

DOI: 10.11766/trxb202405090192

CSTR: 32215.14.trxb202405090192

陈玉萌, 赵志远, 易树生, 郑朝霞, 郑邦玉, 冯天宇, 郑伟, 翟丙年. 渭北旱塬苹果园长期不同施肥处理对土壤有机氮组分的影响[J]. 土壤学报, 2026, 63 (4): 1284–1298.

CHEN Yumeng, ZHAO Zhiyuan, YI Shusheng, ZHENG Zhaoxia, ZHENG Bangyu, FENG Tianyu, ZHENG Wei, ZHAI Bingnian. Effects of Long-term Different Fertilization Treatment on Soil Organic Nitrogen Fractions in Weibei Dryland Apple Orchards[J]. Acta Pedologica Sinica, 2026, 63 (4): 1284–1298.

渭北旱塬苹果园长期不同施肥处理对土壤有机氮组分的影响*

陈玉萌¹, 赵志远¹, 易树生¹, 郑朝霞¹, 郑邦玉¹, 冯天宇¹, 郑伟^{1, 2, 3},
翟丙年^{1, 2, 3†}

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100; 2. 农业农村部西北植物营养与农业环境重点实验室, 陕西杨凌 712100; 3. 西北农林科技大学白水苹果试验站, 陕西白水 715600)

摘要: 土壤有机氮直接反映土壤供氮能力, 为了阐明有机肥对土壤有机氮组分的影响机制, 基于 2008 年开始的长期定位试验, 设 4 个施肥处理 (不施肥 CK, 单施有机肥 M, 单施化肥 NPK, 有机无机肥配施 MNPK), 探究渭北旱塬苹果园长期不同施肥对土壤有机氮组分含量的影响, 通过土壤有机氮组分测定及代谢组学分析含氮代谢物组成, 研究增施有机肥提升土壤有机氮组分的关键机制。结果表明, MNPK 处理与 NPK 处理相比土壤含水量、有效磷、速效钾、可溶性有机氮和微生物生物量氮含量分别提升了 5.4%、33.8%、41.7%、8.2% 和 21.7%; 同时土壤酸解总氮、酸解铵态氮含量分别提升 10.1% 和 8.9%。M 处理的氨基酸态氮含量在整个生育期显著高于其余处理, MNPK 处理次之, CK 处理最低。土壤有机氮组分与土壤全氮、微生物生物量氮以及速效养分 (有效磷和速效钾) 含量呈显著正相关。除非酸解性氮外, 各个有机氮组分与酸解总氮显著正相关。代谢组学结果显示, MNPK 处理的含氮有机物显著高于其余处理, 添加有机肥处理的氨基酸小分子氮的比例高于其余处理。相比 NPK 和 CK 处理, MNPK 处理上调的含氮有机物中氨基酸态氮占重要比例, 45 种含氮有机物中包含 8 种氨基酸, 其相对丰度与有效磷、速效钾和可溶性有机氮显著正相关。上述结果表明, 增施有机肥对于土壤理化性质的改善有助于有机氮分解和氨基酸态氮的周转。

关键词: 有机无机肥配施; 有机氮; 代谢组; 氨基酸态氮; 长期定位试验

中图分类号: S-153.6 文献标志码: A

Effects of Long-term Different Fertilization Treatment on Soil Organic Nitrogen Fractions in Weibei Dryland Apple Orchards

CHEN Yumeng¹, ZHAO Zhiyuan¹, YI Shusheng¹, ZHENG Zhaoxia¹, ZHENG Bangyu¹, FENG Tianyu¹, ZHENG

* 国家重点研发计划项目课题 (2023YFD2301003)、陕西省科技重大专项项目 (2020zdzx03-02-01) 和国家现代农业产业技术体系项目 (CARS-27) 资助 Supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2023YFD2301003), the Special Foundfor Key Program of Science and Technology of Shaanxi Province, China (No. 2020zdzx03-02-01) and the Agriculture Research System of MOF and MARA, China (No. CARS-27)

† 通讯作者 Corresponding author 翟丙年, E-mail: bingnianzhaitg@126.com

作者简介: 陈玉萌 (1999—), 女, 陕西铜川人, 硕士研究生, 主要从事旱地果园水肥调控研究。E-mail: 742671204@qq.com

收稿日期: 2024-05-09; 收到修改稿日期: 2026-02-02; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2026-04-13

Wei^{1, 2, 3}, ZHAI Bingnian^{1, 2, 3†}

(1. College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agri-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Apple Experimental Station, Northwest A&F University, Baishui, Shaanxi 715600, China)

Abstract: 【Objective】 Soil organic nitrogen directly reflects the nitrogen supply capacity of soil. Therefore, it is important to clarify the mechanism of the effect of organic fertilizer on soil organic nitrogen components. 【Method】 This study was based on the long-term positioning experiment started in 2008, and four fertilization treatments were set up (no fertilization CK, single application of organic fertilizer M, single application of chemical fertilizer NPK, and combined application of organic and inorganic fertilizer MNPK) to explore the effects of long-term different fertilization on the content of soil organic nitrogen components in apple orchards on the Weibei dryland. Besides, the key mechanism of increasing organic fertilizer to improve soil organic nitrogen content was studied through soil organic nitrogen component determination and metabolomics analysis of nitrogen metabolites. 【Result】 The results showed that compared with NPK treatment, the contents of soil water, available phosphorus, available potassium, soluble organic nitrogen, and microbial biomass nitrogen in MNPK were increased by 4%, 33.8%, 41.7%, 8.2%, and 21.7%, respectively. Also, the content of acid hydrolyzed total nitrogen and acid ammonium nitrogen increased by 10.1% and 8.9%, respectively. The amino acid nitrogen content of M treatment was significantly higher than those of other treatments during the whole growth period, followed by MNPK, and CK was the lowest. Soil organic nitrogen components were significantly positively correlated with soil total nitrogen, microbial biomass nitrogen, and available nutrients (available phosphorus and available potassium). Except for non-acid hydrolyzable nitrogen, each organic nitrogen component was significantly positively correlated with acid-hydrolyzed total nitrogen. Metabolome results showed that the nitrogenous organic compounds in MNPK treatment were significantly higher than those in other treatments, and the proportion of amino acid nitrogen in the application of organic fertilizer treatment was higher than those in other treatments. Compared with NPK and CK treatments, amino acids accounted for an important proportion of nitrogenous organic compounds upregulated by MNPK treatment, and 8 amino acids were included in 45 nitrogenous organic compounds. The relative abundance was significantly positively correlated with available phosphorus, available potassium and soluble organic nitrogen. 【Conclusion】 The results showed that the improvement of soil physicochemical properties with increased application of organic fertilizer was conducive to organic nitrogen decomposition and turnover of amino acid nitrogen.

Key words: Combined application of organic and inorganic fertilizers; Organic nitrogen; Metabolome; Amino acid nitrogen; Long-term positioning experiment

土壤有机氮是土壤氮素的主要存在形式，占土壤全氮的 90%以上，直接影响土壤氮素的转化与循环，是矿质氮的“源”和“库”^[1]。土壤有机氮按化学形态一般分为非酸解氮和酸解氮（主要包括酸解铵态氮、酸解氨基酸态氮、酸解氨基糖态氮和酸解未知态氮），主要成分包括酰胺类化合物、蛋白质、核酸、嘧啶、嘌呤氨基酸、氨基糖及其缩合作用形成的其他复杂化合物等^[2]。这些含氮有机物质经微生物的分解释放出速效氮可供作物吸收利用，能够有效反映土壤的供氮潜力，因此一直是土壤氮素研究关注的热点。

农业生态系统中，施肥是为土壤提供氮源的直接有效方式，其中，有机肥富含蛋白质、核酸、氨

基酸等含氮有机物，相比于单施化肥更能有效提升土壤有机氮组分含量^[3-4]。研究表明，在小麦-玉米轮作体系中，与单施化肥相比，增施有机肥改变了与有机氮组分显著相关的有益细菌群落相对丰度，从而提升土壤酸解总氮及氨基酸态氮含量^[5]，有利于土壤氮库的周转^[6]。在小麦-玉米轮作土壤中，有机-无机肥配施相较单施化肥增加了腐殖质氮组分含量^[7]，并且有机氮各个组分与土壤全氮、可溶性氮、微生物生物量氮关系密切^[8-9]。然而，长期增施有机肥提升有机氮组分的机制，特别是氨基酸态氮组分的分子组成变化研究较少。

氨基酸态氮是有机氮组分的重要组成部分，土壤中的氨基酸矿化后不仅可为作物提供氮源，同时

参与合成蛋白质, 调节和促进作物生长。并且, 过去的研究认为植物仅能吸收矿质无机氮, 然而越来越多的试验表明, 在大多数的土壤体系中, 植物的氮素利用有相当一部分是以氨基酸作为营养氮源的, 特别是在氮源相对匮乏的土壤体系中, 氨基酸的作用举足轻重^[8-9]。因此, 土壤氨基酸态氮成为关注热点。一系列研究表明, 有机肥本身富含氨基酸, 无论是单施还是与化肥配施均能增加土壤氨基酸态氮比例^[10-12], 并且氨基酸态氮总含量与土壤理化性质的关系也在不同地区不同质地的土壤中被实践和研究, 但长期有机无机肥配施富集的土壤氨基酸种类、丰度及其与土壤理化性质的关系尚不明确。

