

# 核桃大豆间作土壤微生物生物量碳氮、氮素营养与酶活性特征<sup>①</sup>

刘小勇<sup>1</sup>, 任 静<sup>1</sup>, 张 锐<sup>2</sup>, 郭志刚<sup>3</sup>, 彭 海<sup>1</sup>, 韩富军<sup>1</sup>, 刘馨蔚<sup>4</sup>, 徐小强<sup>5</sup>

(1 甘肃省农业科学院林果花卉研究所, 兰州 730070; 2 塔里木大学园艺与林学院, 新疆阿拉尔 843300; 3 天水师范学院生物工程与技术学院, 甘肃天水 741000; 4 甘肃省煤田地质局, 兰州 730030; 5 天水市果树研究所, 甘肃天水 741002)

**摘 要:** 为掌握旱作区核桃大豆间作下土壤质量变化, 探明土壤矿质营养、微生物生物量碳氮和酶活性变化特征及其相关性, 以元林核桃(*Juglans regia* cv. L.)为研究对象, 测定分析了核桃硬核期、坚果成熟期和落叶期 3 个关键物候期核桃大豆间作、核桃单作两种栽培模式下土壤矿质营养、微生物生物量碳(MBC)、微生物生物量氮(MBN)以及酶活性特征。结果表明: ①间作显著提高了核桃生育期土壤有机质(SOM)含量, 降低了核桃生育前期(硬核期和坚果成熟期)0~60 cm 土层土壤碱解氮(AN)、有效磷(AP)含量和表层(0~20 cm)土壤速效钾(AK)含量, 降低了土壤 AN 和 AP 的深层积累, 加速了作物对营养元素的吸收利用, 提高了养分利用效率; ②间作提高了核桃生育期深层(40~60 cm)土壤 MBC 含量和硬核期土壤 MBN 含量, 增加了坚果成熟期和落叶期 0~40 cm 土层土壤 MBN 含量, 维持了深层土壤 MBC 含量; ③间作条件下, 土壤  $\beta$ -葡萄糖苷酶(BG)、磷酸单酯酶(AKP)、 $\alpha$ -纤维素酶(CBH)、N-乙酰葡萄糖胺糖苷酶(NAG)和亮氨酸氨基肽酶(LAP)活性均以坚果成熟期最高、硬核期最低, 而硬核期 5 种酶活性均显著低于单作处理, 坚果成熟期和落叶期均高于单作处理, 表现出较大的波动性; ④Pearson 相关性分析表明, 土壤 MBC 与全氮(TN)、AN 和 SOM 极显著正相关( $P<0.01$ ), 间作下土壤 MBC、MBN 与 AKP 均显著相关( $P<0.05$ ); 土壤 BG、AKP、CBH、NAG 和 LAP 之间均极显著正相关( $P<0.01$ )。综上所述, 旱作区幼龄核桃园间作大豆, 可以显著增加核桃生育期 SOM、AN 和 AP 含量, 降低土壤 AN 和 AP 的深层积累, 提高深层土壤 MBC 含量, 增大坚果成熟期土壤酶活性, 加速作物对营养元素的吸收利用。

**关键词:** 核桃大豆间作; 土壤; 微生物生物量碳氮; 酶活性; 矿质营养; 旱作区

中图分类号: S664.1; S151.9 文献标志码: A

## Changes of Soil Mineral Nutrition, Microbial Biomass Carbon, Nitrogen and Enzyme Activity Under Walnut and Soybean Intercropping in Dry Farming Area

LIU Xiaoyong<sup>1</sup>, REN Jing<sup>1</sup>, ZHANG Rui<sup>2</sup>, GUO Zhigang<sup>3</sup>, PENG Hai<sup>1</sup>, HAN Fujun<sup>1</sup>, LIU Xinwei<sup>4</sup>, XU Xiaoqiang<sup>5</sup>

(1 Institute of Fruit and Floriculture, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou, 730070, China; 2 College of Horticulture and Forestry, Tarim University, Alaer, Xinjiang 843300, China; 3 School of Biological Engineering and Technology, Tianshui Normal University, Tianshui, Gansu 741000, China; 4 Gansu Coalfield Geology Bureau, Lanzhou 730070, China; 5 Tianshui Fruit Research Institute, Tianshui, Gansu 741002, China)

**Abstract:** In order to understand the changes of soil quality under walnut and soybean intercropping in dry farming area, explore the correlations among soil mineral nutrition, microbial carbon and nitrogen and enzyme activity, Yuanlin (*Juglans regia* cv. L.) was selected as the study material, two cultivation modes of walnut and soybean intercropping and walnut monoculture were set, soil mineral nutrition, microbial biomass carbon (MBC) and nitrogen (MBN) and enzyme activities were determined in the hardcore, maturity and deciduous stages of walnut. The results showed that intercropping significantly increased the content of soil organic matter (SOM). The contents of alkali-hydrolyzed nitrogen (AN), available phosphorus (AP) in 0–60 cm soil depth and available potassium (AK) in 0–20 cm soil in hardcore and nut maturity stages were significantly reduced. At the same time, the accumulation of AN and AP were reduced in deep soil, thus the absorption and utilization of nutrients by crops were accelerated. Compared with single cropping, intercropping increased soil MBC content in deep soil (40–60 cm) at the whole growth stage and soil MBN content at the hardcore stage. At maturity and deciduous stages, soil MBN content was increased in

①基金项目: 甘肃省技术创新引导计划项目(23CXNA0003), 国家自然科学基金项目(31860204, 32260412), 新疆建设兵团惠民工程项目(MSSS201902)和“核桃花椒种质创新与资源圃建设”项目(2024LGS04)资助。

作者简介: 刘小勇(1966—), 男, 陕西蓝田人, 硕士, 研究员, 主要从事特色林果营养和生理生态研究工作。E-mail: liuxy6607@163.com

0–40 cm, which maintained soil MBC content in deep soil. Under intercropping conditions, the activities of  $\beta$ -glucosidase (BG), phosphomonoesterase (AKP),  $\alpha$ -cellulase (CBH), N-acetylglucosaminidase (NAG) and leucine aminopeptidase (LAP) in soil were the highest at the maturity stage and the lowest at hardcore stage. The activities of the above enzymes in hardcore stage were significantly lower than those of single cropping, while were higher than those of single cropping in maturity and defoliation stages, which showed great fluctuation. 4) Pearson correlation analysis showed that soil MBC was positively correlated with total nitrogen (TN), AN and SOM ( $P < 0.01$ ). Both soil MBC and MBN were significantly correlated with AKP activity under intercropping ( $P < 0.05$ ). The activities of the five enzymes were positively correlated with each other ( $P < 0.01$ ). In conclusion, interplanting soybean in young walnut orchard in dry farming area can significantly increase the contents of SOM, AN and AP at walnut growth period, reduce the accumulation of AN and AP but increase the content of MBC in deep soil, promote soil enzyme activities at nut maturing stage, thus improve the absorption and utilization of nutrients by crops.

