

王国奇, 王 勇, 杜芸芸, 等. 化肥减施下配施微肥和生物有机肥对马铃薯产量及其构成的影响[J]. 江苏农业学报, 2026, 42(6): 1172-1181.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2026.06.009

化肥减施下配施微肥和生物有机肥对马铃薯产量及其构成的影响

王国奇¹, 王 勇¹, 杜芸芸¹, 吴敏娟¹, 刘娟娟¹, 刘玉汇², 秦舒浩¹

(1. 甘肃农业大学园艺学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃省作物遗传改良与种质创新重点实验室, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 通过研究化肥减施下配施铁肥、锌肥和生物有机肥对马铃薯茎、叶干物质累积量, 叶片矿质元素累积量以及产量及其构成的影响, 明确生物有机肥的作用及适宜的铁肥和锌肥用量, 为促进马铃薯高效生产提供理论依据。本研究以陇薯 17 号为试验材料进行田间试验, 共设置 5 个处理: 以施用化肥作为对照(CK), 80%化肥+3 000 kg/hm²生物有机肥处理(T1)、80%化肥+3 000 kg/hm²生物有机肥+20 kg/hm²铁肥+30 kg/hm²锌肥处理(T2)、80%化肥+3 000 kg/hm²生物有机肥+30 kg/hm²铁肥+40 kg/hm²锌肥处理(T3)和 80%化肥+3 000 kg/hm²生物有机肥+40 kg/hm²铁肥+50 kg/hm²锌肥处理(T4)。研究结果发现, 随着马铃薯生育期的推进, 不同生育期植株茎、叶干物质累积量在各处理下均呈现先升高后下降的趋势, T3 处理茎、叶干物质累积量均显著高于 CK 处理。随着马铃薯生育期的推进, 不同生育期各处理叶片中氮、磷、钾含量均呈现先升后降的趋势; 铁和锌含量呈持续下降趋势。相较 CK, T2~T4 处理均显著提高了马铃薯成熟期茎、叶干物质累积量, 其中 T3 处理矿质元素含量均最高。在产量及其构成方面, T3 处理马铃薯单株薯重、单株结薯数和商品薯率较 CK 分别显著提高了 44.19%、68.62% 和 18.88%。相关性分析结果显示, 马铃薯产量与增产率、单株薯数和 Zn 含量呈极显著正相关($P<0.001$); 聚类分析发现, CK 和 T1 处理聚为一类, T3 处理和 T2 处理、T4 处理聚为一类。综上, 本研究结果说明, 化肥减施配施铁、锌微肥和生物有机肥能有效提高马铃薯茎、叶干物质累积量、矿质元素含量和产量, 其中 T3 处理效果最佳, 可作为西北冷凉地区马铃薯高产高效生产的施肥方案。

关键词: 马铃薯; 铁肥; 锌肥; 生物有机肥; 干物质累积量; 产量

中图分类号: S532 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2026)06-1172-10

Effects of combined application of micronutrient fertilizer and bio-organic fertilizer under reduced chemical fertilizer application on potato yield and its components

WANG Guoqi¹, WANG Yong¹, DU Yunyun¹, WU Minjuan¹, LIU Juanjuan¹, LIU Yuhui², QIN Shuhao¹

(1. College of Horticulture, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 2. Gansu Provincial Key Laboratory of Crop Genetic Improvement and Germplasm Innovation, Lanzhou 730070, China)

Abstract: By investigating the effects of combined application of iron fertilizer, zinc fertilizer, and bio-organic fertilizer under reduced chemical fertilizer application on the dry matter accumulation in potato stems and leaves, the accumulation of mineral elements in leaves, as well as yield and its components, this study clarified the role of bio-organic fertilizer and the appropriate application rates of iron and zinc fertilizers, thereby providing a theoretical basis for promoting efficient potato production. In this study, field experiments were conducted using Longshu 17

收稿日期: 2025-08-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(32260455、32060441、32201810、32360465); 国家现代农业产业技术体系项目(CARS-09-P14)

作者简介: 王国奇(1998-), 男, 山东淄博人, 硕士研究生, 主要从事马铃薯逆境生理方面的研究。(E-mail) 997123411@qq.com

通讯作者: 秦舒浩, (E-mail) qinshuhaogsau@163.com

as the test material. Five treatments were set up: chemical fertilizer application as the control (CK); 80% chemical fertilizer + 3 000 kg/hm² bio-organic fertilizer (T1); 80% chemical fertilizer + 3 000 kg/hm² bio-organic fertilizer + 20 kg/hm² iron fertilizer + 30 kg/hm² zinc fertilizer (T2); 80% chemical fertilizer + 3 000 kg/hm² bio-organic fertilizer + 30 kg/hm² iron fertilizer + 40 kg/hm² zinc fertilizer (T3); and 80% chemical fertilizer + 3 000 kg/hm² bio-organic fertilizer + 40 kg/hm² iron fertilizer + 50 kg/hm² zinc fertilizer (T4). The results showed that as the potato growth period progressed, the dry matter accumulation in stems and leaves at different growth stages under all treatments exhibited a trend of first increasing and then decreasing. The dry matter accumulation in stems and leaves under the T3 treatment was significantly higher than that under the CK treatment. As the potato growth period progressed, the contents of nitrogen, phosphorus, and potassium in leaves under different treatments at different growth stages exhibited a trend of first increasing and then decreasing, while the contents of iron and zinc displayed a continuous decreasing trend. Compared with CK, treatments T2–T4 significantly increased the dry matter accumulation in potato stems and leaves at maturity, among which treatment T3 achieved the highest mineral element contents. In terms of yield and its components, treatment T3 significantly increased the tuber weight per plant, the number of tubers per plant, and the marketable tuber rate by 44.19%, 68.62%, and 18.88%, respectively. The results of correlation analysis indicated that potato yield exhibited a highly significant positive correlation with yield increase rate, number of tubers per plant, and Zn content ($P < 0.001$). Cluster analysis revealed that the CK and T1 treatments were grouped into one cluster, while the T3, T2, and T4 treatments were grouped into another cluster. In summary, the results of this study indicated that under reduced chemical fertilizer application, the combined application of iron and zinc micronutrients with bio-organic fertilizer effectively increased the dry matter accumulation in potato stems and leaves, mineral element contents, and yield. Among all treatments, T3 showed the best performance and could be used as a fertilization strategy for high-yield and high-efficiency potato production in the northwest cold and cool region.

