

DOI: 10.11766/trxb201603300071

# 长期施肥对黄壤有机碳平衡及玉米产量的影响\*

张雅蓉<sup>1, 2</sup> 李 渝<sup>1, 2</sup> 刘彦伶<sup>1, 2</sup> 张文安<sup>1, 2</sup> 蒋太明<sup>2, 3†</sup>

(1 贵州省土壤肥料研究所, 贵阳 550006)

(2 农业部贵州耕地保育与农业环境科学观测实验站, 贵阳 550006)

(3 贵州省农业科学院, 贵阳 550006)

**摘 要** 基于长期定位试验, 以黔中典型黄壤为研究对象, 采用单因素方差分析、可持续性指数、稳定性指数等方法对长期定位试验获取的数据进行分析和比较, 以探讨长期不同施肥处理对黄壤有机碳含量、有机碳平衡量、玉米产量稳定性、可持续性及其相互关系的影响。结果表明:

(1) 与施化肥和对照处理相比, 施有机肥处理土壤有机碳含量明显升高, 按大小排序依次为:  $M > MNPK > 1/2M+1/2NPK > 1/4M+3/4NPK$ ; (2) 施有机肥处理黄壤有机碳平衡量为正值, 且随有机肥施用量增加而增加, 相反, 施化肥和对照处理均为负值, 大小依次为:  $MNPK > M > 1/2M+1/2NPK > 1/4M+3/4NPK > NPK > NK > NP > N > CK > PK$ , 各处理差异显著; (3) 有机肥与化肥配施、有机肥单施及氮磷钾化肥协调施用更有利于提高玉米产量, 排序为:  $MNPK > 1/4M+3/4NPK > 1/2M+1/2NPK > NPK > M > NP > NK > PK > N > CK$ ; (4) 适量有机肥与化肥配施可提高玉米产量稳定性和可持续性 (可持续性指数  $> 0.6$ , 变异系数  $< 0.3$ ), 其中,  $1/4M+3/4NPK$  处理玉米产量稳定性和持续性最好; (5) 玉米年产量与黄壤有机碳平衡量相关度较高, 而玉米可持续性、稳定性则主要受有机碳含量影响。综上, 有机肥与化肥配施有利于黄壤有机碳含量提升、玉米维持高产稳产。按适量“减肥”原则, 以 25% 有机肥配施 75% 氮磷钾化肥效果最佳。

**关键词** 长期施肥; 黄壤; 有机碳含量; 有机碳平衡量; 玉米产量

**中图分类号** S158.3 **文献标识码** A

土壤有机碳库是地球陆地生态系统最重要、最活跃的碳库, 亦是土壤质量和功能的核心, 其在土壤肥力、环境保护和农业可持续发展等相关方面起着极其重要的作用。土壤碳含量由输入碳和输出碳的平衡所决定。土壤有机碳平衡过程较复杂, 受气候、植被、土壤属性、地形等自然因素和土地利用变化、耕种及施肥管理措施等人为因素影响。其中, 有机碳平衡受土壤性质的直接正向作用, 为此, 需要强化人为管理, 尤其是耕作、施肥方式对土壤有机碳平衡过程的影响, 从而利于有机

碳平衡向更优化方向发展<sup>[1]</sup>。根据联合国粮农组织 (FAO) 报告, 农业是第二大温室气体来源, 每年排放  $CO_2$  6.1 Gt, 大约占全球温室气体 10% ~ 12%<sup>[2]</sup>。保护性耕作、合理施肥和不同轮作制度等农业生产技术均能不同程度减少温室气体排放, 提高土壤有机碳固存量和作物产量<sup>[3-4]</sup>。

Pan 等<sup>[5]</sup>通过研究中国土壤有机质含量与维持谷类产量和产量稳定性关系发现, 受地形、气候、农田管理措施等条件影响, 有机质含量与作物产量表现为直线显著相关、曲线相关和无显著相关

\* 国家自然科学基金项目 (41461069)、公益性行业 (农业) 科研专项 (201203030) 和贵州省科技厅省院联合基金项目 (黔科合 LH 字 [2015] 7079 号) 资助 Funded by the National Natural Science Foundation of China (No. 41461069), the Special Fund for Agro-scientific Research in the Public Interest (No. 201203030) and Union Fund of Guizhou (No. LH [2015] 7079)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: jtm532@163.com

作者简介: 张雅蓉 (1988—), 女, 甘肃兰州人, 硕士, 助理研究员, 主要从事土壤肥力方面研究。E-mail: zyr292@163.com

收稿日期: 2016-03-30; 收到修改稿日期: 2016-06-17; 优先数字出版日期 (www.cnki.net): 2016-07-05

关系。但也有较多研究明确作物产量随土壤有机碳含量升高而增加<sup>[6-7]</sup>。土壤与产量关系因受多因素影响而较复杂,为此,针对不同土壤类型,需开展相关深入研究。产量可持续性指数(sustainable yield index, SYI)及变异系数(coefficient of variation, CV)是可用来衡量系统持续生产的重要参数<sup>[8-11]</sup>。目前国内外关于作物可持续性研究较多,通过SYI指数及CV指数,对全国范围<sup>[9]</sup>及某一地带性土壤<sup>[10-13]</sup>作物产量可持续性和土壤可持续性研究发现,较长期不施肥或施用化肥相比,化肥配施有机肥可使作物高产稳产,且系统可保持持续生产力。

