

叶面施锌对马铃薯产量和锌含量的影响

范奕^{1,2}, 李亚杰^{1,2}, 罗磊^{1,2}, 姚彦红^{1,2}, 李丰先^{1,2}, 董爱云^{1,2},
刘慧霞^{1,2}, 牛彩萍^{1,2}, 李德明^{1,2*}

(1. 定西市农业科学研究所, 甘肃 定西 743000;
2. 甘肃省马铃薯产业技术创新中心, 甘肃 定西 743000)

摘要: 在缺锌土壤中施用锌肥不仅可提高马铃薯产量, 而且能显著提高马铃薯块茎锌含量, 研究旨在揭示不同熟性马铃薯叶面施用锌肥的不同施肥量、施肥时期及施肥种类在提高马铃薯产量和块茎锌含量方面的差异。以马铃薯品种费乌瑞它、大西洋、定薯4号为供试材料, 于2020年4月至2021年10月在大田条件下设置3组试验: 试验1为不同类型锌肥喷施试验, 设不施锌肥为对照(G0)、喷施硫酸锌水溶液(G1)、喷施硫酸锌+尿素水溶液(G2)和喷施安米达·糖醇锌水溶液(G3)4个处理; 试验2为不同锌肥喷施量试验, 设喷施浓度为0.00%(F0)、0.02%(F1)、0.03%(F2)、0.04%(F3)、0.05%(F4)和0.06%(F5)6个处理; 试验3为不同时期喷施锌肥试验, 设全生育期不喷施锌肥为对照(L0)、苗期喷施(L1)、现蕾期喷施(L2)、块茎形成期喷施(L3)和块茎膨大期喷施(L4)5个处理。结果表明, 叶面喷施适量硫酸锌, 马铃薯产量、块茎锌含量和叶片SPAD值均有所提高。早熟品种费乌瑞它与中熟品种大西洋, 喷施锌肥浓度为0.30%时, 块茎锌含量较未喷施分别显著增加37.25%和32.26%; 晚熟品种定薯4号锌肥浓度为0.50%时块茎锌含量显著增加31.75%。不同品种马铃薯喷施关键时期均在块茎形成期和膨大期, 块茎锌含量较未喷施平均显著增加46.26%。叶面喷施硫酸锌和尿素水溶液增产增效显著, 块茎锌含量显著增加42.11%, 产量显著增加12.86%。综上所述, 结合叶面施锌增加马铃薯产量和块茎锌含量的田间应用效果分析, 在早、中熟品种马铃薯上采用0.30%硫酸锌水溶液, 晚熟品种上采用0.50%硫酸锌水溶液, 因地制宜采用叶面喷施硫酸锌水溶液配施0.05%尿素, 在马铃薯块茎形成期和块茎膨大期两个关键时期进行喷施, 可协同实现最佳肥料利用效率、最大程度的稳产增产和提高马铃薯的锌营养含量。

关键词: 马铃薯; 叶面施锌; 锌肥种类; 产量; 锌含量; 喷施时期

马铃薯 (*Solanum tuberosum* L.) 是继水稻、小麦和玉米之后的第四大粮食作物^[1], 同时也是甘肃省三大粮食作物之一, 作为甘肃助力乡村振兴“六大特色农业产业”之一, 马铃薯在粮食生产和农村经济发展中占据重要地位^[2-3]。锌是人体必需的微量元素之一, 中国学龄前儿童的锌营养元素平均需要量和推荐摄入量值分别为4.6和5.5 mg/d^[4]。锌缺乏可引起味觉障碍、生长发育不良、皮肤损害和免疫功能损伤等^[5]。根据联合国世界粮食计划署

和国际食物政策研究所基线调研显示, 2019年甘肃省农村部分地区儿童缺锌率为20.22%^[6], 远高于全国平均水平10.40% (2012年), 儿童缺锌现象严重。马铃薯作为甘肃主食之一, 通过食用富含锌营养元素的马铃薯可成为改善当地儿童缺锌的有效手段。富锌马铃薯主要通过两方面来获得, 一是选育锌营养元素高的马铃薯品种, 二是通过农艺栽培措施提升块茎锌含量。但目前已选育的马铃薯品种不能完全满足人们的需求, 且利用传统育种技术改良马铃薯品种需要耗费10~15年^[7]。因此, 强化农艺措施是提高马铃薯块茎锌含量高效、便捷的方式。