Key words: potato; iron fertilizer; zinc fertilizer; bio-organic fertilizer; dry matter accumulation; yield

马铃薯(*Solanum tuberosum* L.)作为全球第4大粮食作物^[1],在中国农业经济中占据重要地位^[2-3]。随着现代农业技术的不断发展和对作物“高产优质”的追求,科学施肥成为提高马铃薯产量和品质的重要手段之一^[4]。虽然化肥的大量使用可以在短期内提高作物产量,但是它带来的环境污染、土壤退化、资源浪费等问题也日益突出^[5]。在此背景下,如何在保障马铃薯稳产提质的前提下实现化肥减量增效、完善养分管理模式,成为推动马铃薯产业绿色可持续发展的关键^[6]。

在马铃薯栽培过程中,生物有机肥因兼具改良土壤、促进作物生长、减少化肥施用量的多重优势成为研究热点,其以传统商品有机肥为基质,科学搭配固氮菌、溶磷菌、乳酸菌、芽孢杆菌以及光合细菌等多种功能性微生物^[7]。施用这类肥料能够显著减少化学肥料的使用量,同时有效改良土壤的理化性质,减轻盐碱化对作物生长造成的不良影响^[8]。前人研究结果显示,施用生物有机肥可增强土壤团聚体的稳定性,提高有机质含量,改善养分的释放效率,而且可以优化氮、磷、钾等大量营养元素的转化效率,提高作物的吸收利用率^[9]。例如,施用生物有机肥可显著提高结球甘蓝^[10]、玉米^[11]、番茄^[12]、白菜^[13]等的产量,促进丝瓜^[14]、脐

橙^[15]、红提葡萄^[16]等果蔬的品质提升;生物有机肥部分替代化肥,还可通过改善土壤养分状况,促进作物生长发育,实现作物产量与品质的协同提升^[17]。

铁与锌都是马铃薯生长发育过程中不可或缺的微量营养元素,它们对于保持马铃薯生理代谢平衡、提高块茎产量和品质都有重要作用^[18]。田间试验结果表明,施用水溶性铁肥可有效缓解作物叶片缺铁黄化,提升光合效率并增强抗逆性,但土壤中天然铁元素多以难溶性形态存在,且常规铁肥施入后易被土壤固定,导致铁素吸收利用率较低,故水溶性铁肥成为改善作物铁素吸收、解决缺铁问题的关键技术手段^[19-20]。锌在促进细胞分裂、增强光合产物合成与转运、提升植物抗逆性等方面效果显著,因此合理施用锌肥可有效提高作物产量、改善作物品质^[21-22]。已有研究表明,基施或叶面喷施锌肥均能显著促进马铃薯对锌元素的吸收与利用,加快块茎发育,其中叶面喷施锌肥还可增强植株抗旱性,进而提升薯块的商品价值^[23]。此外,前人研究发现,铁肥与锌肥科学配施可进一步改善作物生长状况。罗爱花等^[24]研究发现,铁锌配施不仅能提升马铃薯的抗逆能力、提高光合效率,还能促进其茎叶干物质累积,为块茎膨大提供充足养分,最终显著提升块茎产量与品质;焦龙光

等^[25]也证实,铁锌配施可通过促进作物对矿质营养的吸收、调控生理代谢过程、提升光合效能,有效改善玉米生长状况并提高产量。在中国多数地区,尤其是西北干旱半干旱地区,土壤中有有效铁、有效锌含量匮乏,已成为制约马铃薯高产稳产的重要因素之一^[26]。为此,本研究通过分析不同施肥处理对马铃薯茎叶干物质积累、矿质元素含量及产量的影响,评估微肥和生物有机肥在马铃薯养分吸收、干物质积累与产量形成中的调控作用与应用潜力,旨在为马铃薯科学施肥提供理论依据,为实现马铃薯产业高效、绿色、可持续发展提供实践指导。

表 1 试验区土壤基本性状

Table 1 Basic soil properties of the experimental area

土层 (cm)	pH	有机质含量 (g/kg)	全氮含量 (mg/kg)	全磷含量 (mg/kg)	全钾含量 (mg/kg)	有效铁含量 (mg/kg)	有效锌含量 (mg/kg)
0~20	7.1	5.2	0.96	0.44	13.55	2.76	0.63

1.2 试验材料

本试验马铃薯供试品种为陇薯 17 号,由甘肃省定西市农业科学研究院提供,试验所用肥料分别为尿素(纯 N 含量 46%)、过磷酸钙(P_2O_5 含量 12%)、硫酸钾(K_2O 含量 24%),分别由新疆中能万源化工有限公司、云南金星化工有限公司、青海泰齐钾肥有限公司提供;生物有机肥(有机质含量 $\geq 45\%$)由青海恩泽农业技术有限公司提供;铁肥为螯合铁(Fe 含量 $\geq 13\%$)由广州市先益农农业科技有限公司提供;锌肥为糖醇锌(Zn 含量 ≥ 200 g/L)由河南好美特生物科技有限公司提供。

1.3 试验设计

采用大田随机区组设计,共设置 5 个处理(表 2),分别是:化肥(尿素 450 kg/hm²、过磷酸钙 375 kg/hm²、硫酸钾 525 kg/hm²)为对照(CK),80%化肥+3 000 kg/hm²生物有机肥处理(T1)、80%化肥+3 000

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本试验于 2023 年 4–10 月在甘肃省定西市农业科学研究院试验基地(104°35'E,35°33'N)进行,试验地海拔约 1 920 m,年平均气温 6.4 ℃,年降水量 415.2 mm,年蒸发量 1 531 mm,干燥系数 2.53,属半干旱雨养地区。土壤类型为黄绵土,肥力较高,0~20 cm 土层土壤养分含量见表 1。根据甘肃省土壤养分(微量元素)分级标准,试验区土壤有效铁和有效锌含量偏低。

kg/hm²生物有机肥+20 kg/hm²铁肥+30 kg/hm²锌肥处理(T2)、80%化肥+3 000 kg/hm²生物有机肥+30 kg/hm²铁肥+40 kg/hm²锌肥处理(T3)和 80%化肥+3 000 kg/hm²生物有机肥+40 kg/hm²铁肥+50 kg/hm²锌肥处理(T4),每个处理 3 次重复,共 15 个小区。小区面积为 30 m²,采用起垄点播种植,每个小区种植 4 行,行距 40 cm,株距 33 cm,周边设 100 cm 保护行,种植密度为 1 hm² 56 058 株。播前一次性基施化肥和生物有机肥,铁肥和锌肥分别于 5 月 18 日、6 月 25 日和 7 月 25 日采用叶面喷施方式追施,以叶片正反两面全部润湿且有水滴下滴为标准,确保肥料充分吸收,其余管理同当地大田常规管理。分别于 6 月 6 日(苗期)、7 月 10 日(开花期)、8 月 9 日(薯块膨大期)和 10 月 8 日(成熟期)进行样本采集,每个时期随机选择长势一致的 3 株植株进行相关性状的测定。

