

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2024.03.007

蒋如, 宁诗琪, 隋宗明, 等. 长期轮作施肥处理对植烟土壤有机碳组分和酶活性的影响. 土壤, 2024, 56(3): 510–516.

# 长期轮作施肥处理对植烟土壤有机碳组分和酶活性的影响<sup>①</sup>

蒋如<sup>1</sup>, 宁诗琪<sup>1</sup>, 隋宗明<sup>1</sup>, 袁玲<sup>1</sup>, 刘京<sup>2\*</sup>

(1 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 2 贵州省烟草公司遵义市公司, 贵州遵义 563000)

**摘要:** 以贵州省遵义市烤烟长期(18年)定位试验为平台, 研究两种种植制度(烤烟-玉米轮作和烤烟连作)下的3种不同施肥模式(不施肥、单施化肥、化肥有机肥配施)对植烟土壤有机碳组分、酶活性和碳库管理指数的影响, 探究植烟土壤的碳素转化, 为土壤碳素科学管理提供依据。结果显示: 在相同种植模式下, 化肥有机肥配施处理比单施化肥处理的土壤总有机碳(TOC)增加5.65%~12.13%, 其中, 轻组有机碳(LFOC)、溶解性有机碳(DOC)和易氧化有机碳(ROC)分别提高23.33%~28.71%、24.46%~25.54%、10.26%~18.99%, 碳库管理指数增加12.89%~23.34%; 土壤纤维素酶、 $\beta$ -葡萄糖苷酶、淀粉酶、过氧化氢酶和蔗糖酶活性显著增强, 且与土壤有机碳各组分含量和碳库管理指数呈显著正相关( $0.59^* \sim 0.97^{**}$ ,  $n=18$ )。在相同施肥条件下, 轮作处理的土壤有机碳含量、酶活性和碳库管理指数分别比连作处理提高6.14%~23.51%、9.00%~37.92%和4.74%~14.44%, 以烤烟-玉米轮作+化肥有机肥配施处理最优。综上, 通过“轮作+化肥有机肥配施”不仅能显著提高植烟土壤有机碳含量和碳库管理指数, 还能增加土壤微生物生物量和活性有机碳(LOC)组分, 对于提高植烟土壤肥力和维持土地生产力具有重要意义。

**关键词:** 长期施肥; 活性有机碳; 土壤酶活性; 碳库管理指数

中图分类号: S158.3 文献标志码: A

## Effects of Long-term Rotation and Fertilization Treatments on Organic Carbon Fractions and Enzyme Activities in Tobacco-planting Soil

JIANG Ru<sup>1</sup>, NING Shiqi<sup>1</sup>, SUI Zongming<sup>1</sup>, YUAN Ling<sup>1</sup>, LIU Jing<sup>2\*</sup>

(1 College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2 Zunyi Company of Guizhou Company, Zunyi, Guizhou 563000, China)

**Abstract:** Based on the long-term(18 years) field experiment in Zunyi of Guizhou Province, the effects of three different fertilization modes (no fertilization, chemical fertilizer alone, combined chemical and organic fertilizers) under two cropping systems (tobacco-maize rotation and continuous tobacco cultivation) on soil organic carbon (SOC) components, enzyme activities and carbon pool management index (CPMI) were investigated in order to explore carbon transformations in tobacco-planting soils and provide scientific management strategies for soil carbon. The results showed that under the same cropping system, combined chemical and organic fertilizers increased total soil organic carbon (TOC) content by 5.65%–12.13%, among them, light fraction organic carbon (LFOC), dissolved organic carbon (DOC) and readily oxidizable organic (ROC) increased by 23.33%–28.71%, 24.46%–25.54%, and 10.26%–18.99%, respectively. The CPMI also increased by 12.89%–23.34%. The activities of soil cellulase,  $\beta$ -glucosidase, amylase, peroxidase and invertase were significantly enhanced and were positively correlated with contents of SOC components and CPMI ( $0.59^* \sim 0.97^{**}$ ,  $n=18$ ). Under the same fertilization conditions, SOC content, enzyme activities, and CPMI under the rotation were 6.14%–23.51%, 9.00%–37.92%, and 4.74%–14.44% higher than those under the continuous cropping system. In conclusion, tobacco-maize rotation with organic plus inorganic fertilizer application can not only significantly increase SOC and CPMI, but also enhance soil microbial biomass and labile organic carbon, which is of great importance for improving soil fertility and sustaining soil productivity.

