

不同有机肥对甘薯产量、品质及土壤肥力的影响

邓仁菊¹, 尹 旺¹, 罗 密¹, 吴巧玉¹, 付 梅², 包维嘉³, 潘 牧¹, 张舟琼¹,
李 云¹

1. 贵州省农业科学院生物技术研究所, 贵州贵阳 550006; 2. 贵州省农作物技术推广总站, 贵州贵阳 550000; 3. 贵州省农业科学院科技信息研究所, 贵州贵阳 550006

摘 要: 为探究施用不同有机肥对甘薯产量、品质以及土壤肥力的影响。以甘薯品种黔薯 6 号为试材, 设置 5 种不同有机肥处理, 以不施肥为对照。结果表明: 施用有机肥能有效促进甘薯藤蔓生长及块根的膨大, 其中产量以上蚕力有机肥 (T₄) 最高, 较对照增加了 19.9%。不同有机肥对甘薯营养品质的影响差异较大, 而对于干物质的累积不明显。另外, 种植甘薯显著降低了土壤的养分含量, 而施用不同有机肥可以补充甘薯对养分的部分需求, 但对土壤 pH 的影响不明显。施肥均显著增加了土壤微生物量碳 (MBC) 和微生物量氮 (MBN) 的含量。同时显著增加了土壤脲酶 (URE)、酸性磷酸酶 (ACP)、N-乙酰葡萄糖苷酶 (NAG) 和纤维二糖酶 (CBH) 活性, 明显降低了硝酸还原酶 (NR) 和 β -葡萄糖苷酶 (BG) 活性, 而对其他酶活性影响有升有降。相关性分析表明, 有机肥中不同成分对甘薯块根产量和品质的影响差异较大, 肥料的 pH 及有机质投入量主要影响块根的品质, 而纯氮投入量则与块根产量和品质均密切相关。土壤理化性质主要受有机肥的 pH、有机质及纯氮投入量的影响, 而与纯磷和纯钾的投入量相关性较小; 同时, 有机肥与土壤 MBC、土壤 URE、ACP、NR、PPO 和 LAP 的相关性强于土壤微生物量氮 (MBN)、N-乙酰葡萄糖苷酶 (NAG)、纤维二糖酶 (CBH) 和多酚氧化酶 (PPO)。综上, 不同有机肥在一定程度上促进了甘薯的生长, 提高了甘薯产量, 增加了土壤的养分含量, 改变了土壤的微生物环境, 因此可根据指标的相关性分析结果为甘薯生产提供参考依据。

关键词: 有机肥; 甘薯品质; 土壤养分; 酶活性

中图分类号: S18 文献标识码: A

Effects of Different Organic Fertilizers on Yield and Quality of Sweetpotato and Soil Fertility

DENG Renju¹, YIN Wang¹, LUO Mi¹, WU Qiaoyu¹, FU Mei², BAO Weijia³, PAN Mu¹, ZHANG Zhouqiong¹,
LI Yun¹

1. Institute of Biotechnology, Guizhou Academy of Agricultural Sciences, Guiyang, Guizhou 550006, China; 2. Guizhou Crop Technology Promotion Station, Guiyang, Guizhou 550000, China; 3. Institute of Science and Technology Information, Guizhou Academy of Agricultural Sciences, Guiyang, Guizhou 550006, China

Abstract: The study was aimed to explore the effects of applying different organic fertilizers on the yield, quality, soil fertility of sweet potato. Five different organic fertilizer treatments with no fertilization as the control were set up and sweet potato variety Qianshu 6 was used. The results showed that the application of organic fertilizer could effectively promote the growth of sweet potato vines and the expansion of root tubers. The yield of Shangcanli biological organic fertilizer (T₄) was the highest, which was 19.9% higher than that of the control. The effects of different organic fertilizers on the nutritional quality of sweet potato were different, but the accumulation of dry matter was not obvious. In addition, planting sweet potato significantly reduces the nutrient content of soil, while applying different organic fertilizers

收稿日期 2022-09-30; 修回日期 2022-11-23

基金项目 贵州省科技厅科技支撑计划项目(黔科合支撑[2023]一般 024); 贵州省科技厅科技计划项目(黔科合基础-ZK[2022]一般 280); 贵州省甘薯工程技术研究中心(黔科合平台人才[2019]5201 号)。

作者简介 邓仁菊(1982—), 女, 博士, 研究员, 研究方向: 薯类作物育种及栽培生理; E-mail: xiaoju63@163.com。

could supplement part of the nutrient requirements of sweet potato, but had no significant impact on soil pH value. Organic fertilization significantly increased the contents of soil microbial biomass carbon (MBC) and microbial biomass nitrogen (MBN). Organic fertilization significantly increased the activities of urease (URE), acid phosphatase (ACP), N-acetylglucosidase (NAG) and cellobiase (CBH), but significantly decreased the activities of nitrate reductase (NR) and-Glucosidase (BG), while did not significantly affected the activity of other enzymes. Correlation analysis showed that the effects of different components of organic fertilizer on the yield and quality of sweet potato root tubers were quite different. The pH value of fertilizer and the amount of organic matter input mainly affected the quality of root tubers, while the amount of pure nitrogen input was closely related to the yield and quality of root tubers. The physical and chemical properties of soil were mainly affected by the pH value of organic fertilizer, the input amount of organic matter and pure nitrogen, but had little correlation with the input amount of pure phosphorus and pure potassium. The correlation between organic fertilizer and soil MBC, soil URE, ACP, NR, PPO and LAP was stronger than that of soil microbial biomass nitrogen (MBN), N-acetylglucosidase (NAG), cellobiase (CBH) and polyphenol oxidase (PPO). Different organic fertilizers promoted the growth of sweet potato, increased the yield of sweet potato, increased the nutrient content of soil, and changed the microbial environment of soil to a certain extent. Therefore, the correlation analysis results of indicators could provide references for sweet potato production.

Keywords: organic fertilizer; quality of sweet potato; soil nutrients; enzyme activity

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2024.02.015

化肥对提高农作物的产量具有十分重要的作用,但化肥施用过量易导致土壤板结、养分失调以及肥力下降等问题^[1-2]。而有机肥中有机质含量较高、养分全面,能够有效提高土壤肥力^[3-4]、改善土壤微生物群落结构^[5-7]、提升作物的产量和品质^[8-9]。王立刚等^[10]研究发现,施用有机肥可促进作物良好生长,提高植物光合效率,有助于作物产量提高。郭洁等^[11]研究表明,在一定范围内的有机肥用量与葡萄叶绿素含量、果实干物质和糖含量呈显著正相关,并能在一定程度上降低酸度,改善口感。韦忠等^[12]研究发现,有机肥的施用可提高烟叶中的钾含量,从而增强其抗病性,同时能增加烟叶的含糖量,明显改善烟叶香气。孔祥波等^[13]研究显示,施用有机肥可提高生姜根茎干物质和挥发油等含量,提高生姜品质,降低硝酸盐含量。目前市面上的有机肥种类繁多,原料和生产工艺各不相同,有机质、养分元素、pH 等差异较大,造成产品质量差异较大,且不同作物对有机肥的响应效果也不相同。对于甘薯而言,不同区域、不同立地条件、不同甘薯品种对有机肥的吸收利用也存在较大的差异,但目前有关这方面的文献相对有限^[14-16]。而甘薯种植户对有机肥选择的盲目性、随机性较大。因此,本研究以贵州自主选育的高淀粉甘薯品种黔薯 6 号为材料,通过研究不同商品有机肥对甘薯农艺性状及土壤肥力、酶活性的影响,为甘薯栽培过程中有机肥选择及利用提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试材料为淀粉型甘薯品种黔薯 6 号,2016 年通过贵州省农作物品种委员会审定,由贵州省生物技术研究所提供。试验于 2020 年在贵阳市清镇市红枫湖镇大冲村进行,地理坐标 106°23'E、26°31'N,前茬作物辣椒,试验地土壤理化性质如下:土壤 pH 4.69、有机质 41.1 g/kg、有效磷 30.2 mg/kg、速效钾 151 mg/kg、碱解氮 178.86 mg/kg、交换性钙 18.62 cmol/kg、交换性镁 0.54 cmol/kg、有效态铜 1.48 mg/kg、有效态锌 2.99 mg/kg、有效态锰 91.03 mg/kg、有效态铁 137.55 mg/kg。

