

复合肥与菌肥减量配施对冬闲田土壤环境及马铃薯生长的影响

杨 丹^{1,2}, 李 璐^{1,2}, 李 兵^{1,2}, 罗彬彬¹, 李树举^{1,2}, 刘会桃¹, 刘 佳¹

(1. 常德市农林科学研究院 湖南常德 415000; 2. 国家马铃薯产业技术体系常德综合试验站 湖南常德 415008)

摘 要: 为探索冬闲田马铃薯绿色高效生产中复合肥减量配施菌肥的可行性, 通过田间试验, 设置 5 个施肥处理, 以养分总量 $36 \text{ kg} \cdot 667 \text{ m}^{-2}$ 为对照 (W1), 研究复合肥减量配施不同用量菌肥对土壤理化性质、微生物群落结构、马铃薯农艺性状、产量及品质的影响。结果表明, 复合肥减量配施菌肥对土壤理化性质、细菌群落多样性及植株农艺性状影响不显著, 但对马铃薯产量和品质影响显著。增施菌肥后, 放线菌门相对丰度显著降低 22.1%~29.5%。冗余分析显示, 土壤微生物群落主要受全钾、速效钾、全氮、碱解氮和有机质含量影响。W5 处理 (复合肥 $65 \text{ kg} \cdot 667 \text{ m}^{-2}$ 、菌肥 $32.73 \text{ kg} \cdot 667 \text{ m}^{-2}$, $\text{N-P}_2\text{O}_5\text{-K}_2\text{O}$ 总量较 W1 减少 41.7%) 在减肥幅度最大、肥料投入最少的情况下, 产量达 $2\,407.36 \text{ kg} \cdot 667 \text{ m}^{-2}$, 与 W1 无显著差异; 其块茎干物质率以及淀粉、维生素 C 含量显著高于 W1, 与品质最佳的 W4 处理无显著差异, 综合表现最优。综上所述, W5 处理可在稳定产量、提升品质的前提下实现大幅减施化肥, 是冬闲田早熟马铃薯种植的推荐施肥方案。

关键词: 马铃薯; 菌肥; 土壤理化性质; 微生物多样性; 产量; 品质

中图分类号: S532

文献标志码: A

文章编号: 1673-2871(2026)08-130-08

Effects of combined reduced application of compound fertilizer and bacterial fertilizer on soil environment and potato growth in winter fallow fields

Yang Dan^{1,2}, Li Lu^{1,2}, Li Bing^{1,2}, Luo Binbin¹, Li Shuju^{1,2}, Liu Huitao¹, Liu Jia¹

(1. Changde Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Changde 415000, Hunan, China; 2. Changde Comprehensive Experimental Station of National Potato Research System, Changde 415008, Hunan, China)

Abstract: To explore the feasibility of combined reducing application of compound fertilizer and bacterial fertilizer for green and efficient potato production in winter fallow fields, this study established five fertilization treatments, used $\text{N-P}_2\text{O}_5\text{-K}_2\text{O}$ content of $36 \text{ kg} \cdot 667 \text{ m}^{-2}$ as control (W1), and systematically investigated the effects of reduced compound fertilizer combined with different amounts of bacterial fertilizer on soil physicochemical properties, microbial community structure, potato agronomic traits, yield, and tuber quality through field experiments. The results showed that the combined application of compound fertilizer and bacterial fertilizer had no significant impact on soil physicochemical properties, bacterial community diversity, or plant agronomic traits, but significantly affected potato yield and tuber quality. After the application of bacterial fertilizer, the relative abundance of Actinobacteria significantly decreased by 22.1% to 29.5%, and its abundance showed a significant negative correlation with fertilization treatments. Redundancy analysis indicated that the soil microbial community was mainly influenced by total potassium, available potassium, total nitrogen, alkaline hydrolyzable nitrogen, and organic matter content. Treatment W5 (compound fertilizer at $65 \text{ kg} \cdot 667 \text{ m}^{-2}$ and bacterial fertilizer at $32.73 \text{ kg} \cdot 667 \text{ m}^{-2}$, with a 41.7% reduction in total $\text{N-P}_2\text{O}_5\text{-K}_2\text{O}$ compared to W1) achieved a yield of $2\,407.36 \text{ kg} \cdot 667 \text{ m}^{-2}$, under the conditions of the greatest fertilizer reduction and the lowest fertilizer input, with no significant difference from W1. Moreover, W5 significantly improved tuber dry matter, starch, and vitamin C content compared to W1, and showed no significant difference from the best-quality treatment (W4), which had the best quality, demonstrating the best overall performance. In conclusion, treatment W5 can achieve substantial fertilizer reduction while maintaining stable yield and improving quality, making it a recommended fertilization strategy for early-maturing potato production in winter fallow fields.

