.9017$ ,  $P = 0.0308$ 。当玉米产量较低时(2~10  $t/(hm^2 \cdot a)$ ),提高有机碳投入量可以快速增加玉米产量,但是,当玉米产量大于 10  $t/(hm^2 \cdot a)$  时,有机碳投入量的持续增加不能显著增加玉米产量。这说明,随着有机碳投入量的增加,玉米产量存在最大值。根据方程进一步计算得

出，红壤旱地上玉米的最大产量为 15.62 t/(hm<sup>2</sup>·a)。

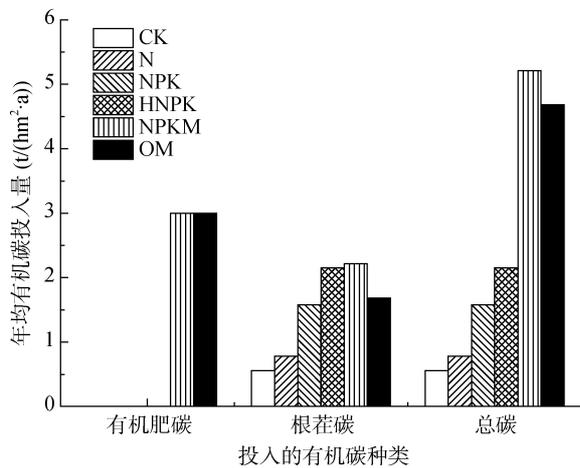


图 2 红壤旱地不同施肥处理有机碳投入

Fig. 2 Organic carbon inputs in drylands of red soil under different fertilization treatments

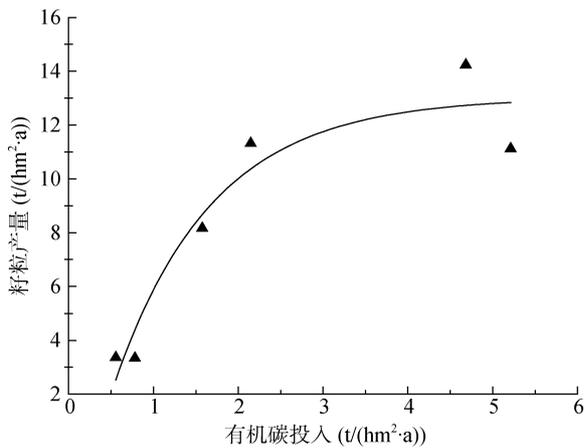


图 3 长期施肥下红壤旱地有机碳投入与玉米籽粒产量的相互关系

Fig. 3 Relationship between corn yield and organic carbon input in dryland of red soil under long-term fertilization

### 2.4 红壤旱地有机碳投入与有机碳储量变化速率的相互关系

图 4 表明，有机碳投入量与土壤有机碳储量变化速率之间存在显著的正相关关系，线性方程  $y = -0.158 + 0.086x$  可以较好地拟合二者的关系 ( $R^2 = 0.9715$ ,  $P < 0.001$ )，表明土壤有机碳没有出现饱和现象，红壤旱地的固碳效率为 8.6% (直线斜率)，且当有机碳投入量为 1.84 t/(hm<sup>2</sup>·a) 时，土壤有机碳储量变化速率为 0，即土壤有机碳储量保持平衡。这进一步证明，在红壤旱地上增加有机碳投入可以提高土壤有机碳储量。

### 3 讨论

在我国南方亚热带地区，红壤旱地是十分重要的

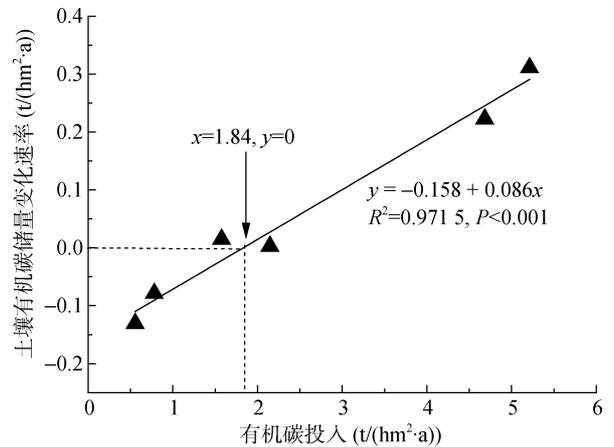


图 4 长期施肥下红壤旱地有机碳投入与土壤有机碳储量变化速率的相互关系

Fig. 4 Relationship between organic carbon input and changing rate of SOC pool in dryland of red soil under long-term fertilization