1.2 方法

1.2.1 试验设计 采用随机区组设计,共 6 个处理,每处理 3 次重复,以不施肥为对照(CK)。甘薯大垄双行种植,株距 28 cm,行距 1 m,栽插密度 667 m² 约 4800 株。6 月 2 日移栽,10 月 25 日收获。所有处理均不施用化肥,其他栽培措施采用统一管理。不同有机肥基本信息及检测情况见表 1 和表 2。

1.2.2 甘薯性状调查及品质分析 甘薯蛋白质、粗脂肪、维生素 C、淀粉及还原糖含量分别参考 GB 5009.5—2016、GB 5009.6—2016、GB/T 5009.86—2016、GB/T 5009.9—2016 和 GB/T 5009.7—2016 的方法测定,总糖含量参考 GB/T 10782—2006 的方法测定,粗纤维含量参考 GB/T 5009.10—2003 的方法测定,干物质含量参考吕长文等^[17]的方法测定。

表 1 不同有机肥基本情况
Tab. 1 Introduction to different organic fertilizers

处理 Treatment	有机肥名称 Organic fertilizer name	生产商 Manufacturer	基本信息 Basic information	667 m ² 施用量 Application rate of 667 m ² /kg
T ₁	活性腐植酸多元素有机肥	贵州中亚生物有机肥业 发展股份有限公司	有机质≥45%，N+P ₂ O ₅ +K ₂ O≥10%	120
T ₂	活性腐植酸钾肥	山东农大肥业有限公司	有机质≥70%，腐植酸≥65%，氧化钾≥10%	120
T ₃	复合微生物肥料	河化邢化化肥有限公司	N+P ₂ O ₅ +K ₂ O=25%，有效活菌数≥0.20 亿/g	120
T ₄	上蚕力有机肥	广东植物龙生物技术有限公司	有机质≥47%，N+P ₂ O ₅ +K ₂ O≥6%	120
T ₅	松达生物有机肥	四川国光农化股份有限公司	有机质≥40.0%，有效活菌数≥0.20 亿/g	120
CK				不施肥

表 2 不同有机肥 pH 及养分情况
Tab. 2 pH value and nutrient detection of different organic fertilizers

处理 Treatment	pH	有机质 Organic/%	有机质投入量 Input of organic matter/kg	养分含量 Nutrient content			纯养分投入量 Nutrient input		
				全磷 TP/%	全钾 TK/%	全氮 TN/%	全磷 TP/kg	全钾 TK/kg	全氮 TN/kg
T ₁	8.79	43.7	52.4	3.934	3.60	5.16	4.721	4.32	6.19
T ₂	10.02	82.4	92.9	0.136	11.52	1.41	0.163	13.82	1.69
T ₃	4.89	13.1	15.7	3.564	4.96	19.46	4.277	5.95	23.35
T ₄	7.86	50.2	60.2	2.166	2.16	4.69	2.599	2.59	5.63
T ₅	7.00	43.7	52.4	1.169	1.46	3.12	1.403	1.75	3.74

1.2.3 土壤养分及酶活性测定 甘薯收获后，立即采集各处理 0~20 cm 土层的土壤，每小区按照“S 形”选 5 点取样后混成一个样品，剔除杂质，一部分样品风干后用作土壤养分分析，另一部分保存在 4 ℃冰箱用作土壤酶活性测定。土壤 pH 采用电位法测定，有机质采用重铬酸钾容量法测定，有效磷采用钼锑抗比色法测定，速效钾采用火焰光度计法测定，碱解氮采用碱解扩散法测定，有效态铜、锌、锰、铁及交换性钙和镁的含量采用原子吸收分光光度法测定。微生物量碳（MBC）和微生物量氮（MBN）采用氯仿熏蒸-K₂SO₄提取法（FE）测定，土壤脲酶（URE）活性采用苯酚钠-次氯酸钠比色^[18]，硝酸还原酶（NR）活性测定参照武志杰等的专利方法^[19]，酸性磷酸酶（ACP）、β-葡萄糖苷酶（BG）、多酚氧化酶（PPO）、过氧化氢酶（POD）、N-乙酰氨基葡萄糖苷酶（NAG）、纤维二糖水解酶（CBT）、亮氨酸酶（LAP）则参考 SINSABAUGH 等^[20]的方法并加以改进。

1.3 数据处理

采用 Excel 2019 软件整理数据并统计各项指标平均值，采用 SPSS 20.0 和 Origin 2021 软件对所得数据进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同有机肥施用对甘薯生长特性及产量的影响

由表 3 可知，植物长势以活性腐植酸钾肥（T₂）、复合微生物肥料（T₃）和松达生物有机肥（T₅）优于其他处理。叶片颜色除活性腐植酸多元素有机肥（T₁）和对照部分偏黄外，其余处理均呈绿色或深绿色，而各处理茎色、叶片大小、分枝数及茎粗与 CK 无明显差异。各处理的蔓长均显著高于 CK（T₂ 除外），其中上蚕力有机肥（T₄）藤蔓最长，较对照增加 43.1%，T₂ 藤蔓最短，与 CK 之间无显著差异。不同有机肥处理均增加了甘薯产量和提高了大中薯率，其中处理 T₄ 的产量最高（667 m² 产量 2230.8 kg），较 CK 增产 19.9%；其次为 T₅，较 CK 增加 16.4%；增幅最小的是 T₁ 和 T₃，分别为 12.2%和 12.3%。各处理大中薯率均显著高于对照，以 T₂ 最高（88.7%），较 CK 提高了 18.1%。其余处理间差异不明显，仅以处理 T₂ 显著高于 T₅。结果表明：不同有机肥施用后，均能明显提高甘薯生长势、产量及大中薯率，但对其影响程度差异较大。

2.2 不同有机肥施用对甘薯品质的影响

从表 4 可以看出，各处理（T₃ 除外）甘薯的

蛋白质含量均显著高于 CK，以 T₅ 的蛋白含量最高，但 T₁、T₂ 和 T₅ 三处理间的差异不显著。处理 T₁ 的粗纤维含量显著高于 CK，T₃ 与 CK 之间无显著差异，其余处理均显著低于 CK。处理 T₃ 和 T₄ 的粗脂肪含量显著高于 CK，分别比 CK 增加了 31.7% 和 28.4%，而处理 T₅ 则比 CK 降低了 35.5%，其余处理与 CK 之间差异不显著。各处理甘薯的维生素 C 含量与 CK 之间差异不明显。不同处理间淀粉含量差异明显，除 T₁ 外，其余处理

