

# 不同施肥模式对植烟棕壤活性有机碳 组分和酶活性的影响

王 鹏<sup>1,2</sup>,郑学博<sup>1</sup>,梁洪波<sup>1</sup>,宋文静<sup>1</sup>,季 璇<sup>1,2</sup>,徐艳丽<sup>1</sup>,况 帅<sup>1</sup>,董建新<sup>1</sup>

(1. 中国农业科学院 烟草研究所,烟草生物学与加工重点实验室,青岛烟草资源与环境野外科学观测试验站,  
山东 青岛 266101;2. 中国农业科学院 研究生院,北京 100081)

**摘要:**为探究植烟棕壤活性有机碳组分和碳转化酶活性对不同施肥模式的响应规律,以始于2009年的土壤肥力长期定位试验为研究对象,选取不施肥(CK)、单施化肥(T1)、化肥有机肥配施(T2)和单施有机肥(T3)4种田间试验处理。结果表明:较CK、T1处理,T2、T3处理显著提高了土壤总有机碳(TOC)、可溶性有机碳(DOC)、微生物量有机碳(MBC)、易氧化有机碳(ROC)、碳库管理指数(CPMI)以及纤维素酶(S-CL)、蔗糖酶(S-SC)、 $\beta$ -葡萄糖苷酶(S- $\beta$ -GC)、多酚氧化酶(S-PPD)和过氧化物酶(S-POD)活性( $P < 0.05$ )。Pearson相关分析表明,DOC、MBC、ROC均与S-CL、S-SC、S- $\beta$ -GC、S-PPD和S-POD活性之间呈极显著正相关( $P < 0.01$ );通径分析表明,直接影响DOC、MBC和ROC含量的是S-CL、S-SC和S- $\beta$ -GC,而主要起间接作用是S-PPD和S-POD。主成分分析表明,不同施肥模式对活性有机碳组分和酶活性的综合影响可分为2组:CK和T1处理为一组,T2和T3处理为一组;结合主成分分析综合得分和方差分析,不同施肥模式影响土壤活性有机碳组分和酶活性的顺序为T3 > T2 > T1 > CK。因此,单施有机肥是提升山东烟区棕壤活性有机碳组分和酶活性的最有效的施肥措施。

**关键词:**植烟棕壤;施肥模式;活性有机碳组分;碳转化酶活性

中图分类号:S158.5 文献标识码:A 文章编号:1000-7091(2021)01-0187-10

doi:10.7668/hbxb.20191407



## Effects of Different Fertilization Models on Active Organic Carbon Components and Enzyme Activities of Tobacco-growing Brown Soil

WANG Peng<sup>1,2</sup>, ZHENG Xuebo<sup>1</sup>, LIANG Hongbo<sup>1</sup>, SONG Wenjing<sup>1</sup>,  
JI Xuan<sup>1,2</sup>, XU Yanli<sup>1</sup>, KUANG Shuai<sup>1</sup>, DONG Jianxin<sup>1</sup>

(1. Institute of Tobacco Research, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Tobacco Biology and Processing, Qingdao Tobacco Resources and Environment Field Scientific Observation Experimental Station, Qingdao 266101, China;  
2. Graduate School of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

**Abstract:** To investigate the response law of organic carbon components and carbon conversion enzyme activities under different fertilization models, this study focused on long-term soil fertility tests that began in 2009, selected no fertilizer (CK), fertilization of chemical fertilizer (T1), organic manure with chemical fertilizer (T2) and fertilization of organic manure (T3) four trial processing. Compared with CK, T1 treatments, T2 and T3 treatments significantly improved TOC, DOC, MBC, ROC, CPMI and S-CL, S-SC, S- $\beta$ -GC, S-PPD and S-POD. Pearson correlation analysis showed that DOC, MBC, ROC and S-CL, S-SC, S- $\beta$ -GC, S-PPD and S-POD were extremely significantly positively correlated ( $P < 0.01$ ); Path analysis showed that S-CL, S-SC and S- $\beta$ -GC directly affected the content of DOC, MBC and ROC, while S-PPD and S-POD mainly played an indirect role. Principal component analysis showed that the comprehensive effected of different fertilization models on active organic carbon components and enzyme ac-

收稿日期:2020-11-22

基金项目:中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(1610232020009);国家自然科学基金青年基金(31901195);山东省自然科学基金博士基金(ZR2019BD062)

作者简介:王 鹏(1995-),男,山东青州人,在读硕士,主要从事土壤肥力提升研究。

通讯作者:董建新(1976-),男,山东单县人,副研究员,在读博士,主要从事农业生态和土壤健康管理研究。

tivity could be divided into two groups: CK and T1 treatments as a group, T2 and T3 treatments as a group; combined with principal component analysis comprehensive score and analysis of variance, the order of different fertilization measured affecting soil active organic carbon components and enzyme activities was T3 > T2 > T1 > CK. The application of organic fertilizer was the most effective fertilization measure to enhance the active organic carbon component and enzyme activity of tobacco-growing brown soil for Shandong smoke zone.

**Key words:** Tobacco-growing brown soil; Fertilization models; Active organic carbon components; Carbon conversion enzyme activities

无机肥在我国农业生产中对农作物增产的贡献超过 50%，我国在全球不到 7% 的耕地上施用了超过 30% 的无机肥，无机肥施用量约是世界平均量的 4 倍多，无机肥用量增加利用率却降低<sup>[1]</sup>。过量施用无机肥可导致土壤耕层 N、P、K 等营养元素大量流失<sup>[2]</sup>；有机碳含量下降，微生物数量和酶活性降低，最终导致土壤肥力整体下降<sup>[3]</sup>。肥料对烟叶产量的贡献最高可达 40%，烟叶生产过程中普遍存在过量施用化肥的现象，烟区农田生态系统养分淋失严重<sup>[4]</sup>。过量施用化肥可获得单位面积耕地产量最大化，但使土壤结构受损肥力降低，烟叶品质下降，造成了植烟地区严重的农业面源污染<sup>[5]</sup>。有机肥可通过增加土壤有机碳库，提高微生物数量和酶活性来改良土壤，能够全面提供作物生长所需的营养，是目前应用最有效地降低化肥用量并提升烟叶品质的方式<sup>[6]</sup>。陆海飞等<sup>[7]</sup>研究表明，多年施用有机肥可显著增加种植水稻红壤的有机碳含量和 $\beta$ -葡糖糖苷酶(S- $\beta$ -GC)、纤维素酶(S-CL)、过氧化物酶(S-POD)活性。张长华等<sup>[8]</sup>研究表明，贵州黄壤有机无机肥配施 1 a 后土壤肥力改善显著，显著增加了土壤蔗糖酶(S-SC)、过氧化氢酶活性和烟叶品质。季璇等<sup>[9]</sup>研究表明，在四川植烟紫色土施用菜籽饼肥 1 a 后，显著增加了有机碳含量，显著降低了多酚氧化酶(S-PPD)和 S-POD 活性。

