

# 长期不同施肥措施下黑土有机碳的固存效应

郝小雨<sup>1,2,3,4</sup>, 马星竹<sup>2,3,4</sup>, 周宝库<sup>2,3,4</sup>, 李一丹<sup>2,3,4</sup>

(1. 黑龙江省农业科学院博士后科研工作站, 哈尔滨 150086; 2. 黑龙江省农业科学院土壤肥料与环境资源研究所, 哈尔滨 150086;  
3. 黑龙江省土壤环境与植物营养重点实验室, 哈尔滨 150086; 4. 黑龙江省肥料工程技术研究中心, 哈尔滨 150086)

**摘要:** 利用开始于1979年的黑土长期定位试验, 研究长期不同施肥措施下土壤有机碳含量演变特征、固碳效应及外源碳输入对土壤固碳的贡献。结果表明: 长期单施化肥土壤有机碳含量较试验前下降了11.6%~16.1%, 有机肥与化肥配施土壤有机碳含量呈上升趋势, 常量有机肥化肥配施(MNP、MNPK)土壤有机碳含量分别上升了6.5%和8.4%, 二倍量有机肥化肥配施( $M_2N_2$ 、 $M_2N_2P_2$ )土壤有机碳含量分别上升了7.7%和11.6%。不施肥和施化肥土壤有机碳储量呈现亏缺, 亏缺量在3.5~6.1 t/hm<sup>2</sup>。有机肥与化肥配施土壤有机碳储量表现为盈余,  $M_2N_2P_2$ 处理盈余量最高, 达到1.9 t/hm<sup>2</sup>。年均有机碳投入量与土壤固碳速率呈显著的线性正相关, 表明黑土仍具有一定的固碳潜力。黑土碳投入的转化效率为34.1%, 若要维持黑土有机碳库平衡, 则每年至少投入1.416 t/hm<sup>2</sup>有机碳。可见, 在黑土区增加土壤碳投入(有机肥)仍然是最有效的土壤固碳措施。

**关键词:** 长期施肥; 土壤有机碳; 有机碳储量; 固碳效应; 黑土

**中图分类号:**S153.6    **文献标识码:**A    **文章编号:**1009-2242(2016)05-0316-06

**DOI:**10.13870/j.cnki.stbcxb.2016.05.052

## Effect of Different Long-term Fertilization Practices on Carbon Sequestration in Black Soil

HAO Xiaoyu<sup>1,2,3,4</sup>, MA Xingzhu<sup>2,3,4</sup>, ZHOU Baoku<sup>2,3,4</sup>, LI Yidan<sup>2,3,4</sup>

(1. Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences Postdoctoral Programme, Harbin 150086;  
2. Institute of Soil and Fertilizer and Environment Resources, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Harbin 150086; 3. Key Laboratory of Soil Environment and Plant Nutrition, Heilongjiang Province, Harbin 150086; 4. Heilongjiang Province Fertilizer Engineering Research Center, Harbin 150086)

**Abstract:** Based on a long-term experiment during 1979—2014 with various fertilizations in black soil of northeast China, the objective of this study was to research evolution characteristics of soil organic carbon (SOC) content, carbon sequestration and its cooperation with carbon input. The results showed that: Compared to the initial soil condition, SOC content in long-term chemical fertilizers application (N, NP, NPK,  $N_2$ ) decreased by 11.6%~16.1%, while the SOC content in long-term horse manure application significantly increased. Chemical fertilizers application plus horse manure with conventional application rates (MNP, MNPK) or doubleness ( $M_2N_2$ ,  $M_2N_2P_2$ ) could increase SOC content 6.5%, 8.4%, 7.7% and 11.6%, respectively. The carbon sequestration in the treatment of non-fertilization (CK) and chemical fertilizers application appeared deficit, ranged from 3.5~6.1 t/hm<sup>2</sup>. In contrast, SOC storage in the treatment of chemical fertilizers application plus horse manure showed surplus, and the maximum value was 1.9 t/hm<sup>2</sup> ( $M_2N_2P_2$ ). There was a significantly positive linear correlation between annual average organic C input and C sequestration efficiency, which showed that black soil still had potential carbon sequestration. The calculated annual transform rate of input carbon was about 34.1%, and the least carbon input for maintaining the initial organic carbon level was about 1.416 t/hm<sup>2</sup>. Therefore, increasing carbon input (manure) was a key to improve carbon sequestration in black soil region.

