

不同轮作模式对土壤活性碳组分及矿化的影响

刘璇, 庞茹月, 赵健, 司彤, 王月福, 邹晓霞, 矫岩林

引用本文:

刘璇, 庞茹月, 赵健, 司彤, 王月福, 邹晓霞, 矫岩林. 不同轮作模式对土壤活性碳组分及矿化的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(8): 1768–1777.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-1165>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同地力玉米田土壤有机碳矿化特征

王永慧, 杨殿林, 红雨, 赵建宁, 轩青霞, 霍莉莉, 谭炳昌, 修伟明, 王丽丽

农业环境科学学报. 2019, 38(3): 590–599 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1032>

小麦与秋豆秸秆配施对土壤有机碳固持的影响

朱文玲, 李秀双, 田霄鸿, 陈娟, 王松

农业环境科学学报. 2018, 37(9): 1952–1960 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0070>

秸秆还田模式对土壤有机碳及腐植酸含量的影响

郭瑞华, 靳红梅, 常志州, 王海候, 孙小祥, 沈明星, 陆长婴

农业环境科学学报. 2017, 36(4): 727–733 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1364>

生物炭对杉木人工林土壤碳氮矿化的影响

李莹, 魏志超, 李惠通, 邱云霄, 周垂帆, 马祥庆

农业环境科学学报. 2017, 36(2): 314–321 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1086>

冬闲稻田养鸡结合生物炭施用对双季稻田产量及土壤有机碳、活性碳氮的影响

周玲红, 张浪, 魏甲彬, 成小琳, 肖志祥, 徐华勤, 唐剑武, 唐启源

农业环境科学学报. 2018, 37(9): 1961–1969 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1389>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

刘璇, 庞茹月, 赵健, 等. 不同轮作模式对土壤活性碳组分及矿化的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(8): 1768–1777.

LIU X, PANG R Y, ZHAO J, et al. Effects of different rotation modes on the concentrations of soil activate carbon fractions and characteristics of carbon mineralization[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(8): 1768–1777.

不同轮作模式对土壤活性碳组分及矿化的影响

刘璇¹, 庞茹月¹, 赵健², 司彤¹, 王月福¹, 邹晓霞^{1*}, 矫岩林^{2*}

(1. 青岛农业大学农学院/山东省旱作农业技术重点实验室, 青岛 266109; 2. 山东省烟台市农业科学研究院, 烟台 265500)

摘要:为研究不同花生轮作模式下土壤活性碳库变化,在大田条件下进行定位试验。试验以春花生一年一作(CP)为对照,设置4种轮作种植模式:春花生→冬小麦-夏玉米两年三作(P→W-M)、冬小麦-夏玉米一年两作(W-M)、冬小麦-夏花生一年两作(W-P)、冬小麦-夏花生→冬小麦-夏玉米两年四作(W-P→W-M),共计5个处理,研究不同种植模式下土壤有机碳及土壤可溶性有机碳、微生物生物量碳等活性碳组分含量变化和碳矿化特征。结果发现:相较于CP模式,P→W-M模式显著提高了0~40 cm土层有机碳(52.7%~53.3%)、可溶性有机碳(13.3%~344.8%)及微生物生物量碳含量(25.3%~101.4%),W-P模式显著提高了0~40 cm土层有机碳(39.3%~46.8%)及0~20 cm土层可溶性有机碳(271.4%)、微生物生物量碳含量(44.3%),W-P→W-M模式则显著降低了20~40 cm土层各碳组分含量。各种种植模式土壤有机碳矿化速率均符合一级动力学模型。CP和W-P模式具有较低的潜在矿化有机碳库,W-M和W-P→W-M模式显著提高了潜在矿化有机碳库与土壤有机碳的比值。研究表明,P→W-M和W-P模式可提升土壤有机碳和活性碳组分含量,有效降低土壤潜在矿化有机碳量,提高土壤有机碳的固持。

关键词:花生;轮作模式;可溶性碳;微生物生物量碳;碳矿化

中图分类号:S512.11;S513;S565.2 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2023)08-1768-10 doi:10.11654/jaes.2022-1165

Effects of different rotation modes on the concentrations of soil activate carbon fractions and characteristics of carbon mineralization

LIU Xuan¹, PANG Ruyue¹, ZHAO Jian², SI Tong¹, WANG Yuefu¹, ZOU Xiaoxia^{1*}, JIAO Yanlin^{2*}

(1. College of Agronomy, Qingdao Agricultural University/Shandong Key Lab. of Dry Farming Techniques, Qingdao 266109, China; 2. Yantai Academy of Agricultural Sciences, Yantai 265500, China)

Abstract: To assess the effects of various planting modes on soil active carbon pools in field experiments, four rotation modes were applied with continuous cultivation of peanut (*Arachis hypogaea* Linn.) (CP) as a control. The four rotation modes were as follows: spring peanut → winter wheat (*Triticum aestivum* L.) – summer maize (*Zea mays* L.) rotation (P→W-M), winter wheat–summer maize rotation (W-M), winter wheat–summer peanut rotation (W-P), winter wheat–summer peanut → winter wheat–summer maize rotation (W-P→W-M). The concentration of soil organic carbon (SOC) and active carbon fractions such as dissolved organic carbon (DOC) and microbial biomass carbon (MBC), and carbon mineralization characteristics were assessed. The results showed that compared with CP, P→W-M significantly increased the content of SOC (52.7%~53.3%), DOC (13.3%~344.8%), and MBC (25.3%~101.4%). W-P significantly increased the content of SOC in the 0~40 cm soil layers (39.3%~46.8%) and that of DOC (271.4%) and MBC (44.3%) in the 0~20 cm layer. The concentrations of all carbon fractions in the W-P→W-M treatment were significantly decreased. Carbon mineralization in all planting modes was consistent with the first-order dynamic model. Lower potentially mineralized carbon (C_0) was found in CP and W-P, while W-

收稿日期:2022-11-14 录用日期:2023-03-03

作者简介:刘璇(1998—),女,山东青岛人,硕士研究生,主要从事花生栽培与生理生态研究。E-mail:eleonor@stu.qau.edu.cn

*通信作者:邹晓霞 E-mail:zzouxiaxia666@126.com; 矫岩林 E-mail:ytpeanut@163.com

基金项目:国家花生产业技术体系项目(CARS-13)

Project supported: China Agriculture Research System of MOF and MARA(CARS-13)

M and W-P→W-M significantly increased the value of C_0/SOC . In conclusion, P→W-M and W-P can increase the concentration of SOC and active carbon fractions, reduce the potentially mineralized carbon, and improve soil organic carbon sequestration.