表 2 各处理肥料施用方案及施用量

Table 2 Fertilizer application scheme and application rate for each treatment

处理	尿素施用量 (kg/hm ²)	过磷酸钙施用量 (kg/hm ²)	硫酸钾施用量 (kg/hm ²)	生物有机肥施用量 (kg/hm ²)	铁肥施用量 (kg/hm ²)	锌肥施用量 (kg/hm ²)
CK	450	375	525	—	—	—
T1	360	300	420	3 000	—	—
T2	360	300	420	3 000	20	30
T3	360	300	420	3 000	30	40
T4	360	300	420	3 000	40	50

1.4 测定项目与方法

1.4.1 马铃薯茎、叶干物质含量的测定 在6月6日(苗期)、7月10日(开花期)、8月9日(薯块膨大期)和10月8日(成熟期),从各处理小区中随机选取完整的植株9株,用蒸馏水冲洗去除根系泥土后置于阴凉处沥干表面水分,将植株分为茎、叶两部分。105℃杀青30 min,随后在85℃下烘干至恒重,使用分析天平分别称量茎、叶干物质重,并计算每株茎、叶干物质累积量^[27]。

1.4.2 马铃薯叶片矿质元素含量的测定 取马铃薯叶片,用清水彻底清洗后再用蒸馏水冲洗2~3次,随后置于85℃烘箱烘干,称取0.5 g烘干后样品,采用电感耦合等离子体原子发射光谱法(ICP-AES)测定样品中矿质元素种类及含量^[28]。并对马铃薯叶片中氮(N)、磷(P₂O₅)、钾(K₂O)、铁(Fe)和锌(Zn)含量进行分析比较。

1.4.3 马铃薯产量及产量构成的测定 在马铃薯收获期(10月8日),每个处理小区随机选取10株马铃薯,记录单株结薯数和单株薯重量,并根据单个薯重量将其分为大薯(>250 g)、中薯(50~250 g)、小薯(<50 g),其中,单薯重达50 g以上的视为商品

薯。根据各小区马铃薯单株产量数据进行产量结构分析,并折算成小区单产,最终计算增产率。

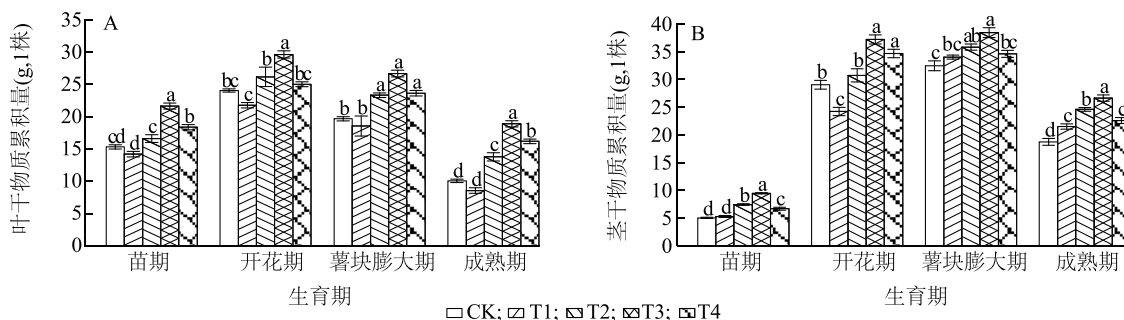
1.5 数据处理

采用 Microsoft Excel 2010 进行试验数据统计及整理;用 SPSS 27.0 软件,以 Duncan 氏新复极差法进行差异显著性分析(显著性水平设为 $P<0.05$);采用 Origin 2022 软件及基迪奥云平台(<https://www.omicshare.com/>)进行绘图。

2 结果与分析

2.1 各处理马铃薯茎、叶干物质累积量

由图 1A 可知,与 CK 相比,马铃薯苗期 T3、T4 处理叶干物质累积量显著提高;开花期 T3 处理叶干物质累积量显著提高;薯块膨大期 T2~T4 处理叶干物质累积量显著提高;成熟期 T2~T4 处理叶干物质累积量显著提高。从图 1B 可知,与 CK 相比,马铃薯苗期 T2~T4 处理茎干物质累积量显著提高;开花期 T3、T4 处理茎干物质累积量显著提高, T1 处理茎干物质累积量显著下降;薯块膨大期 T2 和 T3 处理茎干物质累积量显著提高;成熟期 T1~T4 处理茎干物质累积量显著提高。综上,马铃薯各生育期 T3 处理叶和茎干物质累积量表现最佳。



CK、T1~T4 见表 2。同一生育期图柱上不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

图 1 化肥减施下配施微肥和生物有机肥对马铃薯茎、叶干物质累积量的影响

Fig.1 Effects of combined application of micronutrient fertilizer and bio-organic fertilizer under reduced chemical fertilizer application on dry matter accumulation in potato stems and leaves

2.2 各处理马铃薯叶片矿质元素含量

由表 3 可知,随着马铃薯生育期的推进,不同生育期各处理马铃薯叶片中氮、磷、钾含量均呈现先上升后下降的趋势;Fe 和 Zn 含量则呈持续下降趋势。与 CK 相比,苗期、开花期、成熟期 T1~T4 处理马铃薯叶片中氮和钾含量均显著提升,薯块膨大期 T2~T4 处理叶片中氮和钾含量显著提升;苗期、成熟期 T1~T4 处理马铃薯叶片中磷含量均显著提升,开花