**Keywords:** long-term fertilization; soil organic carbon content; soil organic carbon storage; carbon sequestration; black soil

收稿日期:2016-03-25

资助项目:国家科技支撑计划(2013BAD11B03, 2013BAD07B01); 国家公益性行业(农业)科研专项(201203030, 201303126); 黑龙江省农业科学院引进博士人员科研启动金项目(201507-23)

第一作者:郝小雨(1981—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事农田养分循环研究。E-mail: xiaoyuhao1981@sina.com

通信作者:周宝库(1963—), 男, 硕士, 研究员, 主要从事土壤肥料研究。E-mail: zhoubakou@aliyun.com

土壤有机碳是农业生态系统中重要的生态因子,不仅对作物生产力具有重要影响<sup>[1]</sup>,而且与土壤物理、化学、生物学等众多属性存在直接或间接的关系<sup>[2]</sup>。因此,探究农田土壤有机碳的固存效应对于提高土壤肥力及作物产量具有重要意义。土壤矿质养分库的形成与微生物的矿化分解作用密切相关,土壤有机碳的储量则是外源有机物量(根茬、秸秆和有机肥等)在土壤微生物作用下分解损失量与固持量二者之间平衡的结果<sup>[3]</sup>。不同施肥措施对土壤有机碳含量的影响效应不同。国内外众多长期试验研究结果表明,施用有机肥和秸秆可以实现土壤有机碳含量的提升。在洛桑试验站长达百年的 Broadbalk 小麦试验上的研究指出,施用农家肥的小区土壤有机碳含量显著增加<sup>[4]</sup>。我国一些长期试验的结果表明,连续施用有机物料后土壤有机碳含量显著增加<sup>[5-6]</sup>。土壤固碳效率定义为单位外源有机碳输入下土壤有机碳的变化量<sup>[7]</sup>。研究指出,土壤有机碳含量与碳输入量呈线性增加的关系<sup>[5]</sup>。Zhang 等<sup>[8]</sup>计算了我国 6 种典型土壤的固碳效率,指出年均碳投入与固碳量呈极显著的线性正相关,土壤固碳效率最高值出现在灌漠土(31.0%),其次为灰漠土(26.7%)和中层黑土(15.8%),最后为潮土(6.8%)、黄潮土(7.4%)、褐潮土(7.7%)。然而还有一些研究认为,土壤有机碳含量并未在大量外源有机物的投入下而持续增加,土壤有机碳对外源碳投入的增加无响应,即外源碳不会被土壤固定下来,土壤有机碳接近或达到饱和状态<sup>[9]</sup>。综上所述,关于土壤的固碳效率已有大量报道,但因气候、土壤类型、施肥、种植制度等的差异导致研究结论不尽一致。黑土具有质地疏松、肥力高、供肥能力强的特点,是我国农业综合生产能力最强的土壤,承担着国家粮食安全的重任,而随着黑土开垦年限的增加以及不合理的管理方式,土壤有机质水平迅速降低<sup>[10]</sup>。在本地区不同施肥措施下,如农民长期习惯单施化肥或增施有机肥,土壤的固碳效应如何,我们

不是十分清楚。因此,本研究借助 1979 年开始的厚层黑土长期定位试验,分析长期不同施肥措施下的土壤有机碳的演变特征,探讨外源碳输入与土壤固碳量之间的相互关系,以期深入认识黑土的固碳效应,为切实提高黑土土壤肥力、优化施肥管理措施和促进区域粮食可持续生产提供技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验地位于黑龙江省哈尔滨市道外区黑龙江省农业科学院试验基地,试验地海拔 151 m,地处中温带,≥10 ℃平均有效积温为 2 700 ℃,年均日照时数 2 600~2 800 h,无霜期约 135 d。试验地土壤类型为旱地黑土,成土母质为洪积黄土状粘土。长期试验于 1979 年布设,1980 年开始按小麦—大豆—玉米顺序轮作。初始耕层(1979 年,0—20 cm)土壤基本性质如下:有机碳 15.5 g/kg,全氮(N)1.47 g/kg,全磷(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)1.07 g/kg,全钾(K)25.16 g/kg,碱解氮 151 mg/kg,有效磷 22.2 mg/kg,速效钾 200 mg/kg,pH 值 7.2。2010 年 12 月黑土长期定位试验在冻土条件下进行了搬迁(搬迁深度 1.1 m),新址为哈尔滨市民主镇(126°51' E, 45°50' N)。

### 1.2 试验设计

试验共设 9 个处理,试验设计和各处理施肥量详见表 1。搬迁前小区面积 168 m<sup>2</sup>,无重复。搬迁后每个处理 3 次重复,试验小区面积为 36 m<sup>2</sup>(4 m×9 m),随机排列,小区间用水泥板分割(深度 1.1 m)。采用小麦—大豆—玉米轮作制,每年一季。有机肥为纯马粪(养分含量和含水率在施肥前测定),每个轮作周期施 1 次,于玉米收获后秋施,按纯氮量 75 kg/hm<sup>2</sup>(约马粪 18 600 kg/hm<sup>2</sup>),养分含量为多年测定平均值,N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O 含量分别为 0.58%,0.65%,0.90%。氮、磷、钾肥均为秋季施肥(玉米季氮肥 50% 秋施,50% 于大喇叭口期追施)。氮肥为尿素(N 含量 46%),磷肥为重过磷酸钙(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 含量 46%)、磷酸二铵(N 含量 18%,P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 含量 46%),钾肥为硫酸钾(K<sub>2</sub>O 含量 50%)。