土壤类型，但是，酸性较强和土壤有机质含量较低<sup>[13-14]</sup>也限制了生产潜力的发挥，而大量研究证明，通过合理施肥可以显著提高红壤旱地肥力，尤其是长期施用有机肥<sup>[15-18]</sup>。在本试验中，氮磷钾+有机肥 (NPKM) 和有机肥 (OM) 处理在 27 年间土壤有机碳的增加量分别为 2.26 g/kg 和 1.53 g/kg，增加速率分别为 0.08 g/(kg·a) 和 0.06 g/(kg·a)。其中 NPKM 处理的增幅显著高于氮磷钾 (NPK)、两倍氮磷钾 (HNPK) 和 OM 处理。这与很多研究结果相同<sup>[19-21]</sup>，这主要是由于 NPKM 处理在增加土壤有机碳的同时，也通过较高的根系生物量进一步增加了有机碳的投入量 (图 2)。因此，在红壤旱地上，长期进行有机无机肥配施是稳定提高土壤有机碳含量的有效施肥措施，进而提高了土壤固碳能力。在本研究中，与试验前相比，试验 27 年时，施用有机肥处理 (NPKM 和 OM) 的土壤有机碳储量分别提高了 6.36 t/hm<sup>2</sup> 和 4.26 t/hm<sup>2</sup>，有机碳储量的增加速率分别为 0.24 t/(hm<sup>2</sup>·a) 和 0.16 t/(hm<sup>2</sup>·a)，且均显著高于 CK 处理。这进一步表明有机无机肥配施在维持作物高产的同时可以提升土壤有机碳储量<sup>[19,21]</sup>。说明 NPKM 处理比其他处理具有较强的碳“汇”功能。但也有研究表明，红壤旱地的有机碳矿化速率较高，有机肥的施用显著促进了土壤 CO<sub>2</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放，其固定的有机碳对温室气体的贡献较大<sup>[22-25]</sup>。

有机碳投入是作物产量提高的重要途径<sup>[26]</sup>，与水稻土上的结果相似，红壤旱地上有机碳投入量与玉米产量也存在显著的量化关系 ( $R^2 = 0.9017$ ,  $P = 0.0308$ )，且根据米氏方程发现其玉米产量的最大值为 15.62 t/(hm<sup>2</sup>·a)。这说明，虽然有机碳投入可以提

高红壤旱地的玉米产量,但玉米产量不会持续提高,该方程有利于人们根据目标产量准确估算有机碳投入量。然而,外源投入的有机碳在土壤中存在矿化、分解等过程,并不能完全转化成土壤有机碳。但土壤是一个复杂的系统,土壤中有有机碳的周转受土壤微生物、作物根系等诸多因素的影响,因此,在以往的研究中,人们往往将土壤作为一个“黑箱”,通过有机碳投入和土壤有机碳储量的量化关系来研究土壤的固碳效率和平衡点。在本研究中,当前培肥措施下红壤旱地的有机碳仍未饱和,且其固碳效率为 8.6%,该结果略低于蔡岸冬等<sup>[27]</sup>的研究(10.6%),可能与有机碳投入量和种植模式有关。同时,本研究根据线性方程表明,在双季玉米种植模式下,当红壤旱地的有机碳投入量为 1.84 t/(hm<sup>2</sup>·a) 时,土壤有机碳达到平衡。这一数值与该区域水稻土上的研究结果不同<sup>[28-29]</sup>,原因可能是红壤旱地和水稻土的光合营养微生物、有机碳矿化速率、可溶性有机碳组分及土壤湿度均存在较大差异<sup>[30-31]</sup>。

