

# 长期定位施肥对旱作农田土壤有机碳及其组分的影响

赵丹丹, 王 俊, 付 鑫

(西北大学城市与环境学院, 陕西 西安 710127)

**摘 要:** 基于田间定位试验, 研究了长期施肥对旱作冬小麦农田土壤有机碳及其组分的影响, 试验包括 4 个处理: 不施肥(CK)、氮磷配施(NP)、化肥与有机肥配施(NPM)以及长期休闲地(BL)。结果表明: 长期持续施肥 30 年后, 在 0~30 cm 土层, NPM 处理土壤有机碳、微生物量碳、潜在矿化碳以及碳库管理指数分别较 CK 提高了 42.2%、55.9%、40.9% 和 40.0% ( $P < 0.05$ ), NP 处理土壤有机碳和微生物量碳与 CK 差异不显著, 潜在矿化碳和碳库管理指数分别提高了 29.1% 和 20.0% ( $P < 0.05$ ), 施肥对两种活性有机碳含量的影响在 15~30 cm 土层表现更加显著; 与种植作物相比, 长期休闲显著降低了土壤潜在矿化碳含量, BL 处理较 CK 降低了 20.5% ( $P < 0.05$ )。相关性分析表明, 土壤有机碳、潜在矿化碳、微生物量碳以及碳库管理指数两两之间存在着显著的相关性, 且有机碳组分含量与土壤有机碳含量在处理间变化具有一致性(除 NP 处理外), 两种活性有机碳相对含量在各处理间差异均不显著。总的来说, 长期持续施入有机肥能够有效地增加旱作农田土壤有机碳同时增加其活性组分, 有助于培肥地力和土壤固碳。

**关键词:** 长期施肥; 土壤有机碳; 微生物量碳; 潜在矿化碳; 碳库管理指数

**中图分类号:** S153.6\*2 **文献标志码:** A

## Effect of long-term fertilization on soil organic carbon and its fractions under dryland farming system

ZHAO Dan-dan, WANG Jun, FU Xin

(College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710127, China)

**Abstract:** A long-term winter wheat field experiment was conducted to detect the effect of long-term fertilization on soil organic carbon and its active fractions. Four treatments were performed as control treatment (CK), nitrogen and phosphorus combined fertilization (NP), nitrogen, phosphorus and manure combined fertilization (NPM) and bare land without fertilization and cropping (BL). The results showed that the contents of soil organic carbon content, microbial biomass carbon content, potential mineralized carbon and carbon management index at 0~30 cm soil layers were improved in NPM than in CK after 30-yr continuous fertilization, being 42.2%, 55.9%, 40.9% and 40.0% higher, respectively. No significant difference in soil organic carbon and microbial biomass carbon were found between NP and CK, however, the potential mineralized carbon content and carbon management index were significantly higher in NP than in CK. The effect of long term fertilization on soil active organic carbon fractions was more obvious at 15~30 cm soil layers than at 0~15 cm layers. No cropping reduced the contents of soil organic carbon and its fractions significantly. Soil carbon potential mineralization was lower by 20.5% in BL than in CK, respectively. Correlation analysis showed that soil organic carbon, potential mineralization carbon, microbial biomass carbon and carbon management index correlated with each other significantly. Soil organic carbon changed in agreement with its fractions for all treatments except for NP, and the relative contents of two active organic carbon and its potential mineralization ratio of microbial biomass carbon were not significant among treatments. In general, continuous long-term manure addition can effectively increase soil organic carbon and its active fractions, contributing to soil fertility and carbon sequestration under dryland farming systems.