**Key words:** Long-term fertilization; Labile organic carbon; Enzyme activities; Carbon pool management index

①基金项目: 遵义市烟草公司科技项目(2020XM03)资助。

\* 通讯作者(liujingcre@163.com)

作者简介: 蒋如(1998—), 男, 河南信阳人, 硕士研究生, 主要研究方向为植物营养与环境。E-mail: jal1314841@163.com

西南地区是我国优质烤烟主产区,其中贵州烟区因得天独厚的生态环境造就了烟叶“香味柔和,余味纯净”的特色风格和优良品质,烟草种植也成为当地农业经济发展的重要组成部分。然而,受限于耕地资源匮乏、传统烟区流失和土壤肥力水平低下,烤烟连作和不合理的施肥现象十分普遍,致使烟地生产力下降、土壤理化和生物学性质恶化、肥料利用率降低和环境污染等问题日益凸显<sup>[1]</sup>。因此,保护和改善烟地土壤质量和健康成为亟待解决的问题。

土壤有机碳(SOC)作为土壤中最重要有机组分之一,在土壤生态系统的功能维持和土壤质量改善方面发挥着至关重要的作用。土壤活性有机碳(LOC)是土壤中易被微生物分解的有机碳的重要组成部分,反映了土壤中的有机物分解速率和微生物活动水平,其主要来源于微生物分解的动植物残体、作物根系分泌物和部分简单有机酸,是微生物活动的主要能源和土壤养分的驱动力,具有周转时间短和周转速度快的特点<sup>[2-3]</sup>。其组分如微生物生物量碳(MBC)、溶解性有机碳(DOC)、轻组有机碳(LFOC)和易氧化有机碳(ROC)等可作为反映土壤肥力和质量变化的早期预测指标<sup>[4-5]</sup>。已有的研究表明,种植模式、有机无机肥料配施、水肥一体化和绿肥种植等均能够影响土壤有机碳及其活性组分<sup>[6]</sup>。杨滨娟等<sup>[7]</sup>的研究发现,“油菜-甘蔗||春大豆→紫云英-早稻-玉米||甘薯”复种轮作模式能够增加作物产量,有利于土壤活性有机碳及碳库管理指数的提高。刘威等<sup>[8]</sup>通过绿肥种植,显著提高了稻田土壤总有机碳和活性有机碳含量,而降低了土壤稳态有机碳含量,土壤碳库管理指数提高,水稻产量提高。此外,土壤碳循环相关酶,如纤维素酶、 $\beta$ -葡萄糖苷酶、蔗糖酶和过氧化氢酶等,主要参与有机物的分解和转化,与土壤碳库密切相关,显著影响土壤养分和有机碳的固持与转化<sup>[4]</sup>。

近年来,大部分研究重点关注了短期连作、有机肥或生物质炭施用对土壤碳库的影响,而鲜有长期不同种植模式和施肥方式对植烟土壤碳库管理指数影响的研究,且土壤酶活性与植烟土壤有机碳组分和碳库管理指数的关系有待揭示。为进一步解决贵州烟区烤烟生产面临的现实问题,本研究结合当地不同种植模式(烤烟连作和烤烟-玉米轮作)和施肥方式(单施化肥和化肥有机肥配施),依托烤烟长期定位试验站,研究了不同处理下的土壤有机碳组分、碳循环相关水解酶活性和土壤碳库管理指数特征,并分析其间的相互关系,探究了长期轮作施肥处理对植烟土壤碳库内在机制的影响,以为贵州烟区优化种植施肥模式和固

碳增产管理提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验地位于贵州省遵义市三岔烟草科技园烟地肥力肥效长期定位试验站(27°32'2" N, 106°56'32" E; 海拔 865 m)。该地属亚热带气候,年均日照时数 1 150 h, 年均降水量 1 100 mm, 年均气温 15.7°C, 无霜期 270 d。试验始于 2004 年春,土壤类型为石灰岩发育的黄壤,试验前 0~20 cm 耕作层土壤基本理化性质为:pH 7.49,有机质 21.24 g/kg,全氮 1.16 g/kg,全磷 1.08 g/kg,全钾 16.81 g/kg,碱解氮 94.76 mg/kg,有效磷 19.10 mg/kg,速效钾 196.82 mg/kg。

### 1.2 试验设计

遵义肥力肥效长期田间定位试验的种植模式+施肥处理分别为:①烤烟连作+不施肥(C-CK);②烤烟连作+单施化肥(C-CF);③烤烟连作+化肥有机肥配施(C-MCF);④烤烟-玉米轮作+不施肥(R-CK);⑤烤烟-玉米轮作+单施化肥(R-CF);⑥烤烟-玉米轮作+化肥有机肥配施(R-MCF)。所有处理玉米施用 N 120 kg/hm<sup>2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 90 kg/hm<sup>2</sup>、K<sub>2</sub>O 90 kg/hm<sup>2</sup>,烤烟施用 N 100 kg/hm<sup>2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 50 kg/hm<sup>2</sup> 和 K<sub>2</sub>O 200 kg/hm<sup>2</sup>。N、P、K 化肥分别以尿素、过磷酸钙和硫酸钾提供;有机肥为遵义市烟草公司提供的专用有机肥(总养分 $\geq$ 4%)。在化肥有机肥配施的处理中,养分含量以氮计,化学氮和有机氮各 50%,不足的磷钾由过磷酸钙和硫酸钾补充,使各处理的 N、P、K 用量相等。每个处理 3 个小区,小区面积 20 m<sup>2</sup>,随机区组排列。自 2004 年始,轮作处理奇数年夏季种植烤烟,偶数年种植玉米;冬季(不施肥)均种植小麦(2004—2015 年)、黑麦草(2016—2020 年)和光叶苕子(2021 年至今)。作物种植按当地推荐技术进行。