Key words: Potato; Bacterial fertilizer; Soil physicochemical property; Microbial diversity; Yield; Quality

收稿日期: 2025-12-23; 修回日期: 2026-03-18

基金项目: 国家现代农业产业技术体系建设专项基金 (CARS-09-ES17)

作者简介: 杨 丹, 女, 副研究员, 主要从事马铃薯新品种选育与栽培技术研究。E-mail: 1151904158@qq.com

随着现代农业的快速发展,肥料被大量且单一使用,容易造成环境污染,带来土壤板结、酸化等问题,不利于作物生长^[1-3];有研究表明,微生物菌肥与复合肥配施,能够减少化肥施用量。微生物菌肥能有效改良土壤环境并提升其可持续生产力。其作用机制主要体现在:一方面,通过改善土壤物理结构并提升有机质含量,为作物生长奠定良好基础;另一方面,借助微生物活动促进土壤中难溶营养素的溶解与释放,在提高土壤微量元素有效性的同时,降低重金属的生物毒性。通过上述协同作用,菌肥不仅优化了根际微生物群落的多样性与结构,而且从根本上增强了土壤的综合生产能力^[4-6]。此外,菌肥还可显著提高作物光合作用效率、增强抗氧化能力、抑制膜脂过氧化产物的积累,促进作物吸收养分^[7],缓解盐碱胁迫^[8-9],有利于作物生长发育,从而提高农作物产量和品质^[10-12]。

微生物菌肥能够有效改善土壤环境、提高作物产量和抗逆性,减少病虫害的发生^[13],但微生物菌肥用量并不是越多越好^[14]。李其勇等^[15]研究表明,25%微生物菌肥配施复合肥处理对辣椒产量、品质、土壤养分的促进作用优于50%微生物菌肥配施复合肥。本地区合作社或者农户在马铃薯的生产过程中,为了节约种植成本和用工成本,习惯单一大量施用复合肥,长年不施用有机肥,肥料利用率低,致使土壤板结,土传病害加重,马铃薯产量和品质提升受限。有研究表明,微生物菌肥配施能够改善土壤质量,促进马铃薯生长发育,提高马铃薯的产量及品质^[16-17]。为改善冬闲田马铃薯种植户施肥习惯,减少肥料浪费,在不影响产量和品质的前提下,进一步提高肥料利用效率,改良土壤环境,本试验选用一种复合微生物菌肥,通过复合肥减量与不同用量菌肥配施,研究其对冬闲田土壤理化性质、土壤微生物、马铃薯产量和品质的影响,旨在为冬闲田马铃

薯绿色高效生产提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况及试验材料

试验于2022年12月至2023年5月在常德市农林科学研究院试验基地进行,试验地海拔35 m,属于亚热带季风湿润气候,年平均气温17℃。地域年均降水量1360 mm,雨量丰沛。前茬作物为水稻,土壤类型为壤土。土壤理化性质为:pH 5.69,碱解氮含量(w ,下同)113 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,有效磷含量15.4 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效钾含量79.0 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,全氮含量1.24 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全磷含量0.62 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全钾含量14.4 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,有机质含量22.3 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,肥力水平中等。

供试马铃薯品种为中薯47号,由中国农业科学院蔬菜花卉研究所提供。供试菌肥为复合微生物菌剂(山东施可丰生物科技有限公司),有效活性菌 ≥ 5 亿 $\cdot\text{g}^{-1}$,有机质含量 $\geq 45\%$,($\text{N}+\text{P}_2\text{O}_5+\text{K}_2\text{O}$)含量 $\geq 5.0\%$,腐殖酸含量 $\geq 5\%$ 。供试肥料为42%硫酸钾型复合肥(施可丰化肥有限公司, $\text{N}-\text{P}_2\text{O}_5-\text{K}_2\text{O}:16-8-18$)。

1.2 试验设计

试验采用随机区组设计,在杨雪等^[18]的试验基础上,在常规复合肥施100 $\text{kg}\cdot 667\text{ m}^{-2}$ (总养分45 kg)的基础上减量20%,试验对照W1(CK)养分总量为36 kg,菌肥为0 kg,设计复合肥与菌肥减量配施,共设5个处理(表1),3次重复。小区面积13.4 m^2 ,采用深沟高垄覆膜栽培技术,单垄双行种植,垄宽0.75 m,垄高0.35 m,每小区100株,种植密度为5000株 $\cdot 667\text{ m}^{-2}$ 。

1.3 方法

1.3.1 播种及管理 于2022年12月17日播种,复合肥作为基肥点施于种薯之间,菌肥均匀撒施于播种沟内,播种后、覆膜前进行封闭除草。全生育期依靠自然降雨,不进行人工灌溉。马铃薯生长期

表 1 各施肥处理肥料养分含量
Table 1 Nutrient content of fertilizers in different fertilization treatments

处理 Treatment	复合肥用量 Compound fertilizer rate/($\text{kg}\cdot 667\text{ m}^{-2}$)	菌肥用量 Bacterial fertilizer rate/($\text{kg}\cdot 667\text{ m}^{-2}$)	N - P_2O_5 - K_2O 总量 Total N- P_2O_5 - K_2O rate/ ($\text{kg}\cdot 667\text{ m}^{-2}$)	有效活性菌数 Effective viable bacteria count/($10^8\cdot\text{kg}^{-1}$)	w(有机质) Organic matter content/%	w(腐殖酸) Humic acid content/%
W1(CK)	85.70	0.00	36	0.00	0.00	0.00
W2	77.00	77.00	36	385.00	34.65	3.85
W3	77.00	38.50	34	192.50	17.32	1.92
W4	65.45	65.45	31	327.25	29.45	3.27
W5	65.45	32.73	21	163.63	14.73	1.63

间根据田间情况喷药 3 次防治晚疫病。于 2023 年 5 月 19 日统一收获。

1.3.2 样品采集与处理 土壤样品于马铃薯收获期采集。每小区采用五点取样法采集 0~30 cm 耕层土壤,混合成 1 个土样。样品分成 2 份:一份置于-80 ℃冰箱保存,用于土壤微生物测定;另一份风干后用于土壤理化性质测定。以未施肥马铃薯土壤样品作为空白对照。

