

胡雄亮, 赵雪蕊, 焦淑娟, 等. 氮素形态及配比对马铃薯生理特性、产量及品质的影响[J]. 江苏农业学报, 2025, 41(7): 1280-1288.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2025.07.004

氮素形态及配比对马铃薯生理特性、产量及品质的影响

胡雄亮¹, 赵雪蕊¹, 焦淑娟¹, 张茹艳¹, 王勇¹, 王星星¹, 张卫娜¹, 康益晨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: 为探究氮素不同形态及配比对马铃薯生理特性、块茎产量及品质的影响。本研究以马铃薯晚熟品种陇薯 17 号为试验材料进行田间试验, 设置 6 个处理: 不施氮肥对照(CK)处理, 施酰胺态氮尿素(T1)处理, 施铵态氮硫酸铵(T2)处理, 施硝态氮硝酸钙(T3)处理, 以 50:50 的比例施用硝态氮和铵态氮(T4)处理, 以 75:25 的比例施用硝态氮和铵态氮(T5)处理。研究了氮素形态及配比对马铃薯叶片光合作用、内源激素含量、氮代谢关键酶活性、块茎产量及品质的影响。结果表明, 施用不同形态氮素和配比可不同程度改善马铃薯光合作用, 其中硝态氮和铵态氮比例为 75:25 时马铃薯叶片气孔导度(G_s)显著高于其他处理, 显著增加了玉米素(ZT)含量。与 CK 相比, T5 处理的吲哚乙酸(IAA)含量和 ZT 含量分别提高了 119.02% 和 132.06%, ABA 含量降低了 59.80%, GA₃ 含量提高了 8.25%; 氮代谢关键酶活性均显著高于 CK。同时, 不同形态氮素及配比处理马铃薯块茎产量较 CK 增加了 28.66%~60.43%。上述结果表明, 施用不同形态氮素及配比可以不同程度地调控马铃薯叶片内源激素含量和氮代谢关键酶活性, 提高马铃薯叶片光合性能及产量和品质, 且以硝态氮与铵态氮比例为 75:25(T5)时对马铃薯的生长促进作用最强, 产量和品质最优。

关键词: 马铃薯; 氮素形态; 光合作用; 内源激素; 氮代谢酶; 产量; 品质

中图分类号: S532 文献标识码: A 文章编号: 1000-4440(2025)07-1280-09

Effects of nitrogen forms and ratios on physiological characteristics, yield and quality of potato

HU Xiongliang¹, ZHAO Xuerui¹, JIAO Shujuan¹, ZHANG Ruyan¹, WANG Yong¹, WANG Xingxing¹, ZHANG Weina¹, KANG Yichen¹, LIU Yuhui², QIN Shuhao¹

(1. College of Horticulture, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 2. Gansu Key Lab of Crop Improvement & Germplasm Enhancement, Lanzhou 730070, China)

Abstract: To investigate the effects of different nitrogen forms and ratios on physiological traits, tuber yield, and

收稿日期: 2024-11-07

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: 胡雄亮(1998-), 男, 甘肃漳县人, 硕士研究生, 主要从事蔬菜栽培及逆境生物学研究。(E-mail) 986495933@qq.com

通讯作者: 秦舒浩, (E-mail) qinsh@gsau.edu.cn

quality in potato, a field experiment was conducted using Longshu No. 17 (a late-maturing potato cultivar) as the test material. The experiment comprised six treatments: an unfertilized control (CK), urea application (amide nitrogen, T1), ammonium sulfate application (ammonium nitrogen, T2), calcium nitrate application (nitrate nitrogen, T3), a 50:50 combined application of nitrate and ammonium nitrogen (T4), and a 75:25 combined application

of nitrate and ammonium nitrogen (T5). This study investigated the effects of nitrogen forms and their ratios on potato leaf photosynthesis, endogenous hormone content, key enzyme activities in nitrogen metabolism, tuber yield, and quality. Results indicated that nitrogen forms and their application ratios differentially improved potato photosynthetic performance. Specifically, the 75 : 25 combined application of nitrate and ammonium nitrogen (T5) significantly enhanced stomatal conductance (G_s) and increased zeatin (ZT) content compared to other treatments. Compared to CK, T5 treatment increased indole-3-acetic acid (IAA) and zeatin (ZT) contents by 119.02% and 132.06% respectively, decreased abscisic acid (ABA) content by 59.80%, and elevated gibberellin A_3 (GA_3) content by 8.25%, while significantly enhancing all key nitrogen metabolism enzyme activities. Simultaneously, tuber yields under different treatments increased by 28.66% to 60.43% compared to CK. These findings demonstrated that nitrogen forms and their application ratios differentially regulated endogenous hormone levels and key nitrogen-metabolizing enzyme activities in potato leaves, enhancing photosynthetic performance, yield, and quality. The 75 : 25 combined application of nitrate and ammonium nitrogen (T5) exhibited the most pronounced growth-promoting effects, delivering optimal tuber yield and quality.

Key words: potato; nitrogen forms; photosynthesis; endogenous hormones; nitrogen metabolism enzymes; yield; quality

马铃薯(*Solanum tuberosum* L.)是茄科一年生草本植物^[1],因其营养成分齐全、产量高、适应性强等特点被广泛引种栽培^[2],是中国继水稻、小麦和玉米之后生产和消费最多的粮食作物之一。同时马铃薯块茎既可以作为粮食和蔬菜,也可以作为饲料和加工原料。因此,推动马铃薯产业健康发展对中国农业经济的发展具有重要意义^[3]。