### 1.3 测定项目与方法

2022 年夏季作物收获后,采用多点混合取样法采集 0~20 cm 耕层土壤,剔除杂物后利用四分法制备土样并分为两份。一份新鲜土样采用氯仿熏蒸-K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 浸提法<sup>[9]</sup>测定微生物生物量碳(MBC),另一份于阴凉处风干后测定土壤有机碳组分与土壤酶活性。

其中,将风干土过 0.25 mm 筛后,采用重铬酸钾-浓硫酸外加热法<sup>[10]</sup>测定土壤总有机碳(TOC)。轻组有机碳(LFOC)采用 Janzen 等<sup>[11]</sup>的方法并做适当修改,具体为:称取过 2 mm 筛的风干土样 10 g,按  $m_{\pm} : V_{液} = 1 : 5$  加入 NaI 重液(密度 1.7 g/cm<sup>3</sup>),振荡 18 h, 3 000 r/min 离心 10 min,离心后将悬液过滤,重复 3

次, 滤出的轻组部分用蒸馏水洗涤后, 置于 50 °C 烘箱内烘干至恒重后测定有机碳含量。溶解性有机碳(DOC)参照 Haynes<sup>[12]</sup>的方法, 具体为: 称取风干土样 10 g 于塑料离心管中, 按  $m_{\pm} : V_{\text{水}} = 1 : 5$  加入 50 mL 蒸馏水, 振荡 30 min, 然后在离心机上以 4 000 r/min 离心 20 min, 所有悬液通过 0.45  $\mu\text{m}$  微孔滤膜, 得到水溶性有机碳, 反复提取 3 次, 然后测定提取液中有有机碳含量。易氧化有机碳(ROC)采用高锰酸钾氧化法测定<sup>[13]</sup>。本研究同时参照 Blair 等<sup>[14]</sup>的方法计算下列指标, 参考土壤分别为 C-CK 和 R-CK 处理:

碳库活度(Activity, A)=易氧化有机碳/稳态碳

碳库活度指数(Activity Index, AI)=碳库活度/参考土壤碳库活度

碳库指数(Carbon Pool Index, CPI)=总有机碳/参考土壤总有机碳

碳库管理指数(Carbon Pool Management Index, CPMI, %)=CPI×AI×100

另外, 将风干土过 1 mm 筛后测定土壤酶活性。其中, 纤维素酶、淀粉酶和蔗糖酶采用 3,5-二硝基水杨酸比色法,  $\beta$ -葡萄糖苷酶、过氧化氢酶分别采用对硝基酚比色法和  $\text{KMnO}_4$  滴定法<sup>[15]</sup>。

#### 1.4 数据处理与统计分析

利用 Excel 2016 和 SPSS 23.0 对试验数据进行处理与统计分析。采用单因素方差分析对处理间差异进行显著性检验, 显著水平为  $P < 0.05$ , 并用 Duncan 法进行多重比较。采用 Pearson 相关系数表示土壤总有机碳及其组分和土壤酶活性之间的相关性。

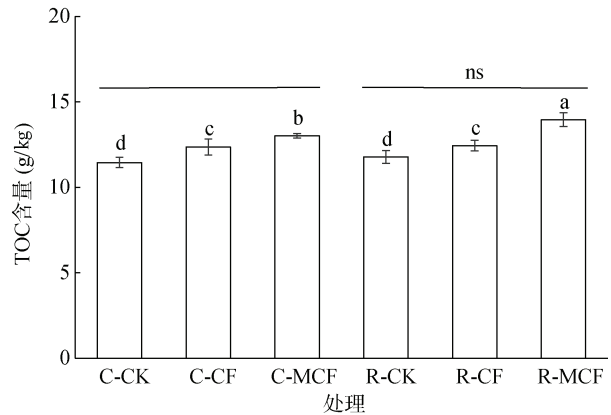
## 2 结果与分析

### 2.1 土壤总有机碳和活性有机碳

如图 1 所示, 连作和轮作总体上对土壤 TOC 无显著影响, 其中 C-CK 与 R-CK 及 C-CF 与 R-CF 处理间无显著差异, 但 R-MCF 处理的 TOC 含量(13.96 g/kg)显著高于 C-MCF(13.02 g/kg)。在连作和轮作条件下, 与不施肥处理相比, 单施化肥和化肥有机肥配施均提高了 TOC 含量, 增幅分别为 7.89% ~ 13.72% 和 5.69% ~ 18.54%。

图 2 显示, 轮作条件下土壤 MBC、LFOC、DOC 和 ROC 含量均高于连作处理, 差异极显著( $P < 0.01$ )。其中, R-MCF 处理的 MBC 含量最高, R-CK 处理的 MBC 含量最低; 轮作条件下土壤 MBC 含量表现为 R-MCF > R-CF > R-CK, 连作条件下土壤 MBC 含量表