表 1 长期定位试验处理及施肥量

处理	施氮量(N)			施磷量(P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )			施钾量 (K <sub>2</sub> O)	有机肥 kg/hm <sup>2</sup>
	小麦	大豆	玉米	小麦	大豆	玉米		
CK	0	0	0	0	0	0	0	0
N	150	75	150	0	0	0	0	0
NP	150	75	150	75	150	75	0	0
NPK	150	75	150	75	150	75	75	0
MNP	150	75	150	75	150	75	0	18600
MNPK	150	75	150	75	150	75	75	18600
N <sub>2</sub>	300	150	300	0	0	0	0	0
M <sub>2</sub> N <sub>2</sub>	300	150	300	0	0	0	0	37200
M <sub>2</sub> N <sub>2</sub> P <sub>2</sub>	300	150	300	150	300	150	0	37200

注:CK 表示不施肥;N、P、K、M(常量)分别表示施氮肥、磷肥、钾肥、有机肥;N<sub>2</sub>、P<sub>2</sub>、M<sub>2</sub> 分别表示施肥量为常量的 2 倍。

### 1.3 样品采集和测定

土壤样品于每年秋季收获后采集,每个小区采集

耕层土样(0—20 cm),按“S”形取 5 个点,每 5 个点组成一个混合样品。土壤风干过筛后采用重铬酸钾-

外加热法测定土壤有机碳。作物产量于收获期将小区划分  $10 \text{ m}^2$  样区, 作物全部收获, 人工脱粒, 风干后称重并测定含水率, 计算作物产量。

#### 1.4 分析方法

1.4.1 有机碳投入计算 本试验中, 作物秸秆全部移出, 只计算作物根、茎和有机肥碳(C)投入。当季作物根、茎碳投入量计算参见文献[6]。

$$C_{\text{投入}} = [(Y_g + Y_s) \times R_a \times D_r + R_r \times Y_s] \times (1 - W) \times C_{\text{作物}} / 1000 \quad (1)$$

式中:  $C_{\text{投入}}$  为作物根、茎碳投入量( $\text{t}/\text{hm}^2$ );  $Y_g$  为作物籽粒产量( $\text{kg}/\text{hm}^2$ );  $Y_s$  是秸秆产量( $\text{kg}/\text{hm}^2$ );  $R_a$  为光合作用进入地下部分的碳的比例(%), 小麦、大豆和玉米分别为 30%, 28%, 26%<sup>[11]</sup>;  $D_r$  为作物根系生物量平均分布在 0—20 cm 土层的比例(%), 小麦、大豆和玉米分别为 75.3%, 100%, 85.1%;  $R_r$  为作物收割留茬占秸秆的比例, 小麦、大豆和玉米分别为 13%, 15%, 3%;  $W$  和  $C_{\text{作物}}$  分别为作物地上部分风干样的含水量和含碳量(%), 据《中国有机肥料养分志》, 小麦、大豆和玉米植株的平均有机碳含量为分别为 39.9%, 45.3%, 44.4%。

有机肥碳投入计算见公式(2):

$$C_m = C \times (1 - W\%) \times A_m / 1000 \quad (2)$$

式中:  $C_m$  为有机肥碳投入量( $\text{t}/\text{hm}^2$ );  $C$  为实测有机肥的有机碳含量( $\text{g}/\text{kg}$ );  $W$  为有机肥含水量%;  $A_m$  为施用有机肥的鲜基重( $\text{kg}/\text{hm}^2$ )。

年均碳投入计算见公式(3):

$$A_c = (\sum_{i=1}^n C_{\text{投入}} + C_m \times 11) / t \quad (3)$$

式中:  $A_c$  为年均碳投入 [ $\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot a)$ ]; 11 为轮作周期数量(有机肥每个轮作周期施 1 次);  $t$  为试验观测年限(a), 由试验观测的终止年与起始年的差值得到。

#### 1.4.2 土壤有机碳储量变化

$$\text{SOC} = C \times BD \times d / 10 \quad (4)$$

式中:  $\text{SOC}$  为某层次土壤有机碳储量( $\text{t}/\text{hm}^2$ );  $C$  为某层次土壤有机碳含量( $\text{g}/\text{kg}$ );  $BD$  为某层次土壤容重( $\text{g}/\text{cm}^3$ );  $d$  为层次厚度(cm); 10 为单位转换系数。