1.3.3 测定项目及方法 采用 NY/T 1121.2—2006 的方法测定 pH^[19];采用 LY/T 1228—2015 的方法测定碱解氮、全氮含量^[20];采用 NY/T 1121.7—2014 的方法测定有效磷含量^[21];采用 NY/T 889—2004 的方法测定速效钾含量^[22];采用 NY/T 88-1988 的方法测定全磷含量^[23];采用 NY/T 87—1988 的方法测定全钾含量^[24];采用 NY/T 1121.6—2006 的方法测定有机质含量^[25]。

提取土壤样品总 DNA,特异性扩增细菌 16S rRNA 基因的 V3~V4 区。采用高通量测序技术对样品进行检测,获得微生物群落组成及相对丰度。使用 QIIME 2(2020.11)软件对原始数据进行质控、拼接和 ASV 聚类,使用 Mothur(v.1.30.2)计算样品的 Alpha 多样性指数(Chao1, Observed species, ACE, Shannon, Simpson, PD whole tree)。

参考(NY/T 1489—2007)^[26]调查植株农艺性状和块茎品质性状。于现蕾期统计出苗率;现蕾期后

15 d 左右,每个小区连续选取 10 株幼苗测定株高(用塔尺测量从茎基部至最高生长点)、茎粗(用游标卡尺测量距地面 5 cm 处主茎粗);使用 SPAD-502Plus 叶绿素仪测定最上部完全展开叶片的 SPAD 值。收获时,每小区随机取 10 株调查单株块茎数、单株薯质量,并称量大中薯(单薯质量>75 g)质量,计算大中薯率。小区全部马铃薯收获后计算产量。采用烘干称质量法测定块茎干物质率;参照 Mepkep 干物质-淀粉换算表确定淀粉含量;采用考马斯亮蓝 G-250 染色法^[27]测定蛋白质含量;采用 2,6-二氯酚酚滴定法^[28]测定维生素 C 含量。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2010 进行数据整理,采用 SPSS 19.0 软件进行方差分析(ANOVA)和 Pearson 相关性分析,采用 Duncan's 新复极差法进行多重比较分析。采用 Canoco 5 软件进行冗余分析(RDA)。使用 Origin 2021 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 各施肥处理对土壤化学性质的影响

由表 2 可知,各施肥处理的 pH 均低于未施肥土壤(pH 5.69)。复合肥与菌肥减量配施各处理间,除全磷含量外,其他指标均无显著差异。W3 处理的 pH 以及有效磷、全氮、全磷、有机质含量均为最低,其中全磷含量显著低于 W4。

表 2 各处理对土壤理化性质的影响
Table 2 Effects of different treatments on soil physicochemical properties

处理 Treatment	pH	w(碱解氮) Alkaline hydrolyzable N content/(mg·kg ⁻¹)	w(有效磷) Available P content/ (mg·kg ⁻¹)	w(速效钾) Available K content/ (mg·kg ⁻¹)	w(全氮) Total N content/ (g·kg ⁻¹)	w(全磷) Total P content/ (g·kg ⁻¹)	w(全钾) Total K content/ (g·kg ⁻¹)	w(有机质) Organic matter content/(g·kg ⁻¹)
W1(CK)	4.98±0.24 a	119.00±7.00 a	19.60±1.37 a	71.33±12.34 a	1.26±0.19 a	0.70±0.05 ab	14.23±0.15 a	22.70±1.51 a
W2	4.95±0.06 a	119.33±4.16 a	21.87±5.47 a	67.00±5.29 a	1.29±0.03 a	0.73±0.04 a	14.07±0.12 ab	23.37±0.29 a
W3	4.94±0.12 a	119.00±0.00 a	18.80±3.93 a	66.67±17.62 a	1.25±0.08 a	0.67±0.02 b	14.13±0.29 a	21.97±0.61 a
W4	4.97±0.07 a	114.00±2.00 a	24.30±4.94 a	64.33±5.51 a	1.28±0.06 a	0.73±0.02 a	14.00±0.26 ab	22.77±0.65 a
W5	5.01±0.15 a	119.33±7.02 a	21.23±1.91 a	62.33±15.95 a	1.32±0.02 a	0.70±0.02 ab	14.00±0.10 ab	22.77±1.33 a

注:同列数字后不同小写字母表示处理间在 0.05 水平差异显著。下同。
Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference at 0.05 level. The same below.

2.2 各施肥处理对土壤中微生物的影响

2.2.1 各施肥处理对马铃薯根际土壤细菌门水平上细菌丰度的影响 由图 1 可知,所有样本中共有的 ASVs 数目为 148 个,施肥后各样本细菌群落 ASV 平均数均较未施肥土壤有所增加。由图 2 可知,各处理土壤的优势菌门为变形菌门(Proteobacteria)、酸杆菌门(Acidobacteriota)、绿弯菌门(Chlo-

roflexi)、芽单胞菌门(Gemmatimonadota)、放线菌门(Actinobacteriota)和黏菌门(Myxococcota)。在 W1(CK)中,各优势菌门相对丰度分别为 35.2%、19.7%、11.8%、5.8%、5.5%和 4.2%。在减施复合肥、增施菌肥后,变形菌门、放线菌门的相对丰度降低,黏菌门、硝化螺旋菌门(Nitrospirota)、拟杆菌门(Bacteroidota)、脱硫杆菌门(Desulfobacterota)的相