收稿日期: 2016-01-05

基金项目: 国家自然科学基金(31270484, 31570440)

作者简介: 赵丹丹(1991—), 女, 硕士研究生, 主要从事旱作农田土壤碳氮循环研究。E-mail: xbtzxd@sina.com。

通信作者: 王 俊(1974—), 男, 教授, 主要从事农田生态学研究。E-mail: wangj@nwu.edu.cn。

**Keywords:** Long-term fertilization; soil organic carbon; potential carbon mineralization; microbial biomass carbon; carbon management index

土壤有机碳是反映土壤质量和生产力的重要指标,其含量往往影响土壤肥力,但因土壤有机碳库存量且变异系数小<sup>[1]</sup>,单独对这一指标的测定并不能准确反映土壤质量和有机质的变化情况<sup>[2]</sup>。土壤微生物量碳、潜在矿化碳等有机碳活性组分虽然在土壤有机碳中所占比例很小,但其具有在土壤中移动快、不稳定、易氧化、易分解、易矿化的特点<sup>[3]</sup>,因而对土壤质量和生产力的反映更为敏感,所以能够作为反映不同管理措施对土壤有机碳影响的重要指标<sup>[1]</sup>。

大量研究结果表明,长期施肥对土壤有机碳及其活性组分有显著影响<sup>[4-9]</sup>,其中,有机肥的施用可以显著增加有机碳及其活性组分含量<sup>[5-6]</sup>,而无机肥的影响却因气候条件、土地类型以及施肥耕作条件的复杂性而不尽相同<sup>[4]</sup>。臧逸飞等<sup>[5]</sup>研究发现,施用有机肥及氮磷肥配合施用可以明显提高黑垆土土壤有机碳含量,有机肥的施入极大地增加微生物量碳含量。而董博等<sup>[6]</sup>的试验表明,长期施肥可显著提高石灰性灌漠土微生物量碳的含量,但单施化肥的效果显著低于绿肥及农肥。这些研究也表明了农田土壤有机碳库对施肥的响应是个长期的过程<sup>[1]</sup>,但持续的肥料投入并不一定总会土壤有机碳含量有显著影响,有时只会对土壤碳库活性组分产生显著影响。例如:张贵龙等<sup>[7]</sup>研究表明,施用有机肥对土壤活性组分提高有显著的促进效果,不同处理间土壤活性有机碳含量的变化幅度较总有机碳大,活性有机碳对施肥措施的响应较为敏感,有助于指示或预警土壤质量的变化。近年来,有关长期施肥对土壤有机碳影响的相关报道颇多,但大部分研究均以不同施肥方式各自对土壤有机碳及其含量影响为主线,对各处理比较,特别是长期种植作物对土壤有机碳及其组分的影响报道较少。本文基于陕西省长武县长期定位试验<sup>[2]</sup>,选取其中冬小麦连作地中 4 个处理(长期休闲地、对照不施肥、氮磷配施、有机肥与氮磷配施),分析了持续施肥 30 年后土壤有机碳库组成的变化,并对有机肥、化肥及种植作物对土壤有机碳及其组分的变化进行比较分析,旨在探讨旱作农田土壤有机碳及其活性组分对长期定位施肥的响应及其敏感性特征,为该地实现农业可持续发展和土壤碳库固定提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验地位于陕西省长武县十里铺村南 1 km 的

旱塬上,海拔 1 200 m,年均降水量为 584.1 mm,年均气温 9.1℃,无霜期 171 d。该地平坦宽阔,黄土堆积深厚,土壤为黄盖粘黑垆土,母质为中壤质马兰黄土。1984 年布设试验时耕层土壤有机质含量为 6.50 g·kg<sup>-1</sup>,全氮含量为 0.80 g·kg<sup>-1</sup>,pH 值 8.10。

### 1.2 试验设计

长期轮作培肥试验始于 1984 年<sup>[2]</sup>,包括 11 种轮作方式和 7 种施肥制度,共 36 个处理,3 次重复,随机区组排列,小区面积 66.67 m<sup>2</sup>(10.26 m × 6.5 m)。选取其中的 4 个处理加以研究,处理方案如表 1 所示。

供试小麦品种为长武 134,每年于 9 月中下旬播种,次年 6 月下旬收获,一年一熟。所有肥料在播种前一次性施入,定期除草和松土,田间管理同大田。

表 1 长武长期定位试验中的供试施肥处理

Table 1 Treatments selected from the long-term experiment at Changwu station

处理 Treatments	施肥量 Fertilizer rates		
	N/(kg·hm <sup>-2</sup> )	P/(kg·hm <sup>-2</sup> )	FYM/(t·hm <sup>-2</sup> )
CK	0	0	0
NP	120	26.2	0
NPM	120	26.2	75
BL	0	0	0

注:CK—对照;NP—氮肥+磷肥;NPM—氮肥+磷肥+有机肥;BL—裸地;N—氮肥;P—磷肥;FYM—有机肥

Note:CK—control check; NP—nitrogen + phosphorus; NPM—nitrogen + phosphorus + manure; BL—bare land; N—nitrogen; P—phosphorus; FYM—farmyard manure.