本研究基于西北农林科技大学白水苹果试验站 11 年长期定位试验, 通过测定不同施肥处理的土壤理化性质、有机氮组分含量、土壤有机氮小分子组成, 分析其与土壤理化性质的关系, 为探究有机肥施用对土壤小分子含氮有机物的影响, 引入代谢组学, 拟在分子水平上观测长期有机肥施用提升土壤供氮潜力的内在原因。同时利用代谢组学的方法研究在不同施肥处理下土壤氨基酸态氮组分变化的关键机制。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

该试验地位于陕西省渭南市白水县西北农林科技大学苹果试验站, 地处陕西渭北旱塬, 年平均气温 11.4 °C, 多年平均降水量 577.8 mm, 试验地土

壤类型为黄壤土, 筒育干润雏形土(初育土纲黄绵土土类), 质地壤土, 其 0~20 cm 土层基础肥力水平为: 有机质 13.58 g·kg⁻¹、全氮 0.77 g·kg⁻¹、硝态氮 22.7 mg·kg⁻¹、铵态氮 2.10 mg·kg⁻¹、有效磷 16.94 mg·kg⁻¹、速效钾 151.28 mg·kg⁻¹、pH 8.36。

1.2 试验设计

试验始于 2008 年, 供试品种为长富二号, 基础为 M26, 2010 年开始结果, 株行距为 2 m × 4 m, 为自由纺锤形树形。试验设置 4 个施肥处理: 不施肥 (CK)、单施有机肥 (M)、单施化肥 (NPK) 和有机无机肥配施 (MNPK)。每个处理设置 3 次重复, 每个重复 24 株果树。有机肥以基肥形式于秋季果实收获后 (10 月上旬) 一次性施入土壤中。氮、磷、钾化肥分 3 次施入。其中, 50% (m:m) 于秋季果实收获后以基肥形式与有机肥一起施入, 余下的 30% (m:m) 和 20% (m:m) 分别于坐果期、膨果期以追肥形式施入。基肥在果树一侧树冠投影区开沟施入, 深度约为 40 cm, 追肥为穴施, 供试肥料: 氮肥为尿素 (N 460 g·kg⁻¹), 磷肥为磷酸二铵 (N 180 g·kg⁻¹, P₂O₅ 460 g·kg⁻¹), 钾肥为硫酸钾 (K₂O 500 g·kg⁻¹), 有机肥为羊粪 (有机质 350.0 g·kg⁻¹、全氮 23.3 g·kg⁻¹、全磷 6.2 g·kg⁻¹、全钾 9.4 g·kg⁻¹), 施肥量见表 1, 其中单施化肥处理和有机无机配施处理为等氮量投入 (根据有机肥中的氮素含量及矿化量计算出用氮量, 替代相应化学氮肥用量), 氮、磷、钾投入量依据目标产量和养分丰缺指标方法确定。

表 1 试验处理和施肥量

Table 1 Experimental treatment and fertilizer amount / (kg·hm⁻²)

处理 Treatment	有机肥 Organic fertilizer	化肥 Chemical fertilizer			总氮投入 Total nitrogen input
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	
CK	0	0	0	0	0
M	45 000	0	0	0	262
NPK	0	564	276	276	564
MNPK	22 500	431	180	180	564

注: CK, 不施肥; M, 单施有机肥; NPK, 单施化肥, MNPK, 有机无机配施。下同。Note: CK, does not fertilize; M, single application of organic fertilizer; NPK, single fertilizer application; MNPK, organic and inorganic combination application. The same below.

1.3 土壤样品采集与测定

分别于 2019 年果树萌芽期 (3 月)、坐果期 (6 月)、膨果期 (8 月) 和成熟期 (10 月) 采集 0~20 cm

土层土壤样品, 在树冠外围垂直投影处 (行间) 设置取样点, 每个处理 9 钻为一个重复样, 每个处理设 3 个重复, 成熟期 (10 月) 样品分为两部分, 鲜

土用于测定土壤含水量 (SWC)、硝态氮 (NO_3^- -N)、铵态氮 (NH_4^+ -N)、微生物生物量碳/氮 (MBC/MBN)、可溶性有机碳 (DOC)、可溶性有机氮 (DON), 风干土样用于测定土壤电导率 (EC)、有机质 (SOC)、全氮 (TN)、pH、有效磷 (AP)、速效钾 (AK) 含量。4 个时期的风干土样用于测定土壤有机氮组分。

土壤含水量用烘干法测定, pH 采用 DELTA320 pH 计测定(水土质量比为 2.5 : 1), 速效氮 (NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N) 用 $1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ KCl 溶液浸提, AA3 连续流动分析仪 (SEAL, Auto Analyzer 3, 德国) 测定, AP 用 $0.5 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaHCO_3 浸提—钼锑抗比色法测定, AK 用 $1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NH_4OAc 浸提—火焰光度法测定^[13], MBC/MBN 采用氯仿熏蒸— $0.5 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ K_2SO_4 浸提, DOC 采用蒸馏水浸提(水土质量比为 1 : 5)—TOC 仪液相法测定, DON 为总溶解氮含量与 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 含量之差^[14]。土壤有机氮分级测定采用 Bremner 法。土壤 TN 采用半微量凯氏法测定^[13]。

另取 1.0 g 鲜土至 2 mL 离心管中, 加入直径 6 mm 的研磨珠; 1 mL 甲醇-水 (4 : 1 v : v) 提取液, 涡旋振荡, 冰浴静置 5 min, 15 000 g、4℃ 条件下离心 20 min; 取一定量的上清液加超纯水稀释至甲醇含量为 53% (v : v); 15 000 g、4℃ 离心 20 min, 收集上清液, 采用液相色谱-串联质谱 (Liquid chromatography-tandem mass spectrometry, LC-MS) 定性分析土壤有机氮的组成, 仪器平台为赛默飞公司的超高效液相色谱串联傅里叶变换质谱 UHPLC-Q Exactive HF-X 系统。色谱柱为 HypesilGoldcolumn (C18); 柱温为 40℃; 流速为 $0.2 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$; 正模式下流动相 A 为 0.1% (v : v) 甲酸, 流动相 B 为甲醇; 负模式下流动相 A 为 $5 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 醋酸铵, pH 9.0, 流动相 B 为甲醇。另从每个实验样本中取等体积样本混匀作为质量控制 (QC) 样本。整个代谢组测定由北京诺禾致源科技股份有限公司完成。样品经电喷雾电离, 分别采用正、负离子扫描模式采集质谱信号, 质量扫描范围 $100\sim 1\,500 \text{ m}\cdot\text{z}^{-1}$ 。

下机数据用 CD3.1 搜库软件进行处理, 对每个代谢物进行保留时间、质荷比等参数的简单筛选, 然后设置保留时间偏差 0.2 min 和质量偏差 $5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 对不同样品进行峰对齐, 使鉴定更准确。随后设置质量偏差 $5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、信号强度偏差 30%、

信噪比 3、最小信号强度、加和离子等信息进行峰提取, 同时对峰面积进行定量, 再整合目标离子, 然后通过分子、离子峰和碎片离子进行分子式的预测并与 mzCloud、mzVault 和 Masslist 数据库进行比对。

1.4 数据分析

采用单因素方差分析和最小显著性差异法 (LSD) 进行方差分析 (ANOVA) 和多重比较 ($P < 0.05$ 被认为差异显著)。利用主坐标分析 (PCoA) 研究不同处理间代谢物差异。绘制火山图, 以差异倍数 (Fold Change) 大于 2 或 $\text{Fold Change} < 1/2$ 且 $P < 0.05$ 筛选 MNPk 分别与 CK 和 NPK 的差异代谢物。利用皮尔逊 (Pearson) 相关性分析方法分析土壤理化性质与 MNPk 相较 CK 和 NPK 共同上调的含氮有机物之间的相关性, 通过热图 (heatmap) 包进行可视化分析。用 R 4.1.0 和 Origin 2021 软件作图。