期、薯块膨大期 T2~T4 处理叶片中磷含量显著提升;苗期 T2~T4 处理叶片中 Fe、Zn 含量显著提升;开花期、薯块膨大期、成熟期 T1~T4 处理马铃薯叶片中 Fe、Zn 含量均显著提升。其中, T3 处理马铃薯叶片中矿质元素含量最高,表明在减少化肥施用时,合理配施微肥和生物有机肥有助于提升马铃薯叶片中矿质元素的积累,但是,铁肥和锌肥施用量过高(T4)则会抑制叶片对矿质元素的有效吸收。

表 3 各处理马铃薯叶片矿质元素含量

Table 3 Mineral element contents in potato leaves under different treatments

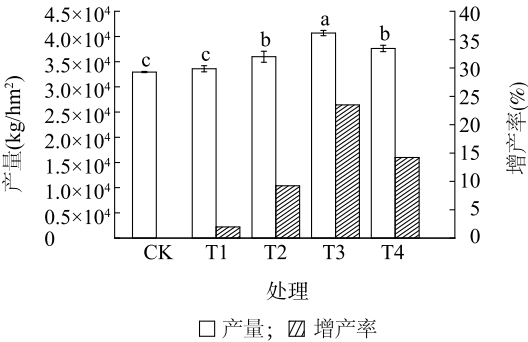
指标	处理	马铃薯生育期			
		苗期	开花期	薯块膨大期	成熟期
N 含量(g/kg)	CK	23.18±0.58c	26.17±0.87d	40.73±0.58c	28.66±0.35d
	T1	29.03±0.72b	29.53±0.54c	42.72±0.44c	31.07±0.55c
	T2	32.18±1.28a	33.67±0.40b	47.13±0.21ab	34.18±0.46ab
	T3	34.96±1.21a	42.63±1.61a	48.61±1.33a	35.62±1.12a
	T4	33.45±0.59a	35.63±0.54b	45.97±0.28b	33.45±0.45b
P ₂ O ₅ 含量(g/kg)	CK	5.24±0.09d	6.77±0.12d	7.44±0.89c	5.96 ±0.07c
	T1	5.49±0.08c	7.08±0.08cd	7.61±0.03c	6.59±0.16b
	T2	5.94±0.21b	7.31±0.06c	8.45±0.05b	7.23±0.31a
	T3	6.38±0.07a	8.30±0.15a	9.13±0.07a	7.46±0.21a
	T4	6.25±0.07b	7.66±0.09b	8.38±0.16b	6.83±0.18b
K ₂ O 含量(g/kg)	CK	21.57±0.45d	49.39±0.81d	44.50±0.47c	36.39±0.81d
	T1	23.84±0.16c	52.48±0.44c	42.48±0.61c	39.48±0.52c
	T2	25.33±0.03b	54.94±0.81b	49.77±0.54ab	45.27±0.62b
	T3	29.35±0.63a	57.62±0.57a	52.40±0.54a	47.29±0.62a
	T4	26.70±0.57b	55.52±0.51b	47.27±1.61b	44.32±0.61b
Fe 含量(mg/kg)	CK	73.46±0.45d	51.54±2.19e	48.81±0.98d	40.32±0.75d
	T1	75.30±1.39d	61.12±1.62d	52.25±1.21c	45.76±1.24c
	T2	79.30±0.65c	67.52±1.04c	67.54±1.12b	54.81±0.41a
	T3	87.96±1.21a	82.79±1.07a	73.84±0.98a	56.49±0.64a
	T4	85.03±0.65b	74.69±0.54b	65.50±0.42b	51.83±0.42b
Zn 含量(mg/kg)	CK	50.32±0.75d	43.89±0.94c	30.71±0.62c	26.95±0.91e
	T1	53.44±1.18d	49.12±1.27b	37.22±0.89b	30.37±0.39d
	T2	63.81±1.24b	54.31±0.99a	38.94±1.13b	36.41±0.61b
	T3	68.49±0.38a	56.55±0.64a	44.90±0.99a	40.63±1.01a
	T4	58.16±1.15c	53.78±0.56a	41.98±0.54a	33.51±0.42c

CK、T1~T4 见表 2。同一指标、同一生育时期数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

2.3 各处理马铃薯产量及其构成

2.3.1 马铃薯块茎产量及增产率 从图 2 可见,与 CK 相比,T2~T4 处理马铃薯产量显著提高。随着微肥施用量的逐渐增加,马铃薯产量及增产率呈先上升后下降的趋势,T3 处理产量及增产率最高。其中,T2~T4 处理马铃薯产量分别达到 35 976.44 kg/hm²、40 678.84 kg/hm²和 37 621.90 kg/hm²。

2.3.2 各处理马铃薯产量构成 由表 4 可知,与 CK 相比,T3 处理马铃薯单株结薯数显著提升 68.62%。T3、T4 处理单株薯重分别较 CK 显著提高 44.19%、60.47%。与 CK 相比,T2、T3 处理商品薯率显著提高了 16.22%、18.88%。可见,化肥减施下配施微肥和生物有机肥可以有效增加马铃薯产量和商品薯



CK、T1~T4 见表 2。产量图柱上不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

图 2 不同处理马铃薯块茎产量及增产率

Fig.2 Yield and yield increase rate of potato tubers under different treatments

率。由表 5 可知,化肥减施情况下配施微肥和生物有机肥(T2~T4 处理)提高了马铃薯大薯和中薯的重量,其中 T3 处理大薯最重,达到 7.56 kg,10 株,较 CK 显著提高了 51.20%;T3 处理小薯数为 12.67 个,10 株,较 CK、T1 处理显著降低;T3 处理小薯重量为 0.63 kg,10 株,较 CK 和 T1 处理分别显著提高了 90.91%和 125.00%。

2.4 马铃薯干物质累积量、矿质元素及产量的相关性分析和聚类分析

从图 3A 可知,马铃薯产量与单株薯数、Zn 含量、增产率呈极显著正相关($P<0.001$),与茎干物质累积量、叶干物质累积量、氮含量、小薯重量、中薯重量呈显著正相关($P<0.05$),与小薯个数呈负相关。由图 3B 可知,根据不同指标间的差异,可将所有处理分为两大类,CK 和 T1 处理为一类,T3 和 T2、T4