### 1.3 分析方法

试验于 2014 年 9 月小麦播种前采用“S”点采样法,采集各小区 0~15 cm、15~30 cm 新鲜土样 5 钻,并将同样深度土样混合均匀,带回实验室风干并剔除植物残体,过 2 mm 筛,用于微生物量碳、潜在矿化碳含量的测定;过 0.15 mm 筛,用于土壤有机碳的测定。潜在矿化碳采用密闭培养法测定<sup>[10]</sup>,微生物量碳采用氯仿熏蒸培养法(FI)<sup>[11]</sup>测定,土壤有机碳采用 EA3000 元素分析仪测定(用 10% HCl 去除无机碳<sup>[12]</sup>)。

碳库管理指数的计算参照文献<sup>[13]~[14]</sup>:

$$CMI = CPI \times LI \times 100 \quad (1)$$

$$CPI = SOC / SOC_{CK} \quad (2)$$

$$LI = L / L_{CK} \quad (3)$$

$$L = LOC / NLOC \quad (4)$$

$$LOC = PCM + MBC \quad (5)$$

$$NLOC = SOC - LOC \quad (6)$$

式中,  $CMI$  为碳库管理指数;  $CPI$  为碳库指数;  $SOC_{CK}$  为对照土壤有机碳含量;  $LI$  为碳库活度指数;  $L$  为样本碳库活度;  $L_{CK}$  为对照碳库活度;  $LOC$  为活性有机碳含量(潜在矿化碳与微生物量碳之和);  $NLOC$  为非活性有机碳含量。

#### 1.4 数据处理

所有数据采用 Excel 2010 绘制表格, PASW Statistics 18 统计软件进行显著性检验和分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤有机碳含量

由表 2 可以看出, 在 0~15 cm 土层, NPM 处理土壤有机碳含量分别比 CK、NP 处理高  $3.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $3.7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 但未达到显著差异水平; 15~30 cm 土层土壤有机碳含量排序为  $NPM > CK > NP > BL$ , 其中 NPM 处理与 CK、NP 处理间的差异达到显著水平, 增幅分别为 49.5%、88.8%; 0~30 cm 土层平均来看, 土壤有机碳含量排序  $NPM > CK > NP > BL$ , 其中 NPM 处理较 CK、NP 处理显著提高 42.2% 和 59.3%, 其余处理差异不显著。

表 3 不同处理土壤微生物量碳含量及其相对含量

Table 3 Soil microbial biomass carbon (MBC) and its contribution to soil organic carbon (MBC/SOC) under different treatments

处理 Treatment	微生物量碳/( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) Soil microbial biomass C			MBC/SOC/%		
	0~15 cm	15~30 cm	0~30 cm	0~15 cm	15~30 cm	0~30 cm
CK	354b	295b	324bc	3.85a	3.00a	3.43a
NP	485ab	276b	380b	4.81a	4.48a	4.15a
NPM	568a	441a	505a	4.16a	2.78a	3.47a
BL	368b	207b	288c	4.55a	3.03a	3.79a

### 2.3 潜在矿化碳及相对含量

由表 4 可以看出, 在 0~15 cm 土层, NPM、NP 显著高于 CK 处理, 增幅为 48.4%、45.7%, 但 NP 与 NPM 之间并无显著差异, 潜在矿化碳相对含量在各个处理间差异未达到显著水平, 其变化趋势为  $NP > BL > NPM > CK$ ; 15~30 cm 土层中, NPM 显著高于其余各处理, 较 CK 和 NP 处理分别增加 36.1% 和 21.0%, CK 处理较 BL 也达到显著差异水平, 潜在矿化碳含量提高 60.0%; 潜在矿化碳相对含量 NP 处理显著高于 NPM 处理, 增幅达 71.0%, 其余处理间差异不显著, 排序为  $NP > CK > BL > NPM$ , PCM/MBC 比值也未显示显著差异, 均表现为 0~15 cm 土层低于 15~30 cm 土层; 从 0~30 cm 平均来看, CK 处理