有机肥施用后可通过改变土壤有机碳库来间接影响碳转化相关酶的活性。可溶性有机碳(DOC)、微生物量有机碳(MBC)及易氧化有机碳(ROC)是土壤活性有机碳库的重要表征指标<sup>[10-11]</sup>。de Brito 等<sup>[12]</sup>研究表明，DOC 和 MBC 在土壤中停留时间短，具有不稳定性，对环境变化十分敏感，在不同施肥模式下可反映土壤碳库的动态变化。倪进治等<sup>[13]</sup>研究表明，不同施肥处理下，DOC/TOC 和 SME (MBC/TOC) 是反映土壤有机碳质量的一个较好指标。土壤碳库管理指数(CPMI)可作为系统和敏感的反应土壤有机碳质量变化的监测指标，是施肥措施引起土壤有机碳变化的重要依据<sup>[14]</sup>。土壤中有有机碳分解与积累、养分元素循环等生物化学反应直

接或间接由土壤酶催化提供动力支持<sup>[15]</sup>。Li 等<sup>[16]</sup>研究表明，土壤中 DOC 和 MBC 对 S-CL 和 S- $\beta$ -GC 起显著正影响作用，而 S-POD 起负影响作用，S-PPD 从正负 2 个方面影响 DOC 含量。Sinsabaugh 等<sup>[17]</sup>认为纤维素酶可介导土壤有机碳降解、转化；S-PPD 和 S-POD 通过抑制土壤中可溶性酚类物质等的累积，从而抑制水解酶类的活性，减少土壤中有机碳的分解，进而有利于有机碳的固存。李月等<sup>[18]</sup>研究表明，有机肥施用后能显著增加潮土有机碳含量、S-CL 和 S-POD 活性。马晓霞等<sup>[19]</sup>研究表明，有机肥施用后能显著升高麦玉轮作黄土地 S-CL、S-SC 活性和活性有机碳含量。因此，明确土壤活性有机碳组分与碳转化酶活性之间的关系对于准确评估土壤活性炭库的变化具有重要意义。前人的研究因有机肥、土壤和种植作物类型不同导致研究结果不太一致，且对于植烟土壤的研究以短期研究为主；不同施肥模式下对具体碳转化酶活引起有机碳组分变化规律的研究鲜见报道。

棕壤主要分布在胶东半岛及山东中南部丘陵地区，大约占山东耕地面积的 29.2%<sup>[20]</sup>。山东是我国烤烟种植的主要区域之一，常年种植面积在 30 000 hm<sup>2</sup> 以上，因此，这一定位试验具有很强的区域代表性<sup>[21]</sup>。本研究基于 10 a 的田间定位试验，通过设置不同的施肥模式，结合山东烟区主要的耕种模式“烤烟单作”，旨在明确不同施肥模式下有机碳组分变化的具体规律和碳转化酶活的作用机制，以为山东烟区植烟棕壤培肥和可持续发展提供基础数据和理论支持。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验概况

试验位于中国农业科学院青岛烟草资源与环境野外科学观测试验站(36°26' N, 120°34' E)，地势平坦，海拔 75.0 m。年平均气温 12.7 °C，年平均降水量 662.1 mm，年平均蒸发量 1 612.0 mm，无霜期 203 d，属温带季风气候。试验始于 2009 年，采用烤烟单作的种植模式。土壤类型为棕壤，试验

前土壤耕层(0~20 cm)基本理化性质为:pH 值 5.56(土:水=1.0:2.5),有机质 11.66 g/kg,碱解氮 52.69 mg/kg,有效磷 10.60 mg/kg,速效钾 105.25 mg/kg。

### 1.2 试验设计

本试验共设置 4 个处理,每个处理 3 次重复,随机区组设计,分别为:①不施肥(CK);②单施化肥(T1);③化肥有机肥配施(T2);④单施有机肥(T3)。各小区面积 5.0 m×4.4 m=22.0 m<sup>2</sup>。供试烤烟品种 NC 89,每年 5 月中上旬移栽,行距 1.1 m,株距 0.5 m,各小区栽烟 40 株。腐熟的牛粪做基肥,化肥分基肥、提苗肥和追肥 3 次条施:基肥是复合肥 435 kg/hm<sup>2</sup>、硫酸钾 225 kg/hm<sup>2</sup>;提苗肥是移栽时施用的磷酸二铵 45 kg/hm<sup>2</sup>;追肥是移栽后 30 d 施用的硫酸钾 75 kg/hm<sup>2</sup>和硝酸钾 75 kg/hm<sup>2</sup>。供试肥料

类型分别为:复合肥(15-15-15)、硫酸钾(0-0-50)、磷酸二铵(16-40-0)、硝酸钾(13-0-46)和牛粪(含 N 11.40 g/kg,P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 10.15 g/kg,K<sub>2</sub>O 19.55 g/kg,钙 25.20 g/kg,镁 16.00 g/kg,有机碳 201.27 g/kg)。田间管理措施按照当地种植习惯进行。各处理具体施肥量见表 1,2。

表 1 各试验处理施肥量

Tab.1 Application rates of each treatment

处理 Treatments	化肥用量/(kg/hm <sup>2</sup> ) Chemical fertilizer rate			有机肥用量 /(t/hm <sup>2</sup> ) Organic manure rate
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	
CK	0	0	0	0
T1	82.20	83.25	249.75	0
T2	82.20	83.25	249.75	15.00
T3	0	0	0	22.50

表 2 各试验处理无机肥的施肥量

Tab.2 Inorganic fertilizer application rates of fertilizer in each treatment

处理 Treatments	N			P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>			K <sub>2</sub> O	
	复合肥 Compound fertilizer	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	KNO <sub>3</sub>	复合肥 Compound fertilizer	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	复合肥 Compound fertilizer	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	KNO <sub>3</sub>
CK	0	0	0	0	0	0	0	0
T1	65.25	7.20	9.75	65.25	18.00	65.25	150.00	34.50
T2	65.25	7.20	9.75	65.25	18.00	65.25	150.00	34.50
T3	0	0	0	0	0	0	0	0

### 1.3 样品采集与分析

于 2018,2019 年烤烟收获后,用五点取样法采集 0~20 cm 的土壤,混匀后四分法保存:一部分土壤样品 4℃保存,用于测定土壤 DOC 和 MBC 等指标;另一部分风干后过 0.15 mm 筛,用于测定 TOC、ROC 和碳转化酶活性等指标。

TOC 采用 HT1300 分析仪(Jena Analytik,德国)测定;ROC 采用 333 mmol/L-KMnO<sub>4</sub>氧化法测定<sup>[22]</sup>;DOC 采用 K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-Multi C/N 3100 分析仪(Jena Analytik,德国)测定;MBC 采用氯仿熏蒸-硫酸钾浸提法测定<sup>[23-24]</sup>。

土壤碳转化酶活(纤维素酶、蔗糖酶、β-葡萄糖苷酶、多酚氧化酶和过氧化物酶)采用上海优选生物技术有限公司提供的试剂盒进行测定。

### 1.4 数据计算与分析

1.4.1 碳库管理指数的计算 本研究以撂荒地(2019 年)为对照进行土壤碳库管理指数的计算<sup>[25]</sup>:

碳库指数(CPI)=样品有机碳含量(g/kg)/参考土壤有机碳含量(g/kg);碳库活度(A)=活性有机碳含量(mg/kg)/非活性有机碳含量(mg/kg);碳库活度指数(AI)=样品碳库活度(A)/参考土壤碳

库活度(A<sub>0</sub>);基于以上参数可以得出土壤碳库管理指数(CPMI,%)<sup>[26-27]</sup>:CPMI=碳库指数(CPI)×碳库活度指数(AI)×100;土壤微生物熵(SME,%)=微生物量有机碳(mg/kg)/总有机碳(mg/kg)。

1.4.2 几何平均酶活性的计算 几何平均酶活性(GMEA)是综合评价土壤生物质量的指标之一<sup>[28]</sup>:

$$GMEA = (S-CL \times S-SC \times S-\beta-GC \times S-PPD \times S-POD)^{1/5}$$

式中:S-CL 为纤维素酶;S-SC 为蔗糖酶;S-β-GC 为 β-葡萄糖苷酶;S-PPD 为多酚氧化酶;S-POD 为过氧化物酶。

1.4.3 数据分析 采用 Excel 2019 处理试验所有数据,SAS 9.1 进行单因素随机区组方差分析、相关性分析、回归分析、通径分析和主成分分析,差异显著性分析采用 Duncan 多重比较方法,采用 Origin 2018 进行绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同施肥模式对土壤活性有机碳组分及 CPMI 的影响

不同施肥模式对有机碳组分和 CPMI 的影响见

表3,4。随着施肥年限的增加,与CK、T1处理相比,T2、T3处理显著增加了TOC、ROC、DOC、MBC含量和CPMI( $P < 0.05$ );T2较CK、T1、T3显著增加了土壤的

DOC/TOC、SME( $P < 0.05$ ),这表明有机肥施用对植烟棕壤有明显的培肥作用,土壤性能向良性状态发展。

表3 不同施肥模式对土壤 CPMI 的影响

Tab.3 Effects of different fertilization regimes on soil CPMI

处理 Treatment	2018年			2019年		
	TOC /(g/kg)	ROC /(g/kg)	CPMI	TOC /(g/kg)	ROC /(g/kg)	CPMI
CK	4.66 ± 0.03d	0.51 ± 0.01d	61.37 ± 1.00d	4.72 ± 0.14d	0.49 ± 0.03b	59.03 ± 3.42b
T1	4.82 ± 0.05c	0.58 ± 0.02c	70.75 ± 2.15c	4.95 ± 0.27c	0.55 ± 0.04b	66.86 ± 5.30b
T2	6.16 ± 0.09b	1.00 ± 0.02b	127.96 ± 1.96b	7.82 ± 0.27b	1.10 ± 0.18a	138.78 ± 6.14a
T3	7.18 ± 0.13a	1.24 ± 0.04a	161.21 ± 5.43a	8.05 ± 0.10a	1.34 ± 0.33a	176.25 ± 12.22a

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著( $P < 0.05$ )。表4-5同。

Note: Different small letters in the same column mean significant difference between treatments at 0.05 levels, respectively. The same as Tab. 4-5.

表4 不同施肥模式对土壤 DOC 及 MBC 的影响

Tab.4 Effects of different fertilization regimes on soil DOC and MBC

处理 Treatment	2018年		2019年	
	DOC /(mg/kg)	MBC /(mg/kg)	DOC /(mg/kg)	MBC /(mg/kg)
CK	69.36 ± 0.93c	41.47 ± 1.51c	67.46 ± 1.07b	40.87 ± 1.36b
T1	70.49 ± 1.69c	39.73 ± 1.28d	67.81 ± 0.47b	39.09 ± 1.66b
T2	98.40 ± 1.28b	63.67 ± 0.67b	112.22 ± 1.34a	71.39 ± 1.56a
T3	102.83 ± 0.46a	71.25 ± 0.70a	113.30 ± 0.54a	73.48 ± 2.78a

处理 Treatment	DOC/TOC/%		SME/%	
	CK	14.89 ± 0.29b	8.90 ± 0.38c	14.47 ± 0.32c
T1	14.55 ± 0.51b	8.24 ± 0.35d	14.06 ± 0.26c	8.10 ± 2.58c
T2	15.97 ± 0.11a	10.33 ± 0.26a	17.37 ± 0.46a	11.04 ± 0.09a
T3	14.31 ± 0.21b	9.92 ± 0.28b	15.00 ± 0.25b	9.73 ± 0.26b

## 2.2 不同施肥模式对碳转化酶活性的影响

不同施肥模式对酶活和酶活性指数的影响见表5。T2、T3较CK、T1处理均显著增加了5种碳转化酶活性( $P < 0.05$ );几何平均酶活性表现为CK <

T1 < T2 < T3。综上可知,单施或配施有机肥能够显著增加土壤5种碳转化酶活性,并且单施有机肥增加效果最显著。

表5 不同施肥模式对土壤酶活性和酶活性指数的影响

Tab.5 Effects of different fertilization regimes on soil enzyme activities and index of enzyme activity

处理 Treatment	2018年					
	纤维素酶 /(mg/(g·d)) Cellulase	蔗糖酶 /(mg/(g·d)) Invertase	β-葡萄糖苷酶 /(μmol/(g·d)) β-glucosidase	多酚氧化酶 /(mg/(g·d)) Phenol oxidase	过氧化物酶 /(mg/(g·d)) Peroxidase	几何平均酶活 Geometric mean enzyme activity
CK	2.34 ± 0.14d	4.12 ± 0.22d	6.54 ± 0.41b	5.78 ± 0.35c	1.25 ± 0.04b	3.04
T1	3.15 ± 0.11c	4.80 ± 0.11c	8.07 ± 0.32b	6.14 ± 0.33c	1.25 ± 0.05b	3.92
T2	5.55 ± 0.21b	5.99 ± 0.11b	12.37 ± 0.25a	7.58 ± 0.25b	1.38 ± 0.02a	5.33
T3	6.16 ± 0.21a	6.96 ± 0.32a	13.35 ± 0.54a	8.69 ± 0.52a	1.39 ± 0.08a	5.86

处理 Treatment	2019年					
	纤维素酶 /(mg/(g·d)) Cellulase	蔗糖酶 /(mg/(g·d)) Invertase	β-葡萄糖苷酶 /(μmol/(g·d)) β-glucosidase	多酚氧化酶 /(mg/(g·d)) Phenol oxidase	过氧化物酶 /(mg/(g·d)) Peroxidase	几何平均酶活 Geometric mean enzyme activity
CK	2.05 ± 0.34d	3.57 ± 0.24d	6.51 ± 0.26d	5.09 ± 0.68d	1.13 ± 0.03b	3.07
T1	2.88 ± 0.17c	4.67 ± 0.02c	7.51 ± 0.34c	6.11 ± 0.36c	1.19 ± 0.05b	3.74
T2	5.67 ± 0.05b	6.82 ± 0.15b	13.54 ± 0.15b	7.34 ± 1.01b	1.44 ± 0.01a	5.75
T3	6.47 ± 0.36a	7.75 ± 0.10a	14.76 ± 0.12a	9.48 ± 0.28a	1.49 ± 0.07a	6.20