处理为另一大类。综合各处理、各指标的变化与聚类热图分析可知,T3 处理效果最佳,其次是 T4 处理和 T2 处理。

表 4 各处理马铃薯单株结薯情况

Table 4 Tuber setting per plant of potato under different treatments

处理	单株薯数 (个)	单株薯重 (kg,1株)	商品薯率 (%)
CK	8.03±0.69b	0.43±0.02b	71.71±0.75c
T1	8.37±0.67b	0.35±0.01b	69.28±1.32c
T2	9.21±0.59b	0.48±0.01ab	83.34±0.54a
T3	13.54±1.93a	0.62±0.03a	85.25±0.67a
T4	12.67±1.67b	0.69±0.01a	80.28±0.65b

CK、T1~T4 见表 2。同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

表 5 各处理 10 株马铃薯各等级薯重量及个数

Table 5 Weight and number of tubers per grade for ten potato plants under different treatments

处理	小薯		中薯		大薯	
	重量(kg)	个数(个)	重量(kg)	个数(个)	重量(kg)	个数(个)
CK	0.33±0.03c	22.00±1.15b	2.85±0.01c	35.67±1.21c	5.00±0.01b	19.69±0.58ab
T1	0.28±0.01c	27.67±1.45a	3.15±0.03b	39.33±0.88b	5.82±0.02bc	23.00±0.52a
T2	0.42±0.02b	14.00±0.58c	3.37±0.01a	46.00±0.58a	6.24±0.014b	24.00±0.58a
T3	0.63±0.04a	12.67±0.88c	3.69±0.09a	46.82±1.15a	7.56±0.05a	14.92±0.57bc
T4	0.46±0.02b	15.67±0.89c	3.32±0.08b	41.67±1.20b	5.69±0.01c	12.13±0.56c

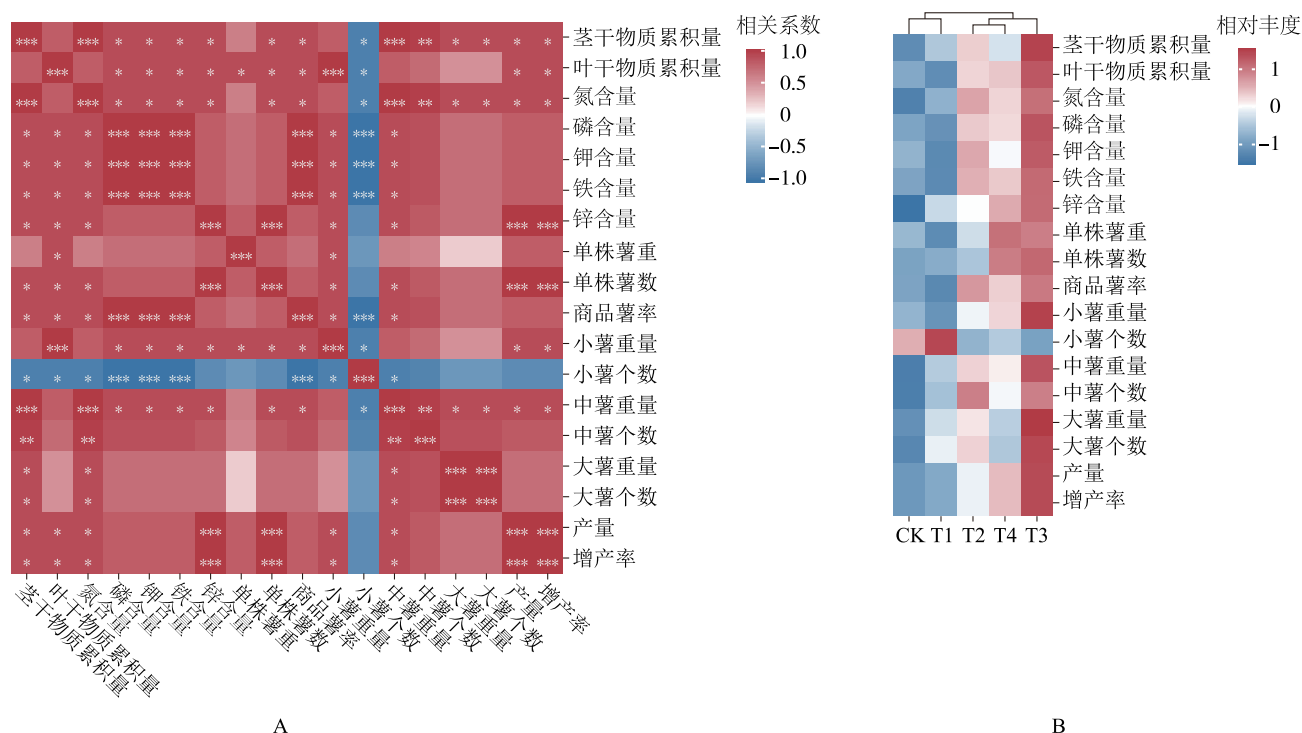
CK、T1~T4 见表 2。同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

3 讨论

3.1 不同施肥处理对马铃薯叶干物质累积量的影响

干物质积累是植物营养代谢与产量形成的基础与前提^[29-30]。较高的干物质积累量可使植物在逆境(如干旱)条件下储备更多能量,从而增强其抗逆能力^[31]。干物质积累量越高,植物体内有机物的累积量也就越高,进而提升其对营养元素的吸收与利用效率,为植株的正常生长发育提供有力支撑^[32]。前人研究结果表明,适度减少化肥施用量可有效规避过量施肥引发的生理负担,促进干物质在植物营养器官中的定向分配^[33]。此外,施用生物有机肥能够改善土壤理化性质,增强土壤透气性与微生物活性,进而促进植物根系发育,提升养分吸收利用效率,最终提高植株的营养获取能力与生理活性^[34]。本研究发现,随着生育期的推进,