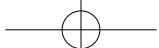
马铃薯块茎主要通过叶片吸收锌营养元素。相关研究表明, 发育中的马铃薯块茎可直接通过木质部途径获取水分和部分金属离子, 但块茎中的锌主要依赖于地上部器官通过韧皮部运输途径进行重新分配^[8-9]。Kromann等^[10]在马铃薯上进行叶面施

收稿日期: 2022-09-15; 录用日期: 2022-10-30

基金项目: 联合国世界粮食计划署甘肃省富锌马铃薯小农户试点项目(WFPGSP-1); 财政部和农业农村部国家现代马铃薯农业产业技术体系(CARS-09); 甘肃省寒旱农业项目抗病优质高效系列专用马铃薯品种创新与示范推广(GNKJ-1); 定西市科技计划项目(DX2022BZ38)。

作者简介: 范奕 (1994-), 助理研究员, 硕士, 从事马铃薯病虫害防治等研究。E-mail: fanly15101788930@163.com。

通讯作者: 李德明, E-mail: dxlideming@163.com。



锌和土壤施锌两种方式,发现块茎锌含量较不施锌处理分别提高了 2.5 和 1.9 倍,采用叶面施锌时锌的转运效率相对较高。杜平^[11]也发现叶面施锌的锌肥利用效率明显高于土壤施锌,且叶面施锌使块茎锌含量提升幅度更大,其中叶面施锌的锌肥利用率为土壤施锌的 9.7~21.6 倍,块茎锌含量提高指数比土壤施锌增加 0.6~1.6 倍。但锌肥在不同熟性马铃薯上的最佳喷施量有待确认,同时市场上有多种类型锌肥,由于其理化性质差异较大,不同用量在马铃薯生产过程中的实施效果尚不明确。因此,本研究通过叶面喷施锌肥,对马铃薯产量、叶片 SPAD 值、成熟期块茎锌累积量等指标进行比较分析,以期确定最佳锌肥种类、喷施用量以及喷施关键时期,为我国西北地区推荐马铃薯高产高效的叶面锌肥施用技术,为生产上进行降本增效提供技术依据和理论支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于定西市农业科学研究院科研创新基地(104° 35' E, 35° 33' N)进行。该区海拔 1920 m,属高原丘陵沟壑地貌。年平均气温 7.2℃,无霜期 140 d,年均降水量 380 mm,平均蒸发量 1526 mm,是典型的干旱半干旱气候类型。试验区土壤为典型的黄绵土,试验地 0~20 cm 土层基础理化性状为: pH 8.19,有机质含量 13.6 g/kg,碱解氮含量 87.5 mg/kg,有效磷含量 47.8 mg/kg,速效钾含量 264 mg/kg,有效锌含量 3.07 mg/kg,有效铁含量 13.8 mg/kg,全盐含量 0.074%。

1.2 供试材料

参试品种:供试马铃薯品种为早熟品种费乌瑞它、中熟品种大西洋和晚熟品种定薯 4 号。种薯级别为原原种,由定西市农业科学院马铃薯研究所提供。供试肥料:硫酸锌(宁夏蒂树农业科技有限公司,硫酸锌含量≥95%,Zn≥34.5%);安米达·糖醇锌(潍坊泰达农化有限公司,Zn≥170 g/L);尿素(山东祥茂环保科技有限公司,总氮含量≥46.4%);马铃薯专用复合肥(史丹利农业集团股份有限公司,N-P₂O₅-K₂O=15-15-15,总养分≥45%)。

1.3 试验设计

试验 1:不同类型锌肥喷施试验时间为 2020 年 4—10 月。试验共设 4 个处理:喷施清水(G0);喷施硫酸锌水溶液(G1);喷施硫酸锌+0.05% 尿素

水溶液(G2);喷施安米达·糖醇锌水溶液(G3)。3 次重复,采用随机区组排列。参试品种为定薯 4 号。叶面施肥方法和用量:全生育期喷施锌肥 3 次,喷施浓度均为 0.30% (Zn 0.55 kg/hm²),每次喷施量为 450 L/hm²。