### 2.3 酶活性和有机碳组分的通径分析

酶活性与有机碳组分的相关性分析见表 6, 逐步回归分析见表 7, 通径分析见表 8。5 种酶活性与有机碳组分存在极显著的正相关关系 ( $P < 0.01$ )。逐步回归分析表明, 5 种碳转化酶对活性有机碳组分的影响程度不同, 其中纤维素酶、 $\beta$ -葡萄糖苷酶和多酚氧化酶极显著影响 ROC, 纤维素酶、蔗糖酶和  $\beta$ -葡萄糖苷酶极显著影响 DOC, 蔗糖酶和  $\beta$ -葡萄糖苷酶极显著影响 MBC ( $P < 0.01$ )。通径分析表明,  $\beta$ -葡萄糖苷酶对 ROC、DOC 和 MBC 表现出较大的直接正效应 (1.253, 1.499, 2.014); 过氧化物酶、蔗糖酶和多酚氧化酶对 ROC 表现出较大的间接正效应 (1.678, 1.611, 1.511), 过氧化物酶、多酚氧化酶和纤维素酶对 DOC 表现出较大的间接正效应 (2.287, 2.100, 1.979), 过氧化物酶、多酚氧化酶和纤维素酶对 MBC 表现出较大的间接正效应 (2.483,

2.464, 2.102)。综上可知, 对活性有机碳组分起直接正效应的是纤维素酶、蔗糖酶、 $\beta$ -葡萄糖苷酶, 而起间接正效应的是多酚氧化酶、过氧化物酶。

表 6 酶活与有机碳组分的相关性 (Pearson 双侧显著检验)

Tab. 6 Correlation between enzyme activities and organic carbon components (Pearson 2-tailed test of significance)

酶活 Enzyme activity	ROC	DOC	MBC
S-CL	0.896 **	0.969 **	0.939 **
S-SC	0.983 **	0.955 **	0.944 **
S- $\beta$ -GC	0.984 **	0.989 **	0.981 **
S-PPD	0.927 **	0.830 **	0.809 **
S-POD	0.963 **	0.957 **	0.937 **

注: \*\* . 差异极显著 ( $P < 0.01$ ); \* . 差异显著 ( $P < 0.05$ )。

Note: \*\*. Correlation is significant difference at the 0.01 level; \* . Correlation is significant difference at the 0.05 level.

表 7 酶活与有机碳组分的逐步回归分析

Tab. 7 Stepwise regression analysis between enzyme activities and organic carbon components

活性有机碳组分 Labile organic carbon component	模型 Model	$R^2$	$P$ 值 $P$ value
ROC	$Y = 0.0771X_1 + 0.11192X_3 + 0.02120X_4 - 0.17235$	0.9978	<0.001
DOC	$Y = 2.21808X_1 + 8.59964X_2 + 8.9854X_3 + 34.68454$	0.9965	<0.01
MBC	$Y = 8.15714X_2 + 8.19625X_3 + 16.23435$	0.9828	<0.01

注:  $Y$ . 相应的活性有机碳组分;  $X_1$ . 纤维素酶活性;  $X_2$ . 蔗糖酶活性;  $X_3$ .  $\beta$ -葡萄糖苷酶活性;  $X_4$ . 多酚氧化酶活性。

Note:  $Y$ . The corresponding labile organic carbon component;  $X_1$ . Cellulase activity;  $X_2$ . Invertase activity;  $X_3$ .  $\beta$ -glucosidase activity;  $X_4$ . Polyphenol oxidase activity.

表 8 酶活与有机碳组分的通径分析

Tab. 8 Path analysis between enzyme activities and organic carbon components

因变量 Dependent variable	自变量 Independent variable	直接效应 Direct effect	间接效应 Indirect effect					总计 Total
			S-CL	S-SC	S- $\beta$ -GC	S-PPD	S-POD	
ROC	S-CL	0.482 **	-	-0.074	1.200	0.072	-0.038	1.160
	S-SC	-0.079	0.450	-	1.110	0.085	-0.034	1.611
	S- $\beta$ -GC	1.253 **	0.462	-0.078	-	0.081	-0.034	0.431
	S-PPD	0.092 *	0.380	-0.073	1.235	-	-0.031	1.511
	S-POD	-0.035	0.451	-0.076	1.221	0.082	-	1.678
DOC	S-CL	0.191 *	-	0.581	1.435	0.043	-0.080	1.979
	S-SC	0.623 *	0.179	-	1.329	0.050	-0.082	1.476
	S- $\beta$ -GC	1.499 **	0.183	0.614	-	0.050	-0.083	0.764
	S-PPD	0.052	0.151	0.578	1.447	-	-0.076	2.100
	S-POD	-0.085	0.179	0.602	1.461	0.045	-	2.287
MBC	S-CL	0.199 *	-	0.482	1.928	-0.145	-0.163	2.102
	S-SC	0.516 *	0.186	-	1.785	-0.170	-0.168	1.633
	S- $\beta$ -GC	2.014 **	0.191	0.509	-	-0.163	-0.169	0.368
	S-PPD	-0.184	0.157	0.479	1.984	-	-0.156	2.464
	S-POD	-0.174	0.187	0.499	1.962	-0.165	-	2.483

### 2.4 土壤活性有机碳组分和碳转化酶活性的 PCA 分析

不同施肥模式土壤活性有机碳组分和碳转化酶活性的 PCA 分析见图 1, 主成分综合得分见图 2。

结果表明, 第一、二主成分共解释了总变异的 98.1%。各处理在 PC1 上存在明显的空间差异, 不同的施肥处理可明显分为 2 簇: CK、T1 为一簇, T2、T3 为一簇; 而在 PC2 上则没有显著的空间差异。

T2、T3 在 PC1 的正半轴,CK、T1 则在负半轴;表明有机肥处理使土壤活性有机碳组分和碳转化酶活性发生显著变化,在 PC1 上各处理主成分分析表现为 T3 > T2 > T1 > CK。结合主成分分析综合得分,不同施肥模式对土壤活性有机碳组分和酶活性影响的顺序为 T3 > T2 > T1 > CK,这与之前不同施肥对有机碳组分和碳转化酶活性的研究结果一致。

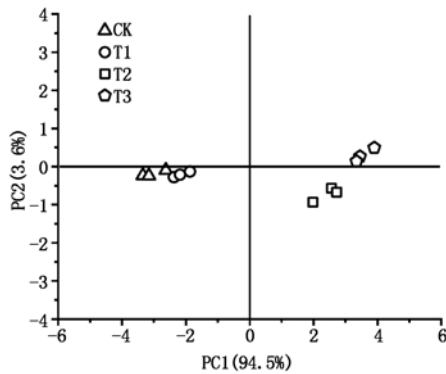


图1 不同施肥模式土壤活性有机碳组分和酶活性的 PCA 分析

Fig.1 PCA analysis of enzyme activities and soil labile organic carbon components in different fertilization models