马铃薯不同生育期茎和叶中干物质累积量在各处理下均呈现先升高后降低的趋势,除苗期外,其他生育期茎干物质累积量均大于叶干物质累积量,T3 处理茎、叶干物质累积量均显著高于 CK,这与前人研究结果基本一致。张婷婷^[35]在山东省烟台市福山区大白菜种植区设置 6 个施肥处理,结果显示,化肥减量 20%(N:469.2 kg/hm²,P₂O₅:222.3 kg/hm²,K₂O:265.2 kg/hm²)配施 4 000 kg/hm²生物有机肥,大白菜茎粗最大、叶绿素含量最高、养分吸收量最大。王成等^[36]研究发现,化肥配施生物有机肥能提高韭菜叶干物质累积量,其中配施 3 600 kg/hm²、4 800 kg/hm²生物有机肥处理效果显著。本研究还发现,微肥处理(T2~T4)的马铃薯茎、叶干物质累积量大多显著高于 T1 处理,且随微肥施用量增加呈先升高后降低的趋势,在 T3 处理时达到峰值。这是由于铁、锌微量元素在植物体内参与叶绿素的合成过程,并调节光合作用,提升光合效率,有利于有机物和



A:相关性分析;B:聚类分析。数据经基迪奥云平台进行无量纲化处理。颜色深浅反映相关系数的大小,其中,红色加深表示相关系数趋近于1,表明正相关关系增强;蓝色加深表示相关系数趋近于-1,表明负相关关系增强。符号*、**、***分别表示显著性水平达到0.05、0.01和0.001;图B中的数值表示相对丰度。CK、T1~T4见表2。

图3 马铃薯茎、叶干物质累积量以及叶片中矿质元素含量与块茎产量的相关性分析及聚类分析

Fig.3 Correlation and cluster analysis of dry matter accumulation in potato stems and leaves, mineral element contents in leaves and tuber yield

干物质的积累^[37]。周坤等^[38]研究发现,高锌处理下番茄果实干重和植株总干重均显著增加。张敏等^[39]的研究结果表明,施用生物有机肥可显著提高花生叶干物质累积量,其中20%化肥(480 kg/hm²)+80%生物有机肥(12 000 kg/hm²)处理花生叶干物质累积量最高。此外,韩金玲等^[40]在冬小麦田设置4个锌肥施用水平,结果发现,锌过量和不足时都会对小麦干物质累积产生不利影响,并最终确定了普通小麦品种施用锌肥的适宜量为11.25 kg/hm²。

3.2 不同处理对马铃薯叶片矿质元素含量的影响

矿质营养是马铃薯生长发育、块茎形成和品质提升的重要物质基础^[41]。研究者发现,在化肥减施条件下,生物有机肥对作物矿质元素含量的影响显著。刘茂等^[42]的研究结果表明,施用生物有机肥能显著提高梨树叶片中叶绿素含量及矿质元素含量;孙海高^[43]研究发现,化肥减量配施生物有机肥能显著提高葡萄叶片中矿质元素含量,其中叶片全氮含

量在生物有机肥替代50%化肥时达到最高值,与单施化肥相比提高了18.8%。土壤中铁含量的有效提升可保障水稻铁元素供应充足,施用螯合铁能显著提高糙米中的铁含量^[44];锌肥施用可促进水稻各组织锌元素的积累,从而促进水稻生长^[45]。本研究结果表明,与不施用微量元素的CK和T1处理相比,分别施用30 kg/hm²铁肥和40 kg/hm²锌肥(T3处理),不仅能提高马铃薯叶片中氮、磷、钾的含量,同时也能有效增加叶片中铁和锌的含量,同时提升植物对矿质养分的综合利用率,这与前人的研究结果一致。Sun等^[46]研究发现,叶面喷施铁肥、锌肥能显著提高甘薯植株中铁、锌含量,因铁、锌作为植物必需微量元素,不仅能够增强叶片对矿质元素的吸收能力^[47],还能调节养分分配,促进氮、磷、钾的转运与分配,提升营养成分的协同利用效率^[48]。施用生物有机肥在改良土壤结构的同时,有效提升了土壤的通气性和保水保肥能力,使土壤中潜在养分得

以释放,从而激发有益微生物的活性,优化根际环境^[49]。铁锌合理配施不仅能增强植株对矿质元素的吸收能力,还可提升叶片中的养分储备量,改善植株整体的养分供给状况与代谢活性,为植株干物质积累及块茎膨大提供充足的营养支撑^[50]。孙小龙^[51]的研究结果表明,施锌肥可显著提高马铃薯各器官中的锌元素累积量,且糖醇锌的效果明显优于硫酸锌。已有研究结果证实,施用生物有机肥配施纳米铁肥的处理方式,可使番茄幼苗叶片中氮、磷、钾、铁、锌等矿质元素的含量不同程度提升^[52]。综上,化学肥料与铁肥、锌肥及生物有机肥的合理配施,能够有效提高植物对矿质元素的吸收利用效率与有效累积量。

3.3 不同施肥处理对马铃薯产量及其构成的影响

增产率、单株薯重、大中小薯数量及重量、商品薯率等是直接表现产量构成的重要指标。杜宏辉等^[53]的研究结果表明,化肥减量配施生物有机肥可显著提高马铃薯产量,其中化肥减量 30% 配施生物有机肥 2 100 kg/hm² 的处理,马铃薯总产量、商品薯产量较当地常规施肥处理分别提升 13.61%、22.46%,商品薯率提高 7.79%。席正祯^[54]的研究也证实,生物有机肥替代部分化肥能显著增加马铃薯产量,其中生物有机肥替代 30% 化肥的处理,产量较常规施肥处理提高 10.30%。另有研究者发现,铁肥、锌肥的施用可间接促进作物产量提升:袁辉等^[55]研究发现,铁、锌肥配施可显著提高甘肃省定西市马铃薯产量和品质,其中铁肥(硫酸亚铁) 20 kg/hm²、锌肥(硫酸锌) 40 kg/hm² 处理下,马铃薯产量较对照提高 21.50%;Chatterjee 等^[56]则证实,铁肥的补充可有效改善马铃薯的抗逆性,促进植株营养累积,进而有利于提升产量与品质。本研究结果表明,在化肥减施下,科学配施微量元素肥料和生物有机肥显著提高了马铃薯产量,且相关性分析结果表明,马铃薯产量与单株薯数、Zn 含量、增产率呈极显著正相关。T3 处理单株结薯数、单株薯重、商品薯率、大薯重量显著高于 CK 和 T1 处理。原因可能是铁和锌在作物体内参与光合作用、酶活性调节及碳水化合物合成等重要代谢过程,适量补充铁和锌有助于提高植株的营养利用效率,促进块茎发育^[57]。同时,生物有机肥富含有机质和有益微生物,能够改善土壤环境,增强根系吸收功能,为马铃薯生长提供良好条件,从而显著提高产量和商品性