试验 2:不同锌肥喷施用量试验时间为 2021 年 4—10 月。试验采用裂区设计,主区为马铃薯品种(D),设置 3 个水平,即 D1:费乌瑞它,D2:大西洋,D3:定薯 4 号。副区为硫酸锌喷施用量(F),设置 6 个水平,即 F0:0.00% (Zn 0 kg/hm²),F1:0.20% (Zn 0.36 kg/hm²),F2:0.30% (Zn 0.55 kg/hm²),F3:0.40% (Zn 0.73 kg/hm²),F4:0.50% (Zn 0.91 kg/hm²),F5:0.60% (Zn 1.09 kg/hm²),每次喷施量为 450 L/hm²。在马铃薯现蕾期、块茎形成期、块茎膨大期和淀粉积累期各喷施 1 次,共 4 次,喷施日期详情见表 1。

表 1 不同品种马铃薯叶面喷施锌肥日期(月-日)

品种	生育期			
	现蕾期	块茎形成期	块茎膨大期	淀粉积累期
D1(费乌瑞它)	05-31	06-16	07-01	07-15
D2(大西洋)	05-31	06-18	07-08	07-26
D3(定薯 4 号)	06-10	07-01	07-22	08-12

试验 3:不同时期喷施硫酸锌试验时间为 2021 年 4—10 月。试验采用裂区设计,主区同试验 2,副区为喷施锌肥不同生育期(L),设置 5 个水平,即 L0:全生育期不喷施,L1:苗期喷施,L2:现蕾期喷施;L3:块茎形成期喷施;L4:块茎膨大期喷施。喷施锌肥浓度为 0.30% (Zn 0.55 kg/hm²),每次喷施量为 450 L/hm²。各处理共喷施 3 次,每次间隔 7 d。

上述 3 组试验中,所有处理小区长 8.0 m、宽 5.0 m,小区面积 40 m²。均采用普通黑色地膜高垄覆盖栽培,覆膜方式全部为播前覆膜,马铃薯专用复合肥作基肥施用,用量 750 kg/hm²。

1.4 测定项目与方法

1.4.1 叶片和薯块锌含量测定

选取马铃薯植株顶部完全展开的倒数第 4 片复叶(从植株顶部第 1 片真叶往下数第 4 片叶)和大小一致的块茎去离子水冲洗干净,于 105℃下杀青 30 min,降温至 65℃烘干至恒重,将烘干样品粉碎后用于测定锌含量,测定采用火焰原子吸收光谱



法^[12]，测定仪器为原子吸收光谱仪（Thermo iCE-3500）。

1.4.2 产量测定

试验收获前，每个小区随机选取 20 株马铃薯计算结薯鲜重，并统计大薯重量。按小区单独收获计鲜重，单位面积鲜薯产量（ kg/hm^2 ）= 小区鲜薯产量（ kg ）/ 小区面积（ m^2 ） $\times 10000$ 。

1.4.3 SPAD 值测定

在叶面喷施锌肥后 3 d 进行测定。采用 SPAD-502Plus 型手持便携式叶绿素测定仪（日本 Minolta 公司）。选取长势均一单株，测定部位为植株顶端完全展开成熟的第 3 ~ 4 片叶。

1.4.4 锌利用效率计算

植物锌总积累量（ g/hm^2 ）= 地上部（茎和叶）锌积累量（ g/hm^2 ）+ 地下部（根和块茎）锌积累量（ g/hm^2 ）；

总锌利用率（%）= [施锌区植株锌总积累量（ g/hm^2 ）- 不施锌区植株锌总积累量（ g/hm^2 ）] / 施锌用量（ g/hm^2 ） $\times 100$ ；

1.4.5 经济效益计算

总收入（元 / hm^2 ）= 块茎产量 $\times$ 市场价格；

产量纯收益（元 / hm^2 ）= 总收入 - 总投入；

产投比 = 总收入 / 总投入。式中，总投入包括肥料、种子、农药、地膜、人工和机械作业投入。

1.5 数据处理及分析

采用 Excel 2007 对数据进行处理，用 Graphpad prism 统计分析软件对数据进行分析作图，采用 Duncan's 新复极差法进行差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 不同类型锌肥喷施试验

2.1.1 不同锌肥类型对马铃薯块茎锌含量的影响

根据表 2 可知，在常规施肥的基础上，未进行锌肥施用马铃薯定薯 4 号块茎锌含量为 1.90 mg/kg ，施用不同锌肥之后块茎锌含量均显著增加，增加幅度为 33.33%~42.11%。其中，叶面喷施