Keywords: peanut; rotation modes; dissolved organic carbon; microbial biomass carbon; carbon mineralization

土壤活性有机碳库是指在一定时空条件下,受植物、微生物影响强烈且活性比较高的那一部分土壤碳素,主要包括易氧化有机碳(Readily oxidizable carbon, ROC)、可溶性有机碳(Dissolved organic carbon, DOC)、微生物生物量碳(Microbial biomass carbon, MBC)和潜在矿化有机碳(Potential mineralization carbon, PMC)等^[1-3],虽然这部分有机碳仅占土壤总有机碳的较小部分,但由于较快的周转速率,以及对环境变化的高度敏感性,其对土壤养分的转化和供应有着重要影响,常被用作表征土壤有机碳(Soil organic carbon, SOC)变化的早期指标^[4]。土壤矿化即土壤有机物质在微生物作用下分解释放出 CO_2 的过程,是陆地生态系统进行碳循环的重要一环,据统计每年通过土壤有机碳矿化释放的 CO_2 为68~75 Pg,是石油和煤等化石燃料燃烧释放量的12~16倍^[5],土壤有机碳的矿化动态将极大影响全球温室效应。

土地利用和种植方式的改变会使土壤有机碳累积和矿化的平衡状态发生改变,直接影响土壤在全球碳收支过程所扮演的源/汇角色。适宜的轮作方式有利于维持或提升土壤碳库总量,并调节碳分配,促进土壤碳库内部各组分之间的转化^[6-7]。赵思腾等^[8]研究发现,与玉米-马铃薯轮作模式相比,玉米-苜蓿轮作更有利于土壤有机碳的积累,改善土壤结构。常规轮作常与秸秆还田相结合,如:李雨诺等^[9]的研究表明,在小麦-玉米轮作体系下双季秸秆还田能显著提高0~20 cm土层活性碳组分含量;郭金瑞^[10]研究发现,相较于玉米-大豆轮作和大豆连作处理,长期玉米连作的高秸秆还田量和微生物量导致了更高的矿化量;但李小涵等^[11]认为,与连作相比,轮作增加土壤碳的作用更强,但不同轮作之间差异不显著,且有机碳的增加主要表现在0~15 cm深度的表层土壤。

作物种植多元化是提高农业生态系统多样性和保障农业生产固碳减排的有利措施^[12]。花生、小麦与玉米是华北地区的主要粮油作物,然而由于花生产区规模相对集中,长期单一种植产生的特定根系分泌物会刺激土壤中病原微生物大量繁殖,导致微生物群落多样性下降,土壤板结^[13]。常规生产采用简单的小麦-玉米轮作,但随着轮作年限的增加,轮作优势也

逐渐减弱。与简单轮作相比,更多样化的轮作增加了土壤微生物群落代谢多样性和活性^[14]。现有研究表明,当前茬作物为豆科作物时,后茬作物产量优势明显^[15]。

农业绿色低碳发展是促进农业可持续发展的重大举措,也是实现农业领域“双碳”目标的必然选择。近年来,基于花生的多元化种植模式日益增多,但不同花生轮作模式对土壤碳库特征的影响尚不清楚。因此,明确不同花生轮作模式下土壤有机碳、活性碳组分及碳矿化特征对于全面、综合评价不同种植模式的科学性,维持土壤生态系统平衡,促进农业可持续发展具有积极意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

定位试验始于2018年10月,研究区位于烟台市农科院(37°45' N, 121°43' E)内,属温带大陆性季风气候,年平均气温13.24℃,年均日照时数2 504.2 h,供试土壤为棕壤,前茬作物为春花生,实验前0~20 cm土层土壤基本理化性质如下:有机质13.74 g·kg⁻¹,碱解氮124.84 mg·kg⁻¹,铵态氮76.62 mg·kg⁻¹,硝态氮51.7 mg·kg⁻¹,有效磷361.55 mg·kg⁻¹,速效钾159.63 mg·kg⁻¹,pH 6.5。

1.2 试验设计

研究以春花生一年一作(CP)为对照,设置4种轮作种植模式:春花生→冬小麦-夏玉米两年三作(P→W-M)、冬小麦-夏玉米一年两作(W-M)、冬小麦-夏花生一年两作(W-P)、冬小麦-夏花生→冬小麦-夏玉米两年四作(W-P→W-M),共计5个处理。每个处理小区面积66.7 m²,随机区组排列,重复3次,春花生起垄覆膜种植,夏花生平种。按当地常规技术措施进行种植和管理,具体如表1所示,保证不同轮作模式下同种作物在其生育期内施肥量一致。小麦及玉米秸秆在作物收获后直接翻入样地,作还田处理,花生由于整株收获,残留量很小故视为不还田。小麦及玉米根据当年作物产量进行秸秆产量换算,计算公式:

秸秆产量(kg·hm⁻²)=草谷比×籽粒产量(kg·hm⁻²)

其中草谷比:小麦 1.38,玉米 1.17^[16]。
试验期间各处理秸秆还田量具体如表 2 所示。

供试春花生品种为“花育 22”,夏花生品种为“花育 20”,供试玉米品种为“连胜 208”,供试小麦品种为“烟农 1212”。春花生每年 5 月 15 日前后播种,9 月 15 日前后收获,夏花生每年 6 月 15 日前后播种,10 月 10 日前后收获,小麦每年 10 月 10 日前后播种,次年 6 月 15 日前后收获,玉米每年 6 月 15 日前后播种,9 月 15 日前后收获。

1.3 样品采集与测定

采样时间为 2020 年作物收获后,其中春花生一年一作(CP)模式为 9 月 15 日春花生收获后,春花生→冬小麦-夏玉米两年三作(P→W-M)模式为 6 月 15 日冬小麦收获后,冬小麦-夏玉米一年两作(W-M)模式与冬小麦-夏花生→冬小麦-夏玉米两年四作(W-P→W-M)模式为 9 月 15 日夏玉米收获后,冬小麦-夏花生一年两作(W-P)模式为 10 月 10 日夏花生收获后。

采用“S”形采样法采集土壤样品并避开边行,利用土钻采集 0~40 cm 土壤剖面样(20 cm 为一个土层),每小区采集 5 个样品,充分混匀。土壤剖面样装

入带有冰袋的保温箱,立即带回实验室。一部分样品保存于 4 ℃恒温冰箱中,用于微生物生物量碳、可溶性碳测定和碳矿化培养;另一部分样品自然风干,剔除植物根系、石砾,过 100 目筛,用于土壤总有机碳测定。利用环刀法^[17]进行原状土采集,每小区采集 3 个土壤样品,采集的原状土用密封袋密封,完整带回,进行土壤含水率和容重的测定。