状^[58]。杨春霞等^[59]研究发现,适当叶面喷施锌肥能够显著提高小麦产量及其籽粒中锌含量,这与本研究结果相似。综上,叶面喷施铁肥、锌肥能够促进作物增产,且在化肥合理减施的基础上科学配施铁肥、锌肥和生物有机肥增产效果更好。

4 结 论

综上,化肥减施条件下科学配施铁肥、锌肥和生物有机肥可显著促进马铃薯干物质积累,提高叶片中矿质元素含量,并有效提高产量,其中 T3 处理效果最好。因此,本研究认为,T3 处理(360 kg/hm² 尿素+300 kg/hm² 过磷酸钙+420 kg/hm² 硫酸钾+3 000 kg/hm² 生物有机肥+30 kg/hm² 铁肥+40 kg/hm² 锌肥)可作为西北冷凉地区马铃薯高效生产的最佳施肥方案。

参考文献:

- [1] 孙得翔,石铭福,王 勇,等. 有机肥部分替代化肥对马铃薯农艺性状、产量和品质的影响[J]. 甘肃农业大学学报,2022,57(6):43-51.
- [2] ZHANG H, XU F, WU Y, et al. Progress of potato staple food research and industry development in China[J]. Journal of Integrative Agriculture,2017,16(12):2924-2932.
- [3] SAMPAIO S L, PETROPOULOS S A, ALEXOPOULOS A, et al. Potato peels as sources of functional compounds for the food industry: a review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 103:118-129.
- [4] 耿 荣,王明国,尹学红,等. 化肥减量配施有机肥对马铃薯生长、产量及土壤容重的影响[J]. 农业科学研究,2024,45(4):91-96.
- [5] 宁学军. 玉米-大豆套种栽培技术要点研究[J]. 种子科技, 2024,42(23):48-50.
- [6] 薛慧玲,李志平,张子义. 不同肥菌互作提升土壤肥力、养分利用和马铃薯产量研究[J]. 内蒙古科技与经济,2024(11):99-104.
- [7] 栗贵俊,楼 玲,李 丹,等. 生物有机肥基施用量对大棚青菜产量和土壤养分含量的影响[J]. 农学学报,2023,13(7):44-47.
- [8] 孙 瑞,孙本华,高明霞,等. 长期不同土地利用方式下土壤微生物特性的变化[J]. 植物营养与肥料学报,2015,21(3):655-663.
- [9] MARTENS D A, JOHANSON J B, FRANKENBERGER W T. Production and persistence of soil enzymes with repeated addition of organic residues[J]. Soil Science,1992,153(1):53-61.
- [10] 周肖瑜,杨明珠,李 艳,等. 生物有机肥替代化肥对设施栽培结球甘蓝、花椰菜产量、品质及土壤理化性状的影响[J]. 蔬菜,2025(5):59-71.