**Key words:** Walnut and soybean intercropping; Soil; Microbial biomass carbon and nitrogen; Enzyme activity; Mineral nutrition; Dry farming areas

氮素是植物细胞中含量最高的营养元素之一。施氮能大幅提高作物产量,但其氮素利用效率随施氮量增大而显著下降。过量施氮会导致树体营养生长过旺和果实品质下降,同时会加大农业投资。林豆间作能显著提高土地利用效率,有效缓解过量施肥造成的土壤污染<sup>[1]</sup>。

土壤微生物生物量是土壤有机物转化、碳氮循环的重要介质<sup>[2]</sup>,是植物营养物质的源与库<sup>[3]</sup>,代表着土壤养分的活性部分,参与养分循环<sup>[4]</sup>。土壤微生物生物量对土壤养分的转化和供应至关重要<sup>[5]</sup>,常被作为评价土壤肥力和土壤质量变化的关键指标<sup>[6]</sup>。种植模式<sup>[7]</sup>、土壤耕作<sup>[8]</sup>、施肥技术措施<sup>[9]</sup>以及植物种类<sup>[10–11]</sup>、生态区域<sup>[12]</sup>等均影响土壤微生物生物量和土壤酶活性。在土壤微生物生物量中,土壤微生物生物量碳和氮是土壤有效养分的重要来源,与土壤有机质、全氮、碱解氮等显著相关<sup>[13]</sup>。

核桃(*Juglans regia* L.)是重要的木本油料和生态树种之一,核桃豆科套种是旱作区常用的间作模式。绝大多数固氮生物不能在非豆科植物上固氮,豆科植物不需要外源施氮就可以进行正常的生长发育,其与根瘤菌形成的共生固氮体系可补充或替代土壤中缺少的氮素<sup>[14]</sup>。被豆科植物根系固定的氮素,除满足自身生育需求外,也会为同一土壤环境下的核桃树提供氮素营养,这有利于减少核桃园氮肥施用量,提高氮素利用效率。合理的种植方式有利于改善土壤微生物结构,增加土壤酶活性和土壤微生物生物量<sup>[13]</sup>。果园间作豆科植物能显著增加土壤有机碳、微生物生物量碳、全氮含量和土壤酶活性<sup>[15–16]</sup>。目前,有关土壤微生物生物量碳氮及酶活性的相关研究较多,但对林农间作,特别是林豆间作系统土壤微生物生物量碳氮的研究报道较少。因此,本文以旱作区幼龄核桃园间作豆科植物模式为研究对象,以核桃单作模式为对

照,通过测定分析核桃大豆间作下土壤矿质营养、微生物生物量碳氮和酶活性,明确其变化特征及其相关关系,探明间作大豆对核桃园土壤氮素营养、微生物和酶活性的影响及作用机制,以为提高黄土高原旱作区核桃产量和品质、实现氮素减施提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验地位于兰州市安宁区甘肃主要果树种质资源圃(36°6' N, 103°42' E),海拔 1 530 m,年平均气温 9.6 °C,年平均降水量 329 mm,无霜期 196 d。试验园土壤为黄绵土,0 ~ 20 cm 土层土壤有机质、全氮、全磷、全钾含量分别为 22.3、1.45、1.18 和 22.06 g/kg,碱解氮、有效磷、速效钾含量分别为 117.71、28.90 和 334.30 mg/kg,土壤 pH 8.37。试验园面积 600 m<sup>2</sup>,常规栽培管理,有灌溉条件。

供试核桃品种为元林(*Juglans regia* cv. L.),大豆品种为陇黄 3 号(*Glycine max* cv. (Linn.))。

### 1.2 试验设计

采用种植袋栽植方法进行试验。种植袋材料为无纺布,透气、透水,恒态佐农园林资材生产。自制种植袋规格:直径 1.5 m、高 0.8 m 的圆柱形。每个种植袋土壤容积为 1.4 m<sup>3</sup>,装入试验园土壤。试验设置核桃大豆间作(以下简称:间作, T1)和核桃单作(以下简称:单作, T2)2 个处理。于 2019 年春季在每个种植袋内栽植 1 株 2 年龄元林核桃嫁接苗,核桃树干高 60 cm、冠径 80 cm,树体生长发育一致。间作处理在距核桃主干 50 cm 两侧分别种植 1 行大豆,每袋共两行 10 株,方向与核桃行向相同。大豆间苗后株行距为 0.2 m×0.5 m。试验在同一地块进行,分 3 个试验小区,每个小区面积 150 m<sup>2</sup>,小区内重复 3

次,每次重复 3 株,不同处理小区内随机排列,每个小区每个处理各 9 株,3 个小区共 54 株核桃树。处理间设置保护行和保护株,肥水管理一致。试验重复进行 2 年。各处理田间布置如图 1 所示。

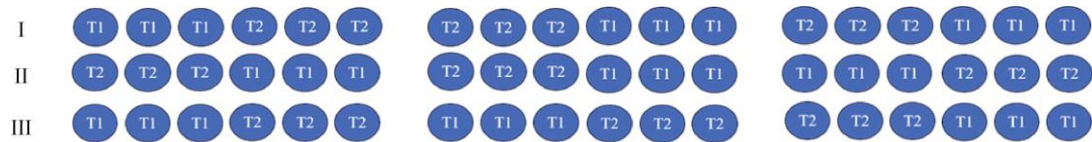


图 1 各处理田间布置图  
Fig. 1 Field layout of each treatment

分别于核桃硬核期(6 月 25 日)、坚果成熟期(9 月 10 日)和落叶期(10 月 30 日)3 个物候期按照 0 ~ 20、20 ~ 40 和 40 ~ 60 cm 三个土层采集核桃根际土壤。土样及时送实验室风干、研磨、过筛后,进行相关指标的测定。

**1.3 测定指标与方法**

**1.3.1 土壤有机质、矿质营养及 pH 测定** 各指标测定方法如表 1 所示。

表 1 土壤样品各项指标测定方法  
Table 1 Determination methods of soil nutritions

检测项目	单位	检测方法
有机质(SOM)	g/kg	NY/T 1121.6—2006 土壤检测 第 6 部分:土壤有机质的测定 <sup>[17]</sup>
全氮(TN)	g/kg	NY/T1121.24—2012 土壤检测 第 24 部分:土壤全氮的测定自动定氮仪法 <sup>[18]</sup>
全磷(TP)	g/kg	硫酸-高氯酸消解,钼锑抗比色法 <sup>[19]</sup>
全钾(TK)	g/kg	氢氧化钠熔融法 <sup>[20]</sup>
碱解氮(AN)	g/kg	DB51/T 1875—2014 土壤碱解氮的测定 <sup>[21]</sup>
有效磷(AP)	mg/kg	NY/T 1121.7—2014 土壤检测 第 7 部分:土壤有效磷的测定 <sup>[22]</sup>
速效钾(AK)	mg/kg	NY/T 889—2004 土壤速效钾和缓效钾的测定 <sup>[23]</sup>
pH		NY/T 1377—2007 土壤 pH 的测定 <sup>[24]</sup>