硫酸锌 + 尿素水溶液（G2）块茎锌含量达到最高，为 2.70 mg/kg ，较 G0 处理显著增加 42.11%，与除 G3 处理外其他处理相比达到显著水平；喷施安米达·糖醇锌水溶液（G3）和硫酸锌水溶液（G1），块茎锌含量较 G0 分别显著增加 36.84% 和 33.33%，但两者间差异不显著。

表 2 不同锌肥类型对马铃薯块茎锌含量的影响

处理	块茎锌含量（ mg/kg ）	较对照增加（%）
G0	1.90 $\pm$ 0.00 c	—
G1	2.53 $\pm$ 0.06 b	33.33
G2	2.70 $\pm$ 0.10 a	42.11
G3	2.60 $\pm$ 0.00 ab	36.84

注：不同字母表示处理间差异显著（ $P < 0.05$ ）。下同。

2.1.2 不同锌肥类型对马铃薯产量、效益和产投比的影响

根据表 3 中数据可知，叶面喷施硫酸锌和尿素混合溶液处理（G2）下，马铃薯产量和经济效益达到最高值，分别为 56361.50 kg/hm^2 和 43113.27 元 / hm^2 ，且较清水喷施（G0）分别显著增加 12.86% 和 31.57%；商品薯率和产投比也达到最高，分别为 97.02% 和 3.43，但与清水喷施（G0）相比，未出现显著差异。

2.2 不同锌肥喷施量试验

2.2.1 不同锌肥喷施量对马铃薯块茎锌含量的影响

根据表 4 可知，喷施不同锌肥之后马铃薯费乌瑞它、大西洋和定薯 4 号块茎内的锌含量相比对照（F0）处理均有不同幅度的增加，增加幅度在 3.92%~37.25% 之间。

在费乌瑞它和大西洋中，叶面喷施 0.30% 浓度（F2）的锌肥后，块茎内锌含量达到最高值 4.67 和 4.10 mg/kg ，相比对照（F0）处理分别增加 37.25% 与 32.26%，差异达到显著水平。随着锌肥喷施浓度的增加，当浓度 $> 0.30\%$ 时，块茎内的锌含量反而出现下降趋势，当锌肥浓度达到 0.60% 时，块茎锌含量出现上升，达到 4.43 mg/kg ，与对照

表 3 锌肥类型对马铃薯产量、效益和产投比的影响

处理	产量（ kg/hm^2 ）	较对照增加（%）	商品薯率（%）	效益（元 / hm^2 ）	产投比
G0	45064.19 $\pm$ 2858.26 b	—	96.43 $\pm$ 0.21 a	32769.32 $\pm$ 3086.92 b	3.06 $\pm$ 0.19 a
G1	48649.31 $\pm$ 6972.16 ab	7.96	94.17 $\pm$ 2.02 a	34760.26 $\pm$ 7529.94 ab	2.95 $\pm$ 0.42 a
G2	56361.50 $\pm$ 3448.49 a	12.86	97.02 $\pm$ 2.98 a	43113.27 $\pm$ 7510.94 a	3.43 $\pm$ 0.42 a
G3	48857.75 $\pm$ 3247.61 ab	8.42	93.15 $\pm$ 4.94 a	34991.37 $\pm$ 3507.42 ab	2.97 $\pm$ 0.20 a



表 4 不同锌肥喷施量下马铃薯块茎锌含量

品种	施肥水平	块茎锌含量 (mg/kg)	较对照增加 (%)
D1 (费乌瑞它)	F0	3.40 ± 0.00 e	—
	F1	3.53 ± 0.06 e	3.92
	F2	4.67 ± 0.12 a	37.25
	F3	4.13 ± 0.06 c	21.57
	F4	3.97 ± 0.12 d	16.67
	F5	4.43 ± 0.06 b	30.39
D2 (大西洋)	F0	3.07 ± 0.06 e	—
	F1	3.43 ± 0.12 d	10.75
	F2	4.10 ± 0.00 a	32.26
	F3	3.67 ± 0.06 c	18.28
	F4	4.10 ± 0.10 a	32.26
	F5	3.93 ± 0.06 b	26.88
D3 (定薯 4 号)	F0	2.13 ± 0.06 d	—
	F1	2.33 ± 0.06 c	11.11
	F2	2.50 ± 0.10 b	19.05
	F3	2.33 ± 0.06 c	11.11
	F4	2.77 ± 0.06 a	31.75
	F5	2.57 ± 0.06 b	22.22
品种 (D)		**	
施肥水平 (F)		**	
品种 × 施肥水平 (D × F)		**	