- [11] 曾 征. 化肥减量配施生物有机肥对玉米生长的影响[J]. 农技服务, 2025, 42(4): 20-24.
- [12] 何志学, 朱惠霞, 张玉鑫, 等. 化肥减量配施有机肥对番茄产量和品质的影响[J]. 中国瓜菜, 2025, 38(6): 146-151.
- [13] 张 燕, 杨荣福. 生物有机肥对白菜生长及产量的影响[J]. 种子科技, 2023, 41(18): 21-23.
- [14] 张国顺, 朱徐燕, 楼 玲, 等. 减量施肥条件下生物有机肥对丝瓜产量与抗病性的影响[J]. 浙江农业科学, 2021, 62(5): 900-903.
- [15] 邓素枫, 杨水芝, 龙显耀, 等. 多功能生物有机肥改良柑橘园碱性土壤的效果[J]. 中国南方果树, 2025, 54(3): 7-14.
- [16] 秦水花. 生物有机肥在红提葡萄上的应用效果研究[J]. 农业技术与装备, 2025(2): 115-117.
- [17] 孙宗训, 倪圣权, 于德科. 生物有机肥替代部分化肥对辣椒制种产量及质量的影响[J]. 长江蔬菜, 2024(24): 73-75.
- [18] 李丰先, 罗 磊, 李亚杰, 等. 铁锌配施对马铃薯植株性状和营养品质的影响[J]. 中国马铃薯, 2022, 36(4): 314-321.
- [19] HADI M R, TAHERI R, BALALI G R. Effects of iron and zinc fertilizers on the accumulation of Fe and Zn ions in potato tubers [J]. Journal of Plant Nutrition, 2015, 38(2): 202-211.
- [20] LINDSAY W L. Soil and plant relationships associated with iron deficiency with emphasis on nutrient interactions [J]. Journal of Plant Nutrition, 1984, 7(1/2/3/4/5): 489-500.
- [21] 张小玲. 微量元素对草莓生长、果实品质及抗病性的影响研究[J]. 河南农业, 2024(24): 28-30.
- [22] 李 凯, 张国辉, 郭志乾, 等. 叶面喷施铁锌锰微肥对马铃薯生长、品质与产量的影响[J]. 作物研究, 2018, 32(1): 28-30, 34.
- [23] 武新娟, 唐 贵, 隋冬华, 等. 铁锌叶面肥对马铃薯叶绿素含量及产量的影响[C]//中国作物学会马铃薯专业委员会, 黑龙江省农业农村厅, 齐齐哈尔市人民政府, 北大荒农垦集团有限公司. 马铃薯产业与种业创新(2023). 黑龙江省农业科学院乡村振兴科技研究所, 2023: 309-312.
- [24] 罗爱花, 陆立银, 王一航. 大中微量元素配施对陇薯5号养分吸收及品质的影响[J]. 长江蔬菜, 2011(6): 52-56.
- [25] 焦龙光, 郭全恩, 曹诗瑜, 等. 不同改良措施对饲用玉米根际土壤生物学性质的影响[J]. 中国草地学报, 2025, 47(3): 103-111.
- [26] 杜 平. 外源锌对马铃薯生长及块茎锌含量的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2021.
- [27] 王鹏伟. 19个马铃薯品种的重要性状及遗传多样性分析[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2019.
- [28] 尼玛央宗, 拉巴扎西. 不同栽培环境对西藏马铃薯品种营养成分的影响[J]. 西藏农业科技, 2020, 42(4): 68-70.
- [29] 王志强, 张丽婷, 彭凌馨, 等. 锌肥对水分逆境下玉米产量形成的影响[J]. 河南农业大学学报, 2014, 48(6): 674-679.
- [30] 吴春胜. 超高产玉米灌浆速率与干物质积累特性研究[J]. 吉林农业大学学报, 2008, 30(4): 382-385, 400.
- [31] GOLABADI M, GOKAR P, BAHARI B. Remobilization assay of dry matter from different shoot organs under drought stress in wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. Agronomy Research, 2015, 13: 1202-1214.
- [32] 朱新广, 王 强, 张其德, 等. 冬小麦光合功能对盐胁迫的响应[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(2): 177-180.
- [33] RAHIM O M A, MOHAMMED I Q. Effect of organic fertilizer and foliar application of humic and salicylic acids on reducing salinity stress of irrigation water on vegetative growth characteristics of broccoli (*Brassica oleracea*) plant [J]. Plant Archives, 2020, 20(1): 2263-2268.
- [34] 何 震, 何雨辉, 刘铭钰, 等. 化肥减量配施有机肥对土壤质量、百合植株养分吸收及产量的影响[J]. 山东农业科学, 2025, 57(6): 87-94.
- [35] 张婷婷. 化肥减量配施生物有机肥对大白菜生长及养分吸收的影响[J]. 特种经济动植物, 2025, 28(1): 19-21, 57.
- [36] 王 成, 吕 剑, 李 静, 等. 不同生物有机肥用量对韭菜产量、品质及养分利用的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2019(6): 204-211.
- [37] 张 毅, 梁 祎, 韩 静, 等. 光周期和外源铁对番茄光合特性、果实品质及矿质元素含量的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2022, 50(1): 104-111.
- [38] 周 坤, 刘 俊, 徐卫红, 等. 外源锌对不同番茄品种抗氧化酶活性、镉积累及化学形态的影响[J]. 环境科学学报, 2014, 34(6): 1592-1599.
- [39] 张 敏, 陈佳佳, 杨 正, 等. 化肥减施配施生物有机肥对花生生长、保护酶活性及产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(21): 86-93.
- [40] 韩金玲, 杨 晴, 周印富, 等. 旱地施用锌肥对冬小麦干物质积累和产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2010, 30(2): 358-361.
- [41] 潘 擎, 冯国惠. 马铃薯矿质营养研究进展[J]. 中国马铃薯, 2023, 37(4): 360-366.
- [42] 刘 茂, 柴仲平, 盛建东, 等. 施用有机肥对库尔勒香梨叶片营养元素及果实产量、品质的影响[J]. 北方园艺, 2014(10): 159-163.
- [43] 孙海高. 有机无机肥配施对葡萄果实品质和主要矿质营养影响研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2020.
- [44] CHEN Z, TANG Y T, YAO A J, et al. Mitigation of Cd accumulation in paddy rice (*Oryza sativa* L.) by Fe fertilization [J]. Environmental Pollution, 2017, 231: 549-559.
- [45] 李梦妮, 吴鲁洁, 叶正钱. 化肥减量条件下喷施锌肥对水稻生长和稻谷锌含量的影响[J]. 浙江农业科学, 2024, 65(8): 1873-1878.
- [46] SUN Y, MI W H, WU L H. Effects of foliar Fe and Zn fertilizers on storage root Fe, Zn, and beta-carotene content of sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) [J]. Journal of Plant Nutrition, 2019, 42(1): 16-26.
- [47] 谢 辉, 阿丽娅·阿力木, 秦丽欢, 等. 杏树叶果及土壤矿质营养的动态变化分析[J]. 北方园艺, 2024(10): 69-77.
- [48] WANG Y H, GARVIN D F, KOCHIAN L V. Nitrate-induced genes in tomato roots.array analysis reveals novel genes that may play a role in nitrogen nutrition [J]. Plant Physiology, 2001, 127(1): 345-359.

- [49] 冯腾腾,贾志航,蒋 薇,等. 不同施肥处理对连作黄瓜生长发育及土壤理化性质的影响[J]. 安徽农业科学,2025,53(12):125-128.
- [50] SOOMRO A F, TUNIO S, OAD F C, et al. Integrated effect of inorganic and organic fertilizers on the yield and quality of sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) [J]. Pakistan Journal of Botany, 2013,45(4):1339-1348.
- [51] 孙小龙. 不同锌肥及锌、铁配施对旱作马铃薯产量和营养品质及其形成规律的影响[D]. 兰州:甘肃农业大学,2014.
- [52] EL-DESOUKY H S, ISLAM K R, BERGEFURD B, et al. Nano iron fertilization significantly increases tomato yield by increasing plants' vegetable growth and photosynthetic efficiency[J]. Journal of Plant Nutrition,2021,44(11):1649-1663.
- [53] 杜宏辉,贾学刚,杨 涛. 化肥减量及配施生物有机肥对马铃薯产量、矿质元素含量及土壤肥力的影响[J]. 中国瓜菜,2023,36(9):66-74.
- [54] 席正祎. 生物有机肥对马铃薯栽培效果的影响对比试验:以威宁县为例[J]. 广东蚕业,2025,59(5):19-21.
- [55] 袁 辉,惠领领,谢军红,等. 铁、锌肥对马铃薯产量、品质及土壤养分的影响[J]. 中国农学通报,2024,40(12):15-21.
- [56] CHATTERJEE C, GOPAL R, DUBE B K. Impact of iron stress on biomass, yield, metabolism and quality of potato (*Solanum tuberosum* L.) [J]. Scientia Horticulturae,2006,108(1):1-6.
- [57] NEGI S, SINGH D, PANDEY H, et al. Biofortification for high Fe and Zn in various Poaceae crops by using different molecular breeding and biotechnological approaches [J]. Plant Physiology Reports,2021,26(4):636-646.
- [58] 邱晓丽,周洋子,董 莉,等. 生物有机肥对马铃薯根际土壤生物活性及根系活力的影响[J]. 干旱地区农业研究,2019,37(3):162-169.
- [59] 杨春霞,张 艳,夏学智. 叶面喷施和滴灌条件下增施微肥对春小麦微量元素含量和产量的影响[J]. 河南农业科学,2023,52(2):38-46.

(责任编辑:黄克玲)