氮素是影响植物生长最主要的养分之一,直接调控植物的生长发育^[4]。植物对氮素的吸收与利用主要有硝态氮和铵态氮两种形态,不同植物对氮素形态的需求不同^[5]。光合作用对植物的生理代谢活动起着至关重要的作用,施用氮肥对许多植物的光合作用有一定影响^[6-8]。研究发现,一定比例的铵态氮(NH_4^+-N)与硝态氮(NO_3^-N)混施可明显改善植物的光合气体交换参数^[9];叶义全等^[10]的研究结果表明,铵态氮处理能够显著提高杉木幼苗叶片气孔导度(G_s)、蒸腾速率(T_r)和净光合速率(P_n)。植物激素的含量受多种因子调控,而氮素是影响激素合成、运输和平衡的重要因素^[11],施用氮肥可以提高葡萄叶片中玉米素(ZT)、吲哚乙酸(IAA)和赤霉素(GA_3)含量,从而提高果实品质与产量^[12]。在对辣椒^[13]和甘薯^[14-16]的研究中发现,不同氮素形态配比可以提高植株的光合特性、氮代谢关键酶活性、产量和品质。此外,前人还研究发现不同形态的氮素可以显著提高马铃薯光合特性和块茎产量,且与铵态氮相比,硝态氮更有利于马铃薯生长发育^[17-19]。

氮素形态及配比对娃娃菜^[20]、番茄^[21]和烤

烟^[22]等植物的产量和品质等方面影响的研究较为广泛,但是针对氮素形态及配比对马铃薯的影响研究较少。因此,筛选出能够促进马铃薯生长发育并提高其产量和品质的氮素形态及比例,可以为马铃薯产业精细化管理提供支持。本研究以马铃薯晚熟品种陇薯17号为供试材料,研究氮素形态及配比对马铃薯叶片光合特性、内源激素含量、氮代谢关键酶活性、块茎产量及品质的影响,确定最佳氮肥形态和比例,以期对马铃薯高产优质栽培奠定基础。

1 材料与方 法

1.1 试验区概况及试验材料

本试验在甘肃省定西市甘肃农业大学综合试验基地(104°35'N,35°33'E)进行,该地区年平均气温为6.4℃,年平均降水量415.2mm,马铃薯整个生育期内总降水量340.0mm,土壤有机质含量高,持水性好。供试材料为甘肃省农业科学院马铃薯研究所提供的马铃薯晚熟品种陇薯17号;供试肥料为硝酸钙(含氮量为17.07%),硫酸铵(含氮量为21.21%),尿素(氮含量为46.00%),过磷酸钙(P_2O_5 含量12.00%)和硫酸钾(K_2O 含量24.00%),购于甘肃盛华威商贸责任有限公司。

1.2 试验设计

本试验共设置6个处理,分别是不施氮肥对照(CK),施尿素(T1),施硫酸铵(T2),施硝酸钙(T3),施硝酸钙+硫酸铵(硝态氮:铵态氮=50:50)(T4),施硝酸钙+硫酸铵(硝态氮:铵态氮=75:25)(T5),具体施肥方案见表1。采用完全随

机机组设计,每个处理 3 次重复,共计 18 个小区。小区面积为 25.9 m² (3.50 m×7.40 m)。采用起垄覆膜点播方法种植,每个小区 2 垄,垄宽 80 cm,每垄种 2 行,行距为 50 cm,株距为 30 cm,种植密度为 1 hm² 53 295 株。所有处理进行统一的田间常规管理,定期进行人工除草。马铃薯于 2023 年 4 月 27 日播种,10 月 8 日采收。

表 1 本试验田间施肥方案

Table 1 Field fertilization programs in this experiment

处理	硝酸钙 用量 (kg/hm ²)	硫酸铵 用量 (kg/hm ²)	尿素 用量 (kg/hm ²)	过磷酸钙 用量 (kg/hm ²)	硫酸钾 用量 (kg/hm ²)
CK	0	0	0	375	525
T1	0	0	450	375	525
T2	0	990	0	375	525
T3	1 230	0	0	375	525
T4	615	495	0	375	525
T5	923	248	0	375	525

1.3 测定项目及方法

1.3.1 光合特性的测定 在晴朗的上午 9:00–11:00 使用 Li-6400 XT 光合仪(美国 LI-COR 公司产品)测定马铃薯叶片气孔导度(G_s)、蒸腾速率(T_r)、净光合速率(P_n)和胞间 CO₂ 浓度(C_i)。

1.3.2 内源激素含量的测定 采用高效液相色谱法测定马铃薯叶片中内源激素(IAA、ZT、ABA、GA₃)含量^[23]。将植物激素提取液复溶后过孔径为 0.22 μm 的有机滤膜,最后转移至棕色进样瓶中,利用美国安捷伦公司生产的高效液相色谱仪(C18, 4.6 mm×250 mm, 5 μm)测定内源激素含量,每个处理均进行 3 次重复测量,以确保结果的可信度,用标准曲线计算各内源激素的含量。

1.3.3 氮代谢关键酶活性的测定 硝酸还原酶(NR)和谷氨酰胺合成酶(GS)活性采用北京索莱宝有限公司提供的试剂盒测定;谷氨酸脱氢酶(GDH)和谷氨酸合成酶(GOGAT)活性采用苏州科铭生物技术有限公司生产的试剂盒进行测定。

1.3.4 产量测定 马铃薯块茎收获时,每个处理分别取 10 株进行考种,按大薯(>250 g)、中薯(50~250 g)、小薯(<50 g)的标准进行产量结构分析,并按小区单收计产,然后计算施氮素肥料处理区与对照相比的增产率。

1.3.5 品质指标测定 采用近红外品质分析仪

(NIRS DS 2500, 丹麦 FOSS 公司产品)测定马铃薯块茎中淀粉、还原糖、蛋白质、维生素 C 和纤维素的含量^[24]。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2013 对数据进行统计,通过 SPSS 25.0 软件用 Duncan's 新复极差法($P < 0.05$)对试验数据进行多重比较。利用 Origin 2022 及基迪奥生物信息云平台(<https://www.omicshare.com/>)进行绘图。