注：* 和 ** 分别表示 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 的显著水平。下同。

处理差异达到显著水平。在中熟品种大西洋中，除 F3 处理外，不同处理下的块茎锌含量相比对照处理差异达到显著水平。块茎内的锌含量随着浓度的变化出现不同波动，喷施浓度为 0.30% 与 0.50% 时，块茎锌含量达到最高值，为 4.10 mg/kg。在晚熟品种定薯 4 号中，喷施不同浓度锌肥之后的块茎锌含量较对照处理能够显著提升块茎锌含量。当喷施锌肥浓度为 0.30% (F2) 时，块茎内的锌含量相比对照处理增加 19.05%，与对照处理差异显著，随着喷施浓度的增加，块茎内的锌含量出现下降 - 上升 - 下降变化趋势，喷施浓度为 0.50% 时，块茎内的锌含量达到最高值 2.77 mg/kg，相比对照处理显著增加 31.75%。

2.2.2 不同锌肥喷施量对马铃薯植株叶片 SPAD 值的影响

由表 5 可知，叶片 SPAD 值随着生育期呈现先升高后降低的趋势。随着叶面喷施锌肥浓度的增加，马铃薯品种费乌瑞它、大西洋和定薯 4 号叶片叶绿素相对含量 SPAD 值呈现出先升高后降低的变化规律。与喷施清水处理 (F0) 相比较，喷施锌肥浓度为 0.30% (F2) 和 0.40% (F3) 处理在马铃薯生育期内显著提高了叶片 SPAD 值。

喷施锌肥浓度为 0.30% (F2) 时，费乌瑞它现蕾期、块茎膨大期和淀粉积累期叶片 SPAD 值达到最大，较喷施清水处理 (F0) 在同一生育期分别显著增加 21.07%、17.79% 和 25.79%；大西洋现蕾期和淀粉积累期 SPAD 值较 F0 在相同生育期分别显著增加 29.16% 和 13.86%；定薯 4 号淀粉积累期 SPAD 值较 F0 显著增加 15.84%。喷施锌肥浓度为 0.40% (F3) 时，费乌瑞它块茎形成期叶片 SPAD 值达到最大，较喷施清水处理 (F0) 显著增加 14.15%；大西洋块茎形成期和块茎膨大期 SPAD 值较 F0 在同一生育期分别显著增加 18.81% 和 19.11%；定薯 4 号现蕾期、块茎形成期和块茎膨大期 SPAD 值较 F0 在相同生育期分别显著增加 18.30%、12.24% 和 19.57%。

2.2.3 不同锌肥喷施量对马铃薯产量及商品薯率的影响

根据表 6 中的 3 个马铃薯品种产量数据可知，采用叶面喷施锌肥方式下的马铃薯产量相比对照 (F0) 处理均有不同幅度的增加，马铃薯品种费乌瑞它、大西洋和定薯 4 号的增幅分别在 6.54%~18.68%、11.88%~33.25% 和 1.66%~19.00% 之间。

在费乌瑞它中，随着喷施浓度的增加，马铃薯产量出现先增加再减少的趋势，当叶面喷施浓度为 0.30% (F2) 时，马铃薯产量达最高值为 42462.42 kg/hm²，相比对照处理 (F0) 显著增产 18.68%；在大西洋中，同样出现随着喷施浓度的增加产量先增加后减少的趋势，当叶面喷施浓度达到 0.40% (F3) 时，马铃薯产量最高为 35329.80 kg/hm²，相比对照处理显著增产 33.25%；在定薯 4 号中，随着喷施浓度的增加，产量增幅呈现出增加 - 减少 - 增加的趋势，叶面喷施浓度为 0.30% (F2) 时，马铃薯产量为 59744.03 kg/hm²，相比对照处理增产 19.00%。