土壤有机碳及其活性有机碳测定方法:采用重铬酸钾外加热法^[18]测定土壤有机碳含量;采用 K₂SO₄提取-重铬酸钾外加热法测定可溶性有机碳含量;采用氯仿熏蒸-K₂SO₄提取法^[19]测定土壤微生物生物量碳含量。采用室内恒温培养-碱液吸收法^[20]测定土壤矿化情况,25 ℃下预培养一周后,于 25 ℃恒温箱内培养 28 d,在第 1、3、5、7、10、14、21、28 天取出烧杯,加入过量的 BaCl₂溶液,以酚酞为指示剂,用盐酸滴定,测定吸收液中的 CO₂-C,计算土壤有机碳矿化量(C,以 CO₂计)和矿化速率。公式如下^[21]:

$$C=C_{HCl} \times (V_0-V_1) \times 22/0.03$$

式中: C_{HCl}为滴定盐酸的浓度, mol·L⁻¹; V₀为对照滴定的盐酸体积, mL; V₁为处理滴定的盐酸体积, mL。

表 1 不同作物田间管理措施
Table 1 Field management measures for different crops

作物品种 Crop variety	行距及株距 Row and plant space	施肥量 Amount of fertilizer applied	灌水量 Amount of irrigation	病虫害防治 Pest control
小麦 烟农 1212	行距 18 cm	基肥: 750 kg·hm ⁻² 复合肥; 返青期追施: 300 kg·hm ⁻² 尿素	无	穗期喷施吡虫啉防治蚜虫
玉米 连胜 208	行距 60 cm 株距 25 cm	基肥: 600 kg·hm ⁻² 复合肥; 大喇叭口期追施: 300 kg·hm ⁻² 尿素	无	苗期喷施吡虫啉防治蚜虫、灰飞虱; 大喇叭口期喷施福戈防治玉米螟
春花生 花育 22	垄宽 80 cm, 小行距 35 cm, 株距 16 cm	基肥: 750 kg·hm ⁻² 复合肥	无	苗期喷施吡虫啉防治蚜虫 后期喷施美甜防治叶斑病
夏花生 花育 20	垄宽 80 cm, 小行距 35 cm, 株距 14 cm	基肥: 750 kg·hm ⁻² 复合肥	无	苗期喷施吡虫啉防治蚜虫 后期喷施美甜防治叶斑病

表 2 不同轮作模式秸秆还田量(kg·hm⁻²)
Table 2 Straw returning amount in different rotation modes(kg·hm⁻²)

轮作模式 Rotation mode	2019 年 6 月 冬小麦 Winter wheat	2019 年 9 月 夏玉米 Summer maize	2020 年 6 月 冬小麦 Winter wheat	2020 年 9 月 夏玉米 Summer maize	合计 Total
CP	0	0	0	0	0
P→W-M	0	0	744.44	330.29	1 074.73
W-M	768.25	462.62	736.46	338.83	2 306.16
W-P	777.77	0	751.99	0	1 529.76
W-P→W-M	759.27	466.01	730.26	0	1 955.54

注: CP 为春花生一年一作, P→W-M 为春花生→冬小麦-夏玉米两年三作, W-M 为冬小麦-夏玉米一年两作, W-P 为冬小麦-夏花生一年两作, W-P→W-M 为冬小麦-夏花生→冬小麦-夏玉米两年四作。下同。
Note: CP, continuous cropping of spring peanut; P→W-M, spring peanut→winter wheat-summer maize rotation; W-M, winter wheat-summer maize rotation; W-P, winter wheat-summer peanut rotation; W-P→W-M, winter wheat-summer peanut→winter wheat-summer maize rotation. The same below.

土壤有机碳矿化速率($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$)=培养时间内有机碳累积矿化量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)/培养时间(d)。

有机碳累积矿化量(C_t)是从培养开始至某一时间点的土壤 CO_2 总释放量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),采用一级动力学方程进行拟合,并得到动力学方程各参数值。拟合方程为:

$$C_t=C_0(1-e^{-kt})$$

式中: C_0 为潜在矿化有机碳, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; k 为有机碳的周转速率常数; t 为培养时间, d 。

1.4 数据处理

采用Excel 2016进行数据的整理、计算和制图,用DPS 17.10进行单因素方差分析(One-way ANOVA)和Duncan多重比较($P<0.05$),用Origin 2021进行一级动力学方程拟合,图表中数据为平均值±标准差。

2 结果与分析

2.1 不同花生轮作模式对土壤含水率及容重的影响

表3显示了不同轮作模式对土壤含水率和容重的影响。各模式间含水率差异在表层(0~20 cm)更为显著,而容重的差异则更显著地表现在深层(20~40 cm)土壤。相较于CP模式,各轮作模式两土层含水率均显著下降,降幅分别为3.9~4.7个百分点和2.9~5.1个百分点,其中0~20 cm土层以W-P和W-P→W-M模式最低(均为5.2%),20~40 cm土层以P→W-M模式最低(4.6%)。与CP模式相比,P→W-M模式0~20 cm和20~40 cm土层容重分别显著降低了2.7%和3.7%,W-M和W-P模式20~40 cm土层容重显著降低了2.1%和4.7%。但W-P→W-M模式显著提高了20~40 cm土层容重。

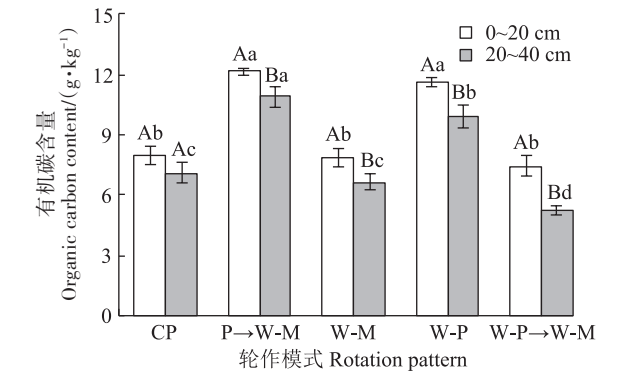
2.2 不同花生轮作模式对土壤有机碳含量的影响

由图1可知,不同模式下0~20 cm土层土壤有机

碳含量均显著高于20~40 cm土层(CP模式除外)。最有利于土壤有机碳含量提高的是P→W-M和W-P模式,与CP模式相比,P→W-M、W-P模式的0~20 cm和20~40 cm土层土壤有机碳含量分别显著增加了52.7%、53.3%和46.8%、39.3%,但W-M模式与CP模式无显著差异。W-P→W-M模式20~40 cm土层有机碳含量较CP模式显著降低了25.8%,不利于深层土壤有机碳的积累。

2.3 不同花生轮作模式对土壤可溶性有机碳含量的影响

由图2可知,可溶性有机碳含量除CP模式0~20 cm土层显著低于20~40 cm土层外,其余各模式0~20 cm土层均显著高于20~40 cm土层,表明CP模式下可溶性有机碳更易向深层土壤迁移。与CP模式相比,各轮作模式0~20 cm土层可溶性有机碳增加48.7%~



不同大写字母表示同一处理不同土层间差异显著($P<0.05$),不同小写字母表示同一土层不同处理间差异显著($P<0.05$)。下同。
Different capital letters indicate significant differences between soil layers in the same rotation mode at 0.05 level, and different lowercase letters indicate significant differences between rotation modes in the same soil layer at 0.05 level. The same below.