土壤有机碳储量变化量( $\text{SOC}_t$ )为最近 3 年(2012—2014 年)的土壤有机碳储量平均值与试验起始年(1979 年)有机碳储量( $\text{SOC}_0$ )的差值。

$$S_{\text{SOC}} = (\text{SOC}_t - \text{SOC}_0) / t \quad (5)$$

式中:  $S_{\text{SOC}}$  为有机碳储量变化速率 [ $\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot a)$ ];  $t$  为试验观测年限(a)。

1.4.3 统计分析 利用 Excel 2007 软件对试验数据进行处理和作图, 应用双因素方差分析方法进行无重复处理的多重比较。利用 SPSS 13.0 软件进行方差分析、多重比较(LSD 法)和相关性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 长期不同施肥措施下黑土有机碳变化

由黑土长期定位试验 1979—2014 年土壤有机碳演变趋势可知, 年际间土壤有机碳含量波动变化, 但不同施肥措施下土壤有机碳的演变规律存在明显差异(图 1)。长期不施肥(CK)及施用化肥, 土壤有机碳含量呈下降趋势, 其中 CK 处理从初始的 15.5 g/kg 下降到 2014 年的 12.9 g/kg, 下降了 16.8%; 单施氮肥, N 和  $N_2$  处理土壤有机碳含量分别下降 16.1% 和 15.5%; 连续施 NP 和 NPK 肥, 土壤有机碳含量分别下降 9.0% 和 11.6%。有机肥与化肥配施, 土壤有机碳含量呈上升趋势, 其中 MNP 和 MNPK 处理土壤有机碳含量分别上升了 6.5% 和 8.4%, 施 2 倍量有机肥和化肥的  $M_2N_2$  和  $M_2N_2P_2$  处理分别上升了 7.7% 和 11.6%。可见, 施用有机肥对提高土壤有机碳含量效果明显。

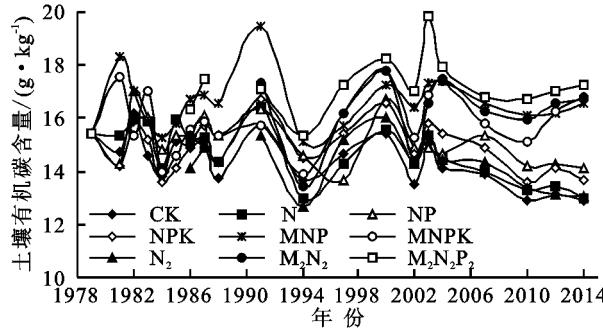


图 1 不同施肥处理土壤有机碳含量变化

采用线性方程拟合土壤有机碳含量与施肥年限的相关关系, 结果见表 2。可以看出, 长期不施肥和偏施化肥, 土壤有机碳含量与施肥年限呈显著负相关( $P < 0.05$ ), 即随着施肥年限的增加土壤有机碳含量持续下降, 下降速率为 0.054(CK), 0.061(N), 0.038(NP), 0.046( $N_2$ )  $\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{a})$ 。均衡施肥时(NPK), 尽管土壤有机碳含量也呈下降趋势, 但降低的幅度要低于不施肥和偏施肥处理。有机肥与化肥配施提高了有机碳的累积速率, 且随着有机肥施用量的增加, 累积速率明显提高。

表 2 长期施肥下土壤有机碳含量与试验年限相关性

处理	拟合方程	$r$
CK	$y = -0.054x + 15.21$	0.643***
N	$y = -0.061x + 15.62$	0.663**
NP	$y = -0.038x + 15.72$	0.469*
NPK	$y = -0.015x + 15.16$	0.184
MNP	$y = 0.001x + 16.57$	0.190
MNPK	$y = 0.023x + 15.54$	0.152
$N_2$	$y = -0.046x + 15.28$	0.457*
$M_2N_2$	$y = 0.043x + 15.17$	0.365
$M_2N_2P_2$	$y = 0.040x + 16.34$	0.373

注: \* 表示在 5% 水平相关性显著; \*\* 表示在 1% 水平相关性显著。

为了观察不同时间段土壤有机碳含量变化情况, 将

试验划分2个时间段(依据土壤有机碳波动的稳定状况),分别为第一阶段(1979—1997年)和第二阶段(1998—2014年),随着种植时间的延长,各处理土壤耕层有机碳含量的变化趋势存在一定差异(表3)。不施肥和单施化肥处理土壤有机碳含量逐步降低,CK、N、NP、NPK和N<sub>2</sub>处理第二阶段较第一阶段土壤有机碳含量下降了6.3%,6.1%,3.2%,1.0%,2.3%。化肥配施有机肥处理土壤有机碳含量呈上升趋势,MNP、MNPK、M<sub>2</sub>N<sub>2</sub>和M<sub>2</sub>N<sub>2</sub>P<sub>2</sub>处理第二阶段较第一阶段土壤有机碳含量增加了1.3%,5.5%,6.6%,6.8%。从有机碳平均含量来看,施用化肥基础上增施有机肥可提高土壤有机碳含量,有机无机肥配施的4个处理土壤有机碳含量均显著高于单施化肥的4个处理( $P<0.05$ )。