表 5 不同锌肥喷施量下马铃薯植株叶片 SPAD 值

品种	处理	生育期			
		现蕾期	块茎形成期	块茎膨大期	淀粉积累期
D1 (费乌瑞它)	F0	30.75 ± 0.77 b	42.20 ± 1.39 b	38.57 ± 1.89 b	29.47 ± 0.93 c
	F1	35.20 ± 2.46 ab	42.97 ± 1.46 ab	41.87 ± 1.35 ab	35.33 ± 1.70 ab
	F2	37.23 ± 1.52 a	45.33 ± 5.54 a	45.43 ± 2.10 a	37.07 ± 1.87 a
	F3	36.27 ± 2.44 a	48.17 ± 0.47 a	43.80 ± 2.88 a	34.20 ± 1.59 ab
	F4	34.93 ± 3.50 ab	45.33 ± 4.05 ab	41.50 ± 2.59 ab	33.60 ± 3.30 b
D2 (大西洋)	F5	33.70 ± 2.02 ab	43.47 ± 1.12 ab	41.87 ± 2.97 ab	32.20 ± 1.80 bc
	F0	27.33 ± 2.96 c	31.90 ± 1.56 c	34.53 ± 1.76 b	29.80 ± 3.82 b
	F1	31.33 ± 0.74 b	34.47 ± 1.32 bc	37.00 ± 2.14 ab	31.57 ± 2.56 ab
	F2	35.30 ± 0.70 a	37.13 ± 2.40 ab	40.07 ± 2.44 a	33.93 ± 1.60 a
	F3	33.43 ± 2.64 ab	37.90 ± 1.99 a	41.13 ± 1.36 a	32.30 ± 1.73 ab
D3 (定薯 4 号)	F4	30.93 ± 1.15 b	35.80 ± 2.00 ab	37.00 ± 2.46 ab	30.83 ± 1.63 b
	F5	32.50 ± 1.10 ab	33.87 ± 1.18 bc	35.83 ± 1.55 ab	31.53 ± 1.67 ab
	F0	37.93 ± 1.19 c	44.10 ± 1.27 b	40.62 ± 1.05 b	36.37 ± 2.15 c
	F1	40.80 ± 2.74 bc	46.70 ± 2.27 ab	46.93 ± 2.55 a	39.47 ± 0.96 bc
	F2	43.60 ± 0.90 ab	47.80 ± 1.85 ab	43.13 ± 0.64 ab	45.10 ± 2.86 a
品种 (D)	F3	44.87 ± 1.70 a	49.50 ± 0.49 a	48.57 ± 0.75 a	42.13 ± 1.95 ab
	F4	41.57 ± 2.25 abc	48.13 ± 0.39 ab	42.45 ± 0.58 ab	41.47 ± 2.28 ab
	F5	40.13 ± 3.07 bc	46.03 ± 2.50 ab	45.53 ± 7.16 ab	37.73 ± 2.32 bc
施肥水平 (F)		**	**	**	**
品种 × 施肥水平 (D × F)		NS	NS	NS	NS

注：NS 表示差异不显著。下同。

表 6 不同锌肥喷施量下马铃薯产量变化

品种	处理	产量 (kg/hm ²)	较对照增加 (%)	商品薯率 (%)
D1 (费乌瑞它)	F0	35779.76 ± 1126.37 b	—	74.18 ± 2.15 b
	F1	40954.24 ± 1459.38 ab	14.46	78.47 ± 3.98 ab
	F2	42462.42 ± 1175.24 a	18.68	77.80 ± 4.18 ab
	F3	40245.98 ± 2394.42 ab	12.48	81.75 ± 5.30 a
	F4	40370.96 ± 2189.96 ab	12.83	79.77 ± 3.75 ab
D2 (大西洋)	F5	38121.19 ± 1322.74 bc	6.54	77.08 ± 4.24 ab
	F0	26514.02 ± 1395.46 b	—	70.83 ± 4.85 a
	F1	31580.18 ± 2867.46 ab	19.11	70.12 ± 3.46 a
	F2	30038.66 ± 3527.07 ab	13.29	71.71 ± 4.24 a
	F3	35329.80 ± 3695.77a	33.25	76.47 ± 6.51 a
D3 (定薯 4 号)	F4	31163.55 ± 6644.74 ab	17.54	72.68 ± 3.49 a
	F5	29663.70 ± 5244.02 ab	11.88	73.97 ± 3.58 a
	F0	50203.31 ± 2625.73 a	—	79.23 ± 2.93 bc
	F1	55911.08 ± 4500.13 a	11.37	82.16 ± 2.93 abc
	F2	59744.03 ± 3813.66 a	19.00	78.37 ± 3.61 c
品种 (D)	F3	55702.76 ± 7375.67 a	10.95	83.51 ± 2.30 ab
	F4	57577.58 ± 9118.38 a	14.69	84.70 ± 1.99 a
	F5	51036.56 ± 6237.28 a	1.66	79.75 ± 3.22 bc
施肥水平 (F)		**		**
品种 × 施肥水平 (D × F)		NS		*
品种 × 施肥水平 (D × F)		NS		NS