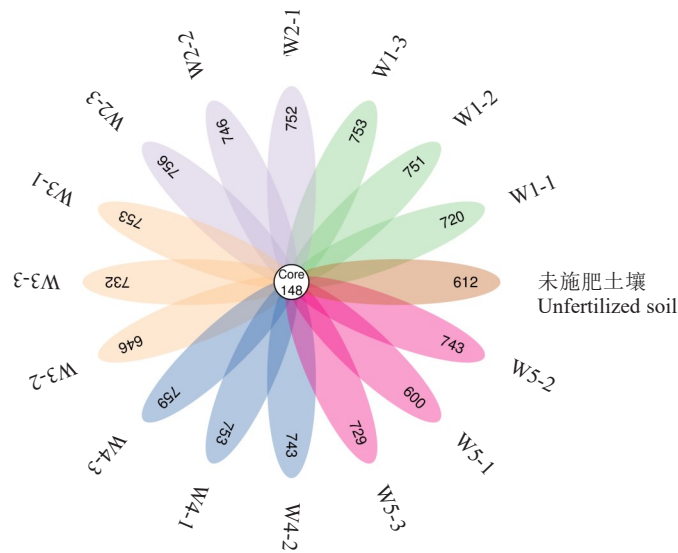
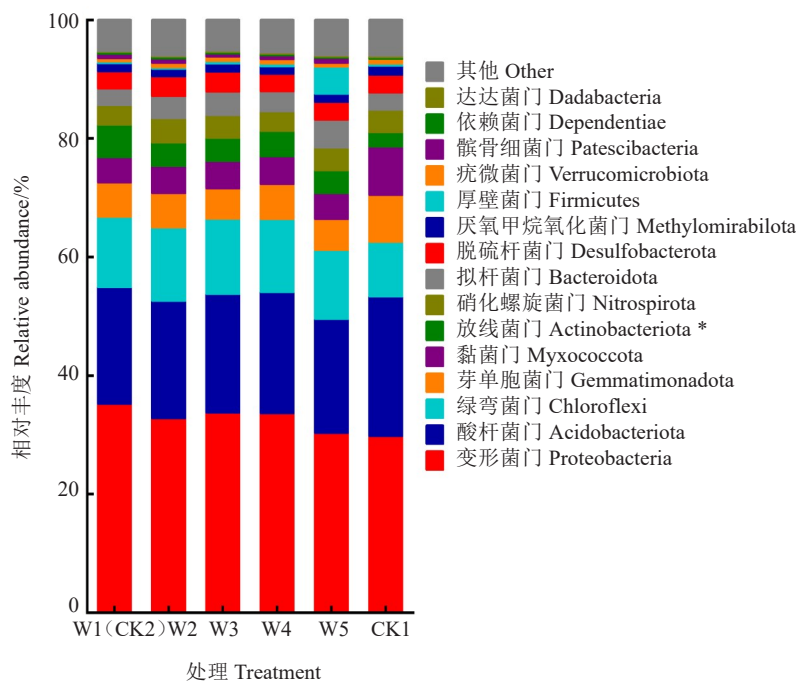


图1 各处理土壤样本中 ASVs 分布花瓣图

Fig. 1 Petal diagram of ASVs distribution in soil samples of each treatment



注: *代表放线菌门的相对丰度在各处理间差异显著。

Note: * indicates significant difference in the relative abundance of Actinobacteria between different treatments.

图2 各处理基于细菌门水平相对丰度的群落结构柱状图(TOP15)

Fig. 2 Community structure histogram based on relative abundance of bacteria at phylum level in each treatment (TOP15)

对丰度增加。显著性分析结果表明,仅放线菌门的相对丰度与 W1 相比有显著差异。增施菌肥后, W2、W3、W4、W5 放线菌门的相对丰度均显著降低 22.1%~29.5%。

2.2.2 各施肥处理对马铃薯根际土壤细菌 Alpha 多样性的影响 由表 3 可知,所有处理 Good's cover-

age 指数均为 1,测序结果代表了土壤样本中细菌群落的真实情况。施肥后土壤中细菌多样性和丰富度较未施肥土壤(其 Observed species 指数为 760, Shannon 指数为 8.9)有所增加。菌肥减施 50%后的 W3 和 W5 处理分别与 W2 和 W4 对比,其 Simpson、Chao1、Observed species、Shannon、ACE 指数均

表 3 各处理对马铃薯根际土壤细菌 Alpha 多样性的影响

Table 3 Effects of different treatments on bacterial Alpha diversity in potato rhizosphere soil

处理 Treatment	Good's coverage	PD whole tree 指数 PD whole tree index	Simpson 指数 Simpson index	Chao1 指数 Chao1 index	Observed species 指数 Observed species index	Shannon 指数 Shannon index	ACE 指数 ACE index
W1(CK)	1.000 0 a	47.668 6 a	0.997 1 a	889.46 a	889.03 a	9.171 0 a	889.557 8 a
W2	1.000 0 a	49.012 2 a	0.997 4 a	899.34 a	899.20 a	9.237 9 a	899.091 3 a
W3	1.000 0 a	48.616 0 a	0.997 3 a	858.30 a	858.30 a	9.166 2 a	858.378 2 a
W4	1.000 0 a	48.757 7 a	0.997 4 a	899.60 a	899.60 a	9.224 1 a	899.753 8 a
W5	1.000 0 a	47.634 0 a	0.996 9 a	838.63 a	838.63 a	9.072 6 a	838.709 8 a