现为 C-CF ≈ C-MCF > C-CK; 轮作条件下 3 种施肥处理(R-CK、R-CF、R-MCF)的 MBC 含量分别较连作条件下 3 种施肥处理(C-CK、C-CF、C-MCF)高 14.04%、6.13% 和 14.89%。



(图中不同小写字母表示处理间差异显著( $P < 0.05$ ); ns、\*和\*\*分别表示连作和轮作之间无显著差异( $P > 0.05$ )、差异显著( $P < 0.05$ )和差异极显著( $P < 0.01$ ); 下同)

图 1 不同处理土壤 TOC 含量

Fig. 1 Soil total organic carbon (TOC) contents under different treatments

此外, 连作和轮作条件下各施肥处理的 LFOC、DOC 和 ROC 含量均表现为化肥有机肥配施(C-MCF、R-MCF) > 单施化肥(C-CF、R-CF) > 不施肥(C-CK、R-CK)。

土壤中各活性有机碳组分占总有机碳的比例差异明显(表 1)。MBC/TOC 比值为 0.89% ~ 1.29%, 以 R-CF 处理(1.29%)最高, 且各施肥处理均显著高于 C-CK 和 R-CK 处理。LFOC/TOC 比值变化于 5.59% ~ 7.45%, 连作和轮作条件下均表现为化肥有机肥配施处理(C-MCF、R-MCF) > 单施化肥处理(C-CF、R-CF) > 不施肥处理(C-CK、R-CK), 且轮作处理显著高于连作处理。DOC/TOC 比值变化于 0.78% ~ 1.08%, 变化趋势与 LFOC/TOC 比值相似。ROC/TOC 比值变化于 30.31% ~ 38.91%, 各处理大小依次为 R-MCF > R-CF > C-MCF > C-CF ≈ R-CK > C-CK。

### 2.2 土壤酶活性

由表 2 可知, 长期轮作和施肥显著影响土壤酶活性。连作模式下, 与不施肥处理相比, 单施化肥和化肥有机肥配施处理的土壤纤维素酶活性分别提高 97.44% 和 150.64%,  $\beta$ -葡萄糖苷酶活性分别提高 20.22% 和 46.05%, 淀粉酶活性分别提高 79.51% 和 143.43%, 过氧化氢酶活性分别提高 67.50% 和 90.00%, 蔗糖酶活性分别提高 2.64% 和 16.57%。轮

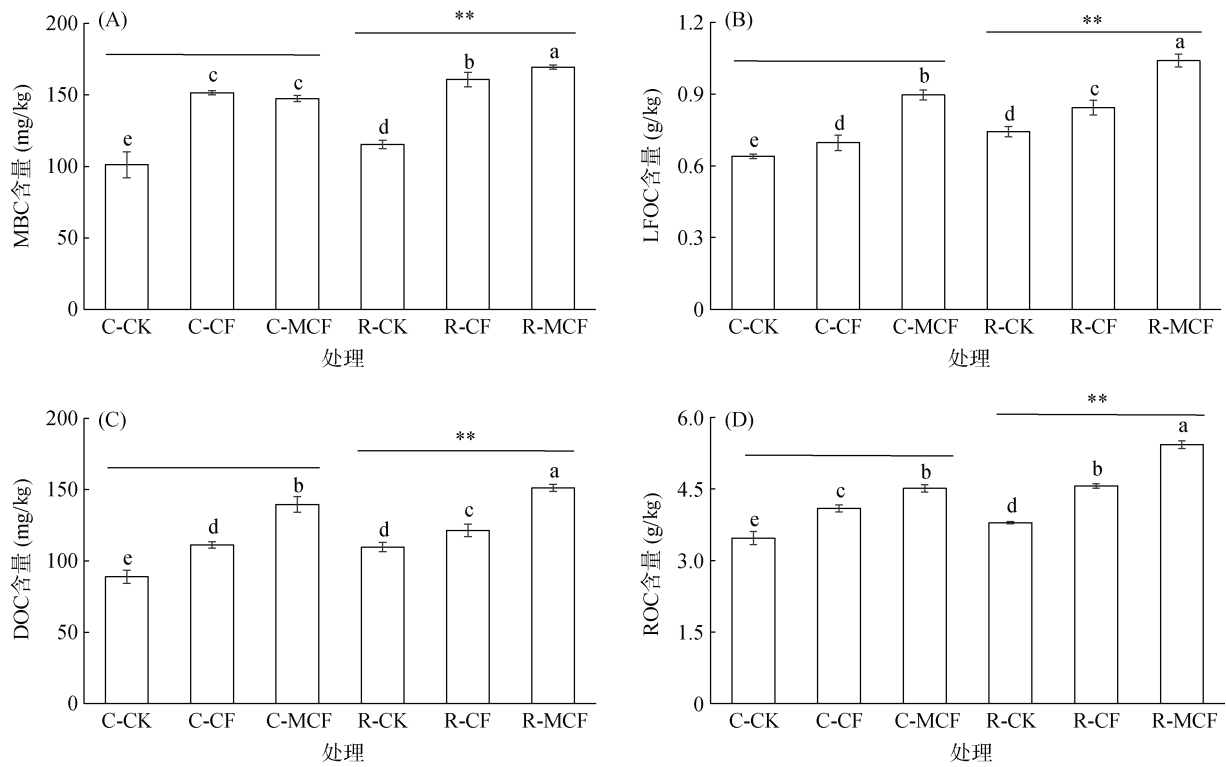


图 2 不同处理土壤活性有机碳组分含量

Fig. 2 Soil labile organic carbon (LOC) contents under different treatments

表 1 不同处理的土壤活性有机碳组分在总有机碳中所占比例(%)