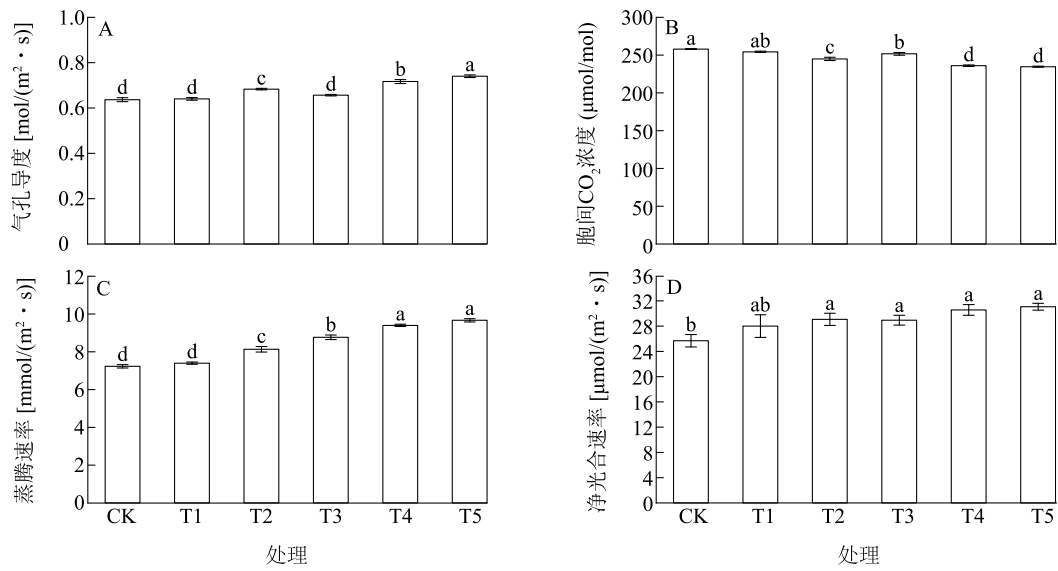
2 结果与分析

2.1 氮素形态及配比对马铃薯叶片光合作用的影响

由图 1 可知,与 CK 相比,T4 处理和 T5 处理对马铃薯叶片气孔导度(G_s)、净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)和胞间 CO₂ 浓度(C_i)均有显著影响。由图 1A 可知,与 CK 和单一氮素处理(T1、T2、T3)相比,混合氮源处理(T4、T5)中的气孔导度显著增加,分别比 CK 增加 12.56%、16.22%。与之相反,从图 1B 可知,与 CK 和 T1、T2、T3 处理相比,T4、T5 处理的胞间 CO₂ 浓度显著降低,较 CK 分别降低了 8.53% 和 9.04%。从图 1C 可知,与 CK 相比,T2、T3、T4、T5 处理马铃薯叶片蒸腾速率分别显著提高了 12.44%、21.20%、29.95% 和 33.64%。从图 1D 可知,与 CK 相比,T2、T3、T4、T5 处理马铃薯叶片中净光合速率显著提高。由此可见,不同氮素形态和配比对马铃薯叶片光合作用有促进作用,可以提高光合效率,有利于光合物质的积累。

2.2 氮素形态及配比对马铃薯叶片内源激素含量的影响

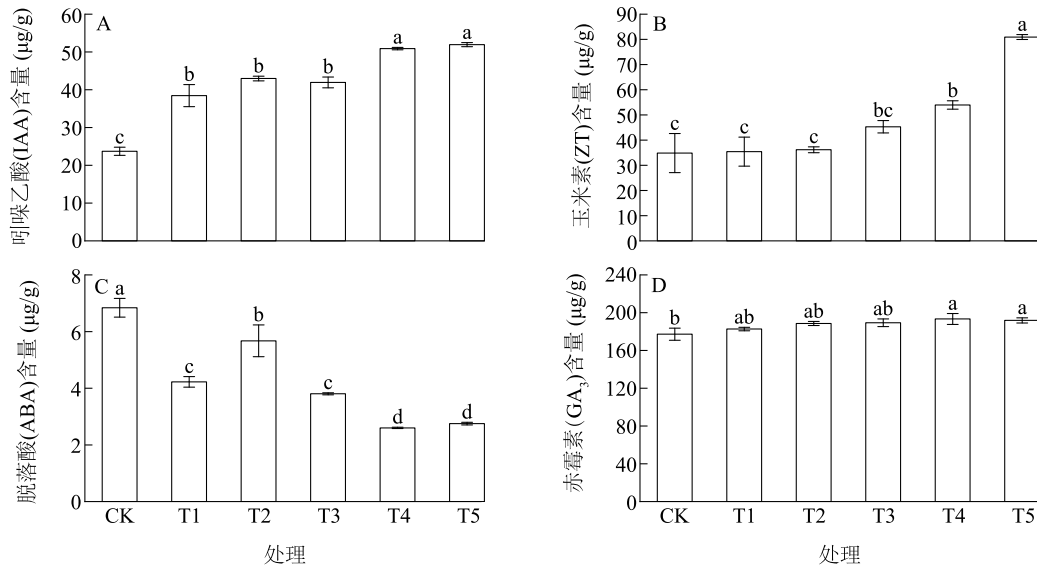
不同氮素形态及配比可调控马铃薯叶片内源激素水平(图 2)。由图 2A 可知,与 CK 相比,T1~T5 处理马铃薯叶片中 IAA 含量均显著增加,T4、T5 处理较 CK 分别增加 114.64%、119.02%。从图 2B 可知,T5 处理马铃薯叶片 ZT 含量较 CK、T1、T2、T3、T4 处理分别显著提高了 132.06%、128.46%、123.66%、78.64% 和 49.97%。从图 2C 可知,与 CK 相比,T1~T5 处理马铃薯叶片中 ABA 含量均显著降低,T4、T5 处理降幅更大。从图 2D 可知,与 CK 相比,T4、T5 处理马铃薯叶片 GA₃ 含量显著增加。综上所述,不同氮素形态及配比可提高马铃薯叶片 IAA、ZT、GA₃ 含量,降低 ABA 含量,其中 T4、T5 处理对马铃薯叶片内源激素的影响更大。



CK:不施氮肥对照处理;T1:酰胺态氮;T2:铵态氮;T3:硝态氮;T4:硝态氮:铵态氮=50:50;T5:硝态氮:铵态氮=75:25。图柱上不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。

图 1 不同氮素形态及配比对马铃薯叶片光合作用的影响

Fig.1 Effects of different nitrogen forms and ratios on photosynthetic characteristics of potato leaves



CK、T1~T5 见图 1 注。图柱上不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。

图 2 不同氮素形态及配比对马铃薯叶片内源激素含量的影响

Fig.2 Effects of different nitrogen forms and ratios on endogenous hormone content in potato leaves