有所降低,但差异均未达到显著水平。

2.3 各施肥处理对冬闲田马铃薯植株性状的影响

由表 4 可知,W3 处理出苗率 94.00%、株高 44.26 cm、SPAD 值 48.16,均高于其他处理,W5 处理植株平均茎粗最大,为 14.12 mm,但各处理间的

出苗率、株高、茎粗、SPAD 值均无显著差异。

2.4 各施肥处理对冬闲田马铃薯经济性状的影响

由表 5 可知,复合肥减量后配施菌肥,单株块茎数均增加,大中薯率降低。各处理间单株块茎数和单株薯质量差异不显著。大中薯率以 W3 最低,与 W1、

表 4 各处理对冬闲田马铃薯植株性状的影响

Table 4 Effects of different treatments on plant traits of potato in winter fallow field

处理 Treatment	出苗率 Emergence rate/%	株高 Plant height/cm	茎粗 Stem diameter/mm	SPAD 值 SPAD value
W1(CK)	88.00±5.00 a	43.80±0.78 a	13.83±0.89 a	46.75±1.65 a
W2	90.00±1.73 a	43.28±2.35 a	13.59±0.75 a	46.56±0.85 a
W3	94.00±3.61 a	44.26±2.17 a	13.33±0.48 a	48.16±1.82 a
W4	91.67±3.51 a	43.73±1.96 a	13.88±1.12 a	46.83±1.38 a
W5	90.00±1.00 a	41.55±3.45 a	14.12±0.17 a	45.82±1.01 a

表 5 各处理对冬闲田马铃薯经济性状的影响

Table 5 Effects of different treatments on economic traits of potato in winter fallow field

处理 Treatment	单株块茎数 Tuber number per plant	单株薯质量 Tuber mass per plant/kg	大中薯率 Large & medium tuber rate/%	产量 Yield/(kg·667 m ²)
W1(CK)	3.73±0.25 a	0.52±0.12 a	96.22±2.33 a	2 496.29±150.94 a
W2	4.30±0.66 a	0.57±0.07 a	96.12±4.16 a	2 324.92±83.88 ab
W3	4.61±0.54 a	0.55±0.05 a	87.36±4.86 b	2 446.35±61.63 a
W4	4.07±0.32 a	0.51±0.08 a	92.38±1.57 ab	2 250.01±97.59 b
W5	4.27±0.50 a	0.57±0.10 a	91.75±0.76 ab	2 407.36±82.57 ab

W2 差异显著。产量以 W1 最高,为 2496.29 kg·667 m², W4 最低,两者差异显著。W5 处理 N-P₂O₅-K₂O 总量较 W1 减少 41.7%,复合肥和菌肥施用量仅为 65 kg·667 m² 和 32.73 kg·667 m²,但产量为 2 407.36 kg·667 m²,与 W1 无显著差异。

2.5 各处理对冬闲田马铃薯品质的影响

由表 6 可知,复合肥减施与菌肥配施显著影响马铃薯的品质,在一定范围内可提高块茎的干物质率以及淀粉、维生素 C 和蛋白质含量。W4 处理干物质率 19.94%,淀粉含量 13.97%,蛋白质含量

表 6 各处理对冬闲田马铃薯品质的影响

Table 6 Effects of different treatments on tuber quality of potato in winter fallow field

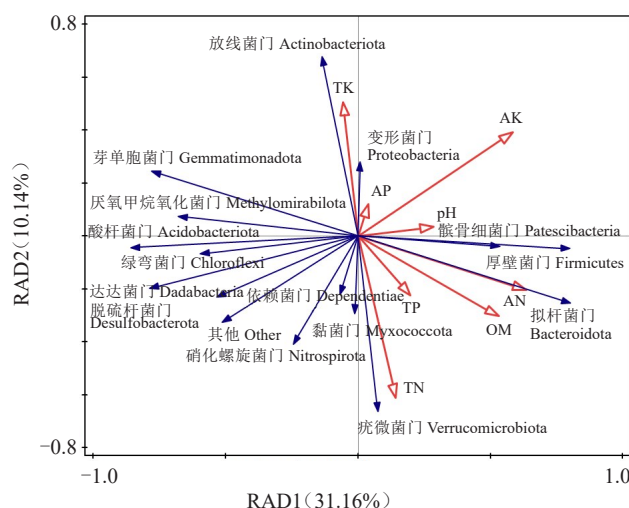
处理 Treatment	干物质率 Dry matter rate/%	w(淀粉) Starch content/%	w(蛋白质) Protein content/(mg·g ⁻¹)	w(维生素 C) Vitamin C content/(mg·100 g ⁻¹)
W1(CK)	16.74±0.64 b	10.50±1.45 b	14.77±1.51 ab	9.98±1.02 b
W2	17.67±1.65 ab	11.75±1.62 ab	12.49±1.36 b	9.92±1.18 b
W3	17.42±0.45 ab	11.49±0.44 ab	14.79±1.31 ab	10.91±0.24 b
W4	19.94±1.63 a	13.97±1.61 a	15.82±1.48 a	13.50±2.09 a
W5	17.98±1.57 ab	12.05±1.55 ab	13.92±1.85 ab	13.48±0.18 a

15.82 mg·g⁻¹, 维生素 C 含量 13.5 mg·100 g⁻¹, 均为最高, 其中干物质率以及淀粉、维生素 C 含量与 W1 差异显著。W5 处理的干物质率以及淀粉、维生素 C 含量均高于 W1, 蛋白质含量低于 W1, 但除维生素 C 含量外均无显著差异。