均显著高于 CK，以 T₄ 含量最高，较 CK 增加 30.7%。还原糖含量除 T₁ 和 T₂ 显著高于 CK 外，其余处理间差异不显著。总糖含量以 T₅ 最高，是 CK 的 1.89 倍，T₃ 的总糖含量最低，与其他处理间差异显著。各处理间干物质含量差异不明显。由此表明，不同有机肥对甘薯块根品质的影响差异较大，其中主要影响甘薯块根中的蛋白质、粗纤维、粗脂肪、淀粉、还原糖和总糖含量，而对维生素 C 和干物质含量的影响相对较小。

表 3 施用不同有机肥的甘薯生长特性及产量
Tab. 3 Growth characteristics and yield of sweet potato with different organic fertilizers

处理 Treatment	植株长势 Plant growth	叶色 Leaf colour	茎色 Stem colour	叶片大小 Leaf size/cm ²	分枝数 Number of branches	蔓长 Vine length /cm	茎粗 Stem diameter/cm	块根产量 Root yield /kg	大中薯率 Commodity rate/%	比对照增产 Increase production compared with the control/%
T ₁	中等	绿，部分叶片偏黄	绿	7.8×7.1 ^a	7.1 ^a	130.2 ^c	0.5645 ^a	2143.3 ^c	85.6 ^{ab}	12.2
T ₂	旺盛	深绿	绿	7.6×6.3 ^a	6.8 ^a	113.7 ^e	0.5790 ^a	2221.9 ^b	88.7 ^a	14.5
T ₃	旺盛	绿	绿	7.2×6.1 ^a	7.4 ^a	122.4 ^d	0.5840 ^a	1988.0 ^d	85.5 ^{ab}	12.3
T ₄	中等	绿	绿	7.0×6.5 ^a	6.9 ^a	159.3 ^a	0.6075 ^a	2367.3 ^a	83.2 ^{ab}	19.9
T ₅	旺盛	深绿	绿	8.3×6.6 ^a	7.6 ^a	142.4 ^b	0.5795 ^a	2232.1 ^b	81.7 ^b	16.4
CK	中等	绿，部分叶片偏黄	绿	7.1×6.0 ^a	7.0 ^a	111.3 ^e	0.5372 ^a	1859.9 ^c	75.1 ^c	

注：同列数据后不同小写字母表示不同处理之间差异显著（ $P<0.05$ ）。大中薯指单个薯重 ≥ 100 g 以上的甘薯。
Note: Different lowercase letters after the data in the same column indicate significant difference between different treatments ($P<0.05$). Commercial sweet potatoes refer to a single sweet potato with a weight more than 100 g.

表 4 施用不同有机肥的甘薯块根品质
Tab. 4 Root quality of sweet potato with different organic fertilizers

处理 Treatment	蛋白质 Protein /[g·(100 g) ⁻¹]	粗纤维 Crude fibre /[g·(100 g) ⁻¹]	粗脂肪 Crude fat /[g·(100 g) ⁻¹]	维生素 C Vitamin C /[mg·(100 g) ⁻¹]	淀粉 Starch /[g·(100 g) ⁻¹]	还原糖 Reducing sugar /[g·(100 g) ⁻¹]	总糖 Total sugar /[g·(100 g) ⁻¹]	干物质 Dry matter/%
T ₁	1.65 ^a	0.542 ^a	0.342 ^b	25.61 ^a	17.2 ^d	1.6 ^a	1.8 ^c	33.72 ^a
T ₂	1.67 ^a	0.406 ^c	0.317 ^b	25.52 ^a	19.2 ^{bc}	1.3 ^b	2.1 ^b	32.30 ^a
T ₃	1.47 ^{bc}	0.530 ^{ab}	0.445 ^a	22.63 ^b	18.8 ^{cd}	1.1 ^c	1.6 ^d	32.46 ^a
T ₄	1.57 ^{ab}	0.417 ^c	0.434 ^a	24.66 ^{ab}	23.0 ^a	1.0 ^c	1.8 ^c	32.11 ^a
T ₅	1.68 ^a	0.421 ^c	0.218 ^c	23.39 ^{ab}	20.8 ^b	1.0 ^c	3.4 ^a	33.65 ^a
CK	1.40 ^c	0.492 ^b	0.338 ^b	24.17 ^{ab}	17.6 ^d	1.1 ^c	1.8 ^c	32.28 ^a

注：同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著（ $P<0.05$ ）。
Note: Different lowercase letters after the same column of data indicate significant difference ($P<0.05$).

2.3 不同有机肥施用对土壤理化性质的影响

由表 5 可知，各处理对土壤 pH 的影响不明显（T₃ 除外），而对土壤养分的影响差异较大。施用不同有机肥均显著提高了土壤有机质含量（T₅ 除外），其中 T₄ 有机质含量最高（51.9 g/kg），较 IV（甘薯移栽前）土壤有机质含量（41.1 g/kg）增加 26.3%，较 CK（甘薯收获后）土壤有机质含量（41.8 g/kg）增加了 24.2%。同时施用有机肥还显著增加了土壤有效磷、交换性钙（T₂ 除外）、

交换性镁、有效态铜（T₃ 除外）、有效态锌和有效态锰（T₁ 除外）的含量。其中，有效磷含量较 CK 增幅为 5.4%~114.3%，交换性钙含量较 CK 增幅为 0.9%~28.0%，交换性镁含量较 CK 增幅为 27.4%~158.5%，有效态铜含量较 CK 增幅为 12.6%~55.2%，有效态锌含量较 CK 增幅为 10.5%~24.4%，有效态锰含量较 CK 增幅为 16.5%~29.0%。T₁ 和 T₃ 降低了土壤速效钾含量，其余处理则显著升高了土壤速效钾含量。T₂、T₃

和 T₄ 均显著提高了土壤碱解氮含量, 其余处理则刚好相反。另外, 未施肥种植甘薯显著降低了土壤中有效磷、有效钾、碱解氮、交换性钙、有效态锌、有效态锰和有效态铁的含量, 分别较 IV(初始值) 降低了 35.4%、12.7%、11.6%、14.5%、12.4%、

296.3%和 50.1%。由此表明, 增施有机肥均能显著提高土壤中的有机质含量, 但仅能补充部分土壤养分, 且不同有机肥对土壤养分的补充差异较大, 这可能与各处理纯养分投入量、甘薯生长习性以及养分流失等多方面因素相关。

表 5 不同有机肥的土壤理化性质
Tab. 5 Physical and chemical properties of soil with different organic fertilizers