图1 不同轮作模式土壤有机碳含量

Figure 1 Soil organic carbon content in different rotation modes

表3 不同轮作模式土壤含水率及容重

Table 3 Moisture content and bulk density in different rotation modes

轮作模式 Rotation mode	土壤含水率Soil moisture content/%		土壤容重Bulk density/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	
	0~20 cm	20~40 cm	0~20 cm	20~40 cm
CP	9.9±0.1Aa	9.7±0.8Aa	1.86±0.02Ba	1.90±0.02Ab
P→W-M	5.4±0.1Ac	4.6±0.1Bc	1.81±0.01Ab	1.83±0.03Acd
W-M	6.0±0.2Ab	6.2±0.1Ab	1.86±0.02Aa	1.86±0.03Ac
W-P	5.2±0.1Bd	6.8±0.3Ab	1.84±0.01Aab	1.81±0.02Ad
W-P→W-M	5.2±0.1Bd	6.8±0.3Ab	1.86±0.02Ba	1.95±0.02Aa

注:不同大写字母表示同一处理不同土层间差异显著($P<0.05$),不同小写字母表示同一土层不同处理间差异显著($P<0.05$)。下同。
Note: Different capital letters indicate significant differences between soil layers in the same rotation mode at 0.05 level, and different lowercase letters indicate significant differences between rotation modes in the same soil layer at 0.05 level. The same below.

344.8%,其中以P→W-M模式增幅最高。但在20~40 cm土层中,只有P→W-M模式可溶性有机碳含量较CP增加显著(13.3%),而W-M和W-P→W-M模式则较CP模式分别降低41.7%和57.3%,且差异显著。可见,各轮作模式中,以P→W-M模式更有利于可溶性有机碳含量的提升。

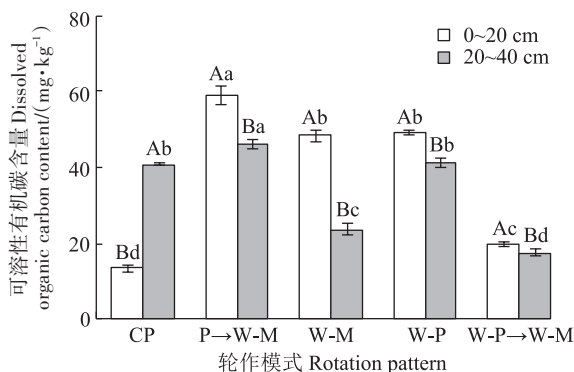


图2 不同轮作模式土壤可溶性有机碳含量

Figure 2 Dissolved organic carbon content in different rotation modes

2.4 不同花生轮作模式对土壤微生物生物量碳含量的影响

由图3可知,P→W-M、W-M、W-P模式0~20 cm土层土壤微生物生物量碳含量显著高于20~40 cm土层,CP和W-P→W-M模式两土层间则无显著差异。与CP模式相比,P→W-M和W-M模式0~40 cm土层微生物生物量碳均显著提升,0~20 cm土层分别显著提高了101.4%和54.3%,20~40 cm土层分别显著提高了25.3%和17.8%。W-P模式0~20 cm土层微生物生物量碳含量较CP模式显著提高了44.3%,但20~40 cm土层则显著下降了13.9%。W-P→W-M模式0~20 cm土层微生物

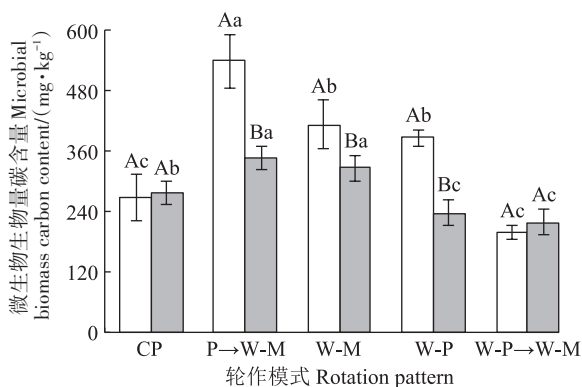


图3 不同轮作模式土壤微生物生物量碳含量

Figure 3 Microbial biomass carbon content in different rotation modes

生物量碳含量与CP模式无显著差异,但20~40 cm土层显著下降了20.6%。综上,P→W-M和W-M模式更有利于0~40 cm土层微生物生物量碳含量的提升。

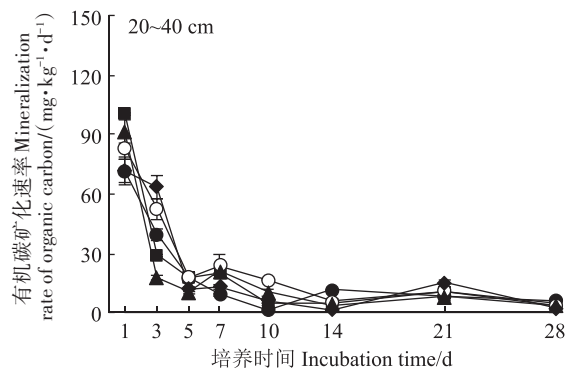
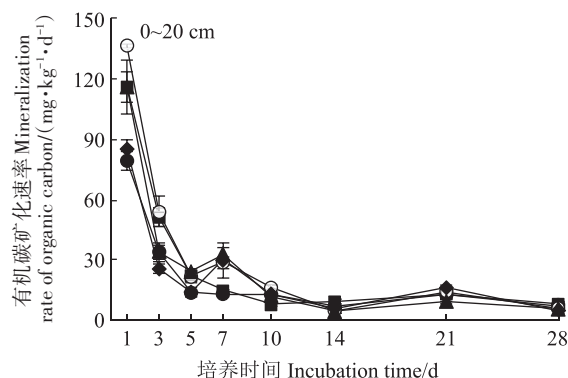
2.5 不同花生轮作模式对土壤有机碳矿化的影响

2.5.1 土壤有机碳矿化速率及累积矿化量

不同花生轮作模式的矿化特征见图4,各轮作模式0~28 d的土壤有机碳矿化速率均呈现逐渐下降的趋势,且前期0~20 cm矿化速率高于20~40 cm土层。不同轮作模式累积矿化量表现为:0~20 cm土层为W-M>P→W-M>W-P>W-P→W-M>CP;20~40 cm土层为W-M>W-P→W-M>P→W-M>CP>W-P。截至第28天时W-M模式在0~20 cm和20~40 cm的累积矿化量均显著高于其他模式,分别为561.92 mg·kg⁻¹和454.39 mg·kg⁻¹,表明其存在较高的有机碳分解速率。0~20 cm CP模式累积矿化量最低为413.11 mg·kg⁻¹,20~40 cm W-P模式累积矿化量最低为323.95 mg·kg⁻¹。