黄壤是中国南方山区重要土壤类型之一,主要分布于贵州、四川两省以及云南、广西等地,尤以贵州分布最为广泛。全国25.3%的黄壤集中分布在贵州,其面积分别占贵州国土面积和土壤面积的41.9%和46.4%<sup>[14]</sup>,是贵州主要的农业土壤类型,在农业生产中发挥着重要的作用。玉米在我国栽培历史悠久,是仅次于水稻和小麦的第三大粮食作物。根据最新数据显示,贵州省2014年度玉米播种面积高达 $7.72 \times 10^5 \text{ hm}^2$ ,2003—2014年平均播种面积 $7.64 \times 10^5 \text{ hm}^2$ ,高于水稻和小麦,是贵州省播种面积最广泛的粮食作物<sup>[15]</sup>。但受黄壤黏、酸、瘦、瘠特点影响,地区农田生产力和农业发展受到严重制约。近年来,有关黄壤培肥、改良等相关研究较多,主要集中在通过合理施肥措施以提高肥效和作物产量等方面<sup>[16]</sup>,鲜有关于黄壤有机碳含量与作物产量可持续性关系方面研究报道,亦很少通过土壤有机碳与作物产量关系来因地制宜确定合理施肥量。为此,本研究基于黄壤肥力与肥效长期定位试验,探讨长期不同施肥处理下黄壤有机碳含量、平衡量变化特征,其对作物产量稳定性和可持续性影响机制及其相互关系,明确土壤有机碳与作物产量的关系,研究结果将为黄壤地区地力培肥、作物产量提升、农业可持续性发展、农田增汇减排等提供重要理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

试验点位于贵州省贵阳市花溪区省农科院内(106°07' E, 26°11' N),地处黔中黄壤丘陵区,平均海拔1 071 m,年均气温15.3 °C,年均日照时

数1 354 h,相对湿度75.5%,全年无霜期270 d,年降雨量1 100~1 200 mm。土壤类型为黄壤,成土母质为三叠系灰岩与砂页岩风化物。

### 1.2 试验设计

黄壤肥力与肥效长期试验始于1995年,初始土壤pH为6.7,有机质43.6 g kg<sup>-1</sup>,全氮2.05 g kg<sup>-1</sup>,全磷0.99 g kg<sup>-1</sup>,全钾10.7 g kg<sup>-1</sup>。种植制度为一年一季玉米。试验采用大区对比试验,小区面积340 m<sup>2</sup>。共设置12个处理,本文选取其中10个处理,分别为:减量有机肥+减量氮磷钾肥(1/4M+3/4NPK)、中量有机肥+中量氮磷钾肥(1/2M+1/2NPK)、全量有机肥(M)、对照(CK)、全量有机肥+全量氮磷钾肥(MNPK)、全量氮磷钾肥(NPK)、偏施氮钾肥(NK)、偏施氮肥(N)、偏施氮磷肥(NP)和偏施磷钾肥(PK)。化肥类型为尿素(N 46%)、普钙(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 16%)、氯化钾(K<sub>2</sub>O 60%)。试验用有机肥为牛廐肥(年平均养分含量C 10.4%、N 2.7 g kg<sup>-1</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 1.3 g kg<sup>-1</sup>、K<sub>2</sub>O 6 g kg<sup>-1</sup>),年均施入122.2 t hm<sup>-2</sup>,每年按照有机肥养分含量来调节化学氮肥施用量,除CK、PK处理不施用氮肥,MNPK氮肥施用量翻倍,其余施氮小区氮素施用量相同,年施入量为N 330 kg hm<sup>-2</sup>。每年春季在玉米播种前施氮磷钾肥或配施有机肥作基肥,通过翻耕,均匀施入土壤,翻耕深度20 cm左右。在玉米生长期(苗期和喇叭口期)追施2次氮肥(尿素),冬季不施肥。各处理具体施肥方案如表1。

表1 各处理纯养分施用量

Table 1 Net nutrient application rate relative to treatment			
处理 Treatment	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg hm <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup> )	K <sub>2</sub> O
1/4M+3/4NPK	330	164	307
1/2M+1/2NPK	330	162	449
M	330	159	733
CK	0	0	0
MNPK	660	324	898
NPK	330	165	165
NK	330	0	165
N	330	0	0
NP	330	165	0
PK	0	165	165

### 1.3 样品采集与分析

土壤样品（耕层0~20 cm）于每年玉米收获后采用“S”形采样法，在每个小区按上、中、下3个部分共采集15个样点，分别混合均匀，去除根系带回风干研磨备用。植株样品于玉米成熟期剔除边行植株后，与土壤样品采集方式相同，在每部分中间人工收获两行，收获后的玉米秸秆和籽粒均在70℃条件下烘干48 h后称量，计算玉米茎、叶生物产量和籽粒产量，籽粒水分控制在12.0%以下。试验初期由于人员及经费等问题致使部分年份土样不齐，因此本文选取10个处理近11年（2004—2014年）土壤和植株样品，分别分析测定了土壤有机碳（SOC）、土壤有机碳平衡量及玉米产量（籽粒产量+秸秆产量）等指标。土壤有机碳测定采用重铬酸钾容量法<sup>[17]</sup>（有机质×0.58，0.58为国际上采用的碳含量转化系数）。

有机碳平衡量=籽粒产量×0.4×0.43+有机肥用量×0.18/1.724-土壤有机碳含量×0.045

式中，有机碳投入量主要包括根茬投入量（籽粒产量×0.4×0.43）和有机肥用量，有机碳矿化量（土壤有机碳含量×0.045）为有机碳主要支出量。0.4为籽粒产量与根茬生物量换算系数<sup>[18]</sup>，0.43为玉米秸秆有机碳含量、0.18为有机肥中平均有机质含量、1.724为有机质与有机碳转化系数（100/58）、0.045为有机碳矿化系数<sup>[19]</sup>。

产量稳定性用统计学中变异系数（CV）表示，用来衡量同一品种作物在不同年份平均产量间的变异程度，其值越小，说明产量稳定性越高，计算方法如下：

$$CV = \sigma / \bar{Y}$$

式中， $\bar{Y}$ 为平均产量； $\sigma$ 为标准差<sup>[11]</sup>。

产量可持续性指数是衡量生态系统是否能持续生产的参数（SYI），其值越大，表明可持续性越好，计算方法如下：

$$SYI = (\bar{Y} - \sigma) / Y_{\max}$$

式中， $Y_{\max}$ 为试验点最高产量<sup>[11]</sup>。

### 1.4 数据处理

采用软件Excel 2010和SPSS 19.0进行数据分析和图表处理。

## 2 结果

### 2.1 长期不同施肥对黄壤有机碳含量的影响

长期不同施肥处理下，土壤有机碳含量变化有显著差异，施有机肥处理明显高于施化肥处理。有机肥处理黄壤有机碳含量较高（25.33~28.65 g kg<sup>-1</sup>），变化幅度较大，以M处理最高，平均达到28.65 g kg<sup>-1</sup>，1/4M+3/4NPK处理略低（25.33 g kg<sup>-1</sup>），各处理高出CK（22.23 g kg<sup>-1</sup>）14%~29%，处理间差异显著，且土壤有机碳含量随有机肥施用量增加而增加；相比2004年，除CK外，其余各处理近三年有机碳含量均值有不同程度升高（8%~55%）。相反，施用化肥各处理土壤有机碳含量较低（21.15~24.08 g kg<sup>-1</sup>），数据波动较平缓。其中，PK处理略高于CK，其余处理差异不显著；相比2004年，近三年各处理土壤有机碳平均含量明显降低（5%~16%），以PK、NPK、CK处理降低较多，N处理较少。（图1，表2）