处理 Treatment	pH	有机质 Organic matter /(g·kg ⁻¹)	有效磷 Available P /(mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available K /(mg·kg ⁻¹)	碱解氮 Alkali hy- drolyzed N /(mg·kg ⁻¹)	交换性钙 Exchangeable Ca /(cmol·kg ⁻¹)	交换性镁 Exchangeable Mg /(cmol·kg ⁻¹)	有效态铜 Available Cu /(mg·kg ⁻¹)	有效态锌 Available Zn /(mg·kg ⁻¹)	有效态锰 Available Mn /(mg·kg ⁻¹)	有效态铁 Available Fe /(mg·kg ⁻¹)
T ₁	4.73 ^a	43.9 ^{cd}	27.4 ^{bc}	127 ^d	151.79 ^{de}	16.50 ^c	2.37 ^c	1.03 ^c	3.31 ^a	20.63 ^c	101.34 ^d
T ₂	4.74 ^a	46.1 ^{bc}	30.1 ^b	183 ^a	168.34 ^c	16.00 ^c	2.09 ^c	1.31 ^b	3.14 ^{ab}	29.96 ^b	121.62 ^b
T ₃	4.15 ^b	46.8 ^b	47.8 ^a	129 ^d	194.64 ^a	16.41 ^c	1.14 ^c	0.57 ^d	2.94 ^{ab}	28.05 ^b	82.51 ^f
T ₄	4.53 ^a	51.9 ^a	24.2 ^{cd}	164 ^b	152.55 ^{de}	20.81 ^a	3.23 ^b	0.98 ^c	3.17 ^{ab}	27.05 ^b	93.10 ^c
T ₅	4.63 ^a	41.1 ^c	23.5 ^{cd}	155 ^c	173.60 ^{bc}	20.14 ^a	4.24 ^a	1.35 ^b	3.21 ^{ab}	27.59 ^b	107.88 ^c
CK	4.61 ^a	41.8 ^c	22.3 ^d	134 ^d	157.81 ^d	16.26 ^c	1.64 ^d	0.87 ^c	2.66 ^b	23.22 ^c	91.65 ^c
IV	4.69 ^a	41.1 ^c	30.2 ^b	151 ^c	178.86 ^b	18.62 ^b	0.54 ^f	1.48 ^a	2.99 ^{ab}	91.03 ^a	137.55 ^a

注: IV 表示未移栽甘薯前试验地土壤理化性质。同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 (P<0.05)。
Note: IV represents the physical and chemical properties of the test site. Different lowercase letters after the same column of data indicate significant difference (P<0.05).

2.4 不同有机肥施用对土壤微生物量碳、氮的影响

由表 6 可知, 与 CK 相比, 各处理均显著增加了土壤 MBC 和 MBN 的含量, 而 MBC/MBN 值明显降低。其中, MBC 较对照增幅最大的是松达生物有机肥 (T₅), 为 45.4%; 其次为复合微生物肥料 (T₃), 增幅为 25.1%; 活性腐殖酸多元素有机肥 (T₁) 的增幅最小 (6.2%)。MBN 的变化规律与 MBC 相似, 较对照增幅最大的仍是 T₅ (281.1%), 其次为 T₃ (90.5%), T₁ 的增幅最低 (9.5%)。MBC/MBN 值的变化则刚好与 MBC 和 (61.0%), 其次为 T₃ (34.4%), T₁ 的降幅最小

表 6 不同有机肥的微生物量碳、氮及比值
Tab. 6 Microbial biomass C, N and ratios with different organic fertilizers

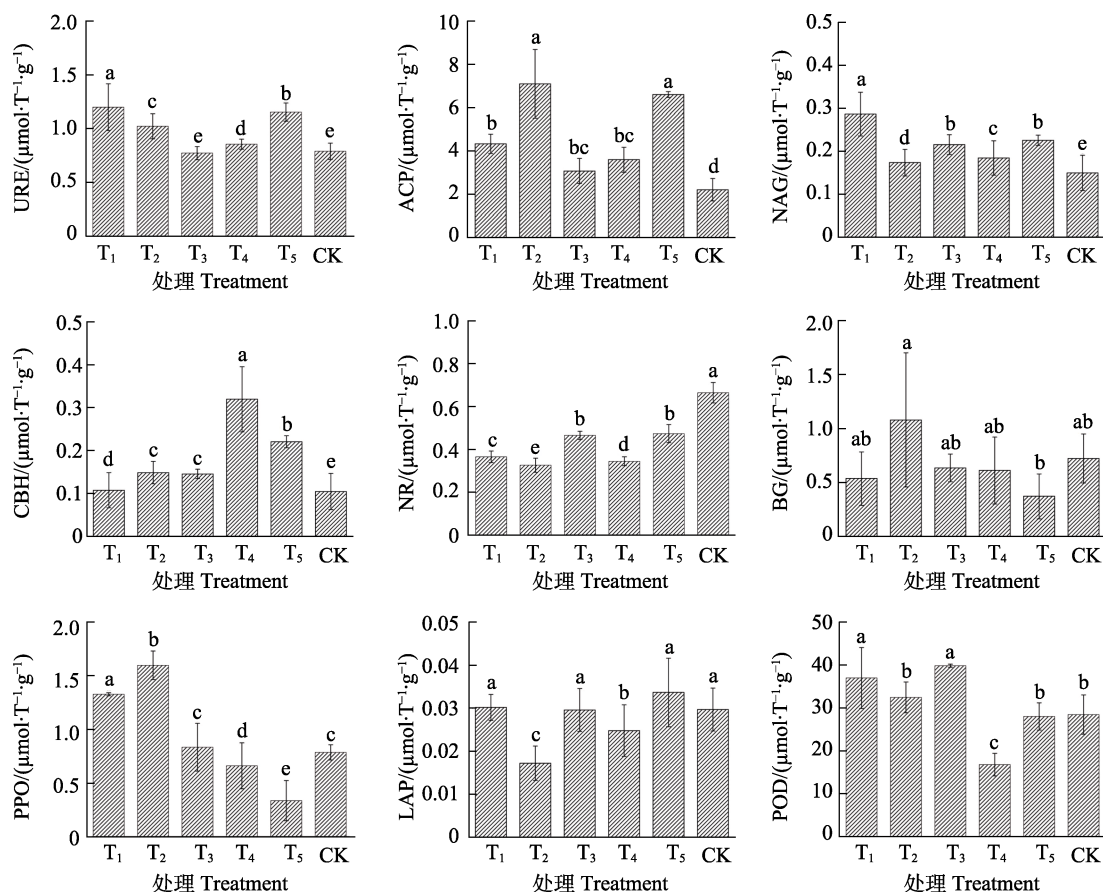
处理 Treatment	MBC/(mg·kg ⁻¹)	MBN/(mg·kg ⁻¹)	MBC/MBN
T ₁	462.41 ^{cd}	3.12 ^{cd}	148.35 ^b
T ₂	479.14 ^c	4.61 ^b	103.93 ^c
T ₃	564.44 ^b	5.43 ^b	103.88 ^c
T ₄	470.89 ^c	4.52 ^{bc}	104.10 ^c
T ₅	656.38 ^a	10.86 ^a	61.72 ^d
CK	451.21 ^d	2.85 ^d	158.44 ^a

注: 同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 (P<0.05)。
Note: Different lowercase letters after the same column of data indicate significant difference (P<0.05).

(6.4%)。由此表明, 增施有机肥能有效提高土壤中微生物碳氮含量, 且处理 T₅ (有机质≥40.0%, 有效活菌数≥0.20×10⁸/g, pH 7.0, 667 m² 用量 120 kg) 微生物分解有机物速度最快。

2.5 不同有机肥施用对土壤酶活性的影响

由图 1 可知, 与 CK 相比, 施用有机肥显著增加了土壤脲酶 (URE) 的活性 (T₃ 除外) (增幅 8.3%~51.7%)、酸性磷酸酶 (ACP) 活性 (增幅 61.3%~270.8%)、N-乙酰葡萄糖苷酶 (NAG) 活性 (增幅 16.0%~91.3%) 和纤维二糖酶 (CBH) 活性 (增幅 12.5%~206.7%), 而显著降低了硝酸还原酶 (NR) 活性 (降幅 28.6%~50.7%) 和 β-葡萄糖苷酶 (BG) 活性 (T₂ 除外) (降幅 5.8%~48.6%)。处理 T₁ 和 T₂ 的多酚氧化酶 (PPO) 活性显著高于 CK, 分别较 CK 增加了 69.1%和 103.7%; 处理 T₄ 和 T₅ 则明显降低了土壤 PPO 活性, 而处理 T₃ 的 PPO 活性虽高于 CK, 但二者之间差异不显著。处理 T₄ 土壤过氧化物酶 (POD) 活性显著低于 CK, T₁ 和 T₃ 则显著高于 CK, 其余处理与 CK 间无显著差异。对于亮氨酸酶 (LAP), 除处理 T₂ 和 T₄ 显著低于对照外, 其余处理与 CK 之间无显著差异。综上, 不同有机肥对土壤酶活性的影响差异较大, 这可能与不同有机肥的理化性质、微生物数量及酶活性等多因素影响土壤酶活性有关。



不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$).