Table 1 LOC/TOC ratios under different treatments

处理	MBC/TOC	LFOC/TOC	DOC/TOC	ROC/TOC
C-CK	0.89 ± 0.31 e	5.59 ± 0.15 d	0.78 ± 0.02 d	30.31 ± 1.22 e
C-CF	1.22 ± 0.15 b	5.63 ± 0.05 d	0.90 ± 0.06 c	33.13 ± 0.80 d
C-MCF	1.13 ± 0.21 c	6.89 ± 0.19 b	1.07 ± 0.02 a	34.67 ± 0.56 c
R-CK	0.98 ± 0.45 d	6.32 ± 0.37 c	0.93 ± 0.04 bc	32.22 ± 0.92 d
R-CF	1.29 ± 0.29 a	6.78 ± 0.10 b	0.98 ± 0.03 b	36.68 ± 0.94 b
R-MCF	1.21 ± 0.21 b	7.45 ± 0.18 a	1.08 ± 0.01 a	38.91 ± 0.71 a

注：表中同列不同小写字母表示处理间差异性显著(P<0.05)，下同。

表 2 不同处理土壤酶活性

Table 2 Soil enzyme activities under different treatments

种植模式	施肥方式	纤维素酶(mg/(g·72h))	β-葡萄糖苷酶(mg/(g·h))	淀粉酶(mg/(g·24h))	过氧化氢酶(mg/(g·24h))	蔗糖酶(mg/(g·24h))
连作	C-CK	1.56 ± 0.06 e	22.80 ± 0.61 c	3.27 ± 0.19 f	0.80 ± 0.01 c	136.66 ± 4.04 d
	C-CF	3.08 ± 0.21 c	27.41 ± 0.48 b	5.87 ± 0.32 d	1.34 ± 0.07 b	140.27 ± 4.45 d
	C-MCF	3.91 ± 0.03 b	33.30 ± 1.36 a	7.96 ± 0.08 b	1.52 ± 0.07 a	159.30 ± 2.20 bc
轮作	R-CK	1.61 ± 0.17 e	21.78 ± 0.71 c	4.51 ± 0.18 e	0.75 ± 0.02 c	152.13 ± 9.30 c
	R-CF	3.21 ± 0.16 c	28.28 ± 0.74 b	7.54 ± 0.43 bc	1.46 ± 0.03 a	152.63 ± 1.95 c
	R-MCF	4.30 ± 0.16 a	32.58 ± 2.15 a	9.76 ± 0.31 a	1.53 ± 0.04 a	169.43 ± 9.15 b
方差分析	种植模式	*	ns	**	ns	**
	施肥方式	**	**	**	**	**
	种植模式×施肥方式	ns	ns	ns	ns	ns
	施肥方式					

注：ns、\*、\*\*分别表示影响不显著(P>0.05)、显著(P<0.05)和极显著(P<0.01)。

作模式下,单施化肥和化肥有机肥配施处理的土壤纤维素酶活性较不施肥处理分别提高 99.38% 和 167.08%, $\beta$ -葡萄糖苷酶活性分别提高 29.84% 和 49.59%,淀粉酶活性分别提高 67.18% 和 116.41%,过氧化氢酶活性分别提高 94.67% 和 104.00%,蔗糖酶活性分别提高 0.33% 和 11.37%。R-MCF 处理纤维素酶、淀粉酶和蔗糖酶活性比 C-MCF 处理显著增加 9.97%、22.61% 和 6.35%; R-CF 处理的淀粉酶、过氧化氢酶和蔗糖酶活性比 C-CF 处理显著增加 28.45%、8.96% 和 8.81%。此外,施肥方式显著影响土壤酶活性,种植模式显著影响土壤纤维素酶、淀粉酶和蔗糖酶活性。

### 2.3 土壤碳库管理指数

图 3 显示,连作条件下化肥有机肥配施处理的碳库活度指数(AI)、碳库指数(CPI)和碳库管理指数(CPMI)分别较单施化肥处理提高了 7.16%、5.34% 和 12.89%;轮作条件下化肥有机肥配施处理的 AI、CPI 和 CPMI 分别较单施化肥处理提高了 9.87%、12.15% 和 23.31%。此外, R-MCF 处理的 AI、CPI 和 CPMI 均显著高于 C-MCF 处理。