**1.3.2 土壤微生物生物量碳(MBC)和氮(MBN)测定** 土壤 MBC 和 MBN 采用氯仿熏蒸-K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 浸提法<sup>[25]</sup>,浸提液过 0.45 μm 水膜,分别采用总有机碳分析仪(Multi N/C 2100, Analytik, Jena, Germany)和连续流动分析仪(San++, Skalar, 荷兰)测定。

**1.3.3 土壤酶活性测定** β-葡糖苷酶(β-glucosidase, BG)、磷酸单酯酶(alkaline phosphatase, AKP), α-纤维素酶(α-D-cellobiohydrolase, CBH)、N-乙酰葡萄糖胺糖苷酶(N-acetylglucosaminidase, NAG)和亮氨酸氨基肽酶(L-leucine aminopeptidase, LAP)活性采用微孔板荧光法测定<sup>[26]</sup>。

**1.4 数据处理与分析**

采用 Excel 2010、SPSS 21.0 进行数据处理与分析。

**2 结果与分析**

**2.1 土壤有机质、矿质营养和 pH 特征**

间作和单作两处理在核桃硬核期、坚果成熟期和落叶期 0 ~ 20(表层)、20 ~ 40(中层)和 40 ~ 60 cm(下层)土层土壤矿质营养、有机质和 pH 的变化特征不同。

硬核期,随土壤深度的增加,不同处理土壤

SOM、AN、AP 和 AK 含量均呈下降趋势;间作处理表层和中层土壤 SOM 含量均显著高于单作处理,而单作处理不同土层 AN 和 AP 含量以及表层 AK 含量显著高于间作处理,说明间作条件下植株吸收土壤速效营养的能力较强,降低了土壤 AN 和 AP 的深层积累,从而提高了养分利用率。不同土层间作处理 pH 显著高于单作处理,但相同处理土层间差异不大。

坚果成熟期,不同处理间 SOM、速效养分变化特征与硬核期相同,即间作处理的 SOM 含量大于单作处理,而单作处理的 AN、AP 以及表层 AK 含量显著高于间作处理。与硬核期相比,土壤 AN、AP、AK 含量均呈下降的趋势;而土壤 pH 呈不同的变化特征,即表层和深层土壤 pH 均为单作处理显著高于间作处理。

落叶期,表层和深层 SOM 含量和 pH 均表现为单作处理大于间作处理,中层则处理间无显著差异;间作处理不同土层土壤 AN 和表层 AP 含量显著高于单作处理;而单作处理下层土壤 AP 含量显著高于间作处理,中层 AP 含量两处理差异不大。土壤 AK 含量与硬核期和坚果成熟期变化特征相同,即表层土壤 AK 含量单作处理显著高于间作处理,而两处理间中、

下层土壤 AK 含量没有显著差异。

黄土高原地区土壤富钾,削弱了植物间作对土壤钾营养的影响。在核桃硬核期和坚果成熟期,土壤表层 AK 含量变化表现出与 AN 和 AP 相同的特征,即间作处理小于单作处理,而落叶期两处理间土壤 AK 含量变化与硬核期和坚果成熟期相反。核桃不同生育期间作处理对中、下层土壤 AK 的影响作用较小,与单作处理土壤 AK 并没有显著差异。

表 2 核桃主要物候期土壤有机质、矿质营养和 pH 特征  
Table 2 Characteristics of SOM, mineral nutritions and pH in three growth stages of walnut

生育期	土层(cm)	处理	SOM (g/kg)	AN (mg/kg)	AP (mg/kg)	AK (mg/kg)	pH
硬核期	0 ~ 20	间作	22.47 ± 0.86 a	70.68 ± 0.55 b	32.20 ± 0.86 b	334.76 ± 1.05 b	8.34 ± 0.03 a
		单作	18.45 ± 0.48 b	131.22 ± 2.22 a	42.59 ± 0.48 a	371.51 ± 2.36 a	8.25 ± 0.02 b
	20 ~ 40	间作	17.19 ± 0.35 a	36.03 ± 0.80 b	24.77 ± 0.35 b	297.14 ± 1.38 a	8.31 ± 0.03 a
		单作	16.24 ± 0.21 b	105.94 ± 2.58 a	33.97 ± 0.21 a	307.78 ± 2.88 a	8.21 ± 0.03 b
	40 ~ 60	间作	14.01 ± 0.47 a	26.87 ± 0.30 b	20.27 ± 0.47 b	278.78 ± 0.54 a	8.32 ± 0.03 a
		单作	13.60 ± 0.31 a	85.34 ± 1.73 a	38.77 ± 0.31 a	277.63 ± 2.00 a	8.27 ± 0.03 b
坚果成熟期	0 ~ 20	间作	22.74 ± 0.47 a	68.01 ± 0.72 b	28.92 ± 0.47 b	307.54 ± 1.04 b	8.31 ± 0.03 b
		单作	19.78 ± 1.21 b	126.33 ± 2.98 a	40.23 ± 1.21 a	335.96 ± 3.25 a	8.37 ± 0.02 a
	20 ~ 40	间作	18.51 ± 0.85 a	31.60 ± 0.74 b	21.73 ± 0.85 b	279.60 ± 0.97 a	8.27 ± 0.02 a
		单作	17.63 ± 0.98 b	95.28 ± 2.23 a	31.30 ± 0.98 a	286.30 ± 3.00 a	8.28 ± 0.04 a
	40 ~ 60	间作	15.65 ± 0.25 a	25.35 ± 0.48 b	17.87 ± 0.25 b	256.68 ± 0.70 a	8.23 ± 0.04 b
		单作	14.38 ± 0.62 b	77.77 ± 1.20 a	38.00 ± 0.62 a	261.51 ± 1.48 a	8.31 ± 0.04 a
落叶期	0 ~ 20	间作	19.47 ± 0.87 b	126.11 ± 2.14 a	31.57 ± 0.87 a	308.18 ± 2.47 b	8.27 ± 0.02 b
		单作	22.64 ± 1.53 a	117.09 ± 4.07 b	29.23 ± 1.53 b	377.81 ± 4.47 a	8.55 ± 0.02 a
	20 ~ 40	间作	20.48 ± 1.40 a	128.18 ± 2.53 a	30.13 ± 1.40 a	330.18 ± 2.67 a	8.19 ± 0.03 a
		单作	20.53 ± 0.90 a	94.35 ± 2.87 b	31.43 ± 0.90 a	323.94 ± 3.22 a	8.21 ± 0.03 a
	40 ~ 60	间作	16.75 ± 1.00 b	109.32 ± 1.53 a	25.33 ± 1.00 b	259.63 ± 1.76 a	8.26 ± 0.03 b
		单作	19.32 ± 1.10 a	69.07 ± 4.30 b	28.47 ± 1.10 a	276.28 ± 4.74 a	8.35 ± 0.02 a