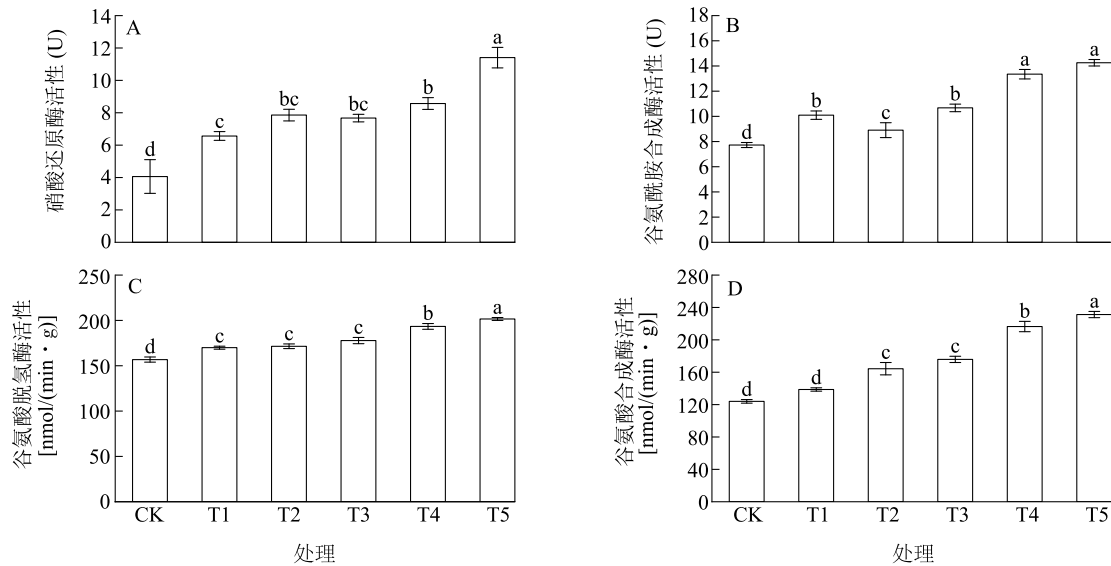
2.3 氮素形态及配比对马铃薯叶片氮代谢关键酶活性的影响

从图 3A 可见,与 CK 相比,T1~T5 处理马铃薯叶片中硝酸还原酶活性显著升高,分别提高了 61.66%、93.40%、88.83%、110.99% 和 180.74%。从图 3B 可知,与 CK 相比,T1~T5 处理均能显著提

高马铃薯叶片中谷氨酰胺合成酶活性,T4、T5 处理显著高于 CK 和其他处理。从图 3C 可知,T5 处理马铃薯叶片中谷氨酸脱氢酶活性较 CK 和 T1~T4 处理分别显著增加了 28.56%、18.63%、17.55%、13.38% 和 4.23%。从图 3D 可知,T4、T5 处理马铃薯叶片谷氨酸合成酶活性均显著高于 CK 和 T1~T3

处理。由此表明,适宜的氮素形态及配比可以提高马铃薯叶片中 *NR*、*GS*、*GDH* 和 *GOGAT* 活性,促进马

铃薯的氮代谢。



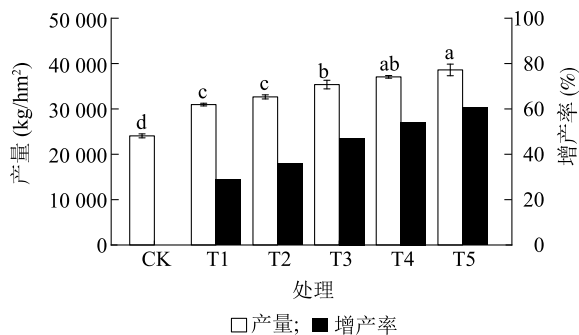
CK、T1~T5 见图 1 注。图柱上不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 3 不同氮素形态及配比对马铃薯叶片氮代谢关键酶活性的影响

Fig.3 Effects of different nitrogen forms and ratios on the activities of key enzymes in nitrogen metabolism in potato leaves

2.4 氮素形态及配比对马铃薯块茎产量及其构成的影响

由图 4 可知,T1~T5 处理马铃薯块茎单位面积产量均显著高于 CK。其中,T5 处理的单位面积产量达 38 600 kg/hm²,与 CK 相比增产 60.43%;另外,T1~T4 处理分别比 CK 增产 28.66%、35.72%、47.01%和 54.08%。



CK、T1~T5 见图 1 注。图柱上不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 4 不同氮素形态及配比对马铃薯块茎产量及增产率的影响

Fig.4 Effects of different nitrogen forms and ratios on yield and yield increase rate of potato tubers

不同的氮素形态及配比可促进马铃薯块茎膨大,大薯和中薯的比例增加,商品薯率提高。由表 2

可知,T4、T5 处理大薯率显著高于其他处理。与 CK 相比,T1、T4、T5 处理中薯率显著提高,T1~T5 处理的小薯率显著降低。

表 2 不同氮素形态与配比对马铃薯产量构成的影响

Table 2 Effects of different nitrogen forms and ratios on yield components of potato

处理	大薯率 (%)	中薯率 (%)	小薯率 (%)
CK	13.70±2.25c	27.04±1.42c	57.53±1.91a
T1	17.28±3.29bc	33.61±1.58ab	47.03±0.94b
T2	20.08±3.71b	30.00±1.61bc	47.60±2.46b
T3	21.11±2.39b	31.70±1.20bc	44.77±2.62b
T4	27.78±3.92a	33.92±2.51ab	32.14±3.45c
T5	30.89±2.38a	38.90±1.59a	30.45±1.95c

CK、T1~T5 见图 1 注。同列不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$),数据为平均值±标准差。

2.5 氮素形态及配比对马铃薯块茎品质的影响

不同形态氮素及配比处理可以改善马铃薯块茎品质(表 3)。从表 3 可知,T1、T2、T4、T5 处理马铃薯块茎中蛋白质含量与 CK 相比显著增加。与 CK 相比,T3、T4、T5 处理马铃薯块茎中淀粉含量显著增加,而 T1、T2 处理与 CK 相比差异不显著。各处理马铃薯块茎中纤维素含量在 0.56%~0.77%,其中