施有机肥处理黄壤有机碳平衡量与化肥处理差异较大（表2）。有机肥处理土壤有机碳平衡量均为正值，且各处理差异显著（ $p < 0.05$ ）。其中，MNPK处理土壤有机碳平衡量最高，平均达到11 003 kg hm<sup>-2</sup>（变化范围7 331~11 722 kg hm<sup>-2</sup>），其次为M处理，平均达到10 661 kg hm<sup>-2</sup>，1/2M+1/2NPK、1/4M+3/4NPK处理较MNPK和M处理有明显降低，平均为4 798 kg hm<sup>-2</sup>和1 835 kg hm<sup>-2</sup>，CK为-1 505 kg hm<sup>-2</sup>。施化肥处理中，以NPK处理土壤有机碳平衡量最高，平均为-1 030 kg hm<sup>-2</sup>，PK最低，为-1 619 kg hm<sup>-2</sup>，除NPK外，其余处理间差异不明显（-1 619~-1 223 kg hm<sup>-2</sup>）。其中，施氮处理（NPK、NK、NP、N）土壤有机碳平衡量高于无氮处理（PK、CK）。可见，有机肥与化肥配施或氮磷钾肥协调施用有助于黄壤有机碳积累且氮素对黄壤有机碳平衡起着重要作用。

### 2.2 长期不同施肥对玉米产量的影响

由不同处理11年平均产量变化知，有机肥处理产量较高，且各处理间差异显著。其中，MNPK处理产量最高，平均达17 837 kg hm<sup>-2</sup>，1/4M+3/4NPK、1/2M+1/2NPK、NPK和M处理产

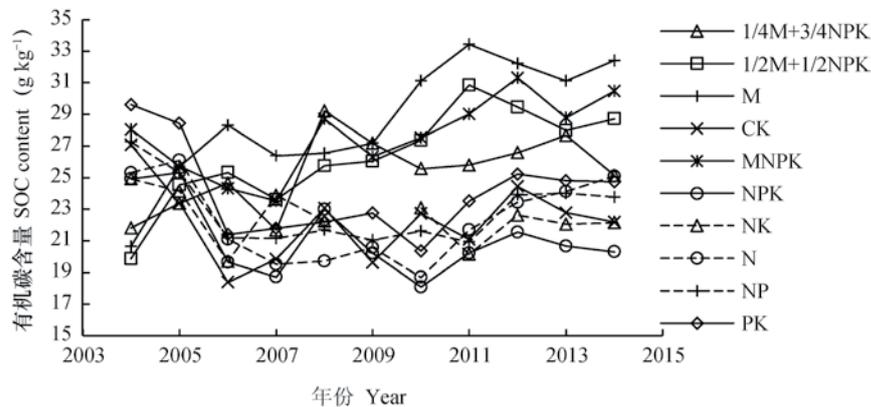


图1 不同处理下黄壤有机碳含量变化

Fig. 1 SOC content in yellow soil relative to treatment

表2 长期不同施肥处理黄壤有机碳含量及有机碳平衡量差异

Table 2 ANOVA of SOC content and SOC balance in yellow soil relative to fertilization treatment

处理 Treatment	有机碳含量 SOC content (g kg <sup>-1</sup> )	有机碳平衡量 SOC balance (kg hm <sup>-2</sup> )
1/4M+3/4NPK	25.33 ± 2.36cd	1 835 ± 334b
1/2M+1/2NPK	26.32 ± 3.06cde	4 798 ± 715c
M	28.65 ± 3.83e	10 661 ± 1 208d
CK	22.23 ± 2.44ab	-1505 ± 213a
MNPK	27.62 ± 2.44de	11 003 ± 1 244d
NPK	21.15 ± 2.36a	-1 030 ± 428a
NK	21.88 ± 2.58ab	-1 223 ± 297a
N	22.31 ± 2.61ab	-1 415 ± 479a
NP	22.90 ± 2.11ab	-1 359 ± 525a
PK	24.08 ± 2.89bc	-1 619 ± 345a

注: 平均值 ± 标准差。不同小写字母表示不同施肥处理间差异显著 ( $p < 0.05$ )。下同 Note: Means ± std. Different lowercase letter means significant difference between treatments at 5% level. The same below

量差异不明显, 平均在13 949 ~ 15 071 kg hm<sup>-2</sup>范围之间。偏施、单施化肥处理NP、NK、PK、N玉米产量较接近, 平均在10 965 ~ 12 042 kg hm<sup>-2</sup>之间。各施肥处理均明显提高了玉米产量, 较CK增幅38% ~ 125%。通过不同施肥处理玉米产量随时间变化趋势知, 2004、2009、2010及2013年各处理产量较高, 这可能与土壤养分含量及当年较高的降雨量有关<sup>[20]</sup>。CK处理产量较低, 变化集中在4 000 ~ 8 000 kg hm<sup>-2</sup>范围内, 总体而言, 玉米产量随时间推移呈上升趋势, 增加速率为500.8 kg hm<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>。