2 结果

2.1 不同施肥处理土壤理化性质

由表 2 可得, 有机肥添加对土壤表层可溶性有机碳含量影响较大, 各处理可溶性有机碳含量表现为: $\text{NPK} > \text{CK} > \text{MNPk} > \text{M}$ 。MNPk 处理相较 CK 和 M, 土壤可溶性有机氮含量分别提升了 27.7%、31.7%。M 处理土壤微生物生物量碳/氮含量显著高于其余处理。M 处理全氮含量高于其余三个处理, CK 全氮含量最低。MNPk 和 NPK 处理电导率 (EC) 显著高于 CK 和 M 处理。土壤 pH 除 M 处理最高外, 无显著差异。MNPk 处理较 NPK 土壤速效钾和有效磷含量分别提高 41.7% 和 33.8%。CK 处理土壤铵态氮含量显著高于其余处理, 施肥处理铵态氮含量无显著差异。NPK 处理的土壤硝态氮含量显著高于添加有机肥 (M 和 MNPk) 的处理, 而土壤有机质含量则为 M 处理和 MNPk 处理均显著高于 CK 处理和 NPK 处理, M 处理较其分别提升了 47.5% 和 43.5%。

2.2 不同时期不同施肥处理土壤有机氮组分含量

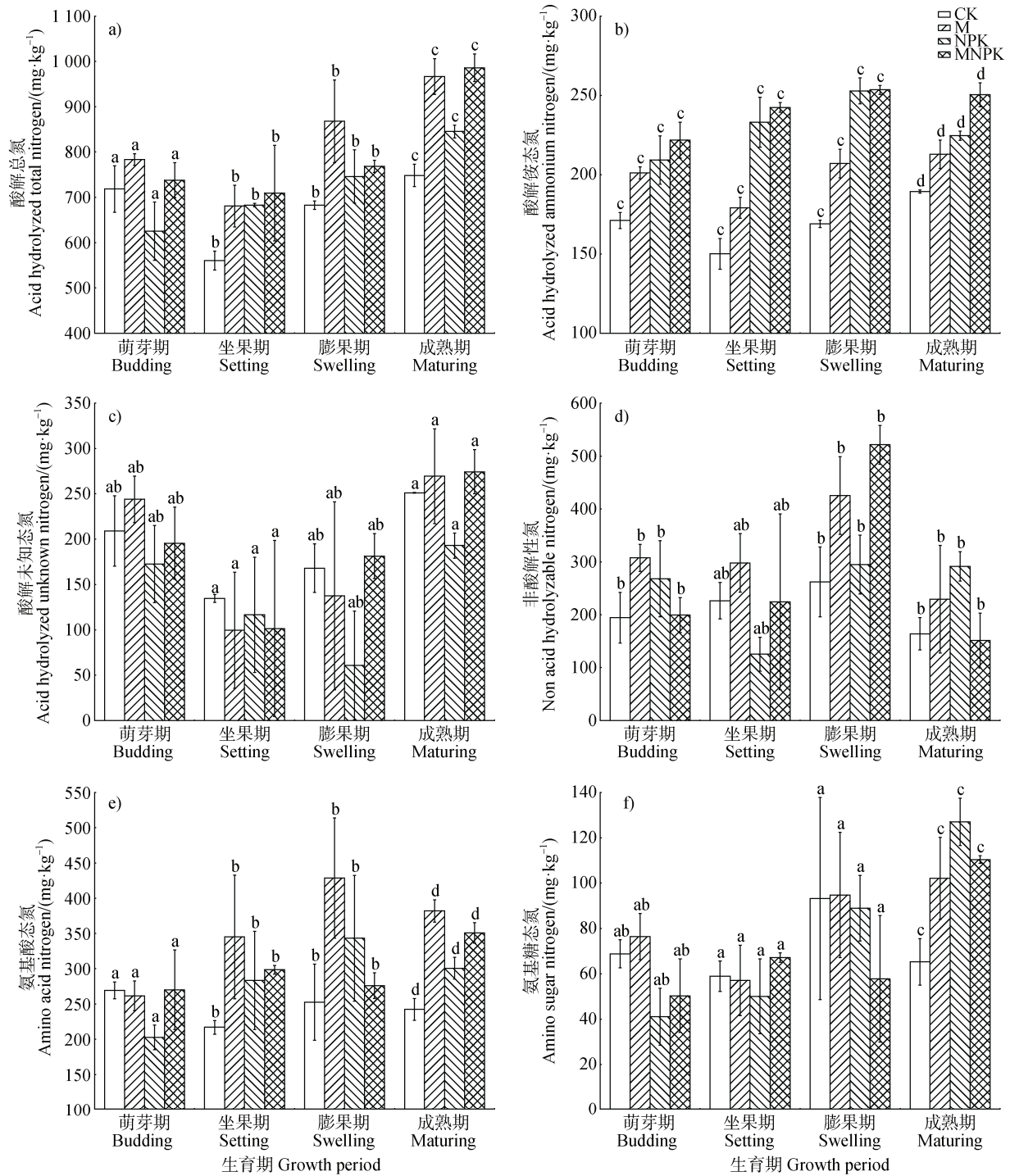
由图 1a 可得, 有机肥投入能够增加土壤酸解总氮的含量, 并且随着生育期的推移, 其含量呈增加的趋势, 成熟期酸解总氮含量最高。由图 1b 可得, MNPk 处理在 4 个生育期均能够增加土壤酸解铵态

表 2 不同处理土壤养分含量

Table 2 Soil nutrient content under different treatments

处理	SWC(g·kg ⁻¹)	EC/ (μS·cm ⁻¹)	pH	SOM/ (g·kg ⁻¹)	TN/ (g·kg ⁻¹)	NO ₃ ⁻ -N/ (mg·kg ⁻¹)	NH ₄ ⁺ -N/ (mg·kg ⁻¹)	AK/ (mg·kg ⁻¹)	AP/ (mg·kg ⁻¹)	DOC/ (mg·kg ⁻¹)	DON/ (mg·kg ⁻¹)	MBC/ (mg·kg ⁻¹)	MBN/ (mg·kg ⁻¹)
CK	18.3±0.2c	107.2±8.1b	8.4±0.0b	15.7±0.5b	0.9±0.0b	1.9±0.1c	1.3±0.2a	254.4±22.7c	19.2±3.2c	27.4±1.8b	7.6±1.1bc	168.6±12.6d	30.2±1.9b
M	20.7±0.0a	117.2±1.9b	8.4±0.1a	23.2±0.7a	1.2±0.1a	1.7±0.2c	0.7±0.4b	431.0±43.7b	22.4±0.7c	12.8±0.4d	7.3±0.3c	332.4±14.5a	56.4±2.1a
NPK	17.9±0.2c	141.9±3.8a	8.4±0.0b	16.1±0.7b	1.1±0.0a	8.9±0.5a	0.7±0.1b	458.8±20.9b	32.5±3.8b	35.6±2.0a	8.9±0.1ab	236.6±4.5c	21.8±1.2d
MINPK	18.8±0.3b	142.9±8.6a	8.4±0.0ab	22.1±1.1a	1.1±0.1a	3.3±0.3b	0.8±0.3b	650.3±46.5a	43.4±2.7a	16.2±1.5c	9.6±1.0a	287.1±17.0b	26.5±0.5c

注: SWC, 土壤含水量; EC, 电导率; SOM, 土壤有机质; TN, 全氮; NO₃⁻-N, 硝态氮; NH₄⁺-N, 铵态氮; AK, 速效钾; AP, 有效磷; DOC, 可溶性有机碳; DON, 可溶性有机氮; MBC, 微生物生物量碳; MBN, 微生物生物量氮。同列不同小写字母表示不同处理间的差异达显著水平 ($P < 0.05$)。下同。Note: SWC, soil water content; EC, electrical conductivity; SOM, soil organic matter; TN, total nitrogen; NO₃⁻-N, nitrate nitrogen; NH₄⁺-N, ammonium nitrogen; AK, available potassium; AP, available phosphorus; DOC, soluble organic carbon; DON, soluble organic nitrogen; MBC, microbial biomass carbon; MBN, microbial biomass nitrogen. Different lower-case letters in the same column represent significant differences between different treatments ($P < 0.05$). The same below.



注：不同小写字母表示同一生育期内不同处理间差异达显著水平 ($P < 0.05$)。下同。Note: Different lower case letters indicate significant differences between treatments in the same growth period, and different letters represent ($P < 0.05$). The same below.