表3 不同时间段下土壤有机碳含量

处理	1979—1997年 有机碳含量/ (g·kg <sup>-1</sup> )	1998—2014年 有机碳含量/ (g·kg <sup>-1</sup> )	增幅(+)或 降幅(-)/ %	有机碳平 均含量/ (g·kg <sup>-1</sup> )
CK	14.8b	13.9d	-6.3	14.4e
N	15.1b	14.2cd	-6.1	14.7de
NP	15.4b	14.9c	-3.2	15.2d
NPK	15.0b	14.8c	-1.0	14.9de
MNP	16.5a	16.7b	+1.3	16.6b
MNPK	15.5b	16.4b	+5.5	15.9c
N <sub>2</sub>	14.6b	14.3cd	-2.3	14.4e
M <sub>2</sub> N <sub>2</sub>	15.4b	16.4b	+6.6	16.0c
M <sub>2</sub> N <sub>2</sub> P <sub>2</sub>	16.5a	17.6a	+6.8	17.1a

注:同列不同小写字母表示不同处理在  $P<0.05$  水平上呈显著差异。

## 2.2 不同施肥措施下黑土碳储量变化

经过34 a长期施肥,不同施肥措施的土壤有机碳储量变化较大(图2)。不施肥和施化肥土壤有机碳储量呈现亏缺,亏缺量在3.5~6.1 t/hm<sup>2</sup>。有机肥与化肥配施土壤有机碳储量表现为盈余,且施2倍量有机肥和化肥处理的盈余量最高,特别是M<sub>2</sub>N<sub>2</sub>P<sub>2</sub>处理,达到1.9 t/hm<sup>2</sup>。进一步分析土壤累计碳投入( $x$ )与有机碳储量( $y$ )的相关关系,其线性方程为 $y=2.807x-73.48$ ,表现为显著的正效应( $P<0.05$ ),说明有机肥的持续投入是土壤固碳的有效措施。

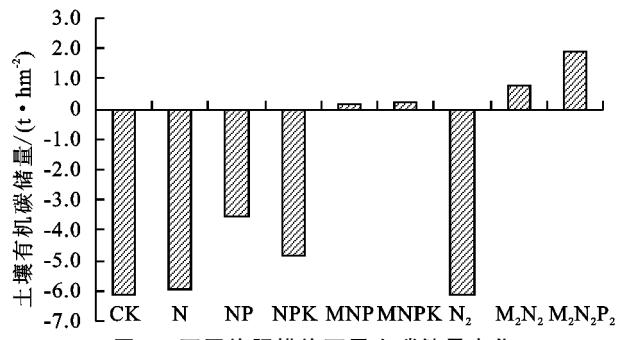


图2 不同施肥措施下黑土碳储量变化

## 2.3 不同施肥措施下黑土外源碳投入量与有机碳变化量的关系

将不同施肥处理的年均有机碳投入量与对应的

年均有机碳储量变化量(土壤固碳速率)进行相关分析,二者符合显著的线性正相关( $P<0.05$ ,图3),其线性方程为 $y=0.341x-0.483$ ,式中 $x$ 代表年均碳投入量(t/hm<sup>2</sup>·a), $y$ 代表年均有机碳变化速率(t/hm<sup>2</sup>·a)。相关方程的斜率表示有机碳投入量增减变化一个单位时有机碳储量发生的相应变化,直线在 $x$ 轴上的截距表示当土壤的有机碳储量变化值为0时所需的维持投入量<sup>[5]</sup>。可以看出,经过34年的连续施肥,土壤有机碳转化率为0.341 t/(hm<sup>2</sup>·a),即每年投入1 t的有机物料,其中0.341 t能进入土壤有机碳库。若要维持黑土有机碳库平衡,则每年至少投入1.416 t/hm<sup>2</sup>有机碳。