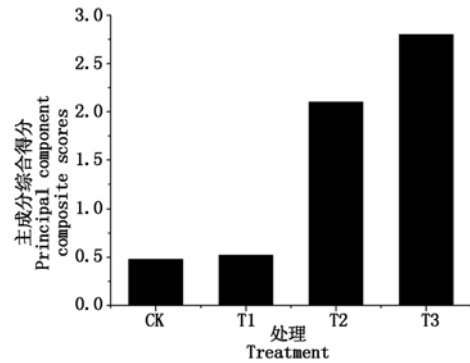


图2 不同施肥模式土壤有机碳组分和酶活性的主成分综合得分

Fig.2 Principal component composite scores of organic carbon components and soil enzyme activities in different fertilization models

不同施肥处理活性有机碳组分和碳转化酶活性在第一、二主成分上的载荷值见表9。原始变量与各主成分间的相关系数可用载荷值表征,载荷值越大,表明该原始变量是该主成分的主要影响因子。第一主成分的各分量之间大小大致相当,说明第一主成分是一个综合指标;第二主成分在 DOC、S-CL、S-SC、S-β-BC 有较大系数,说明第二主成分主要和 DOC、S-CL、S-SC、S-β-BC 有关。

表9 不同施肥措施有机碳组分和酶活性在第一、二主成分上的载荷值

Tab.9 The loaded value of organic carbon components and soil enzyme activities in different fertilization treatments on primary,secondary, respectively (PC1,PC2)

有机碳组分和酶活 Organic carbon contents and enzyme activities		第一主成分 PC1	第二主成分 PC2
有机碳组分 Organic carbon contents	ROC	0.347	-0.408
	DOC	0.359	0.148
	MBC	0.363	-0.078
碳转化酶 C conversion enzyme activities	S-CL	0.329	0.763
	S-SC	0.356	0.052
	S-β-GC	0.358	0.179
	S-PPD	0.358	-0.119
	S-POD	0.354	-0.316

### 3 结论与讨论

本研究结果表明,无机肥处理可增加土壤中的 TOC、ROC 及 CPMI,这与张玉军等<sup>[29]</sup>研究结果一致,原因可能是化肥的施用促进烟草根系和植株的生长,导致更多的烟草根系残留物留在土壤中,分解后增加了土壤的活性有机碳含量。皇甫呈惠等<sup>[30]</sup>研究表明,增施有机肥可以显著增加华北潮土的 ROC、DOC、POC;张迪等<sup>[31]</sup>研究结果表明,增施有机肥可以显著增加水稻土 DOC、MBC、ROC 及 CPMI;本研究结果表明,单施和配施有机肥处理显著增加了土壤活性有机碳组分及 CPMI,原因可能是有机肥

分解后为土壤提供了大量直接有机碳源;有机肥提高了土壤中碳转化酶和微生物的数量和活性,促进有机碳库的周转<sup>[32]</sup>。DOC/TOC 和 SME 可以表示土壤的健康状态,比 DOC 和 MBC 更能有效反映土壤质量的变化,单施和配施有机肥可显著增加土壤的 DOC/TOC 和 SME,有机肥可直接增加土壤中的有机碳源,在微生物分解作用下释放出更多的 DOC 和 MBC<sup>[33]</sup>。单施无机肥降低了土壤的 DOC/TOC 和 SME,原因可能是无机肥虽然促进了烟草植株生长,但根系分泌物、凋落物等和有机肥的直接输入碳源相比毕竟有限,根基微生物的大量活动消耗碳源,并且 DOC 和 MBC 含量较低且易被转化<sup>[34]</sup>;

无机肥的大量施用导致土壤酸化,虽然 SOC 增加但不能被微生物分解利用<sup>[35]</sup>,所以 DOC、MBC 含量增加不显著。

土壤酶是具有生物催化能力特殊蛋白质的总称,可作为判断土壤生物化学过程强度及评价土壤肥力指标<sup>[36]</sup>。Borase 等<sup>[37]</sup>研究表明,施用有机肥可以增加有机碳和微生物量碳含量和  $\beta$ -葡萄糖苷酶活性。田小明等<sup>[38]</sup>研究表明,增施有机肥可以显著增加潮土、灰漠土多酚氧化酶活性,且多酚氧化酶活性与有机肥施用量呈正比。本研究结果表明,单施和配施有机肥处理可显著增加土壤中的多酚氧化酶、过氧化物酶活性,这与季璇等<sup>[9]</sup>研究结果不一致,可能与不同的有机物料在土壤中的腐殖质化进程有差异,提供的底物浓度不同。土壤酶活性不仅受环境条件(如温度、湿度等)的影响,而且与所处的底物浓度呈正相关关系,有机肥施用量的增加能够为相应的碳转化酶提供更多的酚类、木质素类底物,从而导致 2 种酶活性的显著增加<sup>[39]</sup>。但是 Grandy 等<sup>[40]</sup>研究表明,碳转化酶与底物浓度间不总是存在显著的相关性,酶动力学随着土壤有机碳的分解过程的变化而波动。本研究结果也表明,单施和配施有机肥处理可显著增加土壤中的纤维素酶、蔗糖酶和  $\beta$ -葡萄糖苷酶活性,这与魏俊杰等<sup>[41]</sup>研究结果一致。蔗糖酶主要催化分解蔗糖形成葡萄糖和果糖,纤维素酶和  $\beta$ -葡萄糖苷酶主要催化分解纤维素类物质为易溶于水的葡萄糖<sup>[42]</sup>。纤维素酶、蔗糖酶和  $\beta$ -葡萄糖苷酶活性的增加:一方面是由于有机肥施用量的增加能够为纤维素酶、蔗糖酶和  $\beta$ -葡萄糖苷酶提供更多的二糖和纤维类物质,使底物浓度的增加所引起的<sup>[39]</sup>;另一方面,多酚氧化酶活性的增加可以将更多的酚类或多酚类物质转化为对应的醌类,从而更大程度的消除土壤酚类物质对纤维素酶、蔗糖酶和  $\beta$ -葡萄糖苷酶这 3 种水解酶的毒害作用,提高 3 种酶的活性<sup>[40]</sup>。

土壤酶参与土壤中各种生物化学过程,如动植物残体分解转化、腐殖质的分解与合成,与土壤活性有机碳的形成、转化等密切相关;土壤酶活性可以大致反映某一种土壤生态状况下生物化学过程的相对强度<sup>[43]</sup>。柳开楼等<sup>[44]</sup>研究表明,纤维素酶和蔗糖酶是驱动土壤养分迁移和周转的关键因子。蔗糖酶、纤维素酶和  $\beta$ -葡萄糖苷酶均为水解酶,外源输入的有机物质为其提供充足的木质纤维素和蔗糖等物质,将其转化为活性有机碳组分<sup>[45]</sup>。本研究结果表明,活性有机碳组分和碳转化酶活之间存在极显著的正相关关系( $P < 0.01$ ),碳转化酶活性对活性有

机碳组分的影响程度不同,与李增强等<sup>[39]</sup>研究结果一致,这可能与不同碳转化酶在活性有机碳形成过程中所起的功能不同。多酚氧化酶、过氧化物酶催化土壤中的芳香族化合物氧化成醌类物质,醌类物质与蛋白质、糖类等反应生成色素或者复杂的有机物质,完成土壤芳香族化合物的循环,能够有效减少有机物质的消耗,有利于活性有机碳在土壤中保留,从而间接影响土壤中的活性有机碳含量<sup>[46]</sup>。本结果表明,有机肥处理对活性有机碳组分和酶活性的影响大于无机肥和不施肥,这说明有机肥可以增加活性有机碳组分和碳转化酶活性,但影响的具体机制还需进一步研究。