图 1 不同处理土壤有机氮组分含量 (a. 酸解总氮, b. 酸解铵态氮, c. 酸解未知态氮, d. 非酸解性氮, e. 氨基酸态氮, f. 氨基糖态氮)

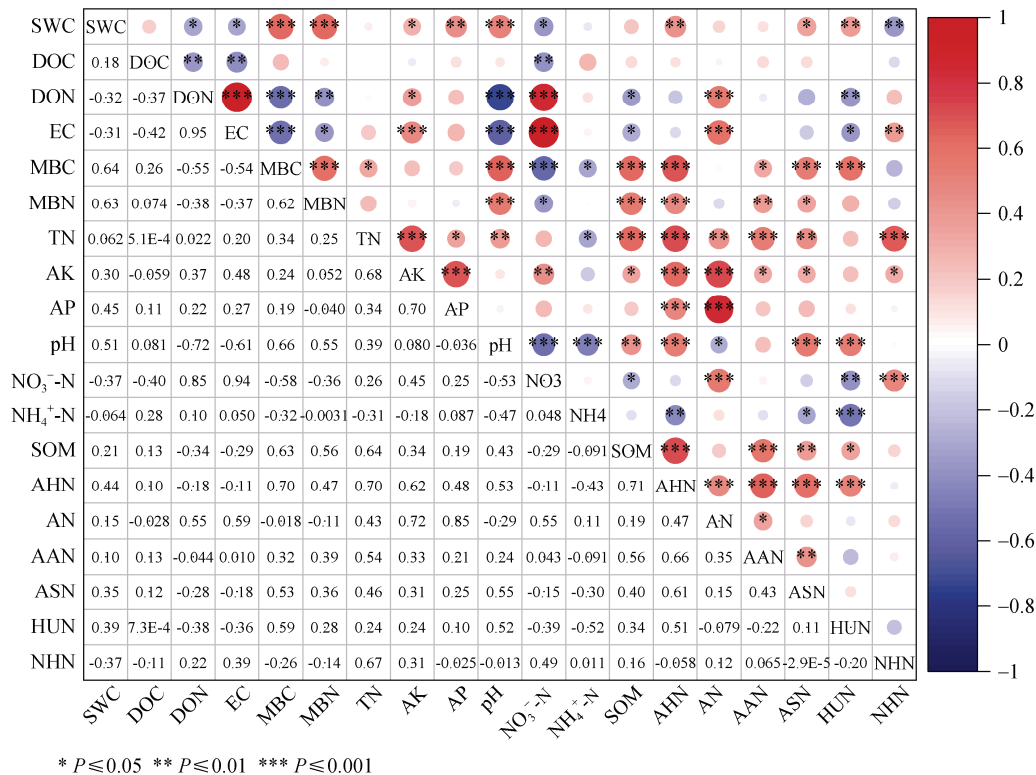
Fig. 1 Content of soil organic nitrogen under different treatments (a. Acid-hydrolyzed total nitrogen, b. Acid-hydrolyzed ammonium nitrogen, c. Acid-hydrolyzed unknown nitrogen, d. Non acid hydrolyzable nitrogen, e. Amino acid nitrogen f. Amino sugar nitrogen)

氮的含量, NPK 处理次之。由图 1c 可得, 土壤有机肥的投入能够提升土壤酸解未知态氮的含量, 萌芽期 M 处理土壤酸解未知态氮最高, 显著高于 NPK 处理, 膨果期和成熟期 MNPK 处理最高, 显著高于 NPK 处理, 总体而言, NPK 处理的酸解未知态氮的含量最低 (除坐果期外), 并且在萌芽期和成熟期含量高于其余两个时期。图 1d 表明非酸解性氮的量也随有机肥的投入而增加, 含量最高的时期为膨果期, 成熟期 NPK 处理的非酸解性氮含量显著高于 CK 和 MNPK 处理, 但与 M 处理无显著差异。

由图 1e 可得, 有机肥的投入能够显著增加氨基酸态氮含量, M 和 MNPK 处理的氨基酸态氮在 4 个生育期整体高于 NPK 处理, 尤其是在成熟期, 并且随着生育期的推移, 整体含量呈现先增加后降低的趋势。图 1f 表明氨基糖态氮随着生育期的推移, 整体含量呈现增加的趋势, 在果树生长前期, M 处理最高, 在成熟期, NPK 处理的土壤氨基糖态氮含量显著高于 M 和 CK 处理。

2.3 土壤理化性质与有机氮组分的相关关系

由图 2 可得, 土壤酸解总氮与土壤铵态氮极显著负相关 ($P < 0.01$), 与土壤含水量、微生物生物量碳、微生物生物量氮、全氮、有效磷、速效钾及土壤有机质极显著正相关 ($P < 0.01$); 酸解铵态氮与土壤可溶性有机氮、全氮、有效磷、速效钾和硝态氮极显著正相关 ($P < 0.01$); 氨基酸态氮与土壤有机质、土壤全氮、微生物生物量氮极显著正相关 ($P < 0.01$), 与微生物生物量碳显著正相关 ($P < 0.05$), 氨基糖态氮与土壤有机质、微生物生物量碳、全氮极显著正相关 ($P < 0.01$), 与微生物生物量氮显著正相关 ($P < 0.05$), 与铵态氮显著负相关 ($P < 0.05$); 酸解未知态氮与土壤硝态氮、铵态氮、可溶性有机氮极显著负相关 ($P < 0.01$)。除酸解性氮外, 各有机氮组分与酸解总氮均极显著正相关 ($P < 0.01$)。总体而言, 各个有机氮组分与土壤全氮含量紧密正相关, 与土壤速效养分 (有效磷和速效钾) 正相关。



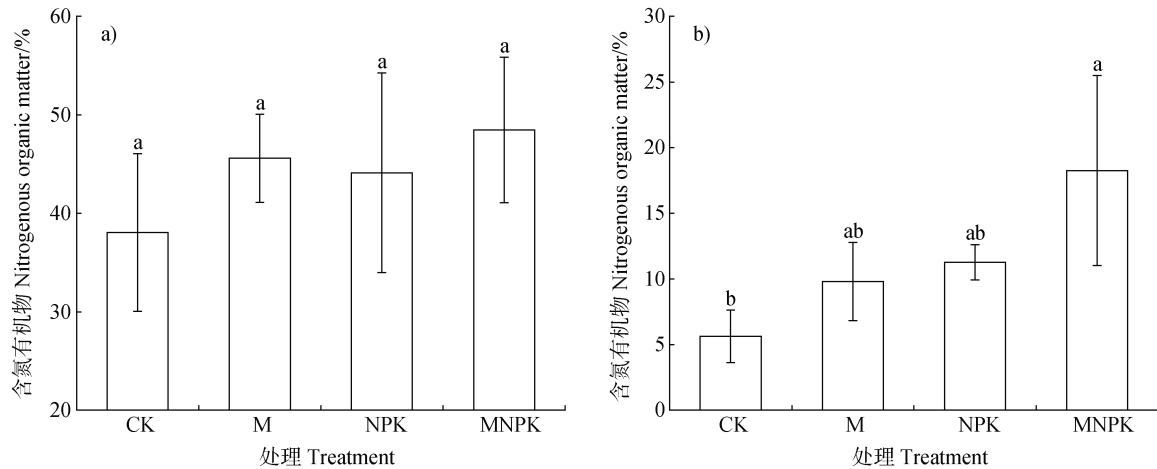
注: AHN: 酸解总氮, AN: 酸解铵态氮, AAN: 氨基酸态氮, ASN: 氨基糖态氮, HUN: 酸解未知态氮, NHN: 非酸解性氮。
 Note: AHN: acid hydrolyzed total nitrogen; AN: acid hydrolyzed ammonium nitrogen; AAN: amino acid nitrogen; ASN: amino sugar nitrogen; HUN: acid hydrolyzed unknown nitrogen; NHN: non-acid hydrolyzable nitrogen.

图 2 成熟期有机氮组分与土壤理化性质的相关关系

Fig. 2 Correlation diagram between organic nitrogen components and soil physical and chemical properties during maturing

2.4 正负离子模式下不同处理土壤含氮有机物百分比的比较

图 3 显示，负离子模式下 MNPK 处理含氮有机



注：不同小写字母表示不同处理间差异达显著水平 ($P < 0.05$)。Note: Different lower-case letters represent significant differences between different treatments ($P < 0.05$).

图 3 正负离子模式下含氮有机物百分比 (a. 正离子模式; b. 负离子模式)

Fig. 3 Percentage of nitrogen-containing organic matter in positive and negative ion mode (a. positive ion mode; b. negative ion mode)

2.5 氨基酸态氮代谢物组分及与土壤理化因子的相关性

图 4 为不同处理氨基酸态氮含量百分比。在正离子模式中，从 441 种含氮有机物中筛选出 70 种氨基酸态氮；在负离子模式中，从 148 种含氮有机物中筛选出 35 种氨基酸态氮，共 105 种氨基酸态氮。由上到下依次为常见氨基酸以及氨基酸衍生物。

在常见氨基酸中，MNPK 处理甲硫氨酸、色氨酸的含量高于其余三个处理；M 处理左旋-瓜氨酸、瓜氨酸、精氨酸、鸟氨酸、组氨酸、天冬酰胺、赖氨酸、苯丙氨酸、脯氨酸、酪氨酸、苏氨酸、谷氨酸、缬氨酸、天冬氨酸和谷氨酸 15 种氨基酸的含量最高。添加有机肥处理 (M 和 MNPK) 中氨基酸含量比例高的占常见氨基酸的 60%。氨基酸的衍生物中，MNPK 处理蛋氨酸亚砷 (Methionine sulfoxide)、S-腺苷-L-蛋氨酸 (S-Adenosyl-L-methionine)、苯丙氨酸-苯丙氨酸 (Phe-Phe)、甘氨酸鹅脱氧胆酸钠 (Glycochenodeoxycholic Acid (sodium salt))、甘氨酸去氧胆酸 (Glycoursodeoxycholic acid)、S-(5-腺苷)-L-高半胱氨酸 (S-(5-Adenosyl)-L-Homocysteine)、Fmoc-L-异亮氨酸 (Fmoc-L-Isoleucine)、Boc-β-氰基-L-丙氨酸 (Boc-beta-cyano-L-alanine) 等 28 种氨