1/4M+3/4NPK、M、MNPK、NPK和PK处理, 玉米产量随时间呈明显增加趋势, 年增加速率按大小排序依次为: MNPK > M > 1/4M+3/4NPK > NPK > PK, 可见, 施有机肥处理玉米产量明显高于化肥处理。1/2M+1/2NPK、NK和NP处理玉米产量年际变化较小, 波动较稳定, 但相比仍以有机肥处理产量略高。施N处理产量逐年降低, 降低速率为391.1 kg hm<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>。可见, 长期不同施肥处理玉米产量存在显著差异, 单施有机肥、有机肥与化肥配施及氮磷钾肥协调施用更有利于增加作物产量, 相反, 化

表3 长期不同施肥处理玉米产量变化

Table 3 Maize yield relative to fertilization treatment

处理 Treatment	玉米产量 Maize yield (kg hm <sup>-2</sup> )	拟合方程 Fitted equation	相关系数 $r$ Correlation coefficient
1/4M+3/4NPK	15 071 ± 2 256d	$y = 361.47x - 711 115$	0.531
1/2M+1/2NPK	15 028 ± 3 057d	$y = -11.851x + 38 841$	-0.012
M	13 949 ± 3 042cd	$y = 432.26x - 854 460$	0.471
CK	7 938 ± 2 795a	$y = 500.81x - 998 197$	0.594
MNPK	17 837 ± 3 676e	$y = 631.52x - 1 \times 10^{-6}$	0.570
NPK	14 615 ± 3 004cd	$y = 171.57x - 330 061$	0.189
NK	11 136 ± 2 860b	$y = 26.36x - 41 820$	0.031
N	10 965 ± 2 848b	$y = -391.08x + 796 640$	-0.455
NP	12 042 ± 2 340bc	$y = 27.178x - 42 558$	0.038
PK	11 089 ± 2 412b	$y = 135.15x - 260 487$	0.241

肥偏施和CK处理产量较低（表3）。

综上，不同施肥处理玉米产量年际间波动较大，仅分析多年平均产量不能真实反映长期不同施肥下土壤培肥作用。因此，本文借助产量可持续性指数（SYI）和产量变异系数（CV）来综合表征（图2）。不同施肥处理，玉米产量SYI值大小不同，总体表现为施有机肥处理高于施化肥处理，高于对照。可根据SYI值大小分为4个等级，依次为：1/4M+3/4NPK（ $SYI > 0.65$ ）> MNPK、M、1/2M+1/2NPK、NP（ $0.60 < SYI < 0.65$ ）> NPK、N、NK、PK（ $0.50 < SYI < 0.60$ ）> CK（ $SYI < 0.50$ ）。结果表明，有机肥与化肥配施玉米产量可持续性最好，不施肥处理最差。玉米产量

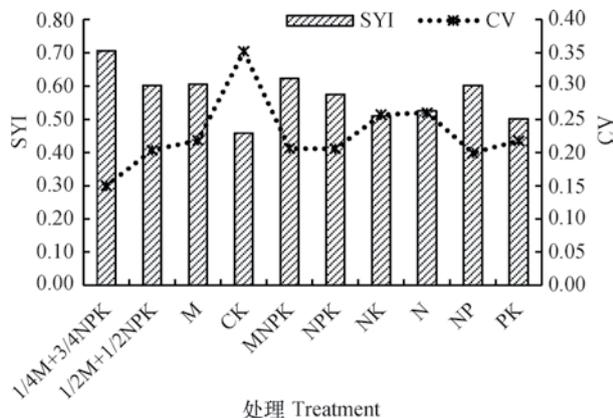


图2 长期不同施肥下玉米产量可持续性指数和变异系数  
Fig. 2 Sustainable yield index (SYI) and coefficient of variation (CV) of maize yield relative to fertilization treatment

CV值大小亦不同，可按其大小分为3个水平，依次为CK（ $CV > 0.30$ ）> NK、N、PK、M、MNPK、NPK，1/2M+1/2NPK、NP（ $0.20 \leq CV < 0.30$ ）> 1/4M+3/4NPK（ $CV < 0.20$ ），变化与SYI基本一致。因此，适量有机肥与化肥配施的施肥结构更有利于提高玉米产量稳定性和持续性。

### 2.3 长期不同施肥玉米产量、SYI及CV值与有机碳含量及其平衡量间的关系

为探究施肥提高产量机制，有必要分析玉米产量及其SYI与CV值与土壤有机碳含量和有机碳平衡量间的关系。由图3、图4可知，玉米产量与土壤有机碳含量极显著正相关（ $r=0.335^{**}$ ），有机碳含量与SYI值也呈线性相关（ $r=0.575$ ），而其与CV值低度负相关。可见，施肥提高土壤有机碳含量与提升产量可持续性较一致，土壤有机碳含量越高，作物产量可持续性越好。结合上文，有机无机肥及氮磷钾肥配施作物产量SYI值较高，得知，施用有机肥提高产量及其可持续性的主要原因是提高了土壤有机碳含量。

玉米产量与土壤有机碳平衡量间也呈极显著正相关关系（ $r=0.511^{**}$ ），且远高于产量与有机碳含量相关Pearson系数，说明长期施用有机肥对玉米产量的影响主要受土壤碳投入和支出量平衡关系即有机碳平衡量变化所致。土壤有机碳平衡量与玉米产量SYI值亦呈显著相关关系（ $r=0.524$ ），也略低于SYI值与有机碳含量相关系数，CV值亦与有机