#### 4 结论

长期施用有机肥可以显著提高红壤旱地的有机碳含量和储量,在 27 年间,有机肥处理的土壤有机碳含量和储量的增加速率分别为 0.06 ~ 0.08 g/(kg·a) 和 0.16 ~ 0.24 t/(hm<sup>2</sup>·a) 且均显著高于其他施肥处理。在双季玉米种植模式下,红壤旱地的有机碳含量仍未达到饱和,其固碳效率为 8.6%。当有机碳投入量为 1.84 t/(hm<sup>2</sup>·a) 时,红壤旱地的有机碳储量保持平衡。

#### 参考文献:

- [1] 孙波,董元华,徐明岗,等. 加强红壤退化分区治理,促进东南红壤丘陵区现代高效生态农业发展[J]. 土壤, 2015, 47(2): 204-209
- [2] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. Science, 2004, 304(5677): 1623-1627
- [3] Pan G X, Li L Q, Wu L, et al. Storage and sequestration potential of topsoil organic carbon in China's paddy soils[J]. Global Change Biology, 2004, 10(1): 79-92
- [4] Zhang H M, Wang B R, Xu M G, et al. Crop yield and soil responses to long-term fertilization on a red soil in southern China[J]. Pedosphere, 2009, 19(2): 199-207
- [5] Zhang W J, Xu M G, Wang B R, et al. Soil organic carbon, total nitrogen and grain yields under long-term fertilizations in the upland red soil of southern China[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2009, 84(1): 59-69
- [6] Zhou H, Peng X, Perfect E, et al. Effects of organic and inorganic fertilization on soil aggregation in an Ultisol as characterized by synchrotron based X-ray micro-computed tomography[J]. Geoderma, 2013, 195: 23-30
- [7] Kong A Y, Six J, Bryant D C, et al. The relationship between carbon input, aggregation, and soil organic carbon stabilization in sustainable cropping systems[J]. Soil Science Society of America Journal, 2005, 69(4): 1078-1085
- [8] Zhang W J, Wang X J, Xu M G, et al. Soil organic carbon dynamics under long-term fertilizations in arable land of northern China[J]. Biogeosciences, 2010, 7: 409-425
- [9] Liu C, Lu M, Cui J, et al. Effects of straw carbon input on carbon dynamics in agricultural soils: A meta-analysis[J]. Global Change Biology, 2014, 20(5): 1366-1381
- [10] Cai Z C, Qin S W. Dynamics of crop yields and soil organic carbon in a long-term fertilization experiment in the Huang-Huai-Hai Plain of China[J]. Geoderma, 2006, 136(3): 708-715
- [11] Majumder B, Mandal B, Bandyopadhyay P K, et al. Organic amendments influence soil organic carbon pools and rice-wheat productivity[J]. Soil Science Society of America Journal, 2008, 72(3): 775-785
- [12] 鲁如坤. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000
- [13] 徐明岗, 于荣, 王伯仁. 长期不同施肥下红壤活性有机质与碳库管理指数变化[J]. 土壤学报, 2006, 43(5): 723-729
- [14] 蔡泽江, 孙楠, 王伯仁, 等. 长期施肥对红壤 pH, 作物产量及氮, 磷, 钾养分吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(1): 71-78
- [15] 王劲松, 戴茨华, 徐红, 等. 红壤连续施用绿肥和有机肥对玉米产量及土壤肥力的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2012(5): 27-30
- [16] 颜雄, 彭新华, 张杨珠, 等. 长期施肥对红壤旱地玉米生物量及养分吸收的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(2): 120-125
- [17] 于天一, 逢焕成, 李玉义, 等. 红壤旱地长期施肥对春玉米光合特性和产量的影响[J]. 中国农业大学学报, 2013(2): 17-21
- [18] 成艳红, 武琳, 钟义军, 等. 控释肥对稻草覆盖红壤花生产量及土壤有效氮平衡的影响[J]. 土壤学报, 2014, 51(2): 306-313
- [19] Yan X, Zhou H, Zhu Q H, et al. Carbon sequestration efficiency in paddy soil and upland soil under long-term fertilization in southern China[J]. Soil and Tillage Research, 2013, 130: 42-51
- [20] Zhang J C, Zhang L, Wang P, et al. The role of non-crystalline Fe in the increase of SOC after long-term organic manure application to the red soil of southern China[J]. European Journal of Soil Science, 2013, 64(6): 797-804
- [21] Peng X, Yan X, Zhou H, et al. Assessing the contributions of sesquioxides and soil organic matter to aggregation in an Ultisol under long-term fertilization[J]. Soil and Tillage Research. 2015, 146: 89-98