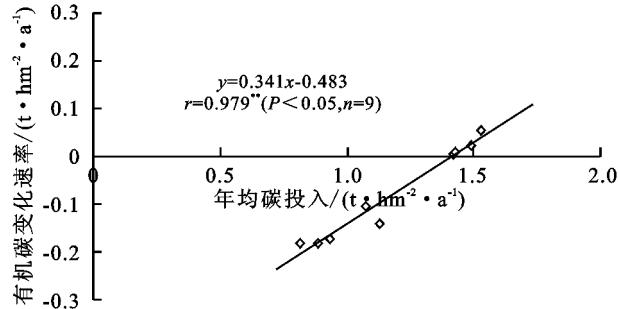


图3 碳投入与土壤有机碳变化的关系

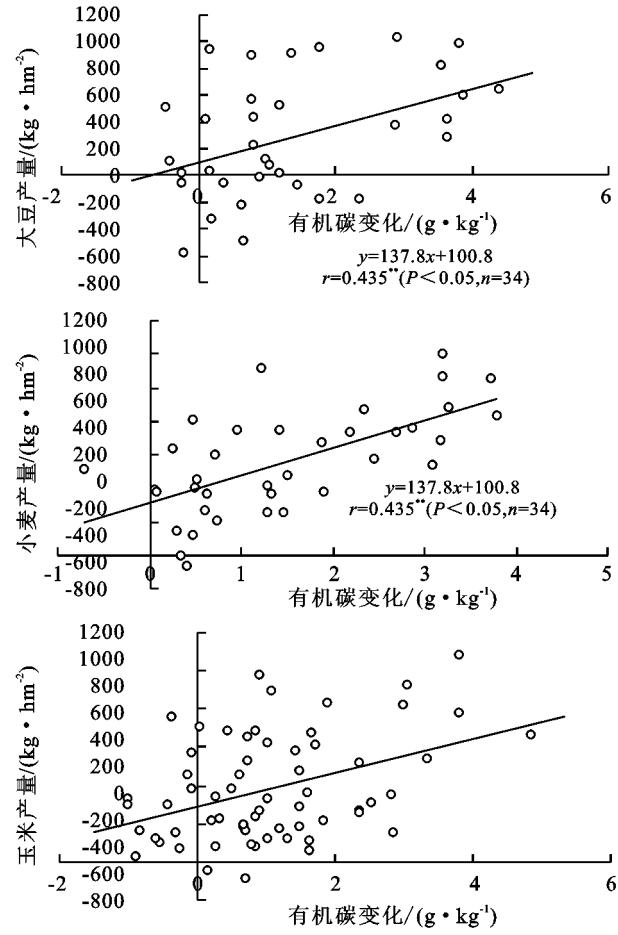


图4 土壤有机碳含量与产量的关系

## 2.4 土壤有机碳对作物产量的影响

将各年份施肥处理的作物产量与土壤有机碳含

量分别减去对应年份的 CK, 得到施肥变化产量(相对产量)和有机碳变化量。相关性分析显示, 施肥处理土壤有机碳含量变化与小麦、大豆和玉米相对产量均呈极显著的线性正相关( $P<0.05$ , 图 4), 这说明土壤有机碳含量越高, 3 种作物的产量也越高。利用线性方程进一步推断, 土壤有机碳含量每增加 1 g/kg, 小麦、大豆和玉米产量可分别增加 415.0, 137.8, 438.4 kg/hm<sup>2</sup>。

### 3 讨论

土壤有机质含量的动态变化是由系统输入和输出量的相对大小决定的, 当系统的输入量大于输出量时, 土壤有机质得到积累, 土壤有机碳含量将随之提高<sup>[12]</sup>。本试验中, 有机肥与化肥配施, 土壤有机碳含量呈上升趋势, 这与其他长期试验的研究结论一致。本研究中, 单施化肥处理土壤有机碳含量均呈下降趋势, 这与薄层黑土长期试验的研究结果类似<sup>[13]</sup>, 但与其他报道结果不尽一致。高伟等<sup>[5]</sup>在旱作潮土长期定位试验的研究表明, 经过 34 a 的长期施肥, 施用化肥(N、NP、NPK)处理土壤有机碳平均增加 29.0%。黄土旱塬黑垆土长期施肥的结果表明, 单施化肥(N、NP)土壤有机碳贮量较试验前分别增加 31.1% 和 47.4%<sup>[14]</sup>。之所以出现差异, 除了受土壤类型、气候条件、种植制度、轮作体系等影响外, 还说明单施化肥处理作物根系形成的残茬碳不足以补充土壤消耗的碳。此外, 偏施化肥(N、NP)导致产量降低, 进而减少了有机物质(残茬、根系及分泌物、凋落物)输入, 特别是氮素单一养分的增加还可能刺激土壤呼吸而减少有机碳储存<sup>[15]</sup>。研究表明, 随着化肥的持续投入, 土壤 C/N 比开始下降, 微生物活性提高, 加速了土壤原有碳和新鲜有机碳的分解矿化, 导致土壤有机碳含量下降<sup>[16]</sup>。