综上所述,单施或配施有机肥可增加植烟棕壤活性有机碳组分、碳库管理指数以及碳转化酶活性,碳转化酶活可间接或直接影响活性有机碳组分。DOC、MBC 和 ROC 均与 5 种碳转化酶之间呈极显著正相关,其中纤维素酶、蔗糖酶和  $\beta$ -葡萄糖苷酶起直接作用,而多酚氧化酶和过氧化物酶则主要起间接作用。各施肥处理对活性有机碳组分和碳转化酶活性的综合影响可分为 2 组:不施肥和单施化肥为 1 组,配施和单施有机肥为 1 组,其中单施有机肥影响效果最显著。因此,单施或配施有机肥是提升植烟棕壤活性有机碳组分和碳转化酶活性的有效施肥模式,其中单施有机肥培肥效果最显著。

#### 参考文献:

- [1] 史常亮,郭焱,朱俊峰. 中国粮食生产中化肥过量施用评价及影响因素研究[J]. 农业现代化研究,2016,37(4):671-679. doi:10.13872/j.1000-0275.2016.0064. Shi C L, Guo Y, Zhu J F. Evaluation of over fertilization in China and its influencing factors[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2016, 37(4):671-679.
- [2] 陈壮壮,郭俊杰,陈泽鹏,贺广生,魏彬,黄浩,谢志东,林勇,周立非,邓世媛,王维. 不同施肥模式对烤烟氮钾肥利用效率及产量和品质的影响[J]. 华北农学报,2015,30(5):180-188. doi:10.7668/hbxb.2015.05.030. Chen Z Z, Guo J J, Chen Z P, He G S, Wei B, Huang H, Xie Z D, Lin Y, Zhou L F, Deng S Y, Wang W. Effects of different fertilization modes on nitrogen and potassium use efficiency, yield and quality of flue-cured tobacco[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2015, 30(5):180-188.
- [3] 宋震震,李絮花,李娟,林治安,赵秉强. 有机肥和化肥长期施用对土壤活性有机氮组分及酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2013,20(3):525-533. doi:10.11674/zwzf.2014.0302. Song Z Z, Li X H, Li J, Lin Z A, Zhao B Q. Long-term effects of mineral versus organic fertilizers on soil labile nitrogen fractions and soil enzyme activities in agricultural soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2013, 20(3):525-533.
- [4] 李洪斌,张杨珠,黄运湘,胡日生,廖超林,朱列书. 不同施肥条件对烟草施肥效应及肥料利用率的影响

- [J]. 湖南农业科学, 2013 (13): 48 - 52. doi: 10.16498/j.cnki.hnnykx.2013.13.034.
- Li H B, Zhang Y Z, Huang Y X, Hu R S, Liao C L, Zhu L S. Influences of different fertilizing conditions on fertilizer response and fertilizer utilization rate of tobacco[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2013 (13): 48 - 52.
- [5] 肖相政, 刘可星, 张志红, 刘亮, 廖宗文. 生物有机肥对烤烟生长及相关防御性酶活性的影响[J]. 华北农学报, 2010, 25(1): 175 - 179. doi: 10.7668/hbxb.2010.01.035.
- Xiao X Z, Liu K X, Zhang Z H, Liu L, Liao Z W. Effect of biological organic fertilizer on flue-cured tobacco growth and defensive-related enzymes activity[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2010, 25(1): 175 - 179.
- [6] 李红丽, 郭夏丽, 李清飞, 王岩. 抑制烟草青枯生物有机肥的研制及其生防效果研究[J]. 土壤学报, 2010, 47(4): 798 - 801. doi: 10.11766/trxb200804150431.
- Li H L, Guo X H, Li Q F, Wang Y. Tobacco wilt suppressing bio-manure and its bio-control effect[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(4): 798 - 801.
- [7] 陆海飞, 郑金伟, 余喜初, 周惠民, 郑聚峰, 张旭辉, 刘晓雨, 程琨, 李恋卿, 潘根兴. 长期无机有机肥配施对红壤性水稻土微生物群落多样性及酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(3): 632 - 643. doi: 10.11674/zwf.2015.0310.
- Lu H F, Zheng J W, Yu X C, Zhou H M, Zheng J F, Zhang X H, Liu X Y, Cheng K, Li L Q, Pan G X. Microbial community diversity and enzyme activity of red paddy soil under long-term combined inorganic-organic fertilization[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2015, 21(3): 632 - 643.
- [8] 张长华, 蒋卫, 蒋玉梅, 唐亮, 陈方林, 曹务栋, 黄建国. 施肥对烤烟产量、品质及土壤养分、酶活的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2012(3): 77 - 80. doi: 10.11838/sf-sc.20120316.
- Zhang C H, Jiang W, Jiang Y M, Tang L, Chen F L, Cao W D, Huang J G. Influence of fertilization on the yield and quality of flue-cured tobacco, soil nutrient and enzyme activity[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2012 (3): 77 - 80.
- [9] 季璇, 冯长春, 郑学博, 宋文静, 陈玉蓝, 况帅, 董建新, 杜如万. 饼肥等氮替代化肥对植烟土壤养分、酶活性和氮素利用的影响[J]. 中国烟草科学, 2019, 40(5): 23 - 29. doi: 10.13496/j.issn.1007-5119.2019.05.004.
- Ji X, Feng C C, Zheng X B, Song W J, Chen Y L, Kuang S, Dong J X, Du R W. Effects of combined application of rapeseed cake and chemical fertilizers on nutrients, enzyme activity of tobacco growing soil and nitrogen utilization[J]. *Chinese Tobacco Science*, 2019, 40(5): 23 - 29.
- [10] 王雪芬, 胡锋, 彭新华, 周虎, 余喜初. 长期施肥对红壤不同有机碳库及其周转速率的影响[J]. 土壤学报, 2012, 49(5): 954 - 961. doi: 10.11766/trxb201106240230.
- Wang X F, Hu F, Peng X H, Zhou H, Yu X C. Effects of long-term fertilization on soil organic carbon pools and their turnovers in a red soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49(5): 954 - 961.
- [11] 吴秀坤, 李永梅, 李朝丽, 王自林, 范茂攀. 纳版河流域土地利用方式对土壤总有机碳以及活性有机碳的影响[J]. 生态环境学报, 2013, 22(1): 6 - 11. doi: 10.3969/j.issn.1674-5906.2013.01.004.
- Wu X K, Li Y M, Li C L, Wang Z L, Fan M P. Effects of land use type on soil total organic carbon and soil labile organic carbon in Naban River watershed[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22(1): 6 - 11.
- [12] de Brito G S, Bautista S, López-Poma R, Pivello V R. Labile soil organic carbon loss in response to land conversion in the Brazilian woodland savanna (*cerradão*) [J]. *Biogeochemistry*, 2019, 144(1): 31 - 46. doi: 10.1007/s10533-019-00570-9.
- [13] 倪进治, 徐建民, 谢正苗, 王德建. 不同施肥处理下土壤水溶性有机碳含量及其组成特征的研究[J]. 土壤学报, 2003, 40(5): 724 - 730. doi: 10.11766/trxb200203130513.
- Ni J Z, Xu J M, Xie Z M, Wang D J. Contents of W SOC and characteristics of its composition under different fertilization systems[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(5): 724 - 730.
- [14] 张鹏, 钟川, 周泉, 唐海鹰, 李新梅, 李萍, 黄国勤. 不同冬种模式对稻田土壤碳库管理指数的影响[J]. 中国生态农业学报, 2019, 27(8): 1163 - 1171. doi: 10.13930/j.cnki.cjea.180995.
- Zhang P, Zhong C, Zhou Q, Tang H Y, Li X M, Li P, Huang G Q. Effects of different winter planting patterns on carbon management index of paddy field[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2019, 27(8): 1163 - 1171.
- [15] Tang H M, Li C, Xiao X P, Pan X C, Cheng K K, Shi L H, Li W Y, Wen L, Wang K. Effects of long-term fertilizer regime on soil organic carbon and its labile fractions under double cropping rice system of southern China [J]. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Soil & Plant Science*, 2020, 70(5): 409 - 418. doi: 10.1080/09064710.2020.1758763.
- [16] Li S, Zhang S R, Pu Y L, Li T, Xiao X X, Jia Y X, Deng O P, Guo S G. Dynamics of soil labile organic carbon fractions and C-cycle enzyme activities under straw mulch in Chengdu plain[J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 155: 289 - 297. doi: 10.1016/j.still.2015.07.019.
- [17] Sinsabaugh R L. Phenol oxidase, peroxidase and organic matter dynamics of soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42(3): 391 - 404. doi: 10.1016/j.soilbio.2009.10.014.
- [18] 李月, 张水清, 韩燕来, 李世莹, 王祎, 李慧, 李芳, 谭金芳. 长期秸秆还田与施肥对潮土酶活性和真菌群落的影响[J]. 生态环境学报, 2020, 29(7): 1359 - 1366. doi: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2020.07.010.
- Li Y, Zhang S Q, Han Y L, Li S Y, Wang Y, Li H, Li F, Tan J F. Effects on fluvo-aquic soil enzyme activity and fungal community of long-term straw returning and fertilization[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, 29(7): 1359 - 1366.
- [19] 马晓霞, 王莲莲, 黎青慧, 李花, 张树兰, 孙本华, 杨学云. 长期施肥对玉米生育期土壤微生物量碳氮及酶活性的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(17): 5502 - 5511. doi: 10.5846/stxb201110191555.
- Ma X X, Wang L L, Li Q H, Li H, Zhang S L, Sun B H, Yang X Y. Effects of long-term fertilization on soil microbial biomass carbon and nitrogen and enzyme activities during maize growing season[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(17): 5502 - 5511.
- [20] Zhang Y P, Liu Z H, Li Y, Zhong Z W, Sun M, Jing Y P. Effects of long-term located fertilization on wheat yield and