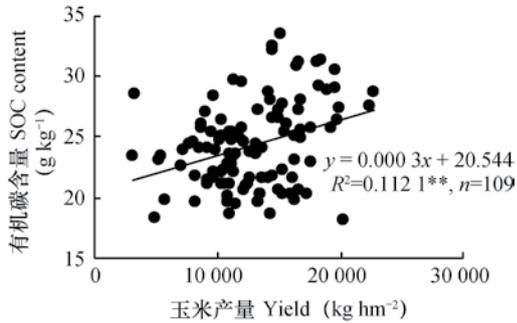


图3 玉米产量与有机碳含量的关系

Fig. 3 Relationship between SOC content and maize yield

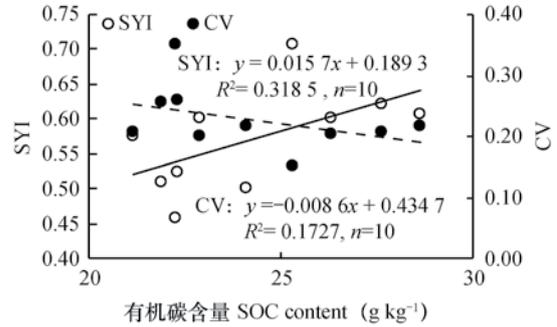


图4 玉米产量SYI、CV值与有机碳含量的关系

Fig. 4 Relationships of SOC content with SYI and CV

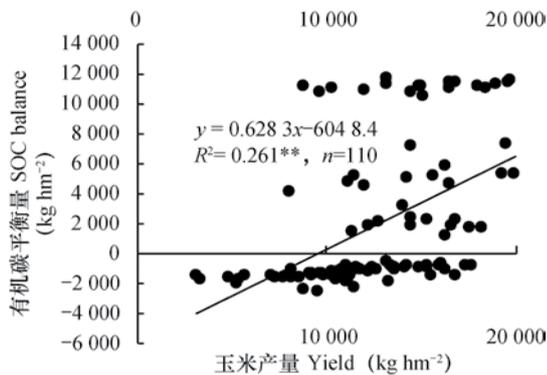


图5 玉米产量与有机碳平衡量的关系

Fig. 5 Relationship between SOC balance and maize yield

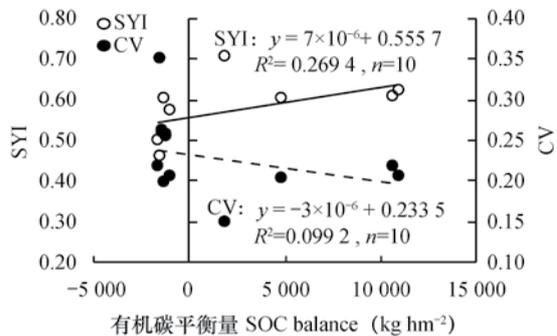


图6 玉米产量SYI、CV值与有机碳平衡量的关系

Fig. 6 Relationships of SOC balance with SYI and CV

碳平衡量负低度相关，且同时低于CV值与有机碳含量相关系数（图5、图6）。

因此，较化肥偏施或单施处理，长期施用有机肥以及有机肥与化肥配施处理对玉米产量、土壤有机碳含量及土壤有机碳平衡量的影响较显著。玉米年产量增加主要受土壤有机碳平衡量变化影响，玉米产量SYI、CV值主要受土壤有机碳含量影响。

### 3 讨论

#### 3.1 长期不同施肥对黄壤有机碳的影响

较多研究结果显示，施用有机肥更有利于土壤有机质积累<sup>[21]</sup>，且与单施化肥相比，长期有机肥与化肥配施，土壤有机碳含量增加明显<sup>[22-23]</sup>。本研究结果显示：单施有机肥、有机肥与化肥配施均可较大幅度提高黄壤有机碳含量，且其含量随有机肥施用量增加而增加；动态变化结果显示，有机肥处理土壤有机碳含量在2008年后迅速升高，这与有机肥肥效缓慢且有机肥中养分含量高低不同有关<sup>[24-25]</sup>。相反，施用化肥处理土壤有机碳含量较

稳定，变化小，化肥偏施与平衡施肥处理间差异不显著，这与氮肥单施或氮肥与磷钾肥配施增加了作物根茬残留、提高了土壤有机质含量有关<sup>[26-27]</sup>；但较2004年，近三年数值均有所降低，是因为长期施肥条件下，施用有机肥处理可提高土壤有机碳含量，施化肥和不施肥处理会明显促进土壤有机质消耗<sup>[28]</sup>，同时，也与微生物数量活性以及不同区域土壤类型、气候条件等因素有关<sup>[29]</sup>。土壤有机碳平衡特征研究对了解有机碳稳定性及土壤培肥效果具有重要意义<sup>[24]</sup>，本研究中，施用有机肥处理黄壤有机碳平衡量均为正值，处于正平衡<sup>[30]</sup>，而施化肥及不施肥处理处于负平衡。这是因为土壤有机碳平衡量与有机物料投入呈极显著正相关关系（ $r = 0.991^{**}$ ， $p < 0.01$ ，图7）。同时，氮肥及氮磷钾肥协调合理施用明显增加了黄壤有机碳平衡量，是因为氮肥施用可增加土壤有机碳积累<sup>[31-32]</sup>。

#### 3.2 长期不同施肥对玉米产量的影响

有机肥施用能供给土壤丰富有机质和各种养分，在提供作物所需养分直接来源的同时，活化土壤中潜在养分，改善了土壤理化性质，提高了

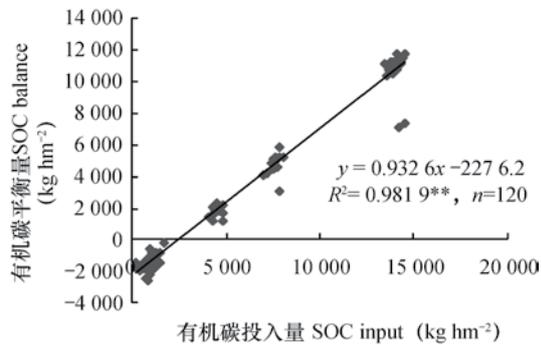


图7 有机碳投入与有机碳平衡关系

Fig. 7 Relationship between SOC balance and organic carbon input

作物产量<sup>[33]</sup>，同时，在一定程度上减少了温室气体排放<sup>[34]</sup>。本研究结果显示：长期不同施肥条件下，玉米产量存在明显差异，总体表现为施用有机肥处理高于化肥处理，高于对照，且处理间差异显著，此结果与前人研究结果一致<sup>[35-37]</sup>。CK处理玉米产量年增幅量较大且变化显著，这是由于长期不施肥条件下，受外界环境影响其边际效应较明显<sup>[38]</sup>。单施氮肥处理，玉米产量随年份明显下降，一方面由于氮肥是玉米产量提升的优先限制养分，另一方面，长期偏施氮肥会加速土壤有机碳及P、K等养分的耗竭，致使土壤养分循环与平衡受阻，作物产量降低<sup>[39-40]</sup>。本研究中，MNPK、1/4M+3/4NPK、1/2M+1/2NPK、NPK和M处理平均产量较高，表现为线性增长及平稳变化趋势。因此，合理的有机肥与化肥配施及化肥平衡施用会降低作物对土壤基础地力的依赖，促使作物高产、稳产。