2.6 相关性分析

2.6.1 土壤细菌群落组成与环境因子之间的相关性分析

对不同处理下土壤理化性质与土壤微生物群落关系进行冗余分析, 由图 3 可知, RDA1 和 RDA2 分别解释了 31.16% 和 10.14% 的群落变化。放线菌门(Actinobacteriota)、变形菌门(Proteobacteria)的相对丰度与全钾含量呈正相关, 与全氮含量呈负相关; 芽单胞菌门(Gemmatimonadota)的相对丰度与碱解氮、有机质含量呈负相关; 拟杆菌门



注: OM 为有机质含量, TN 为全氮含量, AN 为碱解氮含量, TP 为全磷含量, AP 为有效磷含量, TK 为全钾含量, AK 为速效钾含量。下同。

Note: OM, Organic matter content; TN, Total N content; AN, Alkaline hydrolyzable N content; TP, Total P content; AP, Available P content; TK, Total K content; AK, Available K content. The same below.

图 3 土壤理化性质与细菌门水平相对丰度的冗余分析

Fig. 3 Redundancy analysis of soil physicochemical properties and relative abundance of bacteria at phylum level

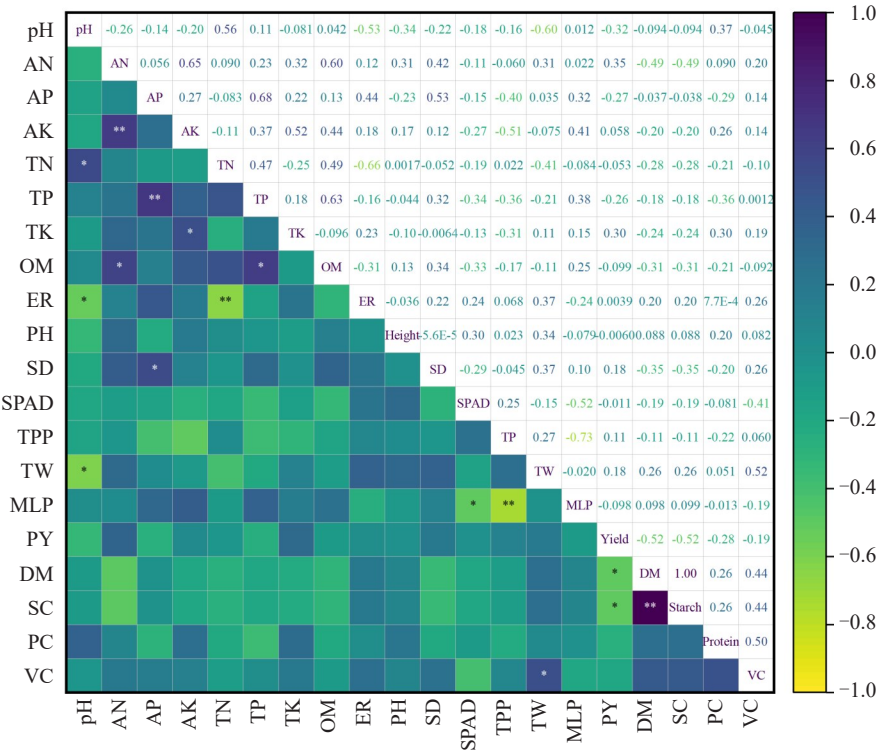
(Bacteroidota)、厚壁菌门(Firmicutes)的相对丰度与碱解氮、有机质含量呈正相关; 达达菌门(Dadabacteria)的相对丰度与速效钾和碱解氮含量呈负相关。

2.6.2 土壤环境、马铃薯农艺性状、品质性状各因子之间的相关性分析 由图 4 可知, 马铃薯植株出苗率与土壤中全氮含量呈极显著负相关, 与 pH 呈显著负相关; 全氮含量与 pH 呈显著正相关。茎粗与有效磷含量呈显著正相关; 有效磷含量与全磷含量呈极显著正相关; 全磷含量与有机质含量呈显著正相关; 有机质含量与碱解氮含量呈显著正相关; 碱解氮含量与速效钾含量呈极显著正相关; 速效钾含量与全钾含量呈显著正相关。单株薯质量与 pH 呈显著负相关。大中薯率与块茎数呈极显著负相关, 与 SPAD 值呈显著负相关。产量与干物质率和淀粉含量呈显著负相关。

3 讨论与结论

有研究表明, 微生物菌肥可显著提升土壤养分

含量^[29], 化肥减量配施微生物菌肥或生物炭均可促进土壤大粒径团聚体形成^[4], 50% 化肥与 50% 微生物菌肥搭配在改善土壤结构及微生态环境、提高土壤养分含量及酶活性方面表现最优^[16]。但在本试验中, 复合肥与菌肥减量配施的各处理间, 除了 W3 与 W4 土壤全磷含量有显著差异外, 其他指标在各处理间均无显著差异, 表明在本试验的减量范围内对土壤理化性质的影响较小, 这可能与复合肥、菌肥本身用量较少有关。微生物菌肥对 pH 值影响不显著, 这与轩晓博等^[30]的研究结果一致。W3 菌肥用量较 W2 和 W4 少, 提供的 N-P₂O₅-K₂O 养分总量大于 W4 小于 W2, 但 W3 土壤的 pH 值以及有效磷、全氮、全磷、有机质含量均为最低, 全磷含量显著低于 W4。相关性分析结果表明, 全磷含量与有机质含量呈显著正相关, 与有效磷含量呈极显著正相关, W3 处理全磷含量显著低于 W4, 可能与该处理土壤有效磷和有机质含量较低有关, 也可能是在该处理条件下, 土壤中原被固定的磷被更多释放并