表 2 不同处理土壤有机碳含量

Table 2 Soil organic C under different treatments

处理 Treatments	有机碳 Soil organic C/( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )		
	0~15 cm	15~30 cm	0~30 cm
CK	10.2ab	10.1b	10.2b
NP	10.1ab	8.0b	9.1b
NPM	13.8a	15.1a	14.5a
BL	8.3b	7.3b	7.8b

注: 不同字母表示处理间差异达到 5% 显著水平, 下同。

Note: Different letters mean significant difference at  $P < 0.05$ . The same below.

### 2.2 微生物量碳及其相对含量

由表 3 可以看出, 在 0~15 cm 土层, NPM 处理微生物量碳含量显著高于 CK 处理, 增幅达到 60.5%。其余各处理差异不显著; 15~30 cm 土层中, NPM 处理较 CK、NP 处理显著提高了微生物量碳含量, 增幅分别达到 49.6% 和 59.8%, 其余处理差异不显著; 且微生物量碳相对含量在以上两土层差异均不显著; 0~30 cm 土层平均来看, 各处理微生物量碳含量排序为  $NPM > NP > CK > BL$ , 其中 NPM 较 NP、CK 处理显著提高; 各处理微生物量碳相对含量表现为  $NP > BL > NPM > CK$ , 且均未达到显著差异。

较 BL 处理潜在矿化碳含量显著增加, 差异达到 25.7%, 两施肥处理较 CK 均有显著的增加, 但相互间差异并不显著, 潜在矿化碳相对含量各处理间差异不显著, 其变化趋势为  $BL > NP > CK > NPM$ ; PCM/MBC 比值呈  $CK > NP > BL > NPM$  趋势。

### 2.4 碳库管理指数

由表 5 可以看出, 在 0~15 cm 土层, NPM、NP 处理碳库管理指数较 CK 分别显著提高了 41.3%、30.0%; 15~30 cm 土层中, CK 处理显著高于 BL 处理, 差异达到 53.8%, 同时 NPM 处理显著高于其余处理, 分别较 CK 和 NP 处理提高 39.1% 和 39.0%; 0~30 cm 土层平均看来, 碳库管理指数排序为  $NPM > NP > CK > BL$ , 其中 NPM 处理与 NP 处理差异显

著,同时两者均显著高于 CK。

表 4 不同处理土壤潜在矿化碳含量及其相对含量

Table 4 Soil potential carbon mineralization (PCM), its contribution to soil organic carbon (PCM/SOC) and its contribution to microbial biomass carbon (PCN/MBC) under different treatment

处理 Treatment	潜在矿化碳/(mg·kg <sup>-1</sup> ) Potential carbon mineralization			PCM/SOC/%			PCM/MBC/%		
	0~15 cm	15~30 cm	0~30 cm	0~15 cm	15~30 cm	0~30 cm	0~15 cm	15~30 cm	0~30 cm
CK	223b	216b	220b	2.35a	2.18ab	2.86a	65.5a	73.2a	69.4a
NP	325a	243b	284a	3.21a	3.06a	3.13a	67.1a	69.9a	68.5a
NPM	331a	294a	310a	2.39a	1.79b	2.09a	59.0a	67.2a	63.1a
BL	211b	135c	175c	2.57a	1.95b	3.25a	60.2a	68.3a	64.3a

表 5 不同处理碳库管理指数

Table 5 Carbon management index under different treatments

处理 Treatment	0~15 cm	15~30 cm	0~30 cm
CK	100b	100b	100c
NP	130a	100b	120b
NPL	141a	139a	140a
BL	92b	65c	79c