注：同列不同小写字母表示同一物候期同一土层两处理间差异显著(P<0.05)；下表同。

图 2 显示了核桃不同生育期 0 ~ 60 cm 土层 SOM、TN、TP、TK、AN、AP、AK 和 pH 的变化特征。与单作处理相比,间作处理 SOM 含量在硬核期和坚果成熟期均较高,而落叶期较低,表现为相对平缓的变化趋势,保持了核桃生育期较高的养分供应。硬核期和坚果成熟期间作处理土壤 TN、TP、AN、AP 及 AK 含量均低于单作处理,表明间作处理促进了核桃生育期对土壤养分的吸收利用,导致土壤中养分特别是速效养分的消耗,从而造成养分含量的降低。随着核桃逐渐进入休眠期,间作条件下核桃对养分的吸收利用量也在逐渐减少,土壤中养分含量逐渐增高;而此时大豆已经收获,间作与单作处理土壤中养分含量逐渐趋于一致。间作显著提高了核桃硬核期土壤 pH,而降低了坚果成熟期和落叶期土壤 pH。

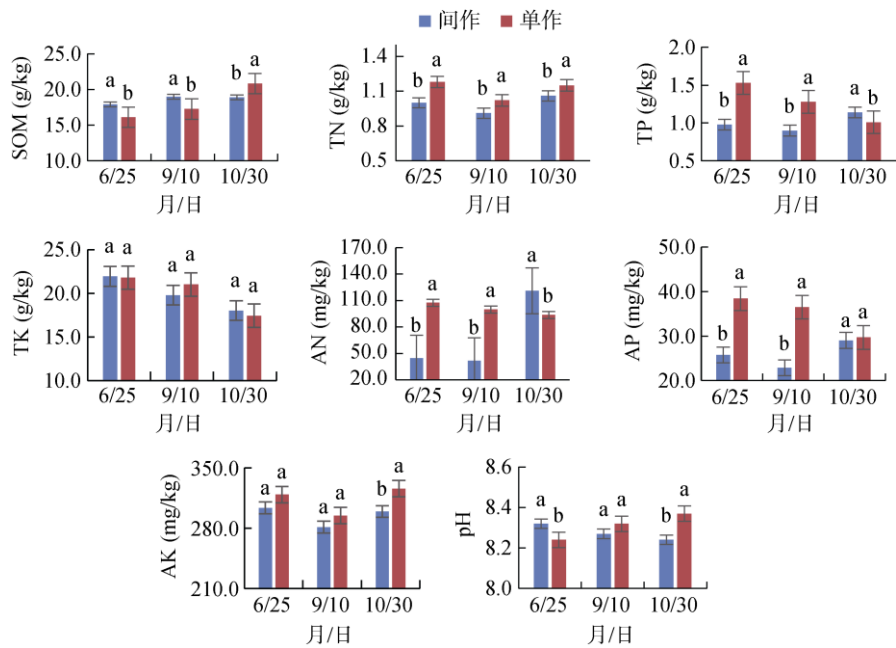
2.2 土壤微生物生物量碳氮特征

土壤微生物生物量是评价土壤肥力和土壤质量变化的关键指标,其中土壤 MBC、MBN 是土壤有效养分的重要来源,不同种植模式会影响土壤微生物生

物量和土壤酶活性。由表 3 可见,种植模式及土层深度不同,土壤 MBC 和 MBN 随核桃生育进程呈不同的变化趋势。

硬核期,间作和单作处理土壤 MBC 含量均随土壤深度增加而显著降低,间作处理降幅逐渐减弱,间作和单作处理表、中层土壤 MBC 含量差异不显著,但下层间作处理显著高于单作处理,表明间作能稳定维持深层土壤 MBC,具有较强的固碳能力。间作处理表层土壤 MBN 含量显著低于单作处理,而下层显著高于单作处理。间作处理 MBC/MBN 值表现为下层>表层>中层,单作处理则为表层>中层>下层。

坚果成熟期,间作和单作处理土壤 MBC 含量均表现为表层土壤显著高于中、下层。与硬核期变化特征相同,间作处理下层土壤 MBC 含量显著高于单作处理,但表层和中层则两处理无显著差异,表现出深层土壤的固碳能力。间作和单作处理土壤 MBN 含量变化趋势基本相同,均为中层最高;间作处理表层和中层土壤 MBN 含量显著大于单作处理,而下层二者



(图中不同小写字母表示同一时期不同处理间差异在  $P<0.05$  水平显著, 下同)

图 2 核桃不同生育期 0~60 cm 土层 SOM、TN、TP、TK、AN、AP、AK 和 pH 特征

Fig. 2 Characteristics of SOM, TN, TP, TK, AN, AP, AK and pH in 0–60 cm soil layers at different growth stages of walnut

表 3 不同处理土壤 MBC、MBN 变化特征

Table 3 Characteristics of soil MBC and MBN under different treatments

生育期	土层(cm)	处理	MBC(mg/kg)	MBN(mg/kg)	MBC/MBN
硬核期	0~20	间作	128.99 ± 8.61 a	15.06 ± 2.57 a	8.69 ± 1.15 b
		单作	139.87 ± 10.97 a	15.07 ± 1.52 a	9.33 ± 1.04 a
	20~40	间作	114.05 ± 7.04 a	15.10 ± 1.12 a	7.56 ± 0.37 b
		单作	112.48 ± 8.95 a	13.30 ± 0.62 b	8.45 ± 0.38 a
	40~60	间作	108.47 ± 8.08 a	14.72 ± 2.54 a	7.49 ± 1.17 a
		单作	87.26 ± 4.66 b	11.36 ± 1.38 b	7.75 ± 0.90 a
坚果成熟期	0~20	间作	135.41 ± 7.23 a	16.59 ± 1.08 a	8.17 ± 0.15 b
		单作	148.71 ± 8.35 a	9.76 ± 1.66 b	15.52 ± 2.74 a
	20~40	间作	119.58 ± 7.68 a	18.99 ± 4.44 a	6.56 ± 1.74 b
		单作	121.42 ± 7.16 a	10.72 ± 3.18 b	12.05 ± 3.82 a
	40~60	间作	117.93 ± 6.05 a	12.17 ± 2.43 a	9.92 ± 2.79 a
		单作	93.96 ± 4.34 b	9.72 ± 1.92 b	9.93 ± 2.11 a
落叶期	0~20	间作	147.98 ± 8.63 a	40.11 ± 2.27 a	3.69 ± 1.74 b
		单作	159.29 ± 8.24 a	32.24 ± 1.93 b	4.94 ± 0.11 a
	20~40	间作	142.36 ± 7.14 a	36.07 ± 2.55 a	3.95 ± 0.09 a
		单作	119.02 ± 7.18 b	28.75 ± 4.14 b	4.18 ± 0.46 a
	40~60	间作	144.36 ± 5.78 a	20.99 ± 3.14 a	6.98 ± 1.05 a
		单作	123.37 ± 4.83 b	22.21 ± 1.78 a	5.57 ± 0.31 b