2.5.2 土壤有机碳矿化动力模型

应用一级动力学方程对不同轮作模式和不同土层土壤有机碳累积矿化量进行拟合,结果如图5所示。拟合方程的 R^2 均 ≥ 0.882 ,达到了较好的拟合水



● CP ■ P→W-M ○ W-M ▲ W-P ◆ W-P→W-M

图4 不同轮作模式土壤有机碳矿化速率

Figure 4 Mineralization rate of organic carbon in different rotation modes

平。在0~20 cm土层,拟合曲线模型参数(表4)显示,各模式土壤潜在矿化有机碳量(C_0)介于415.66~527.53 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,占土壤有机碳总量(C_{soc})的3.8%~6.7%。在20~40 cm土层,各模式土壤 C_0 介于311.45~441.96 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,占 C_{soc} 的3.2%~7.1%。CP和W-P模式的 C_0 在两土层均处于较低水平,W-M模式的 C_0 在0~20 cm和20~40 cm土层较CP模式分别显著提高26.9%和30.3%。与CP模式相比,W-M和W-P→W-M模式显著提高了 C_0/C_{soc} ,而P→W-M和W-P模式则在0~20 cm土层均显著下降了1.4个百分点,在20~40 cm土层均显著下降了1.6个百分点。

2.6 土壤活性碳组分、矿化与环境因子的相关性分析

Pearson 相关性分析表明(图6),土壤累积矿化量与潜在矿化有机碳库在0~20 cm($r=0.84$)和20~40 cm($r=0.95$)土层均存在显著正相关关系。微生物生物量碳与有机碳($r=0.74$)及可溶性有机碳($r=0.89$)仅在0~20 cm土层存在显著正相关关系。土壤可溶性有

机碳与有机碳在0~20 cm($r=0.75$)和20~40 cm($r=0.85$)土层均存在显著正相关关系,而与累积矿化量在0~20 cm($r=0.71$)显著正相关,在20~40 cm($r=-0.68$)则表现为显著负相关。土壤容重则与有机碳($r=-0.70$,0~20 cm; $r=-0.81$,20~40 cm)及可溶性有机碳($r=-0.55$,0~20 cm; $r=-0.63$,20~40 cm)在0~20 cm和20~40 cm土层均存在显著负相关关系。

3 讨论

3.1 不同花生轮作模式对土壤碳组分含量的影响

不同的轮作组合对土壤碳库的影响不同,豆科与非豆科作物轮作可显著提高土壤有机质含量、提升地力^[22-24]。本研究发现P→W-M和W-P轮作模式可显著提高土壤有机碳含量,这一方面可能与不同植物分泌特异性碳源物质调控根际土壤微生物影响土壤碳周转过程有关^[25-26],另一方面可能与豆科花生根瘤固氮改变土壤碳氮比调控土壤碳周转有关^[27-28]。此外,

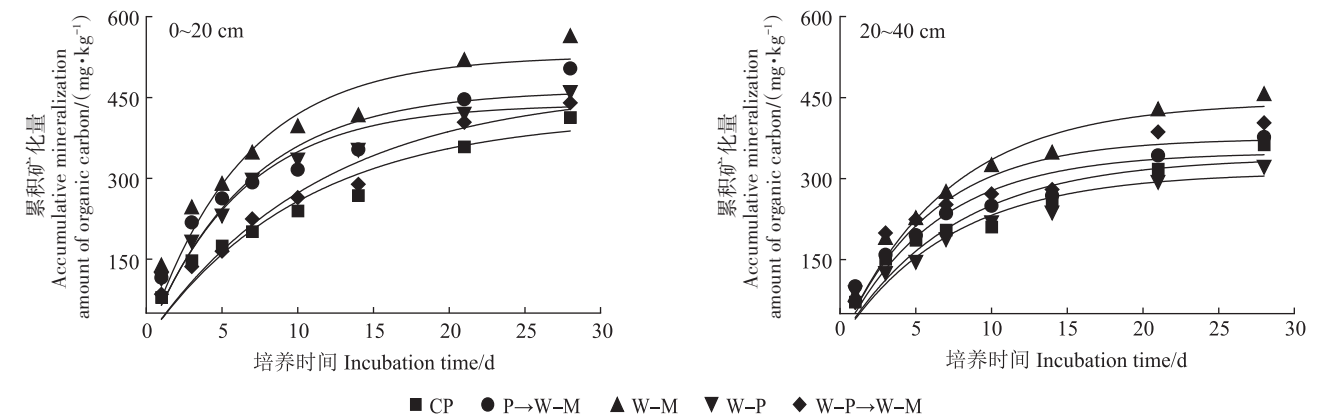
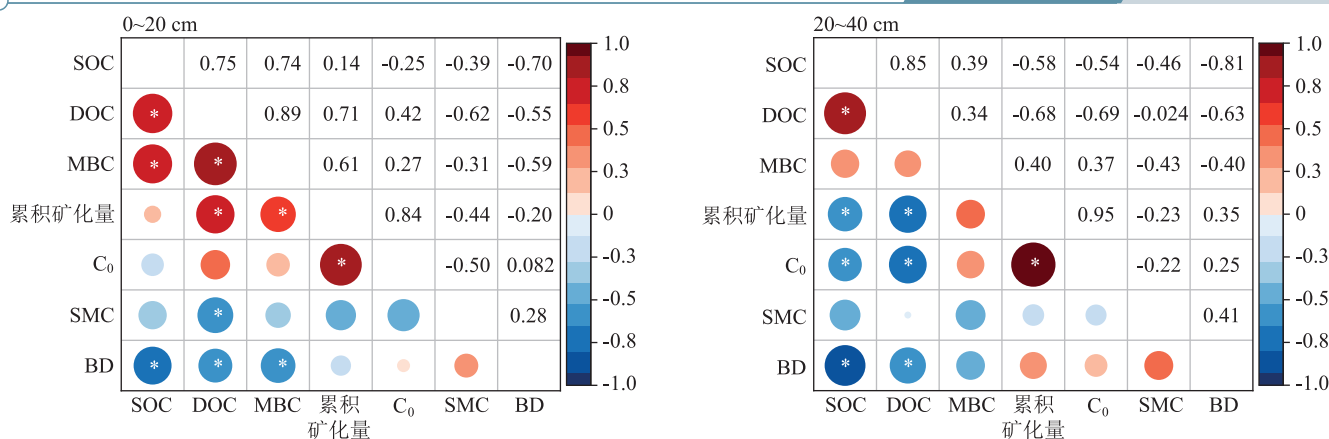


图5 不同轮作模式土壤累积碳矿化量拟合曲线
Figure 5 Fitting curves of soil accumulative mineralization of organic carbon in different rotation modes