物百分比最高，显著高于 CK 处理，M 和 NPK 处理与 CK 间无显著差异，表明 MNPK 处理能够显著提升土壤中有氮有机物含量，提升土壤供氮能力。

氨酸的含量最高，占氨基酸衍生物的 37.3%；M 处理甘氨酸-苯丙氨酸 (Gly-Phe)、天冬氨酸-苯丙氨酸 (Asp-Phe)、N-乙酰基-L-蛋氨酸 (N-Acetyl-L-methionine)、亮氨酸脯氨酸 (Leucylproline)、甘氨酸-L-亮氨酸 (Glycyl-L-leucine)、N-乙酰-DL-苯丙氨酸 (N-Acetyl-DL-Phe) 和对称 N,N-二甲基精氨酸 (N3, N4-Dimethyl-L-arginine) 7 种氨基酸含量最高。47% 的氨基酸衍生物在添加有机肥处理 (M 和 MNPK) 中含量占比更高。总体而言，105 种氨基酸中，有 51% 的氨基酸态氮在有机肥添加的处理 (M 和 MNPK) 中含量占比最高。有机肥添加量越大，氨基酸态氮含量越高，尤其在与植物生长紧密相关的常见氨基酸中表现最为明显。

为了解不同处理间代谢物差异，对其进行 PCoA 分析。结果如图 5 所示，各处理内样本聚集在一起，组内变异较小，重复性较高；MNPK 处理与 CK 处理、NPK 处理能够明显区分开来，表明 MNPK 处理代谢物组分与其他处理有明显差异。

将含氮有机物进行差异物种筛选，图 6a 为 MNPK 与 CK 相比筛选出上调的含氮有机物有 78 个，图 6b 为 MNPK 与 NPK 相比筛选出上调的含氮有机物有 56 个。将筛选出的 MNPK 相比 CK 与 NPK

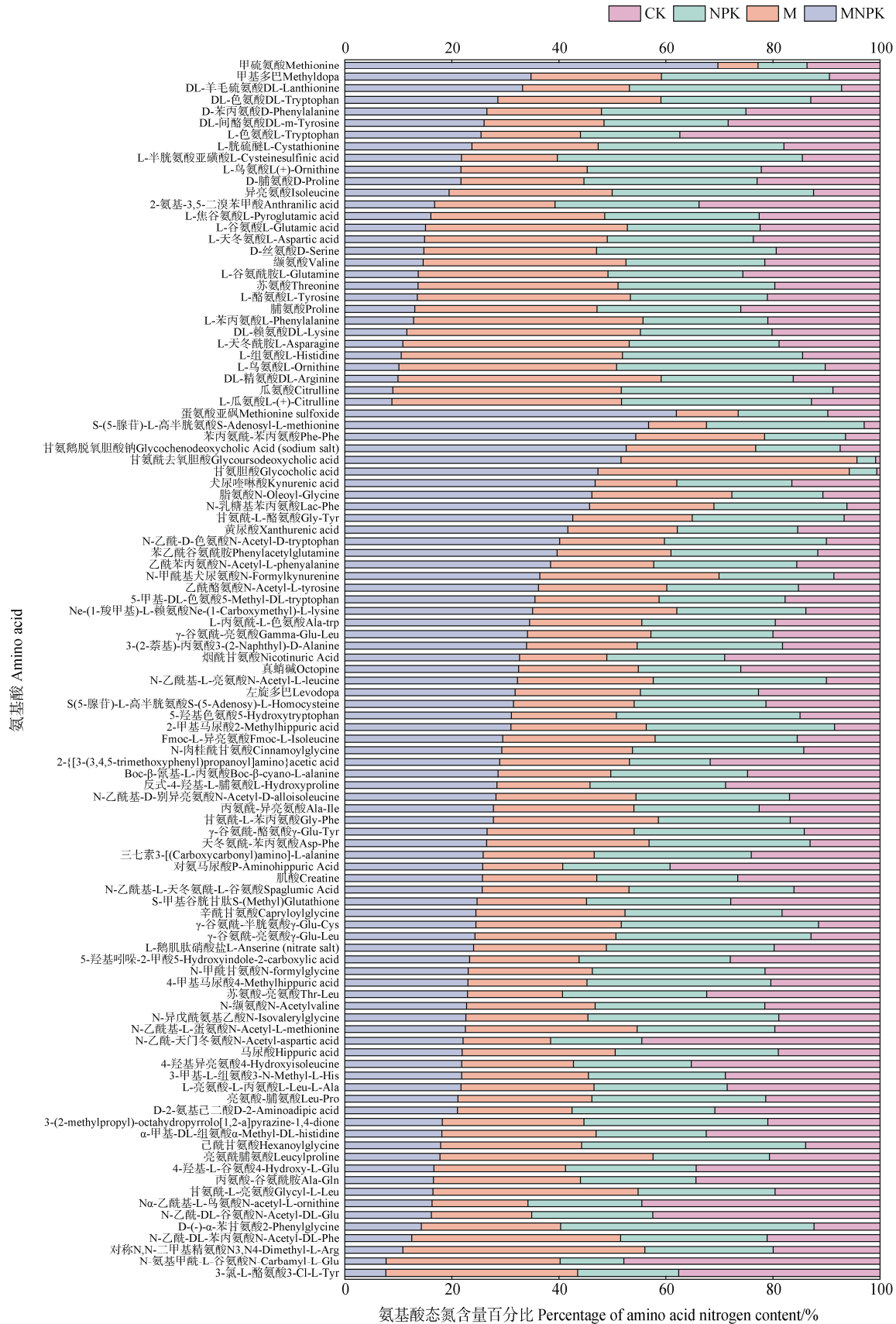


图 4 不同处理氨基酸态氮含量百分比

Fig. 4 Percentage of amino acid nitrogen content in different treatments

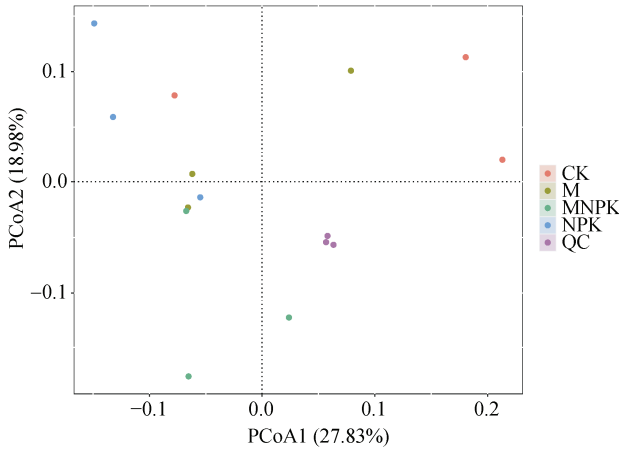


图 5 不同处理的主坐标分析 (PCoA)

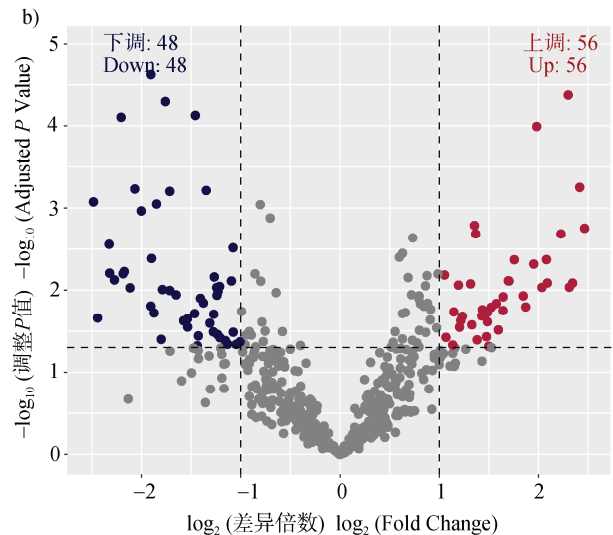
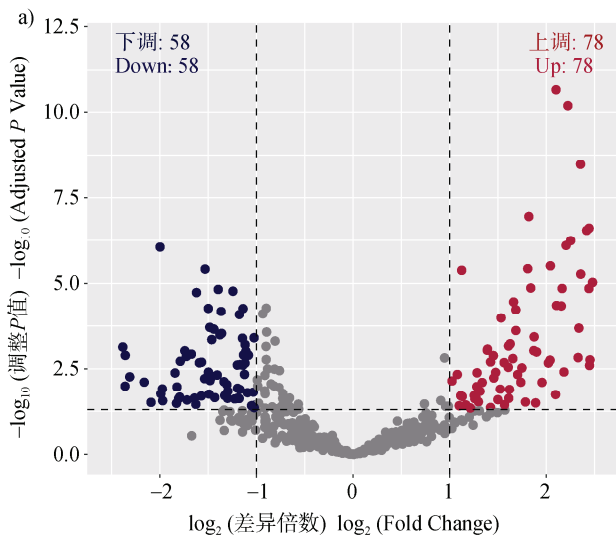
Fig. 5 Principal coordinate analysis (PCoA) of different treatments