T5 处理马铃薯块茎中纤维素含量显著高于其他处理。与 CK 相比, T2~T5 处理马铃薯块茎中还原糖

含量和维生素 C 含量显著提升, 其中 T4、T5 处理马铃薯块茎中维生素 C 含量显著高于其他处理。

表 3 不同氮素形态及配比对马铃薯块茎品质的影响

Table 3 Effects of different nitrogen forms and ratios on the quality of potato tubers

处理	蛋白质含量 (%)	淀粉含量 (%)	纤维素含量 (%)	还原糖含量 (mg/g)	维生素 C 含量 (mg/g)
CK	1.83±0.14c	14.58±0.02c	0.56±0.01c	0.004 3±0.000 1c	0.154 3±0.000 5d
T1	2.23±0.07b	14.70±0.04bc	0.57±0.01c	0.004 4±0.000 1c	0.155 3±0.000 7d
T2	2.13±0.05b	14.84±0.06bc	0.66±0.02b	0.005 6±0.000 1b	0.157 0±0.000 5c
T3	2.03±0.04bc	15.08±0.03ab	0.69±0.02b	0.006 1±0.000 1a	0.159 4±0.000 6b
T4	2.85±0.06a	15.29±0.26a	0.68±0.01b	0.006 1±0.000 1a	0.161 8±0.000 3a
T5	2.89±0.03a	15.40±0.10a	0.77±0.01a	0.006 3±0.000 2a	0.163 2±0.000 1a

CK、T1~T5 见图 1 注。同列不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$), 数据为平均值±标准差。

2.6 马铃薯叶片生理特性、块茎产量及品质的相关性分析和聚类分析

图 5 可知, 马铃薯块茎产量与淀粉含量、维生素 C 含量、蒸腾速率、净光合速率、IAA 含量、 GA_3 含量、硝酸还原酶活性、谷氨酸脱氢酶活性、谷氨酸合成酶活性之间均为极显著正相关, 与纤维素含量、还原糖含量、谷氨酰胺合成酶活性之间显著正相关, 与 ABA 含量、胞间 CO_2 浓度呈显著负相关。其中, 马铃薯块茎产量与净光合速率和 IAA 含量的正相关系数最高 ($r = 0.60$), 与 ABA 含量负相关性最大 ($r = -2.07$)。由图 6 可以看出, 根据不同指标间的差异, 可将所有处理分为两大类, T4 处理和 T5 处理为一类, CK 和 T1、T2、T3 处理为另一大类, 表明 T4 处理和 T5 处理之间存在高度相似性, 并与其他处理有显著差异。综合各处理、各指标的变化与聚类热图分析结果可知, 本研究中 T5 处理效果最佳, 其次是 T4 处理。

3 讨论

氮素形态及配比可影响植物光合作用, 进而对植物的生物量产生调节作用^[25]; 因此, 氮素供应不足或过量都可能导致植物生物量下降, 并对其生长发育造成不利影响。硝态氮和铵态氮配施具有协同增效作用, 二者科学配施比施单一形态氮素对植物的光合作用更有利^[26]。李兰兰等^[27]的研究结果表明, 不同形态氮素处理可使油茶叶片 G_s 、 T_r 和 P_n 提高, C_i 降低, 当铵态氮与硝态氮混施时 P_n 、 G_s 和 T_r 显著高于施单一形态氮肥, 本研究结果支持其观点, 即施用不同形态氮素及配比对马铃薯叶片光合参数均

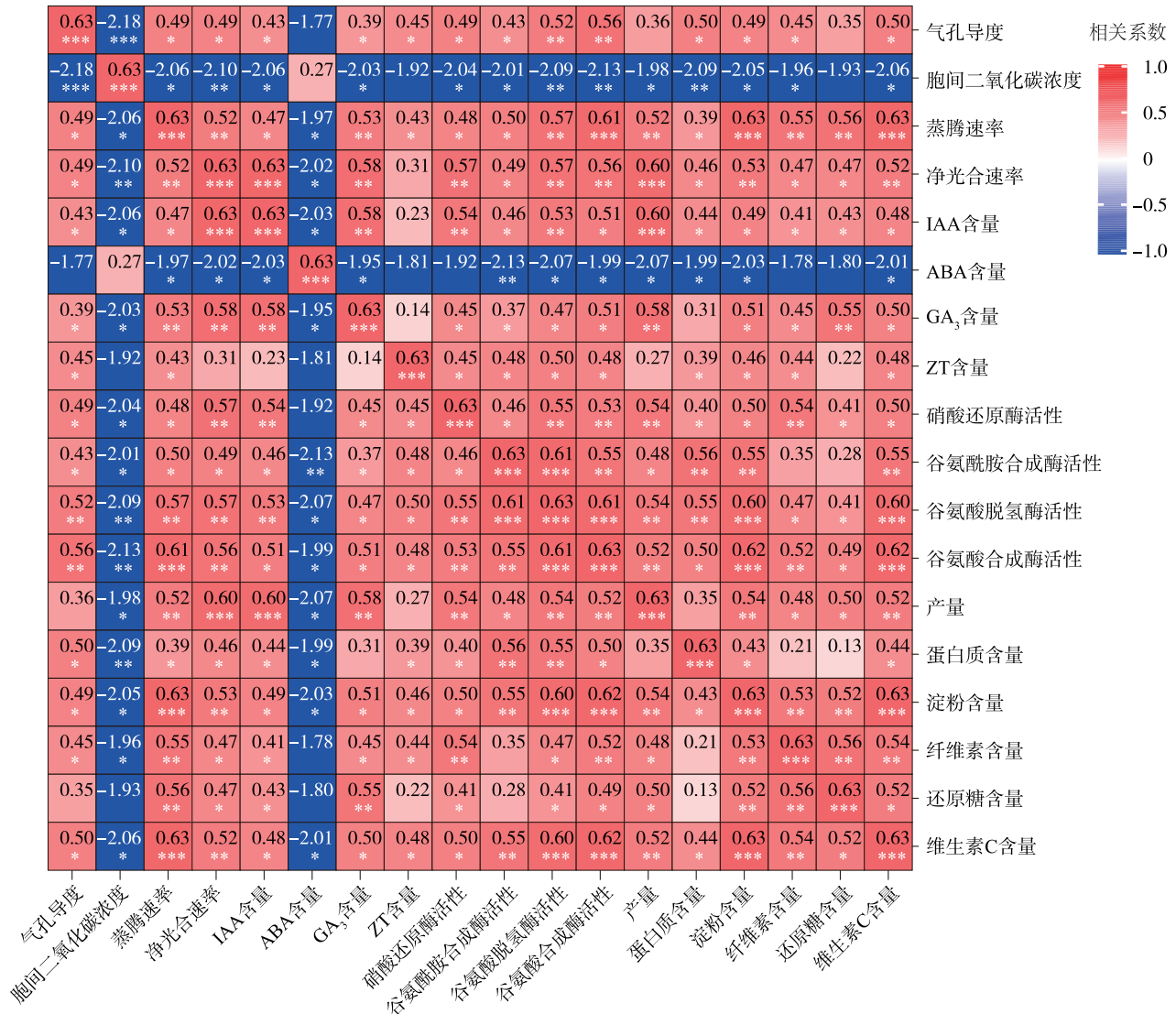
有影响, 硝态氮和铵态氮混施处理的叶片气孔导度、蒸腾速率显著高于 CK 和施单一形态氮肥处理。这些结果表明, 硝态氮和铵态氮配合施用可促进马铃薯叶片光合作用, 增加光合产物的累积, 从而增强光合效率。