注:ER 为出苗率,PH 为株高,SD 为茎粗,TPP 为单株块茎数,TW 为单株薯质量,MLP 为大中薯率,PY 为产量,DM 为干物质率,SC 为淀粉含量,PC 为蛋白质含量,VC 为维生素 C 含量。*表示在 0.05 水平显著相关,**表示在 0.01 水平极显著相关。

Note: ER. Emergence rate; PH. Plant height; SD. Stem diameter; TPP. Tuber number per plant; TW. Tuber mass per plant; MLP. Percentage of medium and large tubers; PY. Plant yield; DM. Dry matter content; SC. Starch content; PC. Protein content; VC. Vitamin C content. * indicates significant correlation at 0.05 level, and ** indicates extremely significant correlation at 0.01 level.

图 4 不同处理下土壤理化指标、农艺性状、品质性状各因子之间的相关性
Fig. 4 Heatmap of correlation among soil physicochemical indices, agronomic traits, and quality traits under different treatments

转化为有效磷,且被植株吸收更多,从而导致土壤中全磷、有效磷含量下降。此外,W3 处理的产量高于 W2 和 W4,也从侧面反映 W3 处理植株的养分吸收利用率可能高于 W2 和 W4 处理。

有研究表明,微生物菌肥可显著提高土壤微生物多样性,改变细菌群落结构,改善土壤质量^[31]。也有研究表明,不同基肥及施用量对土壤微生物的基本种类影响不大,但对相对丰度的影响较明显^[32]。在本试验中,与 W2 和 W4 分别对比,W3 和 W5 处理复合肥用量相同,菌肥减施 50%,W3 和 W5 处理土壤微生物细菌群落多样性及相对丰度均有所降低,但差异不显著,说明在本试验的减量范围内,菌肥对细菌群落的多样性和相对丰度虽有一定影响,但影响不显著。

有研究表明,稀释 30 倍的微生物菌肥能显著提高番茄苗期茎粗和花期冠幅,同时能提高辣椒产量^[33]。本试验中复合肥和菌肥减量配施的各处理间,植株的出苗率、株高、茎粗、SPAD 值无显著差

异。W3 处理在复合肥较 W1 减量 10%、菌肥较 W2 减量 50%时,植株的出苗率、株高、SPAD 值均优于其他处理。值得注意的是,W5 处理在复合肥较 W1 减量 23.6%、菌肥较 W4 减量 50%、用量均为最少时,植株茎粗却最大,为 14.12 mm,说明在本试验的减量范围内,复合肥和菌肥减量配施对植株无不利影响,甚至有利于促进植株茎秆粗壮。

有研究表明,施用微生物菌肥可通过改善土壤理化性质和供肥能力显著提高作物产量^[14]。复合肥减量与菌肥配施量影响作物产量和品质^[12]。在本试验中,复合肥减量后配施菌肥,单株块茎数均增加,大中薯率降低,大中薯率与块茎个数呈极显著负相关。W1 产量最高,但与 W5 无显著差异。轩晓博等^[30]研究表明,在施用微生物菌肥的情况下,可适当削减氮肥使用量,但氮肥减量不宜超过 45%。在本试验中,W5 处理氮肥用量减少 42.2%,菌肥为复合肥总量的 50%(32.73 kg),产量与常规施肥的 W1 无显著差异,这与上述研究结论基本一致。

微生物菌肥中的有益微生物能够分解有机质、活化养分,增强土壤肥力,促进作物生长,提高产量与品质^[14]。化肥减量配施不同用量微生物菌肥可实现葡萄^[34]、黄瓜^[35]品质的提升,有研究表明,化肥减量30%与微生物菌肥及土壤调理剂配施能够改善土壤质量,促进马铃薯生长发育,提高马铃薯产量及品质^[17]。本试验中复合肥减施与菌肥配施可提高马铃薯块茎的干物质率以及淀粉、维生素C、蛋白质含量。W4处理各项品质指标均为最高,其中干物质率以及淀粉、维生素C含量与W1差异显著。W5处理的干物质率以及淀粉、维生素C含量均高于W1,蛋白质含量与W1无显著差异,品质表现仅次于W4,但产量明显高于W4。这表明W5处理在实现较大幅度减肥的同时,较好地协调了产量与品质的关系。

综上所述,W5处理复合肥减量23.6%,复合肥和菌肥配比为2:1,N-P₂O₅-K₂O总量较W1减少41.7%,该处理在肥料减施幅度最大、肥料投入最少的情况下,实现了与常规施肥(W1)产量无显著差异,同时其块茎品质(干物质率以及淀粉、维生素C含量等)均优于W1,且与品质最佳的W4无显著差异,表现出最优的综合效益。因此,为最大限度地降低马铃薯化肥用量,同时稳定产量、提升品质,W5处理(复合肥65 kg·667 m⁻²和菌肥32.73 kg·667 m⁻²)可作为冬闲田早熟马铃薯播种时的推荐施肥方案。