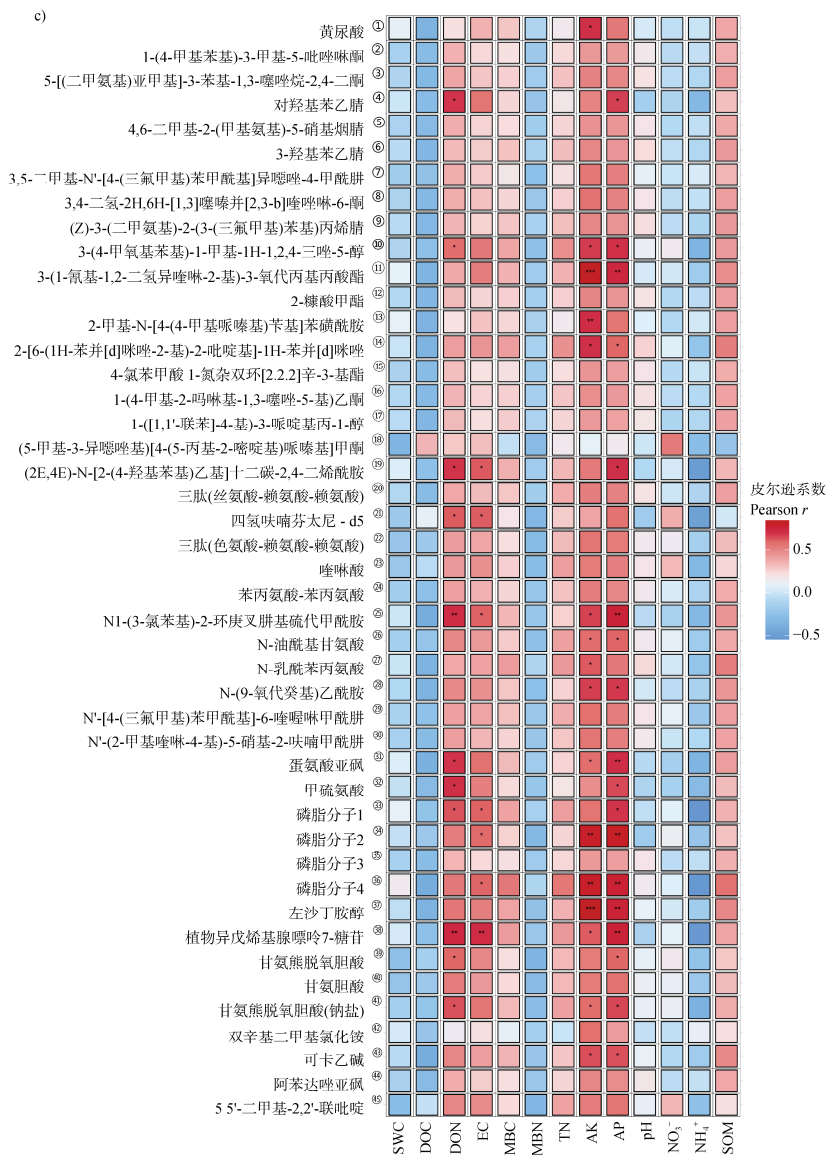
共同上调的 45 种含氮有机物进行土壤理化性质的相关性分析如图 6c, 其中氨基酸态氮有 8 种, 包括一种常见氨基酸——甲硫氨酸 (Methionine)。有 5 种氨基酸态氮 (黄尿酸 Xanthurenic acid、蛋氨酸亚砷 Methionine sulfoxide、甲硫氨酸 Methionine、甘氨酸去氧胆酸 Glycoursode oxycholic acid、N-油酰基甘氨酸 (一种脂氨酸) N-Oleoyl Glycine) 分别与 DON、AK、AP 其中 1~3 种显著正相关, 植物异戊烯基腺嘌呤 7-糖苷 IP7G、3 种磷脂分子 (LysoPE18: 2、LysoPE18: 0 和 LPE17: 1)、乙基苯酰芽子碱 Cocaethylene、N1-(3-氯苯基)-2-环庚叉肼基硫代甲酰胺 N1-(3-chlorophenyl)-2-cycloheptylidenhydrazine-1-carbothioamide 等 10 种含氮有机物均与 DON、EC、AK 及 AP 中至少一种土壤指标显著正相关。

3 讨论

3.1 不同施肥模式对土壤养分及有机氮组分的影响

长期施用有机肥 (M 和 MNPK) 能够提升土壤有机碳、氮含量。本研究结果显示, 添加有机肥 (M 和 MNPK) 相较 NPK 处理显著提升了土壤有机质、全氮、微生物生物量碳、微生物生物量氮含量, MNPK 处理较 NPK 处理显著提升了土壤有效磷和速效钾含量 (表 2)。Gong 等^[15]和 Yang 等^[16]通过田间长期定位试验证实, 有机肥中大量的惰性有机物质提升了土壤全氮含量。有机肥提供的大量有机氮大部分被固持在土壤中, 提升土壤的供氮能力^[17], 并且有机肥添加量越多, 为微生物提供的有效能源越多, 土壤微生物活性越高, 微生物所吸收利用从而固持下来的氮素越多^[18], 且有机肥的添加提升了土壤酶活性, 利于有机质的周转, 从而提升了养分的有效性^[19-20]。增施有机肥也会通过改善土壤酸碱度、降低固体颗粒对土壤养分的吸附固定, 增加土壤有效养分含量, 进而增加微生物对氮的利用^[21]。有机肥本身携带速效氮 (硝态氮和铵态氮) 等养分进入土壤, 为土壤微生物提供养分来源, 提升了 MBC 和 MBN 含量, 这与高鹏等^[22]的研究一致。NPK 处理的表层土壤 DOC 含量高于其余处理, MNPK 和 M 处理最低 (表 2), 这可能是由于有机肥的施入能起到疏松土壤的效果, 王宪玲等^[23]先前的土壤表层 CT 扫描及土壤孔隙度测定结果也能证实该观点。经过夏季大量降水后, 移动性很强的可





注 Note: ① Xanthurenic acid, ② 5-Methyl-2-(4-methylphenyl)-2,4-dihydro-3H-pyrazol-3-one, ③ 5-[(dimethylamino)methylidene]-3-phenyl-1,3-thiazolane-2,4-dione, ④ 4-Hydroxybenzylcyanide, ⑤ 4,6-dimethyl-2-(methylamino)-5-nitronicotinonitrile, ⑥ 3-Hydroxybenzylcyanide, ⑦ 3,5-dimethyl-N'-[4-(trifluoromethyl)benzoyl]isoxazole-4-carbohydrazide, ⑧ 3,4-dihydro-2H,6H-[1,3]thiazino[2,3-b]quinazolin-6-one, ⑨ 3-(dimethylamino)-2-[3-(trifluoromethyl)phenyl]acrylonitrile, ⑩ 3-(4-methoxyphenyl)-1-methyl-1H-1,2,4-triazol-5-ol, ⑪ 3-(1-cyano-1,2-dihydroisoquinolin-2-yl)-3-oxopropyl propionate, ⑫ 2-morpholinophenyl 2-furoate, ⑬ 2-methyl-N-[4-(4-methylpiperazinyl)benzyl]benzenesulfonamide, ⑭ 2-[6-(1H-benzo[d]imidazol-2-yl)-2-pyridyl]-1H-benzo[d]imidazole, ⑮ 1-azabicyclo[2.2.2]oct-3-yl 4-chlorobenzoate, ⑯ 1-(4-methyl-2-morpholino-1,3-thiazol-5-yl)ethan-1-one, ⑰ 1-[1,1'-biphenyl]-4-yl-3-piperidinopropan-1-ol, ⑱ (5-methyl-3-isoxazolyl)[4-(5-propyl-2-pyrimidinyl)piperazino]methanone, ⑲ (2E,4E)-N-[2-(4-hydroxyphenyl)ethyl]dodeca-2,4-dienamide, ⑳ SKK (Ser-Lys-Lys), □ Tetrahydrofuran fentanyl-d5, □ WKK (Trp-Lys-Lys), □ Quinolinic acid, □ Phe-Phe, □ N1-(3-chlorophenyl)-2-cycloheptylidenhydrazine-1-carbothioamide, □ N-Oleoyl glycine, □ N-Lactoyl-Phenylalanine, □ N-(9-oxodecyl)acetamide, □ N'-[4-(trifluoromethyl)benzoyl]-6-quinoxalinecarbohydrazide, □ N'-(2-methylquinolin-4-yl)-5-nitro-2-furohydrazide, □ Methionine sulfoxide, □ Methionine, □ LysoPE18:2, □ LysoPE18:0, □ LysoPE14:0, □ LPE17:1, □ Levalbuterol, □ IP7G, □ Glycoursodeoxycholic Acid, □ Glycocholic acid, □ Glycoursodeoxycholic Acid (sodium salt), □ Dioctyl dimethyl ammonium chloride, □ cocaethylene, □ Albendazole sulfoxide, □ Abametapir.