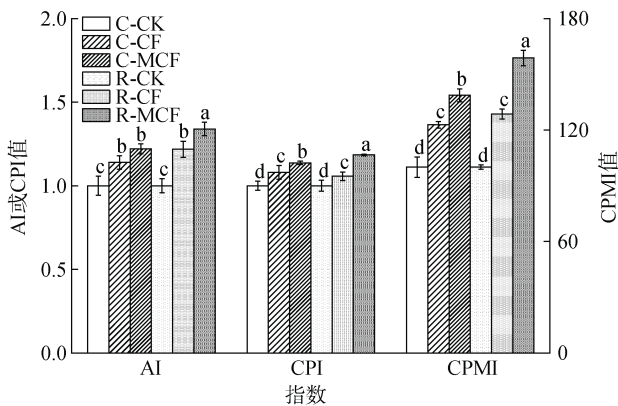


图 3 不同处理土壤碳库管理指数  
Fig. 3 CPMIs under different treatments

### 2.4 土壤酶活性与土壤有机碳组分和碳库管理指数的相关关系

如表 3 所示, TOC、MBC、LFOC、DOC、ROC 含量与纤维素酶、 $\beta$ -葡萄糖苷酶、淀粉酶活性均呈极显著正相关关系, 相关系数为 0.80 ~ 0.97; MBC、ROC 含量与过氧化氢酶活性呈极显著正相关关系, 相关系数为 0.83 ~ 0.93; LFOC、DOC 含量与过氧化氢酶活性呈极显著正相关关系, 相关系数为 0.86 ~ 0.87, CPMI 与纤维素酶、 $\beta$ -葡萄糖苷酶、淀粉酶和过氧化氢酶活性有极显著正相关关系, 与蔗糖酶活性有显著正相关关系。

表 3 土壤有机碳及其组分含量和碳库管理指数与土壤酶活性的相关性 ( $n=18$ )

Table 3 Correlation coefficients among soil enzyme activities, SOC components, and CPMIs

项目	纤维素酶	$\beta$ -葡萄糖苷酶	淀粉酶	过氧化氢酶	蔗糖酶
TOC	0.90**	0.81**	0.92**	0.61*	0.78*
MBC	0.90**	0.80**	0.91**	0.93**	0.59*
LFOC	0.83**	0.81**	0.94**	0.60*	0.87**
DOC	0.90**	0.87**	0.96**	0.76*	0.86**
ROC	0.91**	0.82**	0.97**	0.83**	0.79*
AI	0.93**	0.87**	0.93**	0.89**	0.55*
CPI	0.92**	0.89**	0.88**	0.83**	0.70*
CPMI	0.97**	0.92**	0.96**	0.90**	0.71*

注: \*和\*\*分别表示相关性显著( $P<0.05$ )和极显著( $P<0.01$ )。

## 3 讨论

### 3.1 长期轮作施肥对土壤总有机碳和活性有机碳组分的影响

本研究表明,施用化肥和有机肥均能够提高土壤 TOC 含量,且以化肥有机肥配施处理和轮作处理的含量较高。这是由于有机肥料的投入有利于提高土壤有机质,导致 TOC 积累增加;同时,化肥的合理施用促进了植物生长,刺激了根际土壤微生物活性和土壤有机物质的转化,从而减少微生物对有机碳分解过程中的原始营养物质依赖,间接提高了 TOC 含量<sup>[16]</sup>。一项 Meta 分析的结果也显示,多养分施肥可以增加土壤有机碳,即化学肥料+有机肥>单施有机肥>单施化学肥料,其原因是速效养分的增加导致有机肥中的有机碳滞留,降低了养分的流失<sup>[17]</sup>。本课题前期的研究结果表明,化肥有机肥配施显著促进了烤烟和玉米的生长且增产效应显著<sup>[18]</sup>,推测大量根茬、枯叶以及根系分泌物的不断输入也可能是土壤 TOC 增加的重要因素,这同时也有利于刺激微生物的富集与繁殖<sup>[19]</sup>。这与本试验观测到的化肥有机肥配施处理相比单施化肥处理显著提高了 MBC 的结果相符,其原因还包括有机肥为微生物生长提供了大量碳源,其疏松多孔的结构和对土壤团聚体的改善还为微生物的生存与活动提供了场所,导致微生物数量显著增加<sup>[20]</sup>。DOC 在各处理的变化规律与 MBC 相似,这是因为 DOC 是微生物代谢的关键碳源,主要由微生物驱动土壤有机物分解产生。吴鹏博等<sup>[21]</sup>的研究也表明,相同种植模式下不同施肥方式的 DOC 含量不同,表现为施用有机复合肥处理>化肥处理>不施肥处理;相同施肥水平下不同种植模式的 DOC 含量均表现为轮作模式>连作模式。