参考文献

- [1] 李明静,何智彪,乔文杰,等.蓖麻饼粕肥对欧李土壤养分和酶活性的影响[J].北方农业学报,2025,53(3):35-46.
- [2] 李海峰,刘国宏,郭红梅,等.化肥减施对设施辣椒生长、产量和品质的影响[J].中国农学通报,2023,39(19):33-38.
- [3] Zhang X Y, Dong W Y, Dai X Q, et al. Responses of absolute and specific soil enzyme activities to long term additions of organic and mineral fertilizer[J]. Science of the Total Environment, 2015, 536: 59-67.
- [4] 张艳敏,刘艳侠,纪留杰.微生物菌肥配施生物炭对连作番茄土壤团聚体稳定性及酶活性的影响[J].江苏农业科学,2025,53(15):246-254.
- [5] 管上淇,段维,贾秀苹,等.微生物菌肥影响作物盐碱抗性响应机理研究进展[J].江苏农业科学,2025,53(18):7-16.
- [6] 陈梦微,梁徐,张成磊,等.微生物菌肥对东魁杨梅土壤性状和叶片营养的影响[J].浙江农业学报,2025,37(5):1130-1138.
- [7] 苏明,刘萍涛,洪自强,等.盐碱地有机肥与微生物菌肥复配施用对枸杞叶片生理特性及产量、品质的影响[J].中国农学通报,2025,41(19):87-94.
- [8] 滕迁莹,崔明元,姜海英,等.微生物菌肥增施方式对盐碱地大豆幼苗生长发育及产量的影响[J].大豆科学,2025,44(5):67-76.
- [9] 叶静,陈影,屈爽,等.不同微生物菌肥对滨海盐渍土土壤质量及玉米产量的影响[J].环境科学,2024,45(7):4279-4292.
- [10] 施锴,朱宏强,杨梦璇,等.不同微生物菌肥对烤烟生长发育、产量及品质的影响[J].作物杂志,2026,42(1):189-196.
- [11] 黄梦池,陈利娜,李好先,等.不同微生物菌肥对石榴幼苗生长发育的影响[J].果树学报,2025,42(10):2346-2356.
- [12] 刘庆祖,李晓宏,王兴会.减氮结合微生物菌肥对大白菜生长、产量和肥料利用效率的影响[J].中国瓜菜,2025,38(5):141-148.
- [13] 屈成,刘芬,傅爱斌,等.生物菌肥与化肥配施对水稻生长特性及产量的影响[J].杂交水稻,2023,38(4):134-139.
- [14] 刘莹,杨岩松,刘晓乐,等.增施微生物菌肥对结球甘蓝产量、品质、抗氧化酶活性及土壤肥力的影响[J].中国农业大学学报,2025,30(6):13-25.
- [15] 李其勇,夏武奇,魏斌,等.微生物菌肥与复合肥配施对高山辣椒生长及土壤养分的影响[J].北方园艺,2024(19):1-8.
- [16] 决超.微生物菌肥与土壤改良基质对连作马铃薯土壤性质及微生物群落的影响[J].江苏农业科学,2023,51(1):218-224.
- [17] 张建鹏.化肥减量配施微生物菌肥及土壤调理剂对重茬马铃薯生长发育和土壤质量的影响[J].江苏农业科学,2023,51(7):205-212.
- [18] 杨雪,高倩,蔡林志,等.新型肥料施用对马铃薯生长和产量及品质的影响[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2022,48(5):550-555.
- [19] NY/T 1121.2—2006 土壤检测 第2部分:土壤pH的测定[S].
- [20] LY/T 1228—2015 森林土壤氮的测定[S].
- [21] NY/T 1121.7—2014 土壤检测 第7部分:土壤有效磷的测定[S].
- [22] NY/T 889—2004 土壤速效钾和缓效钾含量的测定[S].
- [23] NY/T 88—1988 土壤全磷测定法[S].
- [24] NY/T 87—1988 土壤全钾测定法[S].
- [25] NY/T 1121.6—2006 土壤检测 第6部分:土壤有机质的测定[S].
- [26] NY/T 1489—2007 农作物品种试验技术规程 马铃薯[S].
- [27] 焦洁.考马斯亮蓝 G-250 染色法测定苜蓿中可溶性蛋白含量[J].农业工程技术,2016,36(17):33-34.
- [28] 马春燕.不同储藏时期苹果 VC 含量的测定[J].畜牧与饲料科学,2008(3):45-46.
- [29] 朱怡蓉,李小英,史亮涛,等.不同微生物菌肥对辣椒土壤理化性状及其酶活性的影响[J].江西农业学报,2025,37(9):73-80.
- [30] 轩晓博,赵文靖,李树瑶,等.微生物菌肥对盐碱地向日葵减施氮肥效应研究[J].山西农业大学学报(自然科学版),2023,43(3):102-111.
- [31] 张煜,张国财,张厚良,等.微生物菌肥施用对烟草土壤理化性状及根际细菌群落结构的影响[J].东北农业大学学报,2025,56(4):13-25.
- [32] 夏枫,刘一宁,路旭,等.不同基肥及施用量对设施大棚土壤养分和微生物的影响[J].热带作物学报,2025,46(8):2019-2029.
- [33] 辛承伟,程亮,李娟.不同浓度微生物菌肥对盆栽辣椒和番茄生长的影响[J].青海农林科技,2025(3):79-84.
- [34] 郭艳兰,牟德生,张勤德,等.化肥减量配施不同用量微生物菌肥对黑比诺葡萄生长、品质及土壤肥力的影响[J].江苏农业学报,2023,39(9):1938-1944.
- [35] 刘赵帆,柳发财,李喜娥,等.降低化肥用量、配施微生物菌肥对设施黄瓜生长、品质及产量的影响[J].中国瓜菜,2024,37(3):71-79.