图 6 MNPK 处理相较 CK (a) 和 NPK (b) 处理上调含氮有机物及其与土壤理化性质相关关系 (c)
Fig. 6 Compared with CK (a) and NPK (b) treatments, MNPK treatment up-regulated nitrogenous organic matter and its correlation with soil physicochemical properties (c)

溶性有机碳更易随雨水入渗至 20 cm 以下的深层土壤中，导致成熟期测定的表层 DOC 及速效氮含量降低。

本研究显示，有机肥的添加能够提升土壤酸解总氮及非酸解性氮的含量（图 1a，图 1d），这与有机肥添加的缓效氮源减少氮素损失、促进氮转化、增加固氮^[24]有关。土壤速效养分（有效磷和速效钾）与酸解总氮显著相关，土壤有机质与酸解总氮、氨基酸态氮、氨基糖态氮呈极显著正相关（图 2）。有机肥本身就含有多种氨基酸、蛋白质和多肽化合物，降解后土壤氨基酸态氮含量也随之增加；有机肥的投入增加了土壤氮库的同时改善土壤团聚体结构^[23]，微生物的活性增强，土壤矿化加强，有效养分含量提升^[25]，土壤腐质化过程产物增加，从而提升土壤酸解总氮含量。Ahanger 等^[26]研究发现，有机肥添加后脯氨酸、甘氨酸、甜菜碱和糖的积累在有机堆肥添加后显著增加，与本研究结果（图 1e，图 1f）相似。在膨果期由于水热条件优越，微生物较为活跃^[27]，降解产生的氨基酸又被微生物利用或被树体吸收，造成其含量有所降低。苹果成熟期土壤氨基糖态氮为 NPK 处理最高（图 1f），这可能是由于成熟期化肥的投入能够为微生物生存提供充足的氮素，有利于微生物的生存繁衍^[27]，其死亡后留存在土壤中的氨基糖态氮含量随之增加。

3.2 关键小分子有机氮与土壤理化性质的关系

氨基酸对于果树生长起到至关重要的作用。氨基酸作为生物促进剂能促进作物生长与增产，同时显著减轻非生物胁迫引起的损伤。氨基酸也作为辅酶与激素的前体，促进作物营养生长，帮助叶绿素形成^[28]。本研究结果显示，M 处理中氨基酸态氮含量最高，常见氨基酸中含量最高的所占比例也最高（图 1e，图 4），氨基酸衍生物在 MNPK 处理中含量最高的所占比例最多，结合 M 处理的氨基酸态氮含量最高而言，常见氨基酸所占氨基酸态氮的比例高（图 4），因此，在 M 处理中体现出了优势，而 MNPK 处理的氨基酸态氮含量高的主要体现在其衍生物中（图 4）。有机肥中含有大量的氨基酸，因此添加有机肥处理（M 和 MNPK）土壤中的氨基酸比例相较 NPK 处理要高。Durani 等^[10]和李萌等^[11]均在水稻-小麦轮作体系中发现，有机肥替代化肥能提升土壤氨基酸态氮比例，本研究结果（图 1e，图 4）与其一致，表明渭北旱塬苹果园有机肥的添加对氨基酸

态氮比例的提升与农田土壤相似。郭勇等^[29]在大麦-双季水稻的根际土壤试验表明，添加有机肥处理的氨基酸态氮比例相较单施化肥处理无显著提升，本研究结果（图 4）与其不一致，这可能是由于根际土壤微生物活性较非根际土壤更高，土壤酸解性氮库相互转化迅速，因此差异不显著^[30]。

本研究显示，有机无机肥配施相较单施化肥上调的 5 种氨基酸态氮（黄尿酸 Xanthurenic acid、蛋氨酸亚砷 Methionine sulfoxide、甲硫氨酸 Methionine、甘氨酸熊脱氧胆酸 Glycoursode oxycholic acid、N-油酰基甘氨酸 N-Oleoyl Glycine）与 DON、AK 和 AP 显著正相关（图 6c），这表明氨基酸态氮的提升对控制土壤有效养分的释放有积极效果，这与氨基酸态氮促进果树根系与土壤微生物生长、增强土壤酶活性有关^[31]。色氨酸是植物合成生长素的前体^[32]，促进植物生长，黄尿酸（Xanthurenic acid）作为色氨酸的最终代谢产物而存在^[33]，甲硫氨酸（Methionine）常作为植物的生长调节剂，能够提高果实的口感和营养价值^[32]，其积极作用在一些叶面喷施氨基酸试验中均被证实^[32, 34-35]。与生物代谢紧密相关的植物异戊烯基腺嘌呤 7-糖苷（IP7G）、3 种磷脂分子 LysoPE18: 2、LysoPE18: 0 和 LPE17: 1 分别与土壤 DON、EC、AK、AP 显著正相关（图 6c），其分别具有参与糖代谢、构建微生物细胞膜、控制细胞新陈代谢的作用^[36]。这些关键含氮有机物与土壤养分的相关性表明，增施有机肥能够通过改善土壤理化性质从而促进土壤有机氮的分解与周转，产生利于植物生长且促进代谢的含氮有机物。

4 结 论

有机无机肥配施能够提升渭北旱塬苹果园土壤有机碳（SOC）、速效钾（AK）、有效磷（AP）、可溶性有机氮（DON）的含量，对土壤酸解总氮、酸解铵态氮的提升有显著作用，配施有机肥相较单施化肥显著提升了土壤氨基酸态氮，其含量随着苹果生育期的不同而变化。有机氮组分与土壤 AK、AP、微生物生物量氮（MBN）、全氮（TN）、SOC 和 DON 正相关。有机氮代谢结果表明，有机无机肥配施相较其余处理对于有机氮代谢物含量有显著提升，氨基酸态氮在有机无机肥配施处理中比例最高，而有

机无机肥配施相较单施化肥处理上调的含氮有机物中氨基酸态氮占优势地位,且与土壤 DON、AP、AK 含量正相关。渭北旱地苹果园有机无机肥配施能够通过改善土壤理化性质,调控有机氮的分解与周转。

参考文献 (References)