表4 不同轮作模式土壤累积碳矿化量拟合曲线模型参数

Table 4 Parameters of the kinetic equations of accumulative mineralization of organic carbon in different rotation modes					
土层 Soil layer	轮作模式 Rotation modes	$C_0/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	k	R^2	C_0/C_{soc}
0~20 cm	CP	415.66±42.64b	0.097±0.021ab	0.926	5.2%±0.3%b
	P→W-M	463.29±38.31ab	0.150±0.034a	0.882	3.8%±0.1%c
	W-M	527.53±34.12a	0.158±0.028a	0.921	6.7%±0.4%a
	W-P	437.50±23.66b	0.160±0.024a	0.945	3.8%±0.1%c
	W-P→W-M	468.94±43.72ab	0.087±0.017b	0.954	6.3%±0.4%a
20~40 cm	CP	339.12±29.75bc	0.134±0.030a	0.895	4.8%±0.3%b
	P→W-M	348.20±26.86bc	0.160±0.034a	0.883	3.2%±0.1%c
	W-M	441.96±21.79a	0.142±0.018a	0.965	6.7%±0.4%a
	W-P	311.45±24.45c	0.137±0.028a	0.906	3.2%±0.2%c
	W-P→W-M	374.27±29.90b	0.168±0.038a	0.882	7.1%±0.3%a



SOC: 有机碳, DOC: 可溶性有机碳, MBC: 微生物生物量碳, C₀: 潜在矿化有机碳库, SMC: 土壤含水率, BD: 土壤容重。

*表示不同因素间差异显著 ($P \leq 0.05$)。

SOC: soil organic carbon, DOC: dissolved organic carbon, MBC: microbial biomass carbon, C₀: potentially mineralized carbon, SMC: soil moisture content, BD: bulk density. * indicate significant differences between different factors at 0.05 level.

图6 土壤活性碳组分、矿化与环境因子的相关性热图

Figure 6 Heatmap of correlation between soil activate carbon fractions, characteristics of carbon mineralization and environmental factors

秸秆还田会产生碳激发效应,导致土壤有机碳分解加速,在一定程度上决定着土壤碳库的周转速率^[29]。这或可解释本研究中,W-M和W-P→W-M模式土壤秸秆还田量高但土壤有机碳含量低于P→W-M模式的现象。

可溶性有机碳、微生物生物量碳和潜在矿化有机碳等土壤活性有机碳对土壤养分的转化供应有重要影响,是土壤质量状况的重要表征指标^[30-31]。本研究发现,不同轮作方式对土壤活性碳组分有明显影响,P→W-M模式更有利于土壤可溶性有机碳含量及微生物生物量的提升,而W-P→W-M模式则显著降低了20~40 cm各碳组分含量。土壤活性碳组分对环境变化有着高度的敏感性,土壤湿度、容重和秸秆还田量均可影响土壤活性有机碳库积累^[32-34],过高的土壤湿度和容重导致微生物的活性下降,使得分解碳源的微生物生物量减少,影响秸秆碳向活性碳组分的转化。P→W-M模式较低的土壤含水率和容重创造了疏松透气的土壤环境,为微生物繁殖和碳周转提供了适宜的条件,有利于活性碳组分的增加^[35]。而W-P→W-M模式则相反,较高的土壤容重可能是限制活性有机碳库组分含量提升的原因。

3.2 不同花生轮作模式对土壤碳矿化的影响

本研究中不同土层及轮作模式土壤有机碳矿化速率均在培养第1天达到峰值,然后迅速下降并趋于稳定,这与前人研究结果一致^[36-37],可能是由于土壤微生物优先分解由大部分植物残体、相当数量的微生物和周转迅速的微小动物碎片等组成的活性有机碳,

导致有机碳矿化速率在培养前期迅速达到高峰,但随着培养时间的推移,土壤中活性有机碳逐渐减少,微生物开始分解纤维素和木质素等结构复杂的大分子有机物,微生物代谢相对减缓,矿化速率随之降低^[38]。

有机碳矿化是土壤碳循环的重要过程之一,较易受外源物的影响^[39]。W-M模式下的玉米与小麦秸秆还田提高了表层有机碳含量,但秸秆碳稳定性较高,并经土壤团聚化被物理保护,短期内难以进入深层^[40],此外本研究相关性分析表明,容重是限制有机碳和可溶性有机碳含量提升的关键因素,W-M模式表层过高的土壤容重使碳源向下垂直迁移时受阻^[41]。本研究中W-M与W-P→W-M模式累积矿化量相对较高,应与作物残茬等外源物还田有关。作物类型不同导致还田秸秆量以及秸秆成分存在较大差异,W-M与W-P→W-M模式较高的小麦玉米还田量可能产生正向激发效应^[42],促进土壤微生物繁殖,提高土壤碳矿化量。此外,植物根系也具有明显的激发效应,但根际分泌物中的部分碳会残留在土壤中,以补偿激发效应造成的碳损失^[43],如Cheng等^[44]指出,植物根系对土壤有机质分解产生的抑制或促进作用可达-50%~380%,而这种巨大的变异性与土壤和微生物特性的不同以及外源碳投入数量和质量的差异密切相关^[45],这或许是本研究中P→W-M和W-P模式C₀/C_{SOC}值显著降低的原因。前人的研究也证实豆科作物根系可向根际土壤微生物提供有机酸、糖类等根源碳分泌物,调控根际微生物代谢,介导土壤碳转化过程^[46],C₀/C_{SOC}表示土壤有机碳矿化分解作用消耗土壤有机

碳的比例,与土壤固碳能力呈正相关^[47],P→W-M和W-P模式下 C_0/C_{SOC} 值的降低表明这两种模式具有较高的碳固持潜力,而W-M和W-P→W-M模式则相反,土壤固碳潜力较低。

4 结论

(1)相较于CP模式,P→W-M和W-P模式显著提高了0~40 cm土层有机碳含量,降低了土壤潜在矿化有机碳库,更有利于土壤有机碳的固持。

(2)相较于CP模式,P→W-M和W-P模式分别提高了0~40 cm土层和0~20 cm土层可溶性有机碳及微生物生物量碳含量,对促进农业绿色、低碳、可持续发展有积极意义。

(3)W-M和W-P→W-M模式显著提高了 C_0/C_{SOC} 值,虽然具有较高的秸秆还田量,但土壤固碳潜力较低。

参考文献:

- [1] 李春丽,董军,王鸿斌,等.不同利用方式黑钙土有机碳组分剖面分布特征[J].水土保持学报,2022,36(5):304-310,318. LI C L, DONG J, WANG H B, et al. Profile distribution of soil organic carbon components in chernozem soils under different land use types[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(5):304-310, 318.
- [2] 刘红梅,张海芳,赵建宁,等.氮添加对贝加尔茅草草原土壤活性有机碳和碳库管理指数的影响[J].草业学报,2020,29(8):18-26. LIU H M, ZHANG H F, ZHAO J N, et al. Effects of nitrogen addition on labile soil organic carbon and carbon pool management index of *Stipa baicalensis* steppe in Inner Mongolia, China[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2020, 29(8):18-26.
- [3] 闫丽娟,李广,吴江琪,等.黄土高原4种典型植被对土壤活性有机碳及土壤碳库的影响[J].生态学报,2019,39(15):5546-5554. YAN L J, LI G, WU J Q, et al. Effects of four typical vegetations on soil active organic carbon and soil carbon in Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(15):5546-5554.
- [4] 石丽红,李超,唐海明,等.长期不同施肥措施对双季稻田土壤活性有机碳组分和水解酶活性的影响[J].应用生态学报,2021,32(3):921-930. SHI L H, LI C, TANG H M, et al. Effects of long-term fertilizer management on soil labile organic carbon fractions and hydrolytic enzyme activity under a double-cropping rice system of southern China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(3):921-930.
- [5] 郭建红.不同土地利用方式土壤有机碳矿化特征研究[D].南京:南京农业大学,2016. WU J H. The characteristics of soil organic carbon mineralization under different land uses[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2016.
- [6] KING A E, BLES J. Crop rotations for increased soil carbon: perennality as a guiding principle[C]//Ecological applications. Ecological Society of America, 2018:249-261.
- [7] 胡芳,王芳,韩晓增,等.不同土地利用方式下典型黑土区土壤微生物群落演替规律[J].土壤学报,2022,59(5):1238-1247. HU F, WANG F, HAN X Z, et al. Succession of microbial community in typical black soil under different land use pattern[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59(5):1238-1247.
- [8] 赵思腾,师尚礼,陈建纲,等.陇中旱作区不同轮作方式对土壤碳、氮含量及酶活性的影响特征[J].草地学报,2019,27(4):817-824. ZHAO S T, SHI S L, CHEN J G, et al. Effects of different rotation patterns on soil carbon and nitrogen contents and enzyme activities in the arid region of central Gansu[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2019, 27(4):817-824.
- [9] 李雨诺,樊媛媛,曹彬彬,等.关中平原麦玉轮作体系作物秸秆不同还田模式下土壤有机碳和无机碳库变化特征[J].应用生态学报,2021,32(8):2703-2712. LI Y N, FAN Y Y, CAO B B, et al. Soil organic and inorganic carbon pools as affected by straw return modes under a wheat-maize rotation system in the Guanzhong Plain, northwest China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(8):2703-2712.
- [10] 郭金瑞.东北黑土区不同种植模式对玉米产量和土壤质量及温室气体排放影响研究[D].南京:南京农业大学,2015. GUO J R. Impacting of long-term cropping regimes on corn yield and soil quality, and greenhouse gas emissions effects on black soil region of northeast China[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2015.
- [11] 李涵,王朝辉,郝明德,等.黄土高原旱地不同种植模式土壤碳特征评价[J].农业工程学报,2010,26(增刊2):325-330. LI X H, WANG Z H, HAO M D, et al. Evaluation on soil carbon contents under different cropping systems on dryland in Loess Plateau[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(Suppl 2):325-330.
- [12] SIRAMI C, GROSS N, BAILLOD A B, et al. Increasing crop heterogeneity enhances multitrophic diversity across agricultural regions[J]. *PNAS*, 2019, 116(33):16442-16447.
- [13] 李庆凯,刘苹,赵海军,等.玉米根系分泌物缓解连作花生土壤酚酸类物质的化感抑制作用[J].中国油料作物学报,2019,41(6):921-931. LI Q K, LIU P, ZHAO H J, et al. Maize root exudates alleviated allelopathic inhibition of phenolic acids in soil of continuous cropping peanut[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2019, 41(6):921-931.
- [14] 靳海洋,岳俊芹,闫雅倩,等.小麦与不同作物多样化轮作对土壤真菌群落的影响[J].环境科学,2022,43(6):3338-3347. JIN H Y, YUE J Q, YAN Y Q, et al. Response of soil fungal communities in diversified rotations of wheat and different crops[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(6):3338-3347.
- [15] 耿赛男,李岚涛,苗玉红,等.大豆和玉米影响后茬作物氮素供应的研究进展[J].植物营养与肥料学报,2022,28(5):919-932. GENG S N, LI L T, MIAO Y H, et al. Research advances on the mechanisms of soybean and maize influence nitrogen supply in subsequent crops[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2022, 28(5):919-932.
- [16] 高忠坡,倪嘉波,李宁宁,等.我国农作物秸秆资源量及利用问题研究[J].农机化研究,2022,44(4):1-6,25. GAO Z P, NI J B, LI N N, et al. Research on the quantity and utilization of crop straw resources in China[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*,