- soil nutrients of three types of soils in Shandong Province [J]. *Agricultural Science & Technology*, 2014, 15 (3): 400–406. doi:10.16175/j.cnki.1009-4229.2014.03.027.
- [21] 闫慧峰, 梁洪波, 许家来, 李德成, 杨举田, 杜传印, 牛柱峰, 刘光亮, 徐宜民, 肖振杰, 关辉, 石屹. 山东烟叶生产典型样区土壤质量评价[J]. *中国土壤与肥料*, 2015, 6(7): 41–47. doi:10.11838/sfsc.20150607.
- Yan H F, Liang H B, Xu J L, Li D C, Yang J T, Du C Y, Niu Z F, Liu G L, Xu Y M, Xiao Z J, Guan H, Shi Y. Evaluation of soil quality in Shandong typical tobacco production region [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2015, 6(7): 41–47.
- [22] 周伟, 吴红慧, 张运龙, 徐明岗, Aslam M, 文石林. 土壤活性有机碳测定方法的改良[J]. *土壤通报*, 2019, 50(1): 70–75. doi:10.19336/j.cnki.trtb.2019.01.11.
- Zhou W, Wu H H, Zhang Y L, Xu M G, Aslam M, Wen S L. Improvement of determination method for soil labile organic carbon [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2019, 50(1): 70–75.
- [23] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1987, 19(6): 703–707. doi:10.1016/0038-0717(87)90052-6.
- [24] 陈安强, 付斌, 鲁耀, 段宗颜, 胡万里. 有机物料输入稻田提高土壤微生物碳氮及可溶性有机碳氮[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(21): 160–167. doi:10.11975/j.issn.1002-6819.2015.21.021.
- Chen A Q, Fu B, Lu Y, Duan Z Y, Hu W L. Exogenous organic materials applied to paddy field improving soil microbial biomass C, N and dissolved organic C, N [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(21): 160–167.
- [25] 马维伟, 李广, 宋捷, 闫丽娟, 武利玉. 植被退化对尕斯库勒湿地土壤有机碳库及碳库管理指数的影响[J]. *草地学报*, 2019, 27(3): 687–694. doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2019.03.022.
- Ma W W, Li G, Song J, Yan L J, Wu L Y. Effect of vegetation degradation on soil organic carbon pool and carbon pool management index in the Gahai Wetland, China [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2019, 27(3): 687–694.
- [26] 董扬红, 曾全超, 安韶山, 张宏. 黄土高原不同林型植被对土壤活性有机碳及腐殖质的影响[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(1): 143–148. doi:10.13870/j.cnki.stbxb.2015.01.029.
- Dong Y H, Zeng Q C, An S S, Zhang H. Effects of different forest types on soil active organic carbon and soil humus composition in the Loess Plateau [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(1): 143–148.
- [27] 滕臻, 曹小青, 孙孟瑶, 李培玺, 徐小牛. 不同生态恢复模式对巢湖湖滨湿地土壤活性碳库及其管理指数的影响[J]. *生态环境学报*, 2019, 28(4): 752–760. doi:10.16258/j.cnki.1674-5906.2019.04.014.
- Teng Z, Cao X Q, Sun M Y, Li P X, Xu X N. Effect of different ecological restoration patterns on soil labile organic carbon and carbon pool management index of lake-side wetland of Chaohu Lake [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, 28(4): 752–760.
- [28] García-Ruiz R, Ochoa V, Hinojosa M B, Carreira J A. Suitability of enzyme activities for the monitoring of soil quality improvement in organic agricultural systems [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(9): 2137–2145. doi:10.1016/j.soilbio.2008.03.023.
- [29] 张玉军, 黄绍敏, 李斌, 龙潜, 姜桂英, 申凤敏, 刘世亮. 长期施肥对潮土不同层次活性有机质及碳库管理指数的影响[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(3): 160–165. doi:10.13870/j.cnki.stbxb.2019.03.024.
- Zhang Y J, Huang S M, Li B, Long Q, Jiang G Y, Shen F M, Liu S L. Effects of long-term fertilization on the labile organic carbon and carbon pool management index at different layers in fluvo-aquic soil [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(3): 160–165.
- [30] 皇甫呈惠, 孙筱璐, 刘树堂, 贾志越, 赵洪翠. 长期定位秸秆还田对土壤团聚体及有机碳组分的影响[J]. *华北农学报*, 2020, 35(3): 153–159. doi:10.7668/hbxb.20190844.
- Huangfu C H, Sun X L, Liu S T, Jia Y Z, Zhao H C. Effects of long-term straw returning to field on soil aggregates and organic carbon components [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2020, 35(3): 153–159.
- [31] 张迪, 韩晓增, 侯雪莹. 长期不同施肥管理对黑土活性有机碳及碳库管理指数的影响[J]. *土壤通报*, 2011, 42(3): 654–658. doi:10.19336/j.cnki.trtb.2011.03.028.
- Zhang D, Han X C, Hou X Y. The effects of long-term fertilization on the labile organic carbon and carbon management index in black soil [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, 42(3): 654–658.
- [32] Ge T D, Wu X H, Chen X J, Yuan H Z, Zou Z Y, Li B Z, Zhou P, Liu S L, Tong C L, Brookes P, Wu J S. Microbial phototrophic fixation of atmospheric CO<sub>2</sub> in China subtropical upland and paddy soils [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2013, 113: 70–78. doi:10.1016/j.gca.2013.03.020.
- [33] 丁少男, 薛莲, 刘国彬. 施肥处理对黄土丘陵区农田土壤酶活性和水溶性有机碳、氮的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34(11): 2146–2154. doi:10.11654/jaes.2015.11.016.
- Ding S N, Xue S, Liu G B. Effects of fertilization on soil enzyme activities and water-soluble organic carbon and nitrogen content in farmland on Hilly Loess Plateau [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(11): 2146–2154.
- [34] Zhang L G, Chen X, Xu Y J, Jin M C, Ye X X, Gao H J, Chu W Y, Mao J D, Thompson M L. 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): 80–99. doi:10.1038/s41598-020-68163-3.
- [35] 李艳鹏, 贺同鑫, 王清奎. 施肥对杉木林土壤酶和活性有机碳的影响[J]. *生态学杂志*, 2016, 35(10): 2722–2731. doi:10.13292/j.1000-4890.201610.028.
- Li Y P, He T X, Wang Q K. Impact of fertilization on soil organic carbon and enzyme activities in a *Cunninghamia lanceolata* plantation [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, 35(10): 2722–2731.
- [36] 刘兰清, 杨晨璐, 王维钰, 孔德杰, Akhtar K, 任广鑫, 冯永忠, 杨改河. 免耕条件下秸秆还田与施肥对小麦-玉米轮作系统土壤养分和酶活性的影响[J]. *华北农学报*, 2017, 32(6): 213–221. doi:10.7668/hbxb.2017.06.031.