图 1 不同有机肥处理的土壤酶活性

Fig. 1 Soil enzyme activities under different organic fertilization treatments

2.6 有机肥与甘薯产量及品质的相关性分析

由表 7 可知, 甘薯的块根产量与有机肥中纯氮的投入量呈显著负相关, 而与其他养分的投入量相关性不明显; 大中薯率与纯磷和纯钾投入量均呈显著正相关, 且与纯钾投入量的相关性达到极显著水平; 甘薯块根的蛋白质和维生素 C 含量均与肥料 pH 及有机质投入量呈显著正相关, 而与纯氮的投入量呈显著负相关, 其中维生素 C 含量与肥料 pH 的正相关性, 蛋白质含量与肥料纯氮投入量的负相关性均达到了极显著水平; 块根中的粗纤维和粗脂肪含量均与肥料的纯氮投入量呈显著正相关, 且粗纤维含量与有机质投入量呈显著负相关, 而块根中的淀粉、还原糖、总糖及干物质含量则与有机肥的相关性不明显。另外, 有机肥中纯磷和纯钾的投入量与块根产量和品质相关性均不显著。由此表明, 有机肥中不同成分对甘薯块根产量和品质的影响差异较大, 肥料的 pH 及有机质投入量主要影响块根的品质, 而纯氮投入量则与块根产量和品质均密切相关。

2.7 有机肥与土壤理化性质的相关性分析

由表 8 可知, 土壤 pH、有机肥的 pH 和有机质投入量呈极显著正相关, 而与有机肥中纯氮投入量呈极显著负相关。土壤有机质含量则与有机肥的 pH 及纯养分投入量相关性不显著。土壤有效磷和碱解氮含量与有机肥的 pH 呈显著负相关, 而与有机肥中纯氮投入量呈极显著正相关。土壤速效钾含量与有机肥的 pH 及有机质投入量呈显著正相关, 且与有机质投入量的相关性达到极显著水平。土壤有效磷含量与有机质的投入量、速效钾含量与纯氮投入量均呈显著负相关。由此表明, 土壤理化性质主要受有机肥的 pH、有机质及纯氮投入量的影响, 而与纯磷和纯钾的投入量相关性较小。

2.8 有机肥与土壤微生物量及酶活性的相关性分析

由表 9 可知, 土壤微生物量碳 (MBC) 与肥料的 pH 呈显著负相关; 土壤脲酶 (URE) 和酸性磷酸酶 (ACP) 均与有机肥中纯氮投入量呈显

著负相关，且后者的相关性达到极显著。另外，ACP 与肥料的 pH 呈显著正相关，而与有机质投入量呈极显著正相关；硝酸还原酶（NR）和亮氨酸酶（LAP）均与肥料 pH 及有机质投入量呈显著负相关，且 LAP 与有机肥中纯磷和纯钾投入量呈显著负相关；贝塔葡萄糖苷酶（BG）与有机肥中纯钾投入量呈显著正相关，而 PPO 与肥料的 pH 及纯钾投入量呈极显著正相关。总体而言，有机肥的理化性质及投入量与土壤 MBC、土壤 URE、ACP、NR、PPO 和 LAP 的相关性强于土壤微生物量氮（MBN）、N-乙酰葡萄糖苷酶（NAG）、纤维二糖酶（CBH）和多酚氧化酶（PPO）。

表 7 有机肥与甘薯产量及品质的相关性分析
Tab. 7 Correlation analysis between organic fertilizer and yield and quality of sweet potato

指标 Index	块根产量 Root yield	大中薯率 Commodity rate	蛋白质 Protein	粗纤维 Crude fibre	粗脂肪 Crude fat	维生素 C Vitamin C	淀粉 Starch	还原糖 Reducing sugar	总糖 Total sugar	干物质 Dry matter
肥料 pH	0.420	0.436	0.531*	-0.349	-0.316	0.701**	-0.133	0.473	0.017	0.163
有机质投入量	0.494	0.330	0.613*	-0.601*	-0.373	0.638*	0.083	0.138	0.170	0.132
纯磷投入量	-0.057	0.527*	0.188	-0.051	0.038	0.353	-0.323	0.302	-0.182	0.073
纯钾投入量	-0.138	0.745**	0.156	-0.130	0.041	0.388	-0.397	0.329	-0.268	-0.140
纯氮投入量	-0.634*	0.042	-0.670**	0.588*	0.609*	-0.527*	-0.231	-0.073	-0.451	-0.335

注：**表示在 0.01 水平（双侧）上极显著相关，*表示在 0.05 水平（双侧）上显著相关。
Note: ** indicates extremely significant correlation at the level of 0.01 (both sides); * indicates significant correlation at the level of 0.05 (both sides).

表 8 有机肥与土壤理化性质的相关性分析
Tab. 8 Correlation analysis of organic fertilizer and soil physical and chemical properties

指标 Index	土壤 pH Soil pH	土壤有机质 Soil organic matter	有效磷 Available P	速效钾 Available K	碱解氮 Alkali hydrolyzed N
肥料 pH	0.793**	0.010	-0.573*	0.583*	-0.554*
有机质投入量	0.705**	0.045	-0.571*	0.805**	-0.476
纯磷投入量	0.193	0.039	0.133	0.326	0.013
纯钾投入量	0.148	0.066	0.287	0.466	0.154
纯氮投入量	-0.836**	0.144	0.899**	-0.638*	0.658**

注：**表示在 0.01 水平（双侧）上极显著相关，*表示在 0.05 水平（双侧）上显著相关。
Note: ** indicates extremely significant correlation at the level of 0.01 (both sides); * indicates significant correlation at the level of 0.05 (both sides).

表 9 有机肥与土壤微生物量及酶活性的相关性分析
Tab. 9 Correlation analysis of organic fertilizer with soil microbial biomass and enzyme activity

指标 Index	MBC	MBN	URE	ACP	NAG	CBH	NR	BG	PPO	POD	LAP
肥料 pH	-0.538*	-0.363	0.445	0.558*	-0.056	-0.103	-0.599*	0.369	0.663**	-0.191	-0.553*
有机质投入量	-0.373	-0.179	0.397	0.679**	-0.242	0.079	-0.531*	0.412	0.474	-0.323	-0.557*
纯磷投入量	-0.341	-0.322	0.064	0.128	-0.192	-0.382	-0.296	0.011	0.509	0.290	-0.525*
纯钾投入量	-0.386	-0.374	-0.047	0.425	-0.199	-0.434	-0.410	0.613*	0.762**	0.329	-0.664**
纯氮投入量	0.157	-0.053	-0.614*	-0.645**	0.076	-0.224	0.354	-0.091	-0.182	0.472	0.244

注：**表示在 0.01 水平（双侧）上极显著相关，*表示在 0.05 水平（双侧）上显著相关。
Note: ** indicates extremely significant correlation at the level of 0.01 (both sides); * indicates significant correlation at the level of 0.05 (both sides).