- [1] Cui N X, Cai M, Zhang X, et al. Runoff loss of nitrogen and phosphorus from a rice paddy field in the east of China: Effects of long-term chemical N fertilizer and organic manure applications[J]. *Global Ecology and Conservation*, 2020, 22: e01011.
- [2] Wu H Q, Zhang Y L, Zhang Y L, et al. Soil organic nitrogen fractions: A review[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2018, 49 (5): 1240—1246. [吴汉卿, 张玉龙, 张玉玲, 等. 土壤有机氮组分研究进展[J]. *土壤通报*, 2018, 49 (5): 1240—1246.]
- [3] Ri Y, Jayanthi D, Gnanachitra M, et al. Effect of long term fertiliser and manure application on Soil Nitrogen Fractions in an Inceptisol under Finger millet: Maize cropping sequence[J]. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 2020, 9: 1112—1116.
- [4] Yu Q G, Hu X, Ma J W, et al. Effects of long-term organic material applications on soil carbon and nitrogen fractions in paddy fields[J]. *Soil and Tillage Research*, 2020, 196: 104483.
- [5] Zhu T C, Ming Y F, Li C F, et al. Effects of increasing application of organic fertilizer on carbon and nitrogen components and microbial community in saline-alkali land of the Yellow River Delta[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36 (6): 387—393. [朱桃川, 明玉飞, 李传福, 等. 增施有机肥对黄河三角洲盐碱地碳氮组分和微生物群落的影响[J]. *水土保持学报*, 2022, 36 (6): 387—393.]
- [6] Jia Q, Liao S P, Bu R Y, et al. Effects of nitrogen application rate on fractionation of soil organic nitrogen relative to crop rotation mode[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54 (6): 1547—1558. [贾倩, 廖世鹏, 卜容燕, 等. 不同轮作模式下氮肥用量对土壤有机氮组分的影响[J]. *土壤学报*, 2017, 54 (6): 1547—1558.]
- [7] Gong W, Yan X Y, Wang J Y, et al. Effects of long-term fertilization on soil humus carbon and nitrogen fractions in a wheat-maize cropping system[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15 (6): 1245—1252. [龚伟, 颜晓元, 王景燕, 等. 长期施肥对小麦-玉米作物系统土壤腐殖质组分碳和氮的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15 (6): 1245—1252.]
- [8] Hao X H, Liu S L, Tong C L, et al. The influence of long-term fertilization on microbial biomass nitrogen and organic nitrogen fractions in paddy soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40 (4): 757—764. [郝晓晖, 刘守龙, 童成立, 等. 长期施肥对两种稻田土壤微生物量氮及有机氮组分的影响[J]. *中国农业科学*, 2007, 40 (4): 757—764.]
- [9] Qiu H. Effects of straw returning combined with phosphorus fertilizer on nutrient accumulation of maize and soil nitrogen and phosphorus fractions[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2023. [邱鹤. 秸秆还田配施磷肥对玉米养分积累与土壤氮磷组分的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2023.]
- [10] Durani A, Brar B S, Dheri G S. Soil nitrogen fractions in relation to rice-wheat productivity: Effects of long-term application of mineral fertilizers and organic manures[J]. *Journal of Crop Improvement*, 2016, 30 (4): 399—420.
- [11] Li M, Wang C Q, Li B, et al. Effects of pig manure replacing nitrogen fertilizer on soil organic nitrogen components under rice-wheat rotation[J]. *Soils*, 2016, 48 (3): 449—454. [李萌, 王昌全, 李冰, 等. 猪粪替代氮肥对稻麦轮作条件下土壤有机氮组分的影响[J]. *土壤*, 2016, 48 (3): 449—454.]
- [12] Jiang H M, Li S S, Zhang J F, et al. Transformation of external chemical nitrogen in soil organic nitrogen fractions and their relationship[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2014, 20 (6): 1421—1430. [姜慧敏, 李树山, 张建峰, 等. 外源化肥氮素在土壤有机氮库中的转化及关系[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20 (6): 1421—1430.]
- [13] Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000. [鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.]
- [14] Zou H Q, Li D J, Ren K Y, et al. Contributions of various forms of nitrogen to nitrogen uptake by maize in red soil with different fertilities[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60 (3): 857—867. [邹洪琴, 李德近, 任科宇, 等. 肥力梯度红壤上不同形态氮库对玉米吸氮量的贡献[J]. *土壤学报*, 2023, 60 (3): 857—867.]
- [15] Gong W, Yan X Y, Wang J Y, et al. Long-term manure and fertilizer effects on soil organic matter fractions and microbes under a wheat-maize cropping system in northern China[J]. *Geoderma*, 2009, 149(3/4): 318—324.
- [16] Yang X Y, Ren W D, Sun B H, et al. Effects of contrasting soil management regimes on total and labile soil organic carbon fractions in a loess soil in China[J]. *Geoderma*, 2012, 177: 49—56.
- [17] Zhang W X, Wang S X, Jin W, et al. Short-term effects

- of organic to chemical nitrogen proportion on paddy soil fertility and double rice yield[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2023, 29(7): 1300—1312. [张文学, 王少先, 金伟, 等. 有机无机氮肥比例对稻田土壤肥力和作物产量的短期效应[J]. *植物营养与肥料学报*, 2023, 29(7): 1300—1312.]
- [18] Zhao Z Y, Zheng W, Ma Y T, et al. Responses of soil water, nitrate and yield of apple orchard to integrated soil management in Loess Plateau, China[J]. *Agricultural Water Management*, 2020, 240: 106325.
- [19] Trap J, Riah W, Akpa-Vinceslas M, et al. Improved effectiveness and efficiency in measuring soil enzymes as universal soil quality indicators using microplate fluorimetry[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2012, 45: 98—101.
- [20] Fan M Z, Yin C, Fan F L, et al. Effects of different long-term fertilization on the activities of enzymes related to carbon, nitrogen, and phosphorus cycles in a red soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(3): 833—838. [范森珍, 尹昌, 范分良, 等. 长期不同施肥对红壤碳、氮、磷循环相关酶活性的影响[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(3): 833—838.]
- [21] Tahseen S B. Effects of cultivation and nutrient management of Chinese prickly ash on soil fertility, nitrogen pools and availability[D]. Yaan, Sichuan: Sichuan Agricultural University, 2023. [Tahseen Saba. 花椒种植和养分管理对土壤肥力、氮库及有效性的影响[D]. 四川雅安: 四川农业大学, 2023.]
- [22] Gao P, Lei X Y, Lu Y X, et al. Effects of partial substitution of chemical fertilizer with organic fertilizer on soil organic nitrogen and active nitrogen[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2023(10): 11—18. [高鹏, 雷星宇, 鲁耀雄, 等. 有机氮部分替代化学氮肥对土壤有机氮组分的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2023(10): 11—18.]
- [23] Wang X L, Zhao Z Y, Ma Y T, et al. Study on the effects of long-term application of chemical fertilizer combined with manure on soil physical properties of apple orchard based on CT scanning technology[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(9): 1647—1655. [王宪玲, 赵志远, 马艳婷, 等. 基于 CT 扫描技术研究有机无机肥长期配施对土壤物理特征的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(9): 1647—1655.]
- [24] Guo X Y, Zhu Z C, Song C H, et al. Differences in organic nitrogen transformation during chicken manure composting with the addition of different disaccharides[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 888: 164174.
- [25] Zheng W. Effect and mechanism of cover crop combined with different fertilization on apple yield and quality as well as soil water and nutrient use efficiency[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A & F University, 2019. [郑伟. 生草覆盖下不同施肥方式对苹果产量品质及水肥利用效率的影响及其机理研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2019.]
- [26] Ahanger M A, Qi M D, Huang Z G, et al. Improving growth and photosynthetic performance of drought stressed tomato by application of nano-organic fertilizer involves up-regulation of nitrogen, antioxidant and osmolyte metabolism[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, 216: 112195.
- [27] Zhao Z Y, Ma Y T, Zhang A, et al. Response of apple orchard bacteria co-occurrence network pattern to long-term organic fertilizer input[J]. *Applied Soil Ecology*, 2023, 191: 105035.
- [28] Shumaila K. Effect of exogenous L-methionine on growth, physiology, and antioxidants system of lettuce in hydroponics[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2019. [Shumaila Khan. 外源 L-甲硫氨酸对水培生菜生长, 生理和抗氧化系统的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2019.]
- [29] Guo Y, Wen L, Shi L H, et al. Effects of long-term application of fertilizers on rhizosphere soil organic nitrogen fraction in barley-double cropping rice field[J]. *Soils*, 2024, 56(2): 273—280. [郭勇, 文丽, 石丽红, 等. 长期不同施肥模式对大麦-双季稻田根际土壤有机氮组分的影响[J]. *土壤*, 2024, 56(2): 273—280.]
- [30] Zhang S H, Wu J, Zhang R Z, et al. Effects of nitrogen fertilizer combined with straw and bio-char on soil organic nitrogen components in dryland farmland[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2020, 38(1): 92—100. [张世汉, 武均, 张仁陟, 等. 不同氮水平下秸秆、生物质炭添加对旱作农田土壤解聚有机氮组分的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2020, 38(1): 92—100.]
- [31] Wang X. Effects of mixed application of *Trichoderma* fertilizer and amino acid on prevention and control of apple replant disease[D]. Taian, Shandong: Shandong Agricultural University, 2022. [王馨. 木霉菌肥与氨基酸混施对防控苹果连作障碍效果的研究[D]. 山东泰安: 山东农业大学, 2022.]
- [32] Zhang A, Wei X J, Xie L, et al. Effects of different amino acid treatments on the growth and quality of broccoli sprouts[J]. *China Cucurbits and Vegetables*, 2024, 37(5): 151—156. [张艾, 魏学军, 谢龙, 等. 不同氨基酸处理对西蓝花芽苗生长及品质的影响[J]. *中国瓜菜*, 2024, 37(5): 151—156.]
- [33] Zhang T. Study on auxiliary diagnostic value of

- tryptophan and its related metabolites in lung cancer[D]. Chengdu : University of Electronic Science and Technology of China, 2023. [张婷. 色氨酸及其相关代谢物在肺癌中的辅助诊断价值研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2023.]
- [34] Yu H L, Lin Z A, Li Y T, et al. Effects of spraying low molecular organic compounds on growth and nutrients uptake of rape (*Brassica Chinensis* L.)[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2014, 20(6): 1560—1568. [于会丽, 林治安, 李燕婷, 等. 喷施小分子有机物对小油菜生长发育和养分吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20 (6): 1560—1568.]
- [35] Hassini I, Rios J J, Garcia-Ibañez P, et al. Comparative effect of elicitors on the physiology and secondary metabolites in broccoli plants[J]. Journal of Plant Physiology, 2019, 239: 1—9.
- [36] Gao J F, Zhou W, Liu N, et al. Analysis of amino acids and lipids in *Kadsura coccinea* seed by widely targeted metabolomics[J]. China Oils and Fats, 2023, 48 (1): 87—93. [高渐飞, 周玮, 刘妮, 等. 基于广泛靶向代谢组学分析黑老虎种子中氨基酸和脂质组分[J]. 中国油脂, 2023, 48 (1): 87—93.]

(责任编辑: 陈荣府)