表 6 为土壤有机碳及其组分相关性分析:可以看出土壤有机碳、潜在矿化碳、微生物量碳以及碳库管理指数两两之间存在着显著的相关性。其中潜在矿化碳和微生物量碳的相关性达到了极显著水平,主要是由于潜在矿化碳受微生物活动影响。土壤有机碳和潜在矿化碳、微生物量碳显著相关,说明土壤中活性有机碳含量受土壤有机碳影响较大,一定程度上说明土壤中活性组分含量依赖于土壤有机碳含量。这两种活性组分虽然不同,但是可以从一个指标的变化判断出另一个指标的变化,两种活性组分均可指示土壤质量的变化情况<sup>[13]</sup>。

### 3 讨论

土壤有机碳含量变化与新鲜有机物的输入关系密切,种植作物可以通过根系残留和枯落物有效增加土壤碳输入,从而提高土壤有机碳水平。在本研究中 BL 处理为常年休闲地,自 1984 年开始由于基本没有新鲜有机物的输入,CK 处理与其相比增加了土壤有机碳含量,增幅为 30.1%,但并未达到显著差异水平。表明长期种植作物可以增加土壤有机碳的积累,这种增加作用在郭胜利等<sup>[8]</sup>的研究中表现更为突出,其研究表明对照处理比长期休闲地土壤有机碳含量增加 13.6% ( $P < 0.05$ )。施肥方式的不同,对土壤有机碳含量影响更为深远,已有研究<sup>[4,9]</sup>表明,长期单施化肥对土壤有机碳的影响不尽相同。

臧逸飞等<sup>[5]</sup>认为施用化肥土壤有机碳含量较小,究其原因在于施肥虽然增加了植物根茬等的残留,但由于土壤的 C/N 比下降,加速了土壤中原有有机碳分解,导致土壤中积累的有机碳总量较少;而陈云峰等<sup>[9]</sup>和郭胜利等<sup>[8]</sup>则认为化肥的施用一定程度上增加了土壤有机质含量,这与本文的研究结论不一致。许多研究者<sup>[15,9,16-17]</sup>在不同的土地类型、气候条件以及利用方式的前提下,均得出长期施入有机肥或有机无机肥料混合施用均能显著提高土壤有机碳含量,本文研究结果与此相一致,化肥有机肥配合施用效果最为明显,土壤有机碳含量较 CK 增加了 42.2%。

表 6 土壤有机碳及其组分相关性分析

Table 6 Correlation analysis of soil organic carbon and its fractions

项目 Item	土壤有机碳 Soil organic carbon	潜在矿化碳 Potential carbon mineralization	微生物量碳 Microbial biomass carbon	碳库管理指数 Carbon pool management index
土壤有机碳 Soil organic carbon	1.000			
潜在矿化碳 Potential carbon mineralization	0.511 *	1.000		
微生物量碳 Microbial biomass carbon	0.540 *	0.784 **	1.000	
碳库管理指数 Carbon pool management index	0.472 *	0.885 **	0.905 **	1.000

注: \* 表示数值间呈显著相关关系 ( $P < 0.05$ ), \*\* 表示数值间呈极显著相关关系 ( $P < 0.01$ )。

Note: \* means significant correlation at  $P < 0.05$  level; \*\* means highly significant correlation at  $P < 0.01$  level.

本研究微生物量碳变动范围为 207 ~ 568 mg·kg<sup>-1</sup>,在一般农田生态系统微生物生物量碳质量分数(200 ~ 1 000 mg·kg<sup>-1</sup>)<sup>[18]</sup>范围之内。这一结果较陈云峰等<sup>[9]</sup>报道的偏低,主要是本研究中包含长

期休闲地,其微生物量碳含量较低,也与研究区土地类型差异有关。高扬等<sup>[15]</sup>对四川盆地坡耕地紫色土研究认为,裸地微生物量碳含量显著低于植被小区,并随坡度增加和土层加深表现更为明显。在本研究中长期休闲地微生物量碳含量均低于种植小麦的各处理,表明种植作物可以大量增加碳源,促进微生物的生长,从而提高微生物量碳含量。本研究还表明,长期施肥(化肥和化肥有机肥混合施用)都能提高微生物量碳含量,其中化肥有机肥配施处理下微生物量碳含量要高于单施化肥,这与高扬等<sup>[15]</sup>的研究结论一致。