2.9 有机肥与土壤理化性质、土壤微生物量及土壤酶活性的主成分分析

由表 10 可知，前 6 个主要成分累计贡献率达 92.3%，表明前 6 个主要成分涵括了有机肥与土壤理化性质、土壤微生物量及土壤酶活性的主要差

异指标信息。其中，第 1 成分特征值为 7.145，贡献率为 34.025%；第 2 成分特征值为 4.371，贡献率为 20.815%，累计贡献率为 54.840%；第 3 成分特征值为 3.283，贡献率为 15.632%，累计贡献率为 70.472%。以横轴为第 1 主成分，纵轴为第 2

主成分(图2)。有机肥理化性质如pH(FPH)、有机质(FOM)、全钾(TK)和全磷(TP)均与第1主成分呈显著负相关,而有机肥纯氮投入量(TN)则与第1主成分呈显著正相关;土壤理化性质如土壤pH(SPH)、有机质(SOM)和速效K(AK)均与第1主成分呈负相关,而土壤有效磷(AP)、和碱解N(AN)与第1主成分呈正相关;土壤酶如BG、NAG、POD和URE均与第1主成分呈负相关,而PPO、ACP、LAP和CBH均与第1主成分呈正相关;MBC和MBN均与第1主成分呈正相关。有机肥理化性质如TN、TP和TK均与第2主成分呈负相关,而FPH和FOM则与第2主成分呈正相关;土壤理化性质如SOM、AP和AN与第2主成分呈负相关,而SPH和AK则与第2主成分呈正相关;土壤酶如PPO、CBH、BG和NAG均与第2主成分呈负相关,URE、POD、

ACP和LAP则与第2主成分呈正相关;而MBC和MBN均与第2主成分呈正相关。

从箭头连线夹角大小来看,肥料的pH与FOM的相关性较强;肥料的有机质与土壤AK的相关性较强;肥料TP和TK与BG、NAG及SOM关系较强;肥料TN与AN、AP、CBH、PPO的相关性较强。另外,土壤AP与CBH相关性较强,土壤AK与NR相关性较强,土壤AP与CBH相关性较强,土壤AN与PPO相关性较强;土壤MBC与LAP相关性较强,土壤MBN与POD相关性较强。

3 讨论

3.1 施用有机肥对甘薯产量及品质的影响

本研究表明,不施用化肥的情况下,仅施用有机肥仍能促进甘薯地上部的生长,提高甘薯的产量和商品薯率,这与禹阳等^[21]、赵鹏等^[22]的研究结果相似,表明增施有机肥或采用有机肥+复合肥配施方式均能提高甘薯的产量,这主要归因于外源有机肥料的投入,提升了土壤有机质及有效养分含量,以及有机肥料对土壤微生物群落结构的重塑,通过介导根际微生物的代谢能力实现对作物产量的影响^[16]。本研究以处理T₄甘薯产量最高,该肥料pH为7.86,有机质含量50.2%,N+P+K养分含量约9%,N:P:K比例约为1:0.46:0.47,在5个肥料处理中,有机质的投入量排名第二,纯养分的投入量排名第四。一方面可能与肥料本身的特性有关,不同有机肥释放的可利用养分量不同,导致养分利用率存在一定的差异^[16];另一方面可能与不同有机肥对土壤微环境的影响不同,导致甘薯对养分吸收的数量和比例存在较大的差异^[23],进而影响到块根产量的形成。相关性研究表明,有机肥中纯氮的投入量与甘薯的产量呈显著负相关,而低氮和高氮投入量均不利于产量的形成,这可能与不同甘薯品种对氮肥需求和利用有关^[24];甘薯大中薯率与有机肥中纯钾的投入量呈极显著正相关,这与前人研究结果相似^[14, 25],表明钾元素有利于后期块根的膨大。另外,不同有机肥对甘薯品质的影响差异较大,通过相关性分析表明,肥料的pH、有机质投入量和纯氮投入量主要影响块根的相关品质,但对维生素C和干物质含量的影响相对较小,该研究结果与唐忠厚等^[26]、侯会静等^[27]研究有机肥对甘薯品质影响的部分结果相似,但也存在一定的差异,其原因可

表 10 有机肥与土壤理化性质、微生物量及酶活性的典型变量

Tab. 10 Typical variables of soil physical and chemical properties, soil microbial mass and soil enzyme activity

成分 Component	特征值 Characteristic value	贡献率 Contribution rate/%	累计贡献率 Cumulative contribution rate/%
1 st	7.145 16	34.024 59	34.024 59
2 nd	4.371 23	20.815 37	54.839 96
3 rd	3.282 68	15.631 79	70.471 75
4 th	2.394 33	11.401 57	81.873 32
5 th	1.240 61	5.907 68	87.781
6 th	0.951 35	4.530 23	92.311 22

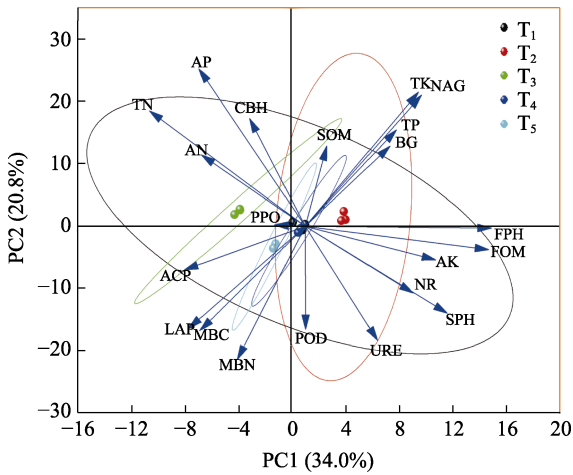


图 2 有机肥与土壤理化性质、微生物量及酶活性的主成分分析

Fig. 2 Principal component analysis of organic fertilizer and soil physical and chemical properties, microbial bio-mass and enzyme activity

能与有机肥种类和甘薯品种不同导致对养分的需求各异,造成甘薯营养累积不同。另外,块根品质以处理 T₄ 效果最好,粗纤维含量较低,蛋白质含量、粗脂肪和淀粉含量均显著高于对照,且淀粉含量在所有处理中最高,这说明有机肥 T₄ 有利于块根淀粉的累积。