植物激素是作物生长发育的关键调节因子^[28], 同时, 不同的氮素水平也会影响到植物内源激素的合成与代谢, 二者互作共同调节作物生长发育^[29]。本研究对马铃薯叶片激素含量进行分析, 结果表明不同氮素形态及配比可增加马铃薯叶片 IAA、ZT、 GA_3 含量, 降低 ABA 含量, 其中 T4、T5 处理对马铃薯叶片内源激素的影响较大, 硝态氮: 铵态氮为 75: 25 时 ZT 含量显著高于其他处理, 这与前人的研究结果基本一致, 王波等^[30]在生菜上研究发现, 当营养液中 NH_4^+ -N 比例为 25% 时, 生菜根系和叶片中的 IAA 含量最高, ABA 含量最低。另有研究结果表明 NH_4^+ 会先诱导植物 ABA 含量上升^[31]。

氮代谢是植物生长发育极为重要的生理过程, NR 、 GS 和 $GOGAT$ 作为氮代谢过程中的关键酶, 能够催化植物吸收氮素从而形成各种氨基酸与蛋白质^[32-33]。在花生^[34]、小麦^[35] 和辣椒^[36] 的研究中发现, 施用氮肥能够显著提高植株 NR 活性、 GS 活性和 $GOGAT$ 活性, 增加产量并改善品质。此外, 还有研究发现, 硝态氮和铵态氮混合能提高水稻叶片中 GS 活性^[37]。史婵等^[38] 对华北落叶松幼苗的研究结果证实, 硝态氮和铵态氮不同配比会影响其根、茎、叶中 NR 活性, 硝态氮所占比例增大会显著增强 NR 活性, 且单一硝态氮处理时会导致 NR 活性下降。 GDH 作为植物氮同化的另一个关键酶, 对铵态

氮的再合成具有重要的调控作用^[39]。有研究表明,施用适量的氮肥可以提高玉米叶片中 *GDH* 活性^[40]。本研究结果发现,与 CK 相比,施用

氮肥可提高马铃薯叶片中 *NR*、*GS*、*GDH* 和 *GOGAT* 的活性,且在硝态氮与铵态氮比例为 75 : 25 时 *NR*、*GDH* 和 *GOGAT* 酶活性显著高于其他处理。

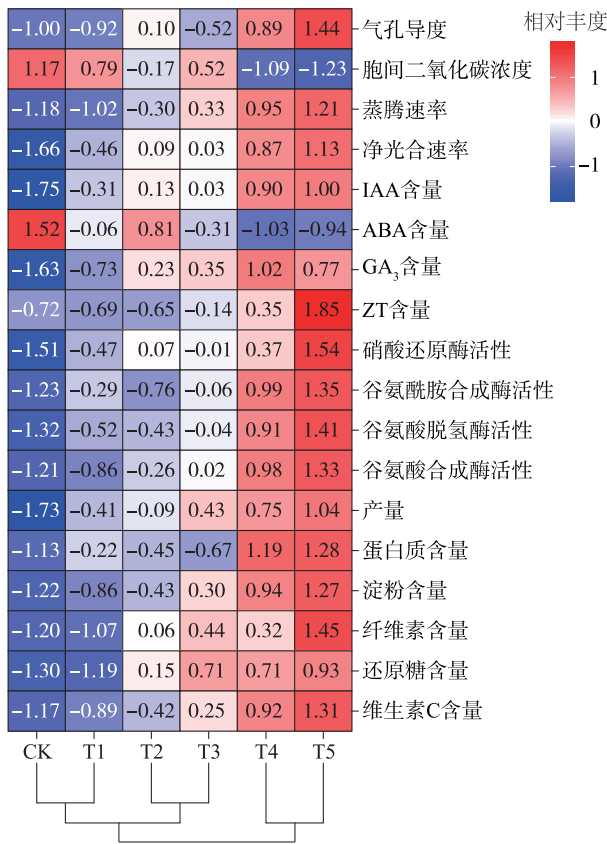


利用基迪奥云平台对数据进行无量纲化处理。红色越深,越接近 1,说明正相关性越大;蓝色越深,越接近-1,说明负相关性越大。图中数字表示各数值归一化后的相关系数,*表示显著相关($P < 0.050$),**表示极显著相关($P < 0.010$),***表示极显著相关($P < 0.001$)。

图 5 马铃薯叶片生理特性、块茎产量及品质的相关性分析结果
Fig.5 Correlation analysis of potato leaf physiological characteristics, tuber yield and quality