潜在矿化碳可以广泛地评估土壤微生物活性,因此,一直以来就被人们作为土壤微生物总的活性指标或作为评价土壤肥力的尺度之一<sup>[3]</sup>。本研究中,潜在矿化碳含量变化趋势与微生物量碳相同,各处理间作用表现为 NPM > NP > CK > BL,这是由于潜在矿化碳值反映微生物呼吸,表征微生物活度,因而其变化与微生物量碳含量密不可分。长期施用有机肥和化学肥料均可增加潜在矿化碳含量,这与李辉信等<sup>[19]</sup>、王玲莉等<sup>[20]</sup>的研究结论一致。

土壤微生物量碳、潜在矿化碳对长期施用化肥与有机肥配施的响应与土壤有机碳一致,而对单施化肥的响应却不尽相同:化肥长期施用虽降低了土壤有机碳的含量,却使得两种活性有机碳(微生物量碳、潜在矿化碳)含量都有增加,这一结论与王玲莉等<sup>[20]</sup>在沈阳研究的长期单施化肥与化肥有机肥配施均使棕壤活性有机碳含量与有机碳增加的结论有所不同。

本研究中潜在矿化碳相对含量变化范围在 1.79% ~ 3.06%,微生物量碳相对含量变化范围在 2.78% ~ 4.81%,这一数据要低于梁贻仓等<sup>[13]</sup>关于覆盖对土壤有机碳的报道,与 Sainju 等<sup>[1]</sup>关于轮作对美国旱地作物有机碳、氮的报道相比也较低。且微生物量碳相对含量在各个土层不同处理间的差异均未达到显著水平,其变化趋势为 NP > BL > NPM > CK;而潜在矿化碳相对含量仅有单施化肥在 15 ~ 30 cm 土层作用显著,各土层平均来看潜在矿化碳相对含量排序为 NP > BL > CK > NPM。就本研究而言,两种活性有机碳相对含量并没有更显著地揭示长期施肥对土壤的影响,究其原因,可能是单施化肥使得土壤有机碳含量降低而活性有机碳含量升高,因而 NP 处理活性有机碳相对含量较高;且与土壤有机碳相比两种活性有机碳随时间的变化更为显著,因而 BL 处理活性有机碳相对含量也较高。PCM/MBC 比值即土壤中微生物呼吸所释放的 CO<sub>2</sub> 比例<sup>[21]</sup>,能够

反映土壤微生物代谢活动,本研究表明,15 ~ 30 cm 土层中 PCM/MBC 平均比值高于 0 ~ 15 cm,这与 Franzluebbers 等<sup>[22]</sup>的研究结论一致;但其指示作用同样不显著。

Lefroy 等<sup>[23]</sup>的研究区分了活性有机碳和非活性有机碳,并提出土壤碳库管理指数的概念。碳库管理指数因结合了土壤碳库指标和土壤碳库活度指标,既反映外界管理措施对土壤有机碳总量的影响,也反映了土壤有机碳组分的变化情况,其广泛应用于农地或者土地利用方式改变后土壤有机碳变化的研究,碳库管理指数 > 100,表明土壤肥力上升;反之,碳库管理指数 < 100,则表明土壤肥力下降<sup>[24]</sup>。本研究表明,NPM 处理显著提高了碳库管理指数,使得土地肥力上升,这与张贵龙等<sup>[7]</sup>、梁贻仓等<sup>[13]</sup>的研究结论一致,且这种促进作用在 15 ~ 30 cm 土层表现更为突出。

## 4 结 论

0 ~ 30 cm 土层平均来看,经过 30 年长期施肥:单施化肥和有机无机肥配施均能显著提高碳库管理指数,长期种植作物作用并不显著。有机肥的施用还对增加土壤有机碳、微生物量碳及潜在矿化碳含量有显著作用,且这种促进作用在 15 ~ 30 cm 土层表现更为突出;但单施化肥及种植作物的作用仅表现在两者均显著增加了土壤潜在矿化碳含量。且除单施化肥外,有机碳组分含量与土壤有机碳含量在处理间变化具有一致性。在本文中,土壤活性有机碳相对含量对长期施肥的响应在各个土层均不显著,并不能及时地反映长期施肥对土壤肥力的影响。同时,土壤总有机碳和碳库管理指数之间存在着显著的相关关系,潜在矿化碳、微生物量碳、碳库管理指数之间相关性较高。