差异不显著。单作处理 MBC/MBN 值随土壤深度增加呈先增后降特征, 间作处理则表现为下层土壤最高、中层最低。与硬核期相比, 间作处理表层和中层土壤 MBC/MBN 值升高且低于单作处理, 而下层土壤单作处理两个时期均显著低于间作处理。

与硬核期和坚果成熟期土壤 MBC 变化不同, 落叶期不同处理随土壤深度增加 MBC 含量降幅减小或稍有增加, 间作处理中、下层土壤 MBC 含量显著高于单作处理, 二者表层土壤则无显著差异; 间作处理不同土层间土壤 MBC 含量差异不大, 单作处理则表

现为表层土壤显著高于中、下层,证明间作对土壤中、下层 MBC 含量具有稳定保持作用。随土壤深度增加,间作和单作处理土壤 MBN 含量均显著降低;间作处理表层和中层土壤 MBN 含量显著高于单作处理,下层土壤二者间则差异不显著。与硬核期和坚果成熟期相比,不同土层间作和单作处理的 MBC/MBN 值均极显著降低,且均以下层土壤最高。

从图 3 中可见,随核桃生育进程,间作和单作处理土壤 MBC 和 MBN 含量均呈升高趋势,均以落叶期最高。核桃不同生育期 MBC 和 MBN 含量均为间作>单作。间作处理的 MBC/MBN 值为持续降低的变化特征,而单作处理为“先升高再降低”的趋势;间

作和单作处理的 MBC/MBN 值均为落叶期最低,且单作处理坚果成熟期显著高于间作处理,而硬核期和落叶期二者差异不大。

2.3 土壤酶活性特征

土壤酶主要来源于土壤中植物根系、微生物、动物细胞分泌物及其残体分解物,参与土壤中腐殖质的合成与分解等生化过程及土壤肥力形成与演化的全过程。土壤酶活性表征土壤酶的存在和酶促反应速度,评估土壤营养物质转化和土壤肥力状况。土壤酶活性与土壤理化性质、土壤肥力和农业措施等密切相关。由表 4 中可见,间作和单作处理不同时期土壤酶活性呈不同趋势的显著性变化。

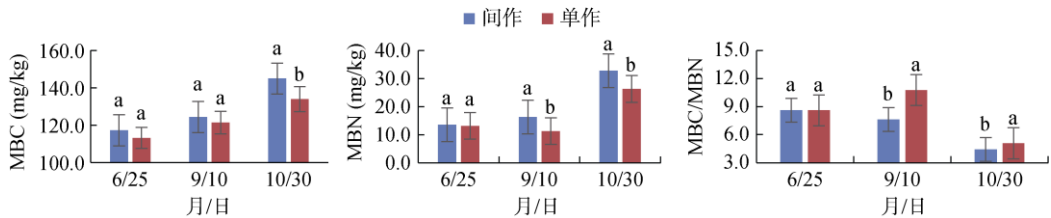


图 3 核桃不同生育期 0~60 cm 土层土壤 MBC、MBN 变化规律  
Fig. 3 Changes of MBC and MBN in 0–60 cm soil layers at different growth stages of walnut

表 4 不同处理土壤酶活性变化

Table 4 Changes of soil enzyme activities under different treatments

生育期	土层 (cm)	处理	BG (nmol/(g·h))	AKP (nmol/(g·h))	CBH (nmol/(g·h))	NAG (nmol/(g·h))	LAP (nmol/(g·h))
硬核期	0~20	间作	26.29 ± 2.15 b	108.06 ± 6.85 b	3.55 ± 0.19 b	2.91 ± 0.08 b	26.46 ± 1.00 b
		单作	73.58 ± 3.12 a	134.78 ± 5.98 a	17.23 ± 0.90 a	5.73 ± 0.21 a	58.21 ± 2.87 a
	20~40	间作	16.90 ± 1.10 b	88.23 ± 3.63 b	2.09 ± 0.10 b	1.43 ± 0.06 b	20.11 ± 1.17 b
		单作	62.34 ± 3.17 a	119.27 ± 7.15 a	13.11 ± 0.50 a	4.66 ± 0.27 a	52.19 ± 2.51 a
	40~60	间作	20.22 ± 1.64 b	104.52 ± 4.61 a	4.55 ± 0.16 b	1.20 ± 0.05 b	24.91 ± 1.30 b
		单作	60.87 ± 3.00 a	103.77 ± 6.70 a	12.85 ± 0.52 a	4.03 ± 0.12 a	46.55 ± 2.61 a
坚果成熟期	0~20	间作	59.90 ± 2.67 b	110.92 ± 7.12 a	12.34 ± 0.67 b	4.08 ± 0.20 b	59.01 ± 3.05 a
		单作	64.54 ± 2.77 a	112.47 ± 5.37 a	14.94 ± 0.95 a	4.85 ± 0.14 a	50.22 ± 2.44 b
	20~40	间作	72.46 ± 3.22 a	126.37 ± 6.18 a	21.49 ± 1.24 a	5.61 ± 0.26 a	55.42 ± 2.22 a
		单作	40.97 ± 2.16 b	102.06 ± 7.12 b	7.63 ± 0.40 b	3.39 ± 0.10 b	43.56 ± 2.33 b
	40~60	间作	55.15 ± 2.67 a	117.45 ± 5.93 a	7.25 ± 0.51 a	2.77 ± 0.14 a	49.97 ± 2.69 a
		单作	40.22 ± 1.96 b	97.45 ± 4.53 b	7.13 ± 0.48 a	2.94 ± 0.08 a	37.30 ± 1.75 b
落叶期	0~20	间作	44.19 ± 2.05 a	141.33 ± 6.42 a	9.04 ± 0.38 a	4.89 ± 0.19 a	47.88 ± 2.39 a
		单作	43.15 ± 2.82 a	85.52 ± 3.35 b	8.10 ± 0.52 b	2.00 ± 0.09 b	29.13 ± 1.80 b
	20~40	间作	47.03 ± 2.41 a	106.84 ± 4.20 a	9.87 ± 0.64 a	3.11 ± 0.24 a	36.42 ± 1.53 a
		单作	22.54 ± 1.84 b	69.45 ± 3.67 b	3.35 ± 0.14 b	1.33 ± 0.05 b	26.51 ± 1.41 b
	40~60	间作	35.57 ± 2.30 a	98.62 ± 5.20 a	7.05 ± 0.63 a	1.23 ± 0.12 a	30.58 ± 2.12 a
		单作	17.83 ± 1.53 b	62.44 ± 3.98 b	2.21 ± 0.16 b	0.87 ± 0.04 b	25.16 ± 1.25 b

硬核期,间作处理不同土层 β-葡萄糖苷酶(BG)、磷酸单酯酶(AKP)、α-纤维素酶(CBH)、亮氨酸氨基肽酶(LAP)和 β-乙酰葡萄糖胺糖苷酶(NAG)5 种酶活性几乎均显著低于单作处理。