本试验中不同施肥处理年均碳输入量和土壤固碳速率呈显著的线性正相关关系, 一方面说明不同施肥处理土壤的固碳速率均不同程度地依赖于碳输入量, 不同施肥措施下外源碳输入量的变化是造成土壤固碳差异的主要原因, 而化肥和有机肥配施可以促进土壤对外源碳的固定; 另外, 在连续种植 34 a 后, 有机物料如有机肥、作物根茬、根系及分泌物等的持续投入, 黑土有机碳尚未达到饱和, 仍具有一定的固碳潜力。

有机肥对土壤碳库的提升作用, 除了有机肥直接的补充之外, 还可能与形成的土壤有机碳库组分及功能有关。由于不同施肥处理下形成的土壤有机碳库形态不同, 尤其是施用有机肥芳香族碳的增加, 直接影响到其矿化与腐殖化功能, 进而影响其周转速率与固存速率<sup>[17]</sup>。在灌育型水稻土上的研究表明, 长期有机无机配施可增加化学抗性化合物和碳水化合物的积累, 并且减缓活性组分的分解, 提高粉粒和黏粒组分有机碳含量<sup>[18]</sup>。蔡岸冬等<sup>[19]</sup>研究了湖南红壤不同粒径颗

粒的固碳效率, 指出施用有机肥处理的土壤粘粒组分的固碳速率最快, 为 0.29~0.52 t/(hm<sup>2</sup>·a), 其次为砂粒 0.30~0.40 t/(hm<sup>2</sup>·a), 而粗粉粒和细粉粒的固碳速率基本相当, 为 0.09~0.16 t/(hm<sup>2</sup>·a), 土壤总有机碳及各级颗粒有机碳与外源有机碳的输入呈显著正线性相关关系。研究表明, 多数富含碳的有机质初始易于截获在粗砂粒中, 随后在生物降解过程中向细砂粒、粉粒迁移, 最终在黏粒中积累<sup>[20]</sup>。可见, 施用有机肥能够促进土壤有机碳在粗砂粒及黏粒中的富集, 增强土壤物理团聚体和黏粒的保护作用, 对土壤有机碳的稳定具有重要意义。

### 4 结论

(1) 在黑土连续 34 a 的不同施肥, 不施肥(CK)及施用化肥土壤有机碳含量呈下降趋势, 其中 CK 处理下降 16.8%, 单施氮肥(N 和 N<sub>2</sub>)土壤有机碳含量分别下降 16.1% 和 15.5%, 均衡施肥(NPK)土壤有机碳含量下降 11.6%。有机肥与化肥配施土壤有机碳含量呈上升趋势, 施常规有机肥(MNP 和 MNPK)土壤有机碳含量分别上升了 6.5% 和 8.4%, 施 2 倍量有机肥(M<sub>2</sub>N<sub>2</sub> 和 M<sub>2</sub>N<sub>2</sub>P<sub>2</sub>)土壤有机碳含量分别上升了 7.7% 和 11.6%。

(2) 不施肥和施化肥土壤有机碳储量呈现亏缺, 亏缺量为 3.5~6.1 t/hm<sup>2</sup>。有机肥与化肥配施土壤有机碳储量表现为盈余, M<sub>2</sub>N<sub>2</sub>P<sub>2</sub> 处理盈余量最高, 达到 1.9 t/hm<sup>2</sup>。土壤累计碳投入与有机碳储量之间为极显著的线性正相关关系。

(3) 年均有机碳投入量与对应的年均有机碳储量变化量(土壤固碳速率)进行相关分析, 二者符合显著的线性正相关。黑土碳投入的转化效率为 34.1%, 若要维持黑土有机碳库平衡, 则每年至少投入 1.416 t/hm<sup>2</sup> 有机碳。

(4) 施肥处理土壤有机碳含量变化与小麦、大豆和玉米相对产量均呈极显著的线性正相关。

(5) 本试验条件下, 增加土壤碳投入(有机肥)仍然是黑土区最有效的土壤固碳措施。

#### 参考文献:

- [1] Pan G X, Smith P, Pan W N. The role of soil organic matter in maintaining the productivity and yield stability of cereals in China[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2009, 129(1/3):344-348.
- [2] Bhattacharyya R, Chandra S, Singh R D, et al. Long-term farmyard manure application effects on properties of a silty clay loam soil under irrigated wheat-soybean rotation[J]. Soil & Tillage Research, 2007, 94(2):386-396.
- [3] Kundu S, Bhattacharyya R, Prakash V, et al. Carbon sequestration and relationship between carbon addition and storage under rainfed soybean-wheat rotation in a sandy loam soil of the Indian Himalayas[J]. Soil and Tillage