### 3.3 长期不同施肥对黄壤产量可持续性及其稳定性的影响

长期施用化肥，作物产量对土壤基础地力的依赖程度较高，因此可在短期内提高玉米产量，而单施有机肥玉米产量提高则较缓慢。有机肥与化肥配施可实现玉米产量快速持续高产，且其稳产和增产效果均优于化肥和有机肥单施<sup>[39]</sup>。本研究中，有机肥与化肥配施有利于促进玉米产量稳定性和可持续性提高，此结果与前人研究结果一致<sup>[9, 38]</sup>。其中，1/4M+3/4NPK处理玉米产量稳定性最好，变异性最低，是保证黄壤玉米产量持续高产稳产的最佳施肥方案，此结果也与冀建华等<sup>[38]</sup>研究结果吻合。

## 4 结 论

在长期水、热、气等环境条件一致情况下，较偏施或者单施化肥处理，有机肥与化肥合理配施及氮磷钾肥协调施用可明显增加土壤有机碳含量、碳积累量，提升作物产量及其稳定性和可持续性，有效避免因化肥大量施用而导致的资源浪费、土壤酸化、氮淋失、温室气体排放等问题产生，亦可提高氮肥利用率、为实现农田固碳减排提供可靠依据，可为今后推荐科学合理的“减肥”方式提供指导。

## 参 考 文 献

- [1] 李慧, 汪景宽, 裴久渤, 等. 基于结构方程模型的东北地区主要旱地土壤有机碳平衡关系研究. 生态学报, 2015, 35 (2): 517—525  
Li H, Wang J K, Pei J B, et al. Equilibrium relationships of soil organic carbon in the main croplands of northeast China based on structural equation modeling (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35 (2): 517—525
- [2] 张恒恒, 严昌荣, 张燕卿, 等. 北方旱区免耕对农田生态系统固碳与碳平衡的影响. 农业工程学报, 2015, 31 (4): 240—247  
Zhang H H, Yan C R, Zhang Y Q, et al. Effect of no tillage on carbon balance in farming ecosystem in dryland area of northern China (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31 (4): 240—247
- [3] Yang X L, Gao W S, Zhang M, et al. Reducing agricultural carbon footprint through diversified crop rotation systems in the North China Plain. *Journal of Cleaner Production*, 2014, 76: 131—139
- [4] Gan Y T, Liang C, Chai Q, et al. Improving farming practices reduces the carbon footprint of spring wheat production. *Nature Communications*, 2014, 5: 5012
- [5] 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. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2009, 129 (1/3): 344—348
- [6] 邱建军, 王立刚, 李虎, 等. 农田土壤有机碳含量对作物产量影响的模拟研究. 中国农业科学, 2009, 42 (1): 154—161  
Qiu J J, Wang L G, Li H, et al. Modeling the impacts of soil organic carbon content of croplands on crop yields in China (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*,

- 2009, 42 (1): 154—161
- [ 7 ] 黄彩变, 曾凡江, 雷加强, 等. 开垦对绿洲农田碳氮累积及其与作物产量关系的影响. 生态学报, 2011, 31 (18): 5113—5120  
Huang C B, Zeng F J, Lei J Q, et al. Effect of cultivation on soil organic carbon and total nitrogen accumulation in Cele oasis croplands and their relation to crop yield (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31 (18): 5113—5120
- [ 8 ] Lin Z, Routray J K, Zoebisch M A, et al. Three dimensions of sustainability of farming practices in the North China Plain: A case study from Ningjin County of Shandong Province, PR China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2005, 105 (3): 507—522
- [ 9 ] 李忠芳, 徐明岗, 张会民, 等. 长期施肥和不同生态条件下我国作物产量可持续性特征. 应用生态学报, 2010, 21 (5): 1264—1269  
Li Z F, Xu M G, Zhang H M, et al. Sustainability of crop yields in China under long-term fertilization and different ecological conditions (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21 (5): 1264—1269
- [ 10 ] 李新旺, 陈亚恒, 王树涛, 等. 长期不同施肥下潮土养分生产力及其可持续性演变. 土壤学报, 2010, 47 (3): 555—562  
Li X W, Chen Y H, Wang S T, et al. Soil nutrients productivity and its sustainability in Fluvo-Aquic soil under long-term fertilization (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47 (3): 555—562
- [ 11 ] Manna M C, Swarup A, Wanjari R H, et al. Long-term effect of fertilizer and manure application on soil organic carbon storage, soil quality and yield sustainability under sub-humid and semi-arid tropical India. *Field Crops Research*, 2005, 93 (2/3): 264—280
- [ 12 ] Srinivasarao Ch, Kundu S, Ramachandrapa B K, et al. Potassium release characteristics, potassium balance, and finger millet (*Eleusine coracana* G.) yield sustainability in a 27-year long experiment on an Alfisol in the semi-arid tropical India. *Plant and Soil*, 2014, 374 (1): 315—330
- [ 13 ] 孙本华, 孙瑞, 郭芸, 等. 壤土区长期施肥农田土壤的可持续性评价. 植物营养与肥料学报, 2015, 21 (6): 1403—1412  
Sun B H, Sun R, Guo Y, et al. Evaluation on the sustainability of cropland under different long-term fertilization in Eum-Orthic Anthrosols area (In Chinese). *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21 (6): 1403—1412
- [ 14 ] 贵州省土壤普查办公室. 贵州省土壤. 贵阳: 贵州科技出版社, 1994  
The Soil Census Office of Guizhou Province. *Soil in Guizhou Province (In Chinese)*. Guiyang: Guizhou Science and Technology Press, 1994
- [ 15 ] 贵州省统计局. 贵州统计年鉴2004—2015. 北京: 中国统计出版社, 2004—2015  
Statistics Bureau of Guizhou Province. *Guizhou statistical yearbook 2004—2015 (In Chinese)*. Beijing: China Statistics Press, 2004—2015
- [ 16 ] 罗龙皂, 李渝, 张文安, 等. 长期施肥下黄壤旱地玉米产量及肥料利用率的变化特征. 应用生态学报, 2013, 24 (10): 2793—2798  
Luo L Z, Li Y, Zhang W A, et al. Variation characteristics of maize yield and fertilizer utilization rate upland yellow soil under long term fertilization (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24 (10): 2793—2798
- [ 17 ] 杨剑虹, 王成林, 代亨林. 土壤农化分析与环境监测. 北京: 中国大地出版社, 2008: 26—79  
Yang J H, Wang C L, Dai H L. *Soil chemical analysis and environmental monitoring (In Chinese)*. Beijing: China Land Press, 2008: 26—79
- [ 18 ] 李克让. 土地利用变化和温室气体净排放与陆地生态系统碳循环. 北京: 气象出版社, 2000  
Li K R. *Land use change, net greenhouse gas emissions and terrestrial ecosystem carbon cycle (In Chinese)*. Beijing: China Meteorological Press, 2000
- [ 19 ] Wen Q X. Utilization of organic materials in rich production in China/IRRI. *Organic matter and rice*. Los Banos, Philippines. 1984: 45—56
- [ 20 ] 李渝, 张雅蓉, 张文安, 等. 贵州黄壤地区不同施肥处理及降雨量对玉米产量的影响. 水资源与水工程学报, 2015, 26 (1): 230—235  
Li Y, Zhang Y R, Zhang W A, et al. Effects of precipitation and fertilizer controls on corn yield in yellow soil region of Guizhou (In Chinese). *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2015, 26 (1): 230—235
- [ 21 ] 耿瑞霖, 郁红艳, 丁维新, 等. 有机无机肥长期施用对潮土团聚体及其有机碳含量的影响. 土壤, 2010, 42 (6): 908—914  
Geng R L, Yu H Y, Ding W X, et al. Effects of long-term application of organic manure and chemical fertilizers on organic carbon in aggregates of a sandy loam (In Chinese). *Soils*, 2010, 42 (6): 908—914
- [ 22 ] 佟小刚, 徐明岗, 张文菊, 等. 长期施肥对红壤和潮土颗粒有机碳含量与分布的影响. 中国农业科学, 2008, 41 (11): 3664—3671  
Tong X G, Xu M G, Zhang W J, et al. Influence of long-term fertilization on content and distribution of