坚果成熟期和落叶期,在土壤垂直分布上,单作

处理的 5 种酶活性均呈下降趋势,表层土壤最高,而中、下层差异不大。随土壤深度增加,间作处理的 BG 和 CBH 活性为“升-降”的变化特征; AKP 和 NAG 活性在坚果成熟期为“升-降”特征,而落叶期为下降趋势; LAP 活性在两个时期均为下降的特征。



图 4 显示, 核桃不同生育期 0~60 cm 土壤酶活性呈不同趋势的变化特征。随核桃生育进程, 间作处理的 5 种酶活均呈“先升高后下降”的趋势, 均表现为坚果成熟期酶活性最高, 硬核期最低; 而单作处理

的 5 种酶活均呈下降的趋势, 硬核期最高, 落叶期最低。间作处理的 5 种酶活性在硬核期均显著低于单作处理, 而在坚果成熟期和落叶期均高于单作处理, 表现出较大的波动性。

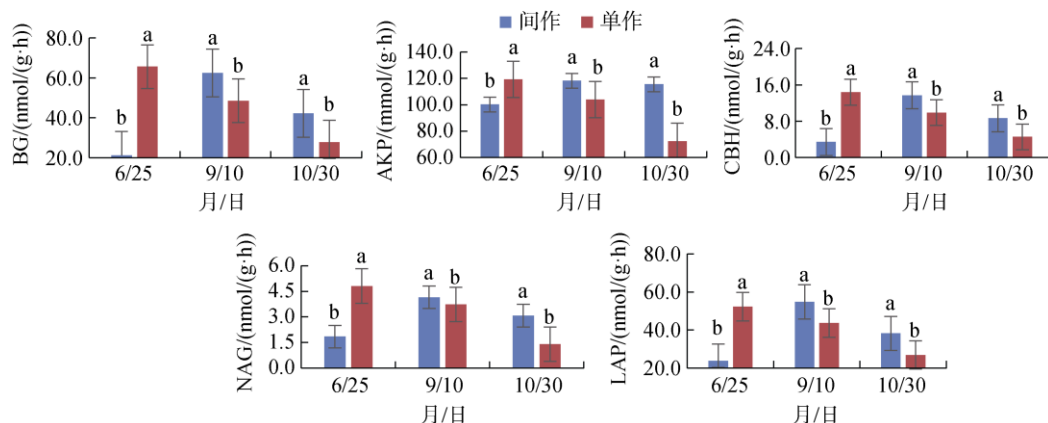


图 4 核桃不同生育期 0~60 cm 土层土壤酶活性特征

Fig. 4 Characteristics of soil enzyme activities in 0~60 cm soil layers at different growth stages of walnut

## 2.4 土壤微生物量碳氮与土壤矿质营养、有机质和 pH 的相关性

本试验结果表明, 不同处理土壤 MBC 和 MBN 与土壤矿质营养、SOM 和 pH 存在一定的相关性 (表 5)。土壤 MBC 与 TN、AN 和 SOM 呈极显著正相关, 而与 TK 为极显著负相关; 间作处理的土壤 MBC 与 TP 和 AP 极显著正相关, 而单作处理的土壤 MBC 与 TP 极显著负相关, 与 AK 和 pH 极显著正相关。土壤 MBN 与 TN、TP、AP、AK、SOM 和 pH 无显著相关性, 与 TK 为极显著或显著负相关; 间作处理的土壤 MBN 与 AN 显著正相关。土壤矿质营养元素之间也表现不同的相关性。间作条件下, 土壤 TN 与 TP、AN、AP、AK 和 SOM, TP 与 AN、AP、AK 和 SOM, TK 与 AN 和 pH 均极显著正相关; AN 与 AP 极显著正相关, 与 AK 和 SOM 显著正相关; AP 与 AK 和 SOM 极显著正相关; AK 与 SOM 极显著正相关。单作条件下, 土壤 TN 与 AN、AK 和 SOM 极显著正相关; TP 与 TK、AP 极显著正相关, 与 SOM 极显著负相关; TK 与 AP 极显著正相关, 与 SOM 极显著负相关, 与 AK 和 pH 显著负相关; AN 与 AK 极显著正相关, 与 AP、SOM 显著正相关; AP 与 SOM 显著负相关; AK 与 SOM 极显著正相关; SOM 与 pH 极显著正相关。

## 2.5 土壤微生物量碳氮与酶活性的相关性

不同处理土壤 MBC、MBN 与土壤酶活性之间相关性差异显著程度不同。从表 6 中可见, 间作处理的土壤 MBC 和 MBN 均与 AKP 显著相关, 而单作处理下没有显著相关性; 间作和单作处理的土壤 MBC 和

MBN 与 BG、CBH、NAG 以及 LAP 均没有显著相关性。BG、AKP、CBH、NAG 和 LAP 5 种酶之间均极显著相关。

## 3 讨论

### 3.1 林豆间作土壤速效养分变化

林农间作改变了土地利用方式, 提高了土地利用效率。果园间作豆科作物, 能充分利用豆科作物根瘤菌固定的氮, 补充或替代部分土壤氮素, 从而减少氮素施用量, 提高氮素利用效率。间作显著提升了豆科植物的生物固氮效率<sup>[27]</sup>, 有利于氮素从豆科作物向非豆科作物的移动和土壤养分的富集<sup>[28]</sup>。核桃大豆间作促进了氮素的吸收利用及转移<sup>[29]</sup>。土壤中速效养分是能被植物吸收利用、保证植物获得高产优质的基础, 是当季土壤肥力的重要体现。本研究中, 随着核桃生长发育进程, 间作显著降低了核桃硬核期和坚果成熟期 0~60 cm 土壤碱解氮、有效磷和 0~20 cm 速效钾含量, 说明核桃大豆间作系统加速了土壤速效养分的吸收和转移, 降低了土壤碱解氮和有效磷的深层积累, 显著提高了土壤营养的吸收利用效率。同时间作显著提高了核桃生育期土壤有机质含量, 从而提升了土壤质量, 这与相关研究结论一致<sup>[15]</sup>。在核桃落叶期, 随着外界气温逐渐降低, 核桃树开始准备休眠, 其根系吸收能力也逐渐减弱, 其吸收利用的氮素营养明显减少, 同时大豆成熟收割, 除大豆植株直接带走的氮素营养外, 其根系前期固定的氮素也会在土壤中积累, 相比单作, 此期间作土壤速效氮含量较前期明显升高。

表 5 不同处理土壤微生物生物量碳氮与土壤矿质营养、有机质和 pH 相关系数矩阵

Table 5 Correlation coefficient matrix between soil microbial biomass carbon and nitrogen with soil mineral nutritions, SOM and pH under different treatments