轻组有机碳(LFOC)主要包括被分解的植物残体和土壤中的木炭等,是一类游离态有机碳;易氧化有机碳(ROC)主要包括氨基酸、简单的碳水化合物和土壤微生物生物质等<sup>[22]</sup>,二者是土壤养分和植物营养的重要来源。本研究中,种植模式相同时,LFOC和ROC含量均表现为化肥有机肥配施处理>单施化肥处理>不施肥处理,其原因可能是施肥促进了作物根系的生长,从而使残留在土壤中的根系更多,根系的分解增加了土壤中的活性有机碳含量;而有机肥分解后给土壤提供了大量直接有机碳源,提高了土壤中微生物的数量和活性,且在微生物分解作用下释放出更多的活性有机碳。施肥方式相同时,轮作处理的LFOC和ROC含量大于连作处理,这可能是连作模式导致的一系列土壤和环境问题,如加重病原微生物、寄生虫等危害,加剧某种或多种特定营养元素消耗而造成土壤养分失衡、恶化,最终导致土壤微生物和相关酶活性降低<sup>[23]</sup>。而轮作通过种植不同作物不但能缓解连作造成的养分失衡,甚至可以培肥土壤,例如豆科植物具有根瘤菌,可以将大气的氮固定到土壤,从而提高土壤肥力和促进其他作物增产<sup>[24]</sup>。此外,本研究中,代表生物活性有机碳库周转速率的活性有机碳与土壤总有机碳的比值也呈现相似变化规律。

### 3.2 长期轮作施肥对土壤碳循环相关酶活性的影响

本研究中,单施化肥和有机无机配施两种施肥处理较不施肥处理对 $\beta$ -葡萄糖苷酶、纤维素酶、淀粉酶和过氧化氢酶活性均有显著影响,以后者效果最佳。主要原因是当土壤中有有机质含量增加时,酶促反应的主要底物增加可以极大地促进土壤微生物的活动,从而使土壤酶活性提高,并且有机肥自身也携带丰富的酶类。轮作模式下施肥对酶活性的提升优于连作模式,这可能是轮作改善了土壤环境,为微生物创造更加适宜的生存条件,从而导致酶活性增强。本监测站前期的研究结果也表明,轮作和有机肥的施用有利于提高土壤微生物多样性,并增加与碳氮磷循环相关微生物的相对丰度,与本试验结果相符<sup>[25]</sup>。此外,这些土壤酶活性与有机碳的变化趋势一致,且二者呈显著正相关。土壤碳循环相关酶作为影响土壤碳循环速率和碳储存的重要因子,其中土壤纤维素酶可催化纤维素分解为纤维二糖; $\beta$ -葡萄糖苷酶催化水解芳基或羟基与糖基原子团之间的糖苷键生成葡萄糖;蔗糖酶和淀粉酶分别能够催化蔗糖和淀粉水解为单糖,在释放低分子量糖方面起着关键作用;过氧化氢酶则加速了有机质的水解。这些酶共同作用于来自有机肥、

植株凋落物和根系分泌物等的有机物质,增强了土壤碳循环<sup>[26]</sup>。张继光等<sup>[27]</sup>在红壤旱地开展的长期肥料定位试验也取得了类似结果。

### 3.3 长期轮作施肥对土壤碳库管理指数的影响

土壤碳库管理指数(CPMI)可以灵敏地反映土壤碳素的动态变化,常用于表征不同农业管理措施下土壤的碳库状况<sup>[16]</sup>。已有的研究表明,CPMI和不同形态碳素的变化与不同施肥、灌水和轮作模式等措施密切相关<sup>[28]</sup>。本研究中,与不施肥相比,单施化肥和化肥有机肥配施均提高了CPMI,且有机无机配施处理对CPMI的提升效果高于单施化肥。这是因为施肥提高了土壤总有机碳和土壤活性有机碳的含量,而CPMI与土壤总有机碳及土壤易氧化有机碳密切相关,故CPMI随着土壤有机碳的增加而增加,表明有机质分解和养分循环速率更高。此外,不同种植模式对CPMI也有一定影响,轮作模式下CPMI比连作模式有更高的水平,原因是轮作可以维持土壤肥力,增强土壤养分循环功能和作物生物量,在根系分泌物和植株残体等转化为有机质的过程中,一部分有机质被活化并继续为植物生长提供养分,另一部分则转化为惰性碳库被土壤固存<sup>[29]</sup>。

## 4 结论

18年长期定位试验结果表明,不同种植模式和施肥方式均显著影响土壤有机碳及其组分含量、土壤酶活性和碳库管理指数。与连作和单施化肥处理相比,轮作和化肥有机肥配施显著提高植烟土壤有机碳的积累,刺激土壤碳循环相关酶活性增加,并具有较高的碳库管理指数。土壤有机碳及其组分含量和碳库管理指数与土壤纤维素酶、 $\beta$ -葡萄糖苷酶、淀粉酶、过氧化氢酶和蔗糖酶活性呈显著正相关,表明土壤碳周转受酶活性影响显著。轮作条件下采用有机无机配施处理效果最优,可作为理想种植模式在贵州烟区进一步推广。