2.2.4 不同锌肥喷施量对锌肥利用效率的影响

从表 7 可以看出，叶面施用不同浓度硫酸锌均能提高马铃薯锌素总积累量。其中，费乌瑞它和大西洋施用不同浓度硫酸锌均显著提高，施用浓度为 0.30%（F2）时达到最高，分别为 219.39 和

145.33 g/hm²；定薯 4 号浓度为 0.50%（F4）时达到最高，锌素总积累量为 186.54 g/hm²。不同品种上锌肥的利用效率不一致，费乌瑞它、大西洋和定薯 4 号的利用率分别在 1.97%~6.32%、1.38%~3.94% 和 0.12%~2.41% 之间。

表 7 不同锌肥喷施量对锌肥利用效率的影响

品种	处理	地上锌积累量 (g/hm ²)	地下锌积累量 (g/hm ²)	锌素总积累量 (g/hm ²)	总锌利用率 (%)
D1 (费乌瑞它)	F0	12.51 ± 0.74 e	121.65 ± 3.83 d	134.16 ± 3.16 d	—
	F1	15.05 ± 0.89 d	144.71 ± 6.00 c	159.77 ± 5.12 c	2.86 ± 0.57 b
	F2	21.15 ± 1.25 a	198.25 ± 10.37 a	219.39 ± 11.59 a	6.32 ± 0.86 a
	F3	21.01 ± 1.24 a	166.31 ± 9.13 b	187.33 ± 8.16 b	2.96 ± 0.45 b
	F4	19.65 ± 1.16 b	159.99 ± 5.04 b	179.64 ± 4.31 b	2.03 ± 0.19 b
	F5	18.31 ± 1.08 c	169.04 ± 7.50 b	187.35 ± 6.48 b	1.97 ± 0.24 b
D2 (大西洋)	F0	8.98 ± 0.53 f	83.23 ± 6.71 c	92.20 ± 7.14 c	—
	F1	13.41 ± 0.79 e	103.03 ± 11.43 bc	116.44 ± 11.60 b	2.69 ± 1.29 ab
	F2	15.85 ± 0.94 c	129.48 ± 11.76 a	145.33 ± 11.16 a	3.94 ± 0.83 a
	F3	16.66 ± 0.99 a	110.73 ± 7.45 ab	127.39 ± 7.41 ab	1.96 ± 0.41 b
	F4	16.32 ± 0.97 b	126.59 ± 18.29 ab	142.91 ± 17.38 a	2.25 ± 0.77 ab
	F5	15.45 ± 0.91 d	113.95 ± 15.06 ab	129.39 ± 14.69 ab	1.38 ± 0.54 b
D3 (定薯 4 号)	F0	9.92 ± 0.59 e	122.48 ± 16.45 b	132.40 ± 15.88 b	—
	F1	18.50 ± 1.09 b	130.46 ± 10.89 b	148.97 ± 11.71 b	1.84 ± 1.30 ab
	F2	21.56 ± 1.28 a	139.49 ± 22.09 ab	161.06 ± 23.33 ab	2.12 ± 1.73 a
	F3	15.85 ± 0.94 d	117.05 ± 3.97 b	132.91 ± 3.78 b	0.12 ± 0.21 b
	F4	21.21 ± 1.25 a	165.33 ± 12.00 a	186.54 ± 11.34 a	2.41 ± 0.50 a
	F5	18.03 ± 1.07 c	130.83 ± 14.25 b	148.86 ± 13.19 b	0.61 ± 0.49 ab
品种 (D)		**	**	**	**
施肥水平 (F)		**	**	**	**
品种 × 施肥水平 (D×F)		**	**	**	**