- Research, 2007, 92(1):87-95.
- [4] 赵方杰. 洛桑试验站的长期定位试验:简介及体会[J]. 南京农业大学学报, 2012, 35(5):147-153.
- [5] 高伟, 杨军, 任顺荣. 长期不同施肥模式下华北旱作潮土有机碳的平衡特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(6):1465-1472.
- [6] 许咏梅, 刘骅, 王西和. 长期施肥下新疆灰漠土有机碳及作物产量演变[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(2):154-162.
- [7] 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(6):42-51.
- [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(2):409-425.
- [9] Stewart C E, Paustian K, Conant R T, et al. Soil carbon saturation: Implications for measurable carbon pool dynamics in long-term incubations[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2009, 41(2):357-366.
- [10] 韩晓增, 王凤仙, 王凤菊, 等. 长期施用有机肥对黑土肥力及作物产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(1):66-71.
- [11] Li C S, Frolking S, Harriss R. Modeling carbon biogeochemistry in agricultural soils[J]. Global Biogeochemical Cycles, 1994, 8(3):237-254.
- [12] 黄晶, 张杨珠, 高菊生, 等. 长期施肥下红壤性水稻土有机碳储量变化特征[J]. 应用生态学报, 2015, 26(11):3373-3380.
- [13] 徐明岗, 张文菊, 黄绍敏, 等. 中国土壤肥力演变[M]. 第2版. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2015:101-119.
- [14] 樊廷录, 王淑英, 周广业, 等. 长期施肥下黑垆土有机碳变化特征及碳库组分差异[J]. 中国农业科学, 2013, 46(2):300-309.
- [15] 王成己, 潘根兴, 田有国, 等. 不同施肥下农田表土有机碳含量变化分析: 基于中国农业生态系统长期试验资料[J]. 中国科学: 生命科学, 2010, 40(7):650-657.
- [16] 周莉, 李保国, 周广胜. 土壤有机碳的主导影响因子及其研究进展[J]. 地球科学进展, 2005, 20(1):99-105.
- [17] 王飞, 李清华, 林诚, 等. 不同施肥模式对南方黄泥田耕层有机碳固存及生产力的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(6):1447-1454.
- [18] 毛霞丽, 陆扣萍, 孙涛, 等. 长期施肥下浙江稻田不同颗粒组分有机碳的稳定特征[J]. 环境科学, 2015, 36(5):1827-1835.
- [19] 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.
- [20] 徐香茹, 骆坤, 周宝库, 等. 长期施肥条件下黑土有机碳、氮组分的分配与富集特征[J]. 应用生态学报, 2015, 26(7):1961-1968.

(上接第309页)

- [22] Zhu H, He X, Wang K, et al. Interactions of vegetation succession, soil bio-chemical properties and microbial communities in a Karst ecosystem[J]. European Journal of Soil Biology, 2012, 51:1-7.
- [23] Zhang X Y, Sui Y Y, Zhang X D, et al. Spatial variability of nutrient properties in black soil of northeast China [J]. Pedosphere, 2007, 17(1):19-29.
- [24] Zhang Z, Hu B, Hu G. Spatial heterogeneity of soil chemical properties in a subtropical karst forest, Southwest China [J]. Scientific World Journal, 2014, 473-651.
- [25] Martínez-García L B, Pugnaire F I. Arbuscular mycor-

rhizal fungi host preference and site effects in two plant species in a semiarid environment[J]. Applied Soil Ecology, 2011, 48:313-317.

- [26] Wei Y, Wang S J, Liu X M, et al. Molecular diversity and distribution of arbuscular mycorrhizal fungi in karst ecosystem, Southwest China [J]. African Journal of Biotechnology, 2012, 11:14561-14568.
- [27] Likar M, Hančević K, Radić T, et al. Distribution and diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in grapevines from production vineyards along the eastern Adriatic coast[J]. Mycorrhiza, 2013, 23:209-219.

(上接第315页)

- [15] 刘艳丽, 张斌, 胡峰, 等. 干湿交替对水稻土碳氮矿化的影响[J]. 土壤, 2008, 40(4):554-560.
- [16] 陈海燕. 京郊典型设施蔬菜地温室气体排放规律及影响因素[D]. 北京: 中国农业科学院, 2012.
- [17] 张婧, 李虎, 王立刚, 等. 京郊典型设施蔬菜地土壤 N<sub>2</sub>O 排放特征[J]. 生态学报, 2014, 34(14):4088-4098.
- [18] 张仲新, 李玉娥, 华路, 等. 不同施肥量对设施菜地 N<sub>2</sub>O 排放通量的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(5):269-275.

- [19] Kallenbach C M, Rolston D E, Horwath W R. Cover cropping affects soil N<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> emissions differently depending on type of irrigation[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2010, 137(3/4):251-260.
- [20] Gu J, Nicoullaud B, Rochette P, et al. A regional experiment suggests that soil texture is a major control of N<sub>2</sub>O emissions from tiledrained winter wheat fields during the fertilization period[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2013, 60(5):134-141.