## 参 考 文 献:

- [1] Upendra M. Sainju, Andrew Lenssen, Thecan Caesar-Thonthat, et al. Dryland plant biomass and soil carbon and nitrogen fractions on transient land as influenced by tillage and crop rotation[J]. Soil & Tillage Research, 2007, 93: 452-461.
- [2] 党廷辉,高长青,彭琳,等.长武旱塬轮作与肥料长期定位试验[J].水土保持研究,2003,10(1):61-64,103.
- [3] 杨丽霞,潘剑君.土壤活性有机碳库测定方法研究进展[J].土壤通报,2004,35(4):502-506.
- [4] 梁贻仓.不同农田管理措施下土壤有机碳及其组分研究进展[J].安徽农业科学,2013,41(24):9964-9966.
- [5] 臧逸飞,郝明德,张丽琼,等.26年长期施肥对土壤微生物量碳、氮及土壤呼吸的影响[J].生态学报,2015,35(5):1445-1451.
- [6] 董博.长期定位施肥对土壤有机碳和微生物量碳的影响[J].

- 土壤通报,2012,43(6):1467-1472.
- [7] 张贵龙,赵建宁,宋晓龙,等.施肥对土壤有机碳含量及碳库管理指数的影响[J].植物营养与肥料学报,2012,18(2):359-365.
- [8] 郭胜利,吴金水,党廷辉.轮作和施肥对半干旱区作物地上部生物量与土壤有机碳的影响[J].中国农业科学,2008,41(3):744-751.
- [9] 陈云峰,韩雪梅,胡诚,等.长期施肥对黄棕壤固碳速率及有机碳组分影响[J].生态环境学报,2013,22(2):269-275.
- [10] Jenkinson D, SPowelson D S. The effects of biocidal treatments on metabolism in soil: A method for measuring soil biomass[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1976,8(3):209-213.
- [11] Goyal S, Chander K, Mundra M C, et al. Influence of inorganic fertilizers and organic amendments on soil organic matter and soil microbial properties under tropical conditions[J]. Biology and Fertility of Soils, 1999,29(2):196-200.
- [12] 沈亚婷. EDXRF 测定土壤元素含量及其在有机碳垂直分布特征研究中的应用[J].光谱学与光谱分析,2012,32(11):3117-3122.
- [13] 梁贻仓,王俊,刘全全,等.地表覆盖对黄土高原土壤有机碳及其组分的影响[J].干旱地区农业研究,2014,32(5):161-167.
- [14] 蔡立群,齐鹏,张仁陟,等.不同保护性耕作措施对麦-豆轮作土壤有机碳库的影响[J].中国生态农业学报,2009,17(1):1-6.
- [15] 高扬,徐亚娟,陈维梁,等.紫色土坡耕地 C、N 与微生物 C、N 变化及其耦合特征[J].应用生态学报,2015,34(1):108-112.
- [16] 袁颖红,黄欠如,黄荣珍,等.长期施肥对红壤土有机碳和全氮含量的影响[J].南昌工程学院学报,2007,26(4):29-33.
- [17] 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.
- [18] Martens R. Current methods for measuring microbial biomass C in soil: potentials and limitations[J]. Biology and Fertility of Soils, 1995,19(2/3):87-99.
- [19] 李辉信,袁颖红,黄欠如,等.长期施肥对红壤性水稻土团聚体活性有机碳的影响[J].土壤学报,2008,45(2):259-266.
- [20] 王玲莉,姜冀来,石元亮,等.长期施肥对土壤活性有机碳指标的影响[J].土壤通报,2008,39(4):752-755.
- [21] Upendra M. Sainjua, Harry H. Schomberg, Bharat P. Singhe, et al. Cover crop effect on soil carbon fractions under conservation tillage cotton[J]. Soil & Tillage Research, 2007,96:205-218.
- [22] Franzluebbers A J, Hons F M, Zuberer D A. Long-term changes in soil carbon and nitrogen pools in wheat management systems[J]. Soil Sci Soc Am J, 1994,58:1639-1645.
- [23] Lefroy R D B, G J Blair, Strong W M. Changes in soil organic matter with cropping as measured by organic carbon fractions and  $^{13}C$  natural isotope abundance[J]. Plant and Soil, 1993,156:399-402.
- [24] 李林海,郜二虎,梦梦,等.黄土高原小流域不同地形下土壤有机碳分布特征[J].生态学报,2013,33(1):179-187.