3.2 施用有机肥对土壤理化性质、微生物量及酶活性的影响

有研究表明,有机肥能改善土壤空隙状况、提高土壤蓄水保墒,同时增加土壤有机质、平衡养分,提高土壤酶活性,进而增加作物的产量,对于促进农业持续健康发展具有重要意义^[3, 7, 27-28]。本研究中除 T₅ 外,其余 4 种有机肥均显著增加了土壤有机质含量。同时施肥还显著增加了土壤有效磷、交换性钙(T₂ 除外)、交换性镁、有效态铜(T₃ 除外)、有效态锌和有效态锰(T₁ 除外)含量,这与杨雷等^[29]研究发现施用生物有机肥,土壤有机质、全氮、速效钾、缓效钾、有效磷含量有所上升,赵欢等^[30]研究发现配施有机肥有效增加马铃薯土壤有机质、碱解氮、有效磷和速效钾含量存在一定的相似性,但不同有机肥对土壤养分的影响差异较大,甚至会降低土壤某些元素的含量。研究还表明,与未种植甘薯土壤相比,无论施肥与否,种植甘薯后土壤中的有效态铜、有效态锰和有效态铁含量均显著降低,特别是锰含量,较土壤 IV 值降低了 3 倍以上,这说明甘薯生长除需要大量养分元素外,对微量元素的需求也必不可少,而目前有关这方面的研究较少^[31],尤其是锰元素的大量消耗机理还有待进一步证实。另外,施用不同有机肥显著增加了土壤微生物量碳氮的含量,降低了微生物 C/N 比值,这与宋震震等^[1]研究发现长期施用有机肥可显著提高土壤微生物量氮、碳的结果一致,说明施用有机肥特别是含有效活菌数 ≥ 0.20 亿/g 的有机肥,极大地促进了土壤微生物的生长繁育和土壤有机质的分解,有利于减少氮的损失。不同有机肥对土壤酶活性的影响差异较大。总体上看,施用不同有机肥均增加了土壤脲酶(T₃ 除外)、酸性磷酸酶和纤维二糖酶活性,而降低了硝酸还原酶和 β -葡萄糖苷酶活性,但不同有机肥对多酚氧化酶、过氧化物酶和亮氨酸酶的活性影响结果不一致,这与李娟等^[32]、陈宵宇等^[33]、荣勤雷等^[34]研究结果有类似之处,但也存在一定的差异,这可能与

有机肥种类和土壤条件不同有关。

参考文献

- [1] 宋震震,李絮花,李娟,林志安,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, 2014, 20(3): 525-533.
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 Fertilizer, 2014, 20(3): 525-533. (in Chinese)
- [2] 陶磊,褚贵新,刘涛,唐诚,李俊华,梁永超. 有机肥替代部分化肥对长期连作棉田产量、土壤微生物数量及酶活性的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(21): 6137-6146.
TAO L, CHU G X, LIU T, TANG C, LI J H, LIANG Y C. Impacts of organic manure partial substitution for chemical fertilizer on cotton yield, soil microbial community and enzyme activities in mono-cropping system in drip irrigation condition[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(21): 6137-6146. (in Chinese)
- [3] 田小明,李俊华,王成,褚贵新,危常州,郑倩,邓世伟. 连续 3 年施用生物有机肥对土壤养分、微生物生物量及酶活性的影响[J]. 土壤, 2014, 46(3): 481-488.
TIAN X M, LI J H, WANG C, CHU G X, WEI C Z, ZHENG Q, DENG S W. Effects of continuous application of bio-organic fertilizer for three years on soil nutrients, microbial biomass and enzyme activity[J]. Soils, 2014, 46(3): 481-488. (in Chinese)
- [4] 宁川川,王建武,蔡昆争. 有机肥对土壤肥力和土壤环境质量的影响研究进展[J]. 生态环境学报, 2016, 25(1): 175-181.
NING C C, WANG J W, CAI K Z. The effects of organic fertilizers on soil fertility and soil environmental quality: a review[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2016, 25(1): 175-181. (in Chinese)
- [5] MARSCHNER P, KANDELER E, MARSCHNER B. Structure and function of the soil microbial community in a long-term fertilizer experiment[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2003, 35(3): 453-461.
- [6] TIMO K, STEPHAN W, FRANK E. Microbial activity in a sandy arable soil is governed by the fertilization regime[J]. European Journal of Soil Biology, 2004, 40(2): 87-94.
- [7] 孔涛,马瑜,刘民,朱朝辉,何志明. 生物有机肥对土壤养分和土壤微生物的影响[J]. 干旱区研究, 2016, 33(4): 884-891.
KONG T, MA Y, LIU M, ZHU Z H, HE Z M. Effect of applying biological organic fertilizer on soil nutrients and soil microbes[J]. Arid Zone Research, 2016, 33(4): 884-891. (in

- Chinese)
- [8] 张鹏, 贾志宽, 路文涛, 张晓芳, 孙红霞, 杨保平. 不同有机肥施用量对宁南旱区土壤养分、酶活性及作物生产力的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(5): 1122-1130.
ZHANG P, JIA Z K, LU W T, ZHANG X F, SUN H X, YANG B P. Effects of organic fertilization on soil nutrient, enzyme activity and crop productivity in semi-arid areas of southern Ningxia[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2011, 17(5): 1122-1130. (in Chinese)
- [9] 巩子毓, 高旭, 黄炎, 李荣, 王东升, 沈其荣. 连续施用生物有机肥提高设施黄瓜产量和品质的研究[J]. 南京农业大学学报, 2016, 39(5): 777-783.
GONG Z Y, GAO X, HUANG Y, LI R, WANG D S, SHEN Q R. Research on continuous application of bio-organic fertilizer for improving greenhouse cucumber yield and quality[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2016, 39(5): 777-783. (in Chinese)
- [10] 王立刚, 李维炯, 邱建军, 朱朝辉, 何志明. 生物有机肥对作物生长、土壤肥力及产量的效应研究[J]. 中国土壤肥料, 2004(5): 12-16.
WANG L G, LI W J, QIU J J, ZHU Z H, HE Z M. Effect of biological organic fertilizer on crops growth[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2004(5): 12-16. (in Chinese)
- [11] 郭洁, 孙权, 张晓娟, 王锐, 王振平, 朱英. 生物有机肥对酿酒葡萄生长、养分吸收及产量品质的影响[J]. 河南农业科学, 2012, 41(12): 76-80, 84.
GUO J, SUN Q, ZHANG X J, WANG R, WANG Z P, ZHU Y. Effects of bio-organic fertilizer on wine grape growth, nutrients absorption, yield and quality[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2012, 41(12): 76-80, 84. (in Chinese)
- [12] 韦忠, 尹永强, 钟启德, 韦大跃, 何明维, 韦峥宇, 耿富卿. 施用生物有机肥对烤烟生长及其产量和品质的影响[J]. 中国农学通报, 2011, 27(3): 135-138.
WEI Z, YIN Y Q, ZHONG Q D, WEI D Y, HE M W, WEI Z Y, GEN F Q. Effect of application of bio-organic fertilizer on growth, yield and quality of flue-cured tobacco[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(3): 135-138. (in Chinese)
- [13] 孔祥波, 徐坤, 尚庆文, 王玉霞. 生物有机肥对生姜生长及产量、品质的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2007(2): 64-67.
KONG X B, XU K, SHANG Q W, WANG Y X. Effect of bioorganic fertilizer on the growth yield and quality of ginger[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2007(2): 64-67. (in Chinese)
- [14] 王汝娟, 王振林, 梁太波, 张晓冬, 刘兰兰, 史春余. 腐植酸钾对食用甘薯品种钾吸收、利用和块根产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008(3): 520-526.
WANG R J, WANG Z L, LIANG T B, ZHANG X D, LIU L L, SHI C Y. Effects of potassium humate on potassium absorption, utilization and root tuber yield of edible sweet potato[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2008(3): 520-526. (in Chinese)
- [15] 柯蓓. 有机肥替代部分化肥对甘薯产量及土壤养分含量的影响[J]. 福建农业科技, 2019(9): 67-70.
KE B. Effect of partial replacement of chemical fertilizers with organic fertilizers on yield and soil nutrient content of sweet potato[J]. Fujian Agricultural Science and Technology, 2019(9): 67-70. (in Chinese)
- [16] 王静, 王磊, 刘耀斌, 李娟, 章明清, 张永春. 长期施用不同有机肥对甘薯产量和土壤生物性状的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(2): 184-192.
WANG J, WANG L, LIU Y B, LI J, ZHANG M Q, ZHANG Y C. Effects of long-term different types of organic fertilizer application on sweet potato yield and soil biological traits[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(2): 184-192. (in Chinese)
- [17] 吕长文, 唐道彬, 罗小敏, 王季春. 甘薯干物质测定方法研究[J]. 江苏农业科学, 2009(3): 307-308.
LYU C W, TANG D B, LUO X M, WANG J C. Study on the determination of dry matter in sweet potato[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2009(3): 307-308. (in Chinese)
- [18] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
GUAN S Y. Soil enzyme and its research method[M]. Beijing: Agricultural Publishing House, 1986. (in Chinese)
- [19] 武志杰, 隗英华, 陈利军, 史云峰. 一种检测土壤硝酸还原酶活性的分析方法: CN101271060B[P]. 2011-06-08.
WU Z J, JUAN Y H, CHEN L J, SHI Y F. An analytical method for detecting nitrate reductase activity in soil: CN101271060B[P]. 2011-06-08. (in Chinese)
- [20] SINSABAUGH R L, REYNOLDS H, LONG T M. Rapid assay for amidohydrolase (urease) activity in environmental samples[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2000, 32(14): 2095-2097.
- [21] 禹阳, 谢一芝, 郭小丁, 贾赵东, 马佩勇, 边小峰. 不同施肥方式对中低产田甘薯产量和土壤肥力的影响[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(22): 77-81.
YU Y, XIE Y Z, GUO X D, JIA Z D, MA P Y, BIAN X F. Effects of different fertilization methods on sweet potato yield and soil fertility in medium and low yield fields[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2020, 48(22): 77-81. (in Chinese)
- [22] 赵鹏, 刘明, 靳容, 陈晓光, 张爱君, 唐忠厚, 魏猛. 长期施用有机肥对潮土区甘薯碳氮积累与分配的影响[J]. 中国农业科学, 2021, 54(10): 2142-2153.
ZHAO P, LIU M, JIN R, CHEN X G, ZHANG A J, TANG Z H, WEI M. Effects of long-term application of organic fer-