- organic carbon in particle-size fractions of red soil and Fluvo-Aquic soil in China (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41 (11): 3664—3671
- [23] Janzen H H, Campbell C A, Izaurrealde R C, et al. Management effects on soil C storage on the Canadian prairies. *Soil and Tillage Research*, 1998, 47 (3/4): 181—195
- [24] 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. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21 (6): 1465—1472
- Gao W, Yang J, Ren S R. Balance characteristics of soil organic carbon under different long-term fertilization models in the upland Fluvo-Aquic soil of North China (In Chinese). *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21 (6): 1465—1472
- [25] Su Y Z, Wang F, Suo D R, et al. Long-term effect of fertilizer and manure application on soil-carbon sequestration and soil fertility under the wheat-wheat-maize cropping system in northwest China. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2006, 75 (1): 285—295
- [26] 谢军飞, 许蕊. 长期施用化肥对土壤有机碳含量影响的 Meta 分析. *土壤通报*, 2014, 45 (2): 427—431
- Xie J F, Xu R. Meta-analysis of the effect of long-term chemical fertilization on soil organic carbon content (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 2014, 45 (2): 427—431
- [27] 刘金山, 戴健, 刘洋, 等. 过量施氮对旱地土壤碳、氮及供氮能力的影响. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21 (1): 112—120
- Liu J S, Dai J, Liu Y, et al. Effects of excessive nitrogen fertilization on soil organic carbon and nitrogen and nitrogen supply capacity in dryland (In Chinese). *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21 (1): 112—120
- [28] 李新爱, 童成立, 蒋平, 等. 长期不同施肥对稻田土壤有机质和全氮的影响. *土壤*, 2006, 38 (3): 298—303
- Li X A, Tong C L, Jiang P, et al. Effects of long-term fertilization on soil organic matter and total nitrogen in paddy soil (In Chinese). *Soils*, 2006, 38 (3): 298—303
- [29] 王阳, 赵兰坡, 朱孟龙, 等. 长期单施化肥对土壤有机质的影响. *吉林农业科学*, 2015, 40 (1): 45—50
- Wang Y, Zhao L P, Zhu M L, et al. Effects of long-term application of chemical fertilizer on soil organic matter (In Chinese). *Journal of Jilin Agricultural Sciences*, 2015, 40 (1): 45—50
- [30] 蒋天明, 罗龙皂, 李渝, 等. 长期施肥对西南黄壤有机碳平衡的影响. *土壤通报*, 2014, 45 (3): 666—671
- Jiang T M, Luo L Z, Li Y, et al. Effects of long-term fertilization on soil organic carbon balance in a Yellow soil of south western China (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 2014, 45 (3): 666—671
- [31] 李海波, 韩晓增, 王凤. 长期施肥条件下土壤碳氮循环过程研究进展. *土壤通报*, 2007, 38 (2): 384—388
- Li H B, Han X Z, Wang F. Review of soil carbon and nitrogen cycling under long-term fertilization (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, 38 (2): 384—388
- [32] 杨景成, 韩兴国, 黄建辉, 等. 土地利用变化对陆地生态系统碳贮量的影响. *应用生态学报*, 2003, 14 (8): 1385—1390
- Yang J C, Han X G, Huang J H, et al. Effects of land use change on carbon storage in terrestrial ecosystem (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14 (8): 1385—1390
- [33] 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. *干旱地区农业研究*, 2010, 28 (1): 66—71
- Han X Z, Wang F X, Wang F J, et al. Effects of long-term organic manure application on crop yield and fertility of black soil (In Chinese). *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2010, 28 (1): 66—71
- [34] Liu H T, Li J, Li X, et al. Mitigating greenhouse gas emissions through replacement of chemical fertilizer with organic manure in a temperate farmland. *Science Bulletin*, 2015, 60 (6): 598—606
- [35] 罗洋, 郑金玉, 郑洪兵, 等. 有机无机肥料配合施用对玉米生长发育及产量的影响. *玉米科学*, 2014, 22 (5): 132—136
- Luo Y, Zheng J Y, Zheng H B, et al. Effects of manure and fertilizer application on growth and yield of maize (In Chinese). *Journal of Maize Sciences*, 2014, 22 (5): 132—136
- [36] 李燕青, 唐继伟, 车升国, 等. 长期施用有机肥与化肥氮对华北夏玉米  $N_2O$  和  $CO_2$  排放的影响. *中国农业科学*, 2015, 48 (21): 4381—4389
- Li Y Q, Tang J W, Che S G, et al. Effect of organic and inorganic fertilizer on the emissions of  $CO_2$  and  $N_2O$  from the summer maize field in the North China Plain (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48 (21): 4381—4389
- [37] Wen Z H, Shen J B, Blackwell M, et al. Combined applications of nitrogen and phosphorus fertilizers with manure increase maize yield and nutrient uptake via stimulating root growth in a long-term experiment. *Pedosphere*, 2016, 26 (1): 62—73