氮素是农作物生长所必需的一种养分,是影响农作物生长发育以及提高农作物产量和品质的主要因子^[41-48]。马铃薯块茎产量是反映马铃薯种植的必要性和农民增收的最直接、最基本的指标。马超等^[49]研究发现,当硝态氮和铵态氮比例为 75 : 25 时,对樱桃番茄的生长有明显的促进作用,而且樱桃番茄果实的产量和品质也有一定的提高,这与本研究结果一致,即在硝态氮与铵态氮比例为 75 : 25

时,马铃薯块茎产量、蛋白质含量、淀粉含量、还原糖含量等表现较好。刘赵帆等^[50]研究结果表明, NO_3^- -N 量 : NH_4^+ -N 量为 3 : 7 ~ 5 : 5 时比施单一形态氮肥处理更能提高花椰菜的品质、生物产量和经济效益。在甜瓜^[51]和辣椒^[52]上的研究也有相似结果。此外,李志恒等^[53]、代明等^[54]对马铃薯研究发现,铵态氮硝态氮混合配施可以促进薯块膨大,增加产量,提高大薯率和中薯率,这与本试验的结果一致。



利用基迪奥云平台对数据进行无量纲化。图中数字表示相对丰度。

图6 马铃薯叶片生理特性、块茎产量及品质的聚类分析

Fig.6 Cluster analysis of potato leaf physiological characteristics, tuber yield and quality

4 结论

不同的氮素形态及配比不仅可以提高马铃薯叶片中NR、GS、GDH和GOGAT活性,改善植株氮代谢,提升马铃薯叶片的光合效率,还可以使马铃薯叶片中IAA、GA₃、ZT含量升高,ABA含量降低,显著提高马铃薯块茎产量,影响块茎蛋白质含量、淀粉含量、还原糖含量、纤维素含量以及维生素C含量。总体来看,硝态氮与铵态氮比例为75:25处理(T5)效果最佳,T5处理中各肥料用量分别为硝酸钙923 kg/hm²、硫酸铵248 kg/hm²、过磷酸钙375 kg/hm²、硫酸钾525 kg/hm²,可作为马铃薯高产、优质栽培的施肥参考。

参考文献:

[1] 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.

[2] KIM J, SOH S Y, BAE H, et al. Antioxidant and phenolic contents in potatoes (*Solanum tuberosum* L.) and micropropagated potatoes[J]. Applied Biological Chemistry, 2019, 62(1): 17.

[3] ZHANG W N, CHEN Z J, KANG Y C, et al. Genome-wide analysis of lectin receptor-like kinases family from potato (*Solanum tuberosum* L.) [J]. Peer J, 2020, 8: 9310.

[4] 刘文平, 梁烜赫, 张春宵, 等. 植物氮素利用途径中硝酸盐转运基因的研究进展[J]. 中国土壤与肥料, 2022(7): 238-246.

[5] ONDOUA R N, WALSH O. Varietal differences in nitrogen use efficiency among spring wheat varieties in Montana [J]. Crops & Soils, 2017, 50(5): 40-42.

[6] 吴有勤. 氮素形态对樟树幼苗生长及光合生理特性的影响[J]. 陕西林业科技, 2024, 52(2): 21-25.

[7] 邢 瑶. 氮素形态对烟苗生长及其生理生化特性的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016.

[8] 杨兵丽, 张国斌, 周箬涵, 等. 不同形态氮素配施对娃娃菜光合和叶绿素荧光特性的影响[J]. 浙江农业学报, 2015, 27(5): 761-768.

[9] 马晓华, 胡青荻, 章彦君, 等. 氮素形态对铁线莲光合特性及氮代谢的影响[J]. 热带亚热带植物学报, 2021, 29(3): 276-284.

[10] 叶义全, 罗红艳, 李 茂, 等. 氮素形态对杉木幼苗侧根生长和叶片光合特性的影响[J]. 西北植物学报, 2018, 38(11): 2036-2044.

[11] 王庆美, 张立明, 王振林. 甘薯内源激素变化与块根形成膨大的关系[J]. 中国农业科学, 2005, 38(12): 2414-2420.

[12] 贺雅娟, 卢慧慧, 郭艳兰, 等. 施氮量对葡萄叶片生理生化指标及果实品质的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2021, 56(6): 56-63, 72.

[13] ZHANG J, LV J, DAWUDA M M, et al. Appropriate ammonium-nitrate ratio improves nutrient accumulation and fruit quality in pepper (*Capsicum annuum* L.) [J]. Agronomy, 2019, 9(11): 683.

[14] 李成阳, 柴沙沙, 刘 意, 等. 不同氮素形态配比对甘薯块根形成及光合产物运输分配的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2022(7): 29-40.

[15] 李成阳, 柴沙沙, 刘 意, 等. 不同氮素形态配比对甘薯前期氮代谢的影响及其生理机制[J]. 植物科学学报, 2021, 39(4): 433-445.

[16] 李成阳, 柴沙沙, 刘 意, 等. 不同氮素形态配比对菜用甘薯产量和品质的影响(英文)[J]. 热带作物学报, 2022, 43(7): 1450-1458.

[17] 张 伟, 高世铭, 王亚宏, 等. 不同形态氮素对马铃薯氮素分布、光合参数及产量的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2009, 44(6): 39-43.

[18] 贾明飞, 樊建英, 封志明, 等. 氮素不同形态对早熟马铃薯产量和氮素积累的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2024(2): 146-151.

[19] DAVIS J M, LOESCHER W H, HAMMOND M W, et al. Response of potatoes to nitrogen form and to change in nitrogen form at tuber initiation[J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 1986, 111(1): 70-72.