- Liu L Q, Yang C L, Wang W Y, Kong D J, Akhtar K, Ren G X, Feng Y Z, Yang G H. Effects of straw returning to field and fertilization on soil nutrient and enzyme activity in wheat-maize rotation system under no-tillage condition[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2017, 32(6): 213 – 221.
- [37] Borase D N, Nath C P, Hazra K K, Senthilkumar M, Singh S S, Praharaj C S, Singh U, Kumar N. Long-term impact of diversified crop rotations and nutrient management practices on soil microbial functions and soil enzymes activity[J]. *Ecological Indicators*, 2020, 114: 1 – 11. doi:10.1016/j.ecolind.2020.106322.
- [38] 田小明,李俊华,危常州,褚贵新. 不同生物有机肥用量对土壤活性有机质和酶活性的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2012(1): 26 – 32. doi:10.11838/sfsc.20120105.
- Tian X M, Li J H, Wei C Z, Chu G X. Effect of different bio-organic fertilizer application rate on soil active organic matter and enzyme activities[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2012(1): 26 – 32.
- [39] 李增强,张贤,王建红,曹凯,徐昌旭,曹卫东. 紫云英施用量对土壤活性有机碳和碳转化酶活性的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2018(4): 14 – 20. doi:10.11838/sfsc.20180403.
- Li Z Q, Zhang X, Wang J H, Cao K, Xu C X, Cao W D. Effects of Chinese milk vetch(*Astragalus sinicus* L.) application rate on soil labile organic carbon and C-transformation enzyme activities[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2018(4): 14 – 20.
- [40] Grandy A S, Neff J C, Weintraub M N. Carbon structure and enzyme activities in alpine and forest ecosystems[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39(11): 2701 – 2711. doi:10.1016/j.soilbio.2007.05.009.
- [41] 魏俊杰,洪坚平. 无机有机肥配施生物炭对复垦土壤酶活性以及磷形态的影响[J]. *华北农学报*, 2019, 34(6): 170 – 176. doi:10.7668/hbxb.20190240.
- Wei J J, Hong J P. Effects of inorganic organic fertilizers combined with biochar on enzyme activities and phosphorus forms in reclaimed soil[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2017, 32(6): 170 – 176.
- [42] Straten P T, Guldberg P, Schrama D, Andersen M H, Møerch U, Seremet T, Siedel C, Reisfeld R A, Becker J C. *In situ* cytokine therapy: Redistribution of clonally expanded T cells[J]. *European Journal of Immunology*, 2001, 31(1): 250 – 258. doi:10.1002/1521-4141(200101)31:1 <250::AID-IMMU250>3.0.CO;2-8.
- [43] Holík L, Hlisenikovsky L, Honzik R, Trögl J, Burdová H, Popelka J. Soil microbial communities and enzyme activities after long-term application of inorganic and organic fertilizers at different depths of the soil profile[J]. *Sustainability*, 2019, 11(12): 3251. doi:10.3390/su11123251.
- [44] 柳开楼,韩天富,胡惠文,黄庆海,余喜初,李大明,叶会财,胡志华. 红壤旱地玉米开花期土壤酶活性对长期施肥的响应[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(6): 1610 – 1618. doi:10.11674/zwyf.18155.
- Liu K L, Han T F, Hu H W, Huang Q H, Yu X C, Li D M, Ye H C, Hu Z H. Response of soil enzyme activity in flowering stages of maize to long-term fertilization in red soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(6): 1610 – 1618.
- [45] Yu H Y, Ding W X, Luo J F, Donnison A, Zhang J B. Long-term effect of compost and inorganic fertilizer on activities of carbon-cycle enzymes in aggregates of an intensively cultivated sandy loam[J]. *Soil Use and Management*, 2012, 28(3): 347 – 360. doi:10.1111/j.1475-2743.2012.00415.x.
- [46] 李增强,张贤,王建红,曹凯,徐昌旭,曹卫东. 化肥减施对紫云英还田土壤活性有机碳和碳转化酶活性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(4): 525 – 534. doi:10.11674/zwyf.18121.
- Li Z Q, Zhang X, Wang J H, Cao K, Xu C X, Cao W D. Effect of chemical fertilizer reduction with return of Chinese milk Vetch(*Astragalus sinicus* L.) on soil labile organic carbon and carbon conversion enzyme activities[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(4): 525 – 534.