	处理	MBC	MBN	TN	TP	TK	AN	AP	AK	SOM	pH
MBC	间作	1									
	单作	1									
MBN	间作	0.387*	1								
	单作	0.264	1								
TN	间作	0.599**	0.218	1							
	单作	0.598**	0.311	1							
TP	间作	0.782**	0.344	0.859**	1						
	单作	-0.650**	-0.270	-0.194	1						
TK	间作	-0.518**	-0.529**	-0.066	-0.314	1					
	单作	-0.580**	-0.464*	-0.311	0.665**	1					
AN	间作	0.869**	0.468*	0.655**	0.884**	-0.582**	1				
	单作	0.708**	0.073	0.756**	-0.159	-0.038	1				
AP	间作	0.674**	0.300	0.946**	0.894**	-0.229	0.755**	1			
	单作	-0.137	-0.373	0.165	0.674**	0.503**	0.436*	1			
AK	间作	0.327	0.126	0.826**	0.593**	-0.089	0.439*	0.838**	1		
	单作	0.793**	0.200	0.886**	-0.331	-0.400*	0.858**	0.134	1		
SOM	间作	0.518**	0.139	0.873**	0.638**	-0.158	0.447*	0.825**	0.788**	1	
	单作	0.856**	0.289	0.529**	-0.832**	-0.827**	0.437*	-0.440*	0.714**	1	
pH	间作	-0.149	-0.190	0.137	-0.057	0.677**	-0.368	0.101	0.136	0.120	1
	单作	0.621**	0.236	0.100	-0.283	-0.482*	0.187	-0.307	0.358	0.534**	1

注：\*、\*\*分别表示在  $P<0.05$ 、 $P<0.01$  水平(双侧)上显著相关；下表同。

表 6 不同处理土壤微生物生物量碳氮与酶活性相关系数矩阵

Table 6 Correlation coefficient matrix of soil microbial biomass carbon and nitrogen with enzyme activities under different treatments

	处理	MBC	MBN	BG	AKP	CBH	NAG	LAP
MBC	间作	1						
	单作	1						
MBN	间作	0.387*	1					
	单作	0.264	1					
BG	间作	0.251	0.135	1				
	单作	0.131	-0.186	1				
AKP	间作	0.391*	0.395*	0.607**	1			
	单作	0.095	-0.197	0.943**	1			
CBH	间作	0.160	0.183	0.898**	0.551**	1		
	单作	0.171	-0.160	0.993**	0.931**	1		
NAG	间作	0.300	0.315	0.796**	0.808**	0.802**	1	
	单作	0.048	-0.257	0.962**	0.973**	0.963**	1	
LAP	间作	0.275	0.131	0.939**	0.698**	0.788**	0.811**	1
	单作	0.009	-0.263	0.934**	0.970**	0.931**	0.985**	1

3.2 林豆间作土壤微生物生物量碳氮与酶活性变化

土壤微生物生物量碳氮含量的多少直接影响土壤养分含量及其养分供应能力<sup>[30]</sup>，其碳氮比(MBC/MBN)是描述土壤微生物群落结构的重要指标，当

MBC/MBN 值较高时，表明土壤微生物中真菌比重较大，比值较低时则细菌比重较大<sup>[31]</sup>。一般来说，土壤真菌的碳氮比为 7 ~ 12，而细菌为 3 ~ 6<sup>[32]</sup>。本研究中，核桃落叶期 MBC/MBN 值显著降低，其值在 3.68 ~ 6.38，是否说明了此期土壤微生物是以细菌为



主? 这有待于进一步验证。除环境因素外,生物间相互作用也会显著影响土壤微生物群落。研究表明,不同植物种类<sup>[33-34]</sup>、间作条件<sup>[35]</sup>均能显著影响土壤微生物和土壤酶活性,而种植豆科作物可以为间作物提供氮供应,维持良好的土壤碳氮比,并加速氮素养分的释放<sup>[36]</sup>。本研究结果表明,与单作相比,核桃大豆间作显著提高了土壤 MBC 和 MBN 含量,特别是提高和维持了核桃生育期深层土壤(40~60 cm)MBC 含量,这与相关研究结论一致<sup>[37]</sup>;而间作增加了核桃坚果成熟期和落叶期 0~40 cm 土壤 MBN 含量,其 MBC/MBN 值表现为生长前期较高,而中、后期显著下降的特征。间作的 BG、AKP、CBH、NAG 和 LAP 活性均随核桃生育期表现为“先升高后下降”的变化特征,以坚果成熟期最高、硬核期最低;成熟期下层土壤(40~60 cm)MBC/MBN 值间作显著高于单作,而表层和中层土壤(0~40 cm)则单作显著高于间作,表明间作影响了酶活性变化,从而影响了土壤微生物群落。对核桃大豆间作系统微生物群落以及土壤中细菌、真菌拮抗作用的相关研究有待于进一步开展。

### 3.3 林豆间作土壤微生物生物量碳氮与矿质营养及酶活性的相关关系

不同的土地利用方式会影响果园土壤微生物生物量碳氮与酶活性及矿质营养的相关关系<sup>[11,38]</sup>。本研究中,不同处理土壤 MBC 与 TN、AN 和 SOM 呈极显著正相关,这与相关研究结论一致<sup>[27]</sup>,但与 TK 为极显著负相关。间作条件下土壤 MBC 与 TP 和 AP 极显著正相关,而单作条件下土壤 MBC 与 TP 极显著负相关、与 AK 极显著正相关,说明不同土地利用改变了土壤养分与土壤 MBC 的相关关系。由于本试验地土壤为黄绵土,虽然富钾,土壤全钾含量高,但只有 2% 左右为可利用钾,因此有可能表现出土壤 MBC 与 TK 的负相关而与土壤 AK 的正相关关系,其相关作用机理有待于进一步验证。有研究表明,土壤 MBN 含量取决于土壤中微生物数量,与土壤 TN、AP 含量极显著正相关<sup>[12]</sup>,而在本研究不同栽培模式下,土壤 MBN 与 TN、TP、AP、AK、SOM 和 pH 无显著相关性,与 TK 显著相关,这可能是由于不同土壤类型差异造成的。本研究表明,间作条件下 MBC 和 MBN 均与 AKP 活性显著相关,而单作条件下其相关性不显著,这与马斌等<sup>[39]</sup>的研究结论不同,可能是由于土壤微生物及酶活性均受多种因素的影响,从而导致土壤类型、施肥管理等均会影响其相关性。

## 4 结论

旱作区幼龄核桃园间作大豆,可以显著增加核桃生育期土壤有机质、碱解氮和有效磷含量,降低土壤速效养分的深层积累,提高深层土壤 MBC 含量,增大坚果成熟期土壤酶活性,加速作物对营养元素的吸收利用。