- [22] Zhai L M, Liu H B, Zhang J Z, et al. Long-term application of organic manure and mineral fertilizer on N<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> emissions in a red soil from cultivated maize-wheat rotation in China[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2011, 10(11): 1748–1757
- [23] Zhang X B, Wu L H, Sun N, et al. Soil CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O emissions in maize growing season under different fertilizer regimes in an upland red soil region of south China[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2014, 13(3): 604–614
- [24] 黄晶, 张杨珠, 刘宏斌, 等. 长期不同施肥条件下红壤小麦和玉米季 CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O 排放特征[J]. *生态与农村环境学报*, 2011, 27(4): 7–13
- [25] 王聪, 沈健林, 郑亮, 等. 猪粪化肥配施对双季稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放及其全球增温潜力的影响[J]. *环境科学*, 2014, 35(8): 3120–3127
- [26] 余喜初, 李大明, 柳开楼, 等. 长期施肥红壤稻田有机碳演变规律及影响因素[J]. *土壤*, 2013, 45(4): 655–660
- [27] 蔡岸冬, 张文菊, 申小冉, 等. 长期施肥土壤不同粒径颗粒的固碳效率[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(6): 1431–1438
- [28] Cong R H, Xu M G, Wang X B, et al. An analysis of soil carbon dynamics in long-term soil fertility trials in China[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2012, 93(2): 201–213
- [29] Zhang W J, Xu M G, Wang X J, et al. Effects of organic amendments on soil carbon sequestration in paddy fields of subtropical China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2012, 12: 457–470
- [30] 王媛华, 苏以荣, 李杨, 等. 水田和旱地土壤有机碳周转对水分的响应[J]. *中国农业科学*, 2012, 45(2): 266–274
- [31] Chen X, Wang A, Li Y, et al. Fate of <sup>14</sup>C-labeled dissolved organic matter in paddy and upland soils in responding to moisture[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 488: 268–274

## Carbon Sequestration Efficiency Under Long-term Fertilization in Dryland of Red Soil

LIU Kailou, YE Huicai, LI Daming, HUANG Qinghai\*, YU Xichu, HU Zhihua, XU Xiaolin, HU Huiwen, ZHOU Lijun, WANG Sailian

(National Engineering and Technology Research Center for Red Soil Improvement/Jiangxi Institute of Red Soil, Nanchang 330046, China)

**Abstract:** Soil organic carbon (SOC) content is low in red soil, so the application of organic fertilizers is a better fertilization pattern. A long-term experiment was conducted since 1986 in drylands of red soil with a double corn cropping system under different fertilization regimes in Jinxian county of Jiangxi Province, subtropical China. The contents and pools of SOC were analyzed and the relationship between SOC pools and carbon inputs were assessed. The results showed that organic fertilizers increased the contents and pools of SOC, among 27 years, for NPKM (chemical and organic fertilizers) and OM (organic fertilizer) treatments, the increasing rates of SOC contents and SOC pools were 0.08 g/(kg·a) and 0.06 g/(kg·a), 0.24 t/(hm<sup>2</sup>·a) and 0.16 t/(hm<sup>2</sup>·a), respectively. Compared with CK (control), SOC contents and SOC pools of NPKM and OM increased by 51.5% and 42.0%, 57.1% and 45.7%, respectively. The relationship between C input amount and SOC pool fitted well the linear equation ( $y = -0.158 + 0.086x$ ,  $R^2 = 0.971$ ,  $P < 0.001$ ). Carbon sequestration efficiency was 8.6% in double corn cropping system, and SOC pool reached balance when carbon input was 1.84 t/(hm<sup>2</sup>·a). Therefore, applying organic fertilizers can improve SOC content and pool, which can provide references for fertilization management in red soil through carbon sequestration efficiency and SOC balance.

**Key words:** Soil organic carbon; Red soil; Long-term fertilization; Organic carbon input; Fitted equation