### 参考文献:

- [1] 王珏,杜琴,彭双,等.不同施肥处理对植烟土壤细菌群落的影响[J].土壤,2021,53(5):998-1007.
- [2] 李睿,江长胜,郝庆菊.缙云山不同土地利用方式下土壤团聚体中活性有机碳分布特征[J].环境科学,2015,36(9):3429-3437.
- [3] Panchal P, Preece C, Peñuelas J, et al. Soil carbon sequestration by root exudates[J]. Trends in Plant Science, 2022, 27(8): 749-757.
- [4] Zhang L G, Chen X, Xu Y J, et al. Soil labile organic carbon fractions and soil enzyme activities after 10 years of

- continuous fertilization and wheat residue incorporation[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 11318.
- [5] 郝翔翔, 邹文秀, 韩晓增. 长期不同利用方式对黑土剖面中有机质化学组成的影响[J]. *土壤学报*, 2022, 59(5): 1228–1237.
- [6] 张维理, Kolbe H, 张认连. 土壤有机碳作用及转化机制研究进展[J]. *中国农业科学*, 2020, 53(2): 317–331.
- [7] 杨滨娟, 李新梅, 胡启良, 等. 不同轮作休耕模式对稻田土壤有机碳及其组分的影响[J]. *华中农业大学学报*, 2022, 41(6): 51–58.
- [8] 刘威, 耿明建, 秦自果, 等. 种植绿肥与稻秸协同还田对单季稻田土壤有机碳库和酶活性的影响[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(7): 125–133.
- [9] 吴金水, 林启美, 黄巧云, 等. 土壤微生物生物量测定方法及其应用[M]. 北京: 气象出版社, 2006.
- [10] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [11] Janzen H H, Campbell C A, Brandt S A, et al. Light-fraction organic matter in soils from long-term crop rotations[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56(6): 1799–1806.
- [12] Haynes R J. Labile organic matter as an indicator of organic matter quality in arable and pastoral soils in New Zealand[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(2): 211–219.
- [13] 张璐, 张文菊, 徐明岗, 等. 长期施肥对中国 3 种典型农田土壤活性有机碳库变化的影响[J]. *中国农业科学*, 2009, 42(5): 1646–1655.
- [14] Blair G J, Lefroy R, Lisle L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems[J]. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1995, 46(7): 1459.
- [15] 关荫松. 土壤酶及其研究方法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- [16] Liu Y H, Zang H D, Ge T D, et al. Intensive fertilization (N, P, K, Ca, and S) decreases organic matter decomposition in paddy soil[J]. *Applied Soil Ecology*, 2018, 127: 51–57.
- [17] Tian K, Zhao Y C, Xu X H, et al. Effects of long-term fertilization and residue management on soil organic carbon changes in paddy soils of China: A meta-analysis[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2015, 204: 40–50.
- [18] 王亚麒. 长期种植施肥模式对烟地生产力和养分状况的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2021.
- [19] 祝贞科, 肖谋良, 魏亮, 等. 稻田土壤固碳关键过程的生物地球化学机制及其碳中和对策[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2022, 30(4): 592–602.
- [20] 李春越, 郝亚辉, 薛英龙, 等. 长期施肥对黄土旱塬农田土壤微生物量碳、氮、磷的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39(8): 1783–1791.
- [21] 吴鹏博, 李立军, 张艳丽, 等. 轮作结合施肥对土壤有机碳及其组分和土壤养分的影响[J]. *土壤通报*, 2020, 51(2): 416–422.
- [22] Zou X M, Ruan H H, Fu Y, et al. Estimating soil labile organic carbon and potential turnover rates using a sequential fumigation-incubation procedure[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37(10): 1923–1928.
- [23] 刘株秀, 刘俊杰, 徐艳霞, 等. 不同大豆连作年限对黑土细菌群落结构的影响[J]. *生态学报*, 2019, 39(12): 4337–4346.
- [24] 李隆. 间套作强化农田生态系统服务功能的研究进展与应用展望[J]. *中国生态农业学报*, 2016, 24(4): 403–415.
- [25] 王亚麒, 刘京, 苟剑渝, 等. 长期有机无机配施下烤烟–玉米轮作优化土壤微生物活化无机磷[J]. *土壤学报*, 2022, 59(3): 808–818.
- [26] 王峥宇, 廉宏利, 孙悦, 等. 秸秆还田深度对春玉米农田土壤有机碳、氮含量和土壤酶活性的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2021, 38(4): 636–646.
- [27] 张继光, 秦江涛, 要文倩, 等. 长期施肥对红壤旱地土壤活性有机碳和酶活性的影响[J]. *土壤*, 2010, 42(3): 364–371.
- [28] 曹培, 徐莹, 朱杰, 等. 不同种植模式对稻田土壤活性有机碳组分及产量的短期影响[J]. *生态学杂志*, 2019, 38(9): 2788–2798.
- [29] Zhu L Q, Hu N J, Zhang Z W, et al. Short-term responses of soil organic carbon and carbon pool management index to different annual straw return rates in a rice-wheat cropping system[J]. *CATENA*, 2015, 135: 283–289.