### 参考文献:

- [1] Allen S C, Jose S, Nair P K R, et al. Safety-net role of tree roots: Evidence from a pecan (*Carya illinoensis* K. Koch)—cotton (*Gossypium hirsutum* L.) alley cropping system in the southern United States[J]. *Forest Ecology and Management*, 2004, 192(2/3): 395–407.
- [2] Xu X F, Thornton P E, Post W M. A global analysis of soil microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus in terrestrial ecosystems[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2013, 22(6): 737–749.
- [3] 李炎龙, 刘梓雅, 严景, 等. 华北平原典型农田土壤微生物生物量碳氮磷库的县域分布特征——以河北省曲周县为例[J]. *土壤学报*, 2021, 58(1): 235–245.
- [4] 徐阳春, 沈其荣, 冉炜. 长期免耕与施用有机肥对土壤微生物生物量碳、氮、磷的影响[J]. *土壤学报*, 2002, 39(1): 83–90.
- [5] Anderson J P E, Domsch K H. Quantities of plant nutrients in the microbial biomass of selected soils[J]. *Soil Science*, 1980, 130(4): 211–216.
- [6] 王攀, 朱湾湾, 牛玉斌, 等. 氮添加对荒漠草原植物群落组成与微生物生物量生态化学计量特征的影响[J]. *植物生态学报*, 2019, 43(5): 427–436.
- [7] 杨东伟, 章明奎, 张鹏启, 等. 水田改果园后土壤微生物学特性演变[J]. *土壤学报*, 2018, 55(1): 182–193.
- [8] 陈慧, 郝慧荣, 熊君, 等. 地黄连作对根际微生物区系及土壤酶活性的影响[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(12): 2755–2759.
- [9] 王宁, 南宏宇, 冯克云. 化肥减量配施有机肥对棉田土壤微生物生物量、酶活性和棉花产量的影响[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(1): 173–181.
- [10] 李聪, 吕晶花, 陆梅, 等. 文山国家级自然保护区不同海拔地带性植被的土壤微生物生物量碳氮分布特征[J]. *林业科学*, 2022, 58(3): 20–30.
- [11] 袁春阳, 李济宏, 韩鑫, 等. 树种对土壤微生物生物量碳氮的影响: 同质园实验[J]. *植物生态学报*, 2022, 46(8): 882–889.
- [12] 聂秀青, 王冬, 周国英, 等. 三江源地区高寒湿地土壤微生物生物量碳氮磷及其化学计量特征[J]. *植物生态学报*, 2021, 45(9): 996–1005.
- [13] 张美曼, 范少辉, 官凤英, 等. 竹阔混交林土壤微生物生物量及酶活性特征研究[J]. *土壤*, 2020, 52(1): 97–105.
- [14] Kiers E T, Hutton M G, Denison R F. Human selection and the relaxation of legume defences against ineffective rhizobia[J]. *Proceedings Biological Sciences*, 2007, 274(1629): 3119–3126.

- [15] 张媛. 华南赤红壤坡地幼龄果园间作对土壤碳、氮组分的影响[D]. 广州: 华南农业大学, 2017.
- [16] 张道勇, 李会科, 郭宏, 等. 间作白三叶对苹果/白三叶复合系统土壤微生物量碳、氮及酶活性的影响[J]. 水土保持研究, 2015, 22(5): 39–45.
- [17] 中华人民共和国农业部. 土壤检测 第6部分: 土壤有机质的测定: NY/T 1121.6—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [18] 中华人民共和国农业部. 土壤检测 第24部分: 土壤全氮的测定自动定氮仪法: NY/T 1121.24—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [19] 王雪晴, 阮文渊, 易可可. 植物体内磷素状况测定方法的研究进展[J]. 植物生理学报, 2016, 52(9): 1327–1332.
- [20] 土壤中全磷、全钾及氟化物的测定 氢氧化钠熔融法: T/NAIA 0280—2024[S]. 北京: 中国标准出版社, 2024.
- [21] 四川省质量技术监督局. 土壤碱解氮的测定: DB51/T 1875—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [22] 中华人民共和国农业部. 土壤检测 第7部分: 土壤有效磷的测定: NY/T 1121.7—2014[S]. 北京: 中国农业出版社, 2015.
- [23] 中华人民共和国农业部. 土壤速效钾和缓效钾含量的测定: NY/T 889—2004[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
- [24] 中华人民共和国农业部. 土壤中 pH 的测定: NY/T 1377—2007[S]. 北京: 中国农业出版社, 2007.
- [25] Frey S D, Knorr M, Parrent J L, et al. Chronic nitrogen enrichment affects the structure and function of the soil microbial community in temperate hardwood and pine forests[J]. *Forest Ecology and Management*, 2004, 196(1): 159–171.
- [26] Marx M C, Wood M, Jarvis S C. A microplate fluorimetric assay for the study of enzyme diversity in soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33(12/13): 1633–1640.
- [27] Inal A, Gunes A, Zhang F, et al. Peanut/maize intercropping induced changes in rhizosphere and nutrient concentrations in shoots[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2007, 45(5): 350–356.
- [28] Li Q Z, Sun J H, Wei X J, et al. Overyielding and interspecific interactions mediated by nitrogen fertilization in strip intercropping of maize with faba bean, wheat and barley[J]. *Plant and Soil*, 2011, 339(1): 147–161.
- [29] 任静, 刘小勇, 刘芬, 等. 核桃/大豆间作对氮素吸收利用及转移的影响[J]. *经济林研究*, 2022, 40(1): 1–10.
- [30] 张洋, 倪九派, 周川, 等. 三峡库区紫色土旱坡地桑树配置模式对土壤微生物生物量碳氮的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2014, 22(7): 766–773.
- [31] Campbell C A, Biederbeck V O, Zentner R P, et al. Effect of crop rotations and cultural practices on soil organic matter, microbial biomass and respiration in a thin Black Chernozem[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1991, 71(3): 363–376.
- [32] de Vries F T, Hoffland E, van Eekeren N, et al. Fungal/bacterial ratios in grasslands with contrasting nitrogen management[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(8): 2092–2103.
- [33] 李洋, 王毅, 韩国栋, 等. 青藏高原高寒草地土壤微生物量碳氮含量特征及其控制要素[J]. *草业学报*, 2022, 31(6): 50–60.
- [34] 孙建, 刘苗, 李立军, 等. 免耕与留茬对土壤微生物量 C、N 及酶活性的影响[J]. *生态学报*, 2009, 29(10): 5508–5515.
- [35] 耿广东, 王忠平, 冯道友, 等. 玉米与姜间作对土壤微生物和酶活性的影响[J]. *土壤通报*, 2009, 40(5): 1104–1106.
- [36] Virk A L, Lin B J, Kan Z R, et al. Simultaneous effects of legume cultivation on carbon and nitrogen accumulation in soil[M]//*Advances in Agronomy*. Amsterdam: Elsevier, 2022: 75–110.
- [37] 贾伟, 周怀平, 解文艳, 等. 长期有机无机肥配施对褐土微生物生物量碳、氮及酶活性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2008, 14(4): 700–705.
- [38] 杨继芬, 李永梅, 李春培, 等. 不同种植模式对坡耕地红壤团聚体中酶活性及养分含量的影响[J]. *土壤*, 2023, 55(4): 787–794.
- [39] 马斌, 刘景辉, 张兴隆. 褐煤腐殖酸对旱作燕麦土壤微生物量碳、氮、磷含量及土壤酶活性的影响[J]. *作物杂志*, 2015(5): 134–140.