- [20] 周箬涵,郁继华,杨兵丽,等. 不同氮素形态及配比对娃娃菜产量、品质及其养分吸收的影响[J]. 华北农学报,2015,30(3):216-222.
- [21] 蔡东升,杨文洁,段伊佩,等. 不同氮素形态及配比对番茄幼苗生长和生理特性的影响[J]. 江苏农业科学,2023,51(16):113-118.
- [22] 张圣炜,易克,杨中义,等. 烤烟氮肥形态配比研究[J]. 安徽农业科学,2013,41(2):572-574.
- [23] 王智明. 不同碱化土壤改良措施对油葵生理生态的影响研究[D]. 银川:宁夏大学,2015.
- [24] 周春涛,张茹艳,石铭福,等. 铁肥形态对马铃薯块茎内源激素、产量及品质的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2022,50(4):42-49.
- [25] 高研,彭绿春,李世峰,等. 不同铵硝比对高山杜鹃侧枝生长和生理特性影响[J]. 核农学报,2024,38(4):785-793.
- [26] 戴廷波,曹卫星,孙传范,等. 增铵营养对小麦光合作用及硝酸还原酶和谷氨酰胺合成酶的影响[J]. 应用生态学报,2003,14(9):1529-1532.
- [27] 李兰兰,颜妙珍,冯名开,等. 不同氮形态叶面肥对油茶春梢叶片光合生理特性的影响[J]. 南方农业学报,2022,53(11):3165-3173.
- [28] KIBA T, KUDO T, KOJIMA M, et al. Hormonal control of nitrogen acquisition: roles of auxin, abscisic acid, and cytokinin [J]. Journal of Experimental Botany, 2011, 62(4): 1399-1409.
- [29] WALCH-LIU P, NEUMANN G, BANGERTH F, et al. Rapid effects of nitrogen form on leaf morphogenesis in tobacco [J]. Journal of Experimental Botany, 2000, 51(343): 227-237.
- [30] 王波,耿士均,刘刊,等. 不同铵硝配比营养液对生菜内源激素的影响[J]. 湖北农业科学,2012,51(19):4293-4298.
- [31] RAHAYU Y S, WALCH-LIU P, NEUMANN G, et al. Root-derived cytokinins as long-distance signals for NO₃-induced stimulation of leaf growth [J]. Journal of Experimental Botany, 2005, 56(414): 1143-1152.
- [32] 杜永成,王玉波,范文婷,等. 不同氮素水平对甜菜硝酸还原酶和亚硝酸还原酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2012,18(3):717-723.
- [33] 王琰,陈志雄,姜大刚,等. 增强叶片氮素输出对水稻分蘖和碳代谢的影响[J]. 作物学报,2022,48(3):739-746.
- [34] 张智猛,万书波,宁堂原,等. 氮素水平对花生氮素代谢及相关酶活性的影响[J]. 植物生态学报,2008,32(6):1407-1416.
- [35] 王小纯,程振云,何建国,等. 不同氮素形态对专用小麦苗期氮同化关键酶活性的影响[J]. 麦类作物学报,2008,28(5):836-840.
- [36] 徐金崇,陈修斌,吕剑,等. 水氮调控对寒旱区温室辣椒氮代谢酶活性及产量品质的影响[J]. 北方园艺,2024(22):31-37.
- [37] 徐国伟,江孟孟,陆大克,等. 干湿交替灌溉与氮肥形态耦合对水稻光合特性及氮素利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2020,26(7):1239-1250.
- [38] 史婵,杨秀清,闫海冰. 硝、铵态氮不同配比对华北落叶松幼苗生长和硝酸还原酶活性的调控效应[J]. 山西农业大学学报(自然科学版),2016,36(11):809-814.
- [39] 夏光利,董浩,宋绪鹏,等. 授高油玉米花粉对普通玉米籽粒蛋白质积累及氮代谢相关酶活性的影响[J]. 中国农业大学学报,2016,21(7):13-20.
- [40] 吴雅薇,李强,豆攀,等. 氮肥对不同耐低氮性玉米品种生育后期叶绿素含量和氮代谢酶活性的影响[J]. 草业学报,2017,26(10):188-197.
- [41] 武松伟,梁珊珊,谭启玲,等. 柑橘营养特性与“以果定肥”[J]. 华中农业大学学报,2021,40(1):12-21.
- [42] 武阳春,高婷婷,侯宗运,等. 玉米自交系在苗期耐低氮能力的鉴定与筛选[J]. 江苏农业科学,2024,52(22):62-68.
- [43] 张勇,管菊,赵庆勇,等. 优质稻粳南梗 5818 氮高效机制初探[J]. 江苏农业学报,2024,40(9):1586-1593.
- [44] 张疏影,张金珠,王振华,等. 不同水氮配施对北疆膜下滴灌棉花生长发育的影响[J]. 排灌机械工程学报,2024,42(6):641-648.
- [45] 孙扬名,张明亮,葛敏,等. 玉米 *ZmZIM* 家族基因鉴定及其对氮素的响应特征[J]. 江苏农业学报,2024,40(4):577-590.
- [46] 张哲,杨润亚,朱瑾瑾,等. 地下氧灌对土壤氮素分布及番茄水氮利用效率的影响[J]. 排灌机械工程学报,2023,41(9):952-958,965.
- [47] 王倩,脱云飞,王飞,等. 微喷灌施肥对三七土壤氮素运转转化试验研究[J]. 排灌机械工程学报,2023,41(2):187-194.
- [48] 唐俊杰,陈海元,张所兵,等. 水稻氮素利用相关基因遗传研究进展[J]. 江苏农业学报,2024,40(3):570-576.
- [49] 马超,李雪,马瑞杰,等. 铵硝比对樱桃番茄生长发育、产量、品质及氮素吸收的影响[J]. 中国瓜菜,2024,37(3):121-127.
- [50] 刘赵帆,张国斌,郁继华,等. 氮肥形态及配比对花椰菜产量、品质和养分吸收的影响[J]. 应用生态学报,2013,24(7):1923-1930.
- [51] 康利允,李晓慧,高宁宁,等. 不同铵硝比对甜瓜叶片生理特性及产量、品质的影响[J]. 果树学报,2021,38(5):760-770.
- [52] 袁嫚嫚,邬刚,王家宝,等. 不同铵硝比对辣椒产量、养分积累和氮肥利用率的影响[J]. 中国瓜菜,2022,35(2):43-48.
- [53] 李志恒,皇甫丽云,许世豪,等. 不同氮素形态比对马铃薯氮素利用与产量的影响[J]. 现代园艺,2023(3):1-2,5.
- [54] 代明,侯文通,陈日远,等. 硝基复合肥对马铃薯生长发育、产量及品质的影响[J]. 中国土壤与肥料,2014(3):84-87,97.

(责任编辑:黄克玲)