- tilizer on carbon and nitrogen accumulation and distribution of sweetpotato in fluvo aquic soil area[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(10): 2142-2153. (in Chinese)
- [23] 段文学, 张海燕, 解备涛, 汪宝卿, 张立明. 化肥和生物有机肥配施对鲜食型甘薯块根产量、品质及土壤肥力的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2021, 27(11): 1971-1980.
- DUAN W X, ZHANG H Y, XIE B T, WANG B Q, ZHANG L M. Effects of chemical and bio-organic fertilizers on tuber yield, quality, and soil fertility of edible sweetpotato[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(11): 1971-1980. (in Chinese)
- [24] 董月, 安霞, 张辉, 马洪波, 宁运旺, 张永春. 不同品种甘薯的生物量累积、养分吸收和分配规律[J]. *江苏农业学报*, 2016, 32(2): 313-318.
- DONG Y, AN X, ZHANG H, MA H B, NING Y W, ZHANG Y C. Biomass accumulation, nutrient absorption and distribution of different sweet potato varieties[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2016, 32(2): 313-318. (in Chinese)
- [25] 汪顺义, 李欢, 史衍玺. 不同施钾方式对甘薯钾素吸收及产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(2): 557-564.
- WANG S Y, LI H, SHI Y X. Effects of different potassium application methods on potassium absorption and yield of sweet potato[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2016, 22(2): 557-564. (in Chinese)
- [26] 唐忠厚, 李洪民, 张爱君, 史新敏, 朱红, 孙健. 长期定位施肥对甘薯块根产量及其主要品质的影响[J]. *浙江农业学报*, 2010, 22(1): 57-61.
- TANG Z H, LI H M, ZHANG A J, SHI X M, ZHU H, SUN J. Effect of long-term located fertilization on yield and quality of sweetpotato[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2010, 22(1): 57-61. (in Chinese)
- [27] 侯会静, 韩正砥, 杨雅琴, 李占超, 王洁. 生物有机肥的应用及其农田环境效应研究进展[J]. *中国农学通报*, 2019, 35(14): 82-88.
- HOU H J, HAN Z D, YANG Y Q, LI Z C, WANG J. Bio-organic fertilizer: application and farmland environmental effects[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2019, 35(14): 82-88. (in Chinese)
- [28] 姬兴杰, 杨颖颖, 熊淑萍, 李春明, 马新明, 刘晓迎. 不同肥料对土壤微生物数量及全氮时空变化的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2008, 16(3): 576-582.
- JI X J, YANG Y Y, XIONG S P, LI C M, MA X M, LIU X Y. Effect of different fertilization on spatio-temporal variability of soil microorganism and total N[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 16(3): 576-582. (in Chinese)
- [29] 杨雷, 冯作山, 余力, 张洪斌, 邵德强, 王道兵. 生物有机肥部分替代化肥对土壤肥力及甘薯产量的影响[J]. *南方农业*, 2019, 13(10): 26-28, 32.
- YANG L, FENG Z S, YU L, ZHANG H B, SHAO D Q, WANG D B. Effects of bio-organic fertilizer partially replacing chemical fertilizer on soil fertility and sweet potato yield[J]. *South China Agriculture*, 2019, 13(10): 26-28, 32. (in Chinese)
- [30] 赵欢, 刘海, 何佳芳, 周瑞荣, 肖厚军, 孙锐锋, 苟久兰. 不同肥料组合对马铃薯产量、生物性状和土壤肥力的影响[J]. *贵州农业科学*, 2013, 41(12): 110-114.
- ZHAO H, LIU H, HE J F, ZHOU R R, XIAO H J, SUN R F, GOU J L. Effects of different fertilizer combination on potato yield, biological traits and soil fertility[J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2013, 41(12): 110-114. (in Chinese)
- [31] 杨爱梅, 吴继华, 雷红霞, 秦云霞, 雷书声. 几种大量和微量元素对甘薯的增产效应[J]. *河南农业科学*, 2001(8): 11-12.
- YANG A M, WU J H, LEI H X, QIN Y X, LEI S S. Effect of several large and trace elements on yield increase of sweet potato[J]. *Henan Agricultural Science*, 2001(8): 11-12. (in Chinese)
- [32] 李娟, 赵秉强, 李秀英, HWAT B S. 长期有机无机肥料配施对土壤微生物学特性及土壤肥力的影响[J]. *中国农业科学*, 2008, 41(1): 144-152.
- LI J, ZHAO B Q, LI X Y, HWAT B S. Effects of long-term combined application of organic and mineral fertilizers on soil microbiological properties and soil fertility[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(1): 144-152. (in Chinese)
- [33] 陈宵宇, 周连仁, 刘妍. 有机无机肥配施对黑土酶活性及作物产量的影响[J]. *东北农业大学学报*, 2012, 43(2): 88-91.
- CHEN X Y, ZHOU L R, LIU Y. Effect of inorganic fertilizer combined with organic manure on enzyme activity and crop yield in black soil[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2012, 43(2): 88-91. (in Chinese)
- [34] 荣勤雷, 梁国庆, 周卫, 刘东海, 王秀斌, 孙静文, 李双来, 胡诚. 不同有机肥对黄泥田土壤培肥效果及土壤酶活性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(5): 1168-1177.
- RONG Q L, LIANG G Q, ZHOU W, LIU D H, WANG X B, SUN J W, LI S L, HU C. Effects of different organic fertilization on fertility and enzyme activities of yellow clayey soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(5): 1168-1177. (in Chinese)