(上接第 84 页)

- [4] 马群,李国业,顾海水,等.我国水稻氮肥利用现状及对策[J].广东农业科学,2010,37(11):126-129.
- [5] 高远.农资转型发展必由之路:开启零增长行动[J].中国农资,2015,6:18.
- [6] 段爱旺,张寄阳.中国灌溉农田粮食作物水分利用效率的研究[J].农业工程学报,2000,16(4):41-44.
- [7] 刘洪亮,曾胜河,施敏,等.棉花膜下滴灌施肥技术的研究[J].土壤肥料,2004,(2):30-34.
- [8] 吴立峰,张富仓,周罕觅,等.不同滴灌施肥水平对北疆棉花水分利用率和产量的影响[J].农业工程学报,2014,20(30):137-146.
- [9] 杨小梅,刘树伟,秦艳梅,等.中国玉米化学氮肥利用率的时空变异特征[J].中国生态农业学报,2013,21(10):1184-1192.
- [10] 赵靓,侯振安,黄婷,等.氮肥用量对玉米产量和养分吸收的影响[J].新疆农业科学,2014,51(2):275-283.
- [11] 李洁尉.我国化肥用量超世界公认警戒上限[N].中国科学报,2015-1-8(4).
- [12] 姜雯,周登博,张洪生,等.不同施肥水平下聚天冬氨酸对玉米幼苗生长的影响[J].玉米科学,2007,15(5):121-124.
- [13] 王秀斌,徐新朋,孙刚,等.氮肥用量对双季稻产量和氮肥利用率的影响[J].植物营养与肥料学报,2013,19(6):1279-1286.
- [14] Gentry L E, Below F E. Maize Productivity as influenced by form and availability of nitrogen[J]. Crop Sci, 1993,33(3):491-497.
- [15] Heberer J A, Below F E. Mixed nitrogen nutrition and productivity of wheat grown in hydroponics[J]. Ann. Bot, 1989,63(6):643-649.
- [16] Schroder J J, Neeteson J J, Withagen J C M, et al. Effects of N application on agronomic and environmental parameters in silage maize production on sandy soils[J]. Field Crops Research, 1998,58(1):55-67.
- [17] 田秀英,王正银.尿素与复合氮肥增效剂配施对水稻氮素利用的影响[J].水土保持学报,2006,20(6):120-123.
- [18] 中国农业年鉴编委会.中国农业年鉴[M].北京:中国农业出版社,2011.
- [19] 巨晓棠,张福锁.关于氮肥利用率的思考[J].生态环境,2003,12(2):192-197.
- [20] 高亚军,李生秀,田霄鸿,等.不同供肥条件下水分分配对旱地玉米产量的影响[J].作物学报,2006,32(3):415-422.
- [21] 游福欣,王向阳,王宗杰,等.夏玉米最佳施氮量研究[J].安徽农业科学,2005,33(5):765-766.
- [22] 侯云鹏,孔丽丽,秦裕波,等.吉林省中部黑土区玉米氮肥效应研究[J].玉米科学,2012,20(3):130-133,138.
- [23] 曾艳,周柳强,黄金生,等.肥料增效剂对玉米干物质积累及氮养分吸收的影响[J].南方农业学报,2014,45(10):1813-1817.
- [24] 田秀英,王正银.玉米对尿素减量与复合氮肥增效剂配施的响应[J].核农学报,2006,20(6):539-543.
- [25] 孙传范,戴廷波,曹卫星.不同施氮水平下增铍营养对小麦生长和氮素利用的影响[J].植物营养与肥料学报,2003,9(1):33-38.