- [38] 冀建华, 候红乾, 刘益仁, 等. 长期施肥对双季稻产量变化趋势、稳定性和可持续性的影响. 土壤学报, 2015, 52 (3): 607—619  
 Ji J H, Hou H Q, Liu Y R, et al. Effects of long-term fertilization on yield variation trend, yield stability and sustainability in the double cropping rice system (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52 (3): 607—619
- [39] 李慧, 徐明岗, 朱平, 等. 长期培肥我国典型黑土玉米氮肥效应的演变趋势. 植物营养与肥料学报, 2015, 21 (6): 1506—1513  
 Li H, Xu M G, Zhu P, et al. Change of nitrogen use efficiency of maize affected by long-term manure fertilization in the typical black soil (In Chinese). *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21 (6): 1506—1513
- [40] 郝小雨, 周宝库, 马星竹, 等. 长期不同施肥措施下黑土作物产量与养分平衡特征. 农业工程学报, 2015, 31 (16): 178—185  
 Hao X Y, Zhou B K, Ma X Z, et al. Characteristics of crop yield and nutrient balance under different long-term fertilization practices in black soil (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31 (16): 178—185

## Effects of Long-term Fertilization on Soil Organic Carbon Balance and Maize Yield in Yellow Soil

ZHANG Yarong<sup>1, 2</sup> LI Yu<sup>1, 2</sup> LIU Yanling<sup>1, 2</sup> ZHANG Wen'an<sup>1, 2</sup> JIANG Taiming<sup>2, 3†</sup>

(1 *Guizhou Institute of Soil and Fertilizer, Guiyang 550006, China*)

(2 *Scientific Observing and Experimental Station of Arable Land Conservation and Agriculture Environment (Guizhou), Ministry of Agriculture, Guiyang 550006, China*)

(3 *Guizhou Academy of Agricultural Sciences, Guiyang 550006, China*)

**Abstract** 【Objective】 Based on a long-term fertilization experiment on yellow soil typical of Central Guizhou, analysis was done to explore relationship between soil organic carbon (SOC) content and crop yield sustainability in yellow soil and to make case-specific rational fertilization recommendations, because few of the studies in the past did much work on the aspects. 【Method】 Therefore, data of the 11 year-long (2004—2014) field experiment that had 10 different treatments, that is CK (no fertilizer), treatment NPK (balanced chemical fertilizer application), treatment N (PK deficiency), treatment PK (N deficiency), treatment NK (P deficiency), treatment NP (K deficiency), treatment M (manure only), treatment MNPK (manure plus balanced chemical fertilizer), treatment 1/2M+1/2NPK (50% manure plus 50% chemical fertilizer) and treatment 1/4M+3/4NPK (25% manure plus 75% chemical fertilizer), were analyzed and compared with the single factor variance analysis, sustainable yield index (SYI) and stability index (CV) methods, with a view to exploring effects of the treatments on SOC content and SOC balance in the yellow soil, their effect on crop yield stability and sustainability, and their interrelationships, clarifying the relationship between SOC and crop yield, and providing some theoretic bases for building of soil fertility, improvement of crop yield, development of sustainable agriculture, expansion of carbon sink and reduction of carbon emission. 【Result】 Comparison between the treatments demonstrates that treatments M and MNPK were significantly higher in SOC content than all the others, displaying an order of M > MNPK > 1/2M+1/2NPK > 1/4M+3/4NPK. In treatments M and MNPK, content of SOC was gaining in budgeting, and the higher the application rate of manure, the more significant the gain, while it was losing in all the other treatments, displaying an order of MNPK & M > 1/2M+1/2NPK > 1/4M+3/4NPK > NPK > NK > NP > N & CK > PK. Application of manure plus chemical fertilizers, manure alone or balanced NPK was more conducive to improvement of crop yield than the other patterns of

fertilization, and in terms of crop yield, the treatments followed an order of MNPK > 1/4M+3/4NPK & 1/2M+1/2NPK > NPK & M > NP > NK, PK & N > CK. Application of NPK coupled with appropriate of organic manure improved maize yield sustainability (SYI) and yield stability (CV), especially treatment 1/4M+3/4NPK that was the highest in both of the indices, with SYI being > 0.6 and CV being < 0.3. The research also found that annual yield was closely related to balance of SOC content, whereas, yield sustainability and stability was to SOC content. **【Conclusion】** To sum up, application of chemical fertilizer coupled with organic manure is conducive to accumulation of SOC content in yellow soil and maintenance of stable and sustainable maize yield, and in response to the fertilizer reducing principle, the application of 1/4M+3/4NPK is recommended to be the optimal practice.

**Key words** Long-term fertilization; Yellow soil; Soil organic carbon content; Soil organic carbon balance; Maize yield

(责任编辑：卢萍)