- 2022, 44(4):1-6, 25.
- [17] 祝瑜, 褚琳琳, 朱文东, 等. 滨海盐渍土壤物化性质与水动力学性质变异[J]. 水土保持学报, 2022, 36(6):379-386. ZHU Y, CHU L L, ZHU W D, et al. Variation of soil physicochemical properties and hydrodynamic properties of coastal saline soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(6):379-386.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005:25-28. BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2005:25-28.
- [19] 俞慎, 李振高. 熏蒸提取法测定土壤微生物量研究进展[J]. 土壤学进展, 1994, 22(6):42-50. YU S, LI Z G. Advances in determination of soil microbial biomass by fumigation extraction[J]. *Progress in Soil Science*, 1994, 22(6):42-50.
- [20] 陈晓芬, 刘明, 江春玉, 等. 不同施肥处理红壤性水稻土团聚体有机碳矿化特征[J]. 中国农业科学, 2018, 51(17):3325-3334. CHEN X F, LIU M, JIANG C Y, et al. Organic carbon mineralization in aggregate fractions of red paddy soil under different fertilization treatments[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(17):3325-3334.
- [21] 罗安焕, 夏东, 王小利, 等. 有机物料对旱作黄壤呼吸及酶活性的影响[J]. 作物研究, 2020, 34(6):568-573. LUO A H, XIA D, WANG X L, et al. Effects of organic materials on respiration and enzyme activity of upland yellow soil[J]. *Crop Research*, 2020, 34(6):568-573.
- [22] SAINJU U M, LENSSEN A W, CAESAR T, et al. Dryland residue and soil organic matter as influenced by tillage, crop rotation, and cultural practice[J]. *Plant & Soil*, 2011, 338:27-41.
- [23] 陈宝书. 牧草饲料作物栽培学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001. CHEN B S. Cultivation of forage crops[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2001.
- [24] BERZSENYI Z, GYÖRFFY B, DANGQUOC L. Effect of crop rotation and fertilization on maize and wheat yields and yield stability in a long-term experiment[J]. *European Journal of Agronomy*, 2000, 13:225-244.
- [25] 刘蕾, 徐梦, 王凌, 等. 引入豆科作物的轮作模式对设施蔬菜土壤微生物群落组成的影响[J]. 华北农学报, 2021, 36(3):203-215. LIU L, XU M, WANG L, et al. Effects of crop rotation with legumes on the composition of microbial community in greenhouse vegetable soils[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2021, 36(3):203-215.
- [26] 贾利华, 王鑫, 张蕊, 等. 根际微生物群落介导植物磷胁迫应答与免疫调控的整合机制[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(2):321-327. JIA L H, WANG X, ZHANG R, et al. Rhizosphere microbial community mediated a synergism regulatory mechanism of phosphorus stress and immunity in plants by the integrated pathway[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(2):321-327.
- [27] 郑永美, 周丽梅, 郑亚萍, 等. 花生主要碳代谢指标与根瘤固氮能力的关系[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(1):75-86. ZHENG Y M, ZHOU L M, ZHENG Y P, et al. Relationship between carbon metabolism indices of peanut leaves and nitrogen fixation ability of nodules[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(1):75-86.
- [28] 谢志煌, 李彦生, 于镇华, 等. 秸秆还田与作物氮素利用关系研究[J]. 土壤与作物, 2016, 5(4):261-268. XIE Z H, LI Y S, YU Z H, et al. Impacts of residue return on nitrogen utilization in crops: a review[J]. *Soils and Crops*, 2016, 5(4):261-268.
- [29] CHEN L, LIU L, QIN S, et al. Regulation of priming effect by soil organic matter stability over a broad geographic scale[J]. *Nature Communications*, 2019, 10:5112.
- [30] 杨艳华, 苏瑶, 何振超, 等. 还田秸秆碳在土壤中的转化分配及对土壤有机碳库影响的研究进展[J]. 应用生态学报, 2019, 30(2):668-676. YANG Y H, SU Y, HE Z C, et al. Transformation and distribution of straw-derived carbon in soil and the effects on soil organic carbon pool: a review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(2):668-676.
- [31] 杨桦, 彭小瑜, 杨淑琪, 等. 滇南喀斯特断陷盆地土地利用方式对土壤有机碳及其活性组分的影响[J]. 生态学报, 2022, 42(17):7105-7117. YANG H, PENG X Y, YANG S Q, et al. Effects of land use types on soil organic carbon and soil labile organic carbon in Karst faulted basin of southern Yunnan[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(17):7105-7117.
- [32] LIU B, XIA H, JIANG C C, et al. 14 year applications of chemical fertilizers and crop straw effects on soil labile organic carbon fractions, enzyme activities and microbial community in rice-wheat rotation of middle China[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 841:156608.
- [33] 唐海明, 程凯凯, 肖小平, 等. 不同冬季覆盖作物对双季稻田土壤有机碳的影响[J]. 应用生态学报, 2017, 28(2):465-473. TANG H M, CHENG K K, XIAO X P, et al. Effects of different winter cover crops on soil organic carbon in a double cropping rice paddy field[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(2):465-473.
- [34] HAO X X, HAN X Z, WANG S Y, et al. Dynamics and composition of soil organic carbon in response to 15 years of straw return in a Mollisol[J]. *Soil and Tillage Research*, 2022, 215:105221.
- [35] 兰延, 黄国勤, 杨滨娟, 等. 稻田绿肥轮作提高土壤养分增加有机碳库[J]. 农业工程学报, 2014, 30(13):146-152. LAN Y, HUANG G Q, YANG B J, et al. Effect of green manure rotation on soil fertility and organic carbon pool[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(13):146-152.
- [36] 丁长欢, 王莲阁, 唐江, 等. 水热变化对三峡水库消落带紫色土有机碳矿化的影响[J]. 环境科学, 2016, 37(7):2763-2769. DING C H, WANG L G, TANG J, et al. Effects of soil moisture and temperature variations on organic carbon mineralization of purple soil in the hydro-fluctuation belt of the Three Gorges Reservoir[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(7):2763-2769.
- [37] 息伟峰, 徐新朋, 赵士诚, 等. 长期施肥下三种旱作土壤有机碳含量及其矿化势比较研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(12):2094-2104. XI W F, XU X P, ZHAO S C, et al. Comparison of organic carbon content and its mineralization potential in three dryland soils under long-term fertilization[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(12):2094-2104.
- [38] 陈甜, 元方慧, 张琳梅, 等. 不同化学性质叶凋落物添加对土壤有机碳矿化及激发效应的影响[J]. 应用生态学报, 2022, 33(10):2602-2610. CHEN T, YUAN F H, ZHANG L M, et al. Effects of addition of leaf litter with different chemical properties on soil organic

- carbon mineralization and priming effect[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(10):2602–2610.
- [39] 段建军, 罗安焕, 李瑞东, 等. 温度对贵州喀斯特黄色石灰土有机碳矿化、水稻秸秆激发效应和 Q_{10} 的影响[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(5):265–280. DUAN J J, LUO A H, LI R D, et al. Temperature remarkably affecting organic carbon mineralization of Karst yellow rendzina, priming effect of rice straw, and Q_{10} in Guizhou Province[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(5):265–280.
- [40] 朱孟涛, 刘秀霞, 王佳盟, 等. 生物质炭对水稻土团聚体微生物多样性的影响[J]. *生态学报*, 2020, 40(5):1–12. ZHU M T, LIU X X, WANG J M, et al. Effects of biochar application on soil microbial diversity in soil aggregates from paddy soil[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(5):1–12.
- [41] 王佳盟, 刘伟, 刘志伟, 等. 生物质炭施用对不同深度稻田土壤有机碳矿化的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39(9):2081–2088. WANG J M, LIU W, LIU Z W, et al. Effects of biochar application on soil organic carbon mineralization at different depths in paddy soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(9):2081–2088.
- [42] HUO C F, LIANG J Y, ZHANG W D, et al. Priming effect and its regulating factors for fast and slow soil organic carbon pools: a meta-analysis[J]. *Pedosphere*, 2022, 32:140–148.
- [43] QIAO N, SCHAEFER D, BLAGODATSKAYA E, et al. Labile carbon retention compensates for CO_2 released by priming in forest soils[J]. *Global Change Biology*, 2014, 20:1943–1954.
- [44] CHENG W, PARTON W J, GONZALEZ M A, et al. Synthesis and modeling perspectives of rhizosphere priming[J]. *New Phytologist*, 2014, 201:31–44.
- [45] FENG J G, TANG M, ZHU B. Soil priming effect and its responses to nutrient addition along a tropical forest elevation gradient[J]. *Global Change Biology*, 2021, 27:2793–2806.
- [46] 白志勇, 任可心, 陈梦雨, 等. N 沉降下川中丘陵地区柏树人工林根系分泌物特征及其介导的根际 C、N 转化过程[J]. *生态学杂志*, 2022, 41(3):454–464. BAI Z Y, REN K X, CHEN M Y, et al. Root exudates characteristics and associated soil C and N transformation processes of *Cupressus funebris* plantation in hilly region of central Sichuan under N deposition[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2022, 41(3):454–464.
- [47] 汤洁, 刘禹晴, 王思宁, 等. 吉林西部盐碱地区稻田土壤有机碳矿化特征[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(2):162–168. TANG J, LIU Y Q, WANG S N, et al. Characteristics of organic carbon mineralization in saline-alkali paddy field in western Jilin Province[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(2):162–168.