2.3 马铃薯不同生育期喷施锌肥试验

2.3.1 不同生育期喷施锌肥对马铃薯块茎锌含量的影响

在马铃薯不同生育期进行叶面喷施锌肥均提高了块茎锌含量，增幅在 3.33%~61.67% 之间。块茎内的锌含量随着不同的喷施时期变化出现不同波动，早熟品种费乌瑞它不同时期喷施均显著提高了块茎锌含量，其中块茎膨大期（L4）达到最高值为 4.30 mg/kg，较未喷施（L0）增加 31.50%，与其他处理达到差异显著；中熟品种大西洋不同时期喷施均显著提高了块茎锌含量，其中块茎形成期（L3）达到最高值 4.03 mg/kg，较 L0 增加 45.61%，并与其他时期达到差异显著；晚熟品种

定薯 4 号除苗期外其他时期块茎锌含量均显著增加，块茎膨大期（L4）达最高值 3.23 mg/kg，较未喷施（L0）显著增加 61.67%，与其他时期喷施达到差异显著。费乌瑞它和定薯 4 号在块茎膨大期喷施效果最佳，大西洋在块茎形成期喷施效果最佳。

2.3.2 不同生育期喷施锌肥对马铃薯产量及商品薯率的影响

根据表 9 中马铃薯产量数据可知，在不同生育期叶面喷施硫酸锌水溶液马铃薯产量较未喷施（L0）均有所增加，增幅在 0.90%~15.26% 之间。费乌瑞它施用锌肥后平均增产 8.42%，块茎形成期（L3）产量达最高，较 L0 显著增产 15.26%；大西



表 8 不同生育期施用锌肥下马铃薯块茎锌含量

品种	处理	喷施时期	块茎锌含量 (mg/kg)	较对照增加 (%)
D1 (费乌瑞它)	L0	未喷施	3.27 ± 0.06 c	—
	L1	苗期	3.90 ± 0.10 b	19.27
	L2	现蕾期	3.95 ± 0.05 b	20.90
	L3	块茎形成期	3.83 ± 0.15 b	17.23
	L4	块茎膨大期	4.30 ± 0.10 a	31.50
D2 (大西洋)	L0	未喷施	2.77 ± 0.12 c	—
	L1	苗期	3.60 ± 0.10 b	29.96
	L2	现蕾期	3.53 ± 0.06 b	27.56
	L3	块茎形成期	4.03 ± 0.15 a	45.61
	L4	块茎膨大期	3.70 ± 0.00 b	33.57
D3 (定薯 4 号)	L0	未喷施	2.00 ± 0.10 d	—
	L1	苗期	2.07 ± 0.06 d	3.33
	L2	现蕾期	2.57 ± 0.06 c	28.33
	L3	块茎形成期	2.83 ± 0.06 b	41.67
	L4	块茎膨大期	3.23 ± 0.06 a	61.67
品种 (D)			**	
喷施时期 (L)			**	
品种 × 施肥水平 (D × F)			**	

表 9 不同生育期施用锌肥下马铃薯产量变化

品种	处理	产量 (kg/hm ²)	较对照增加 (%)	商品薯率 (%)
D1 (费乌瑞它)	L0	33649.44 ± 1585.98 b	—	73.83 ± 1.59 a
	L1	35271.27 ± 3113.00 b	4.75	78.02 ± 4.93 a
	L2	34625.41 ± 6108.57 b	2.83	77.35 ± 4.65 a
	L3	38809.16 ± 2204.60 a	15.26	81.30 ± 4.99 a
	L4	37316.50 ± 3114.86 b	10.83	79.33 ± 4.68 a
D2 (大西洋)	L0	25870.38 ± 3037.64 b	—	73.61 ± 2.67 a
	L1	26408.60 ± 5976.25 b	2.22	70.48 ± 2.55 a
	L2	29243.22 ± 1561.14 a	13.19	69.83 ± 3.14 a
	L3	27126.23 ± 7223.37 b	5.00	76.04 ± 5.25 a
	L4	27197.99 ± 2469.56 b	5.28	71.35 ± 2.08 a
D3 (定薯 4 号)	L0	44779.80 ± 1164.94 a	—	85.55 ± 3.87 a
	L1	45612.25 ± 3598.67 a	1.86	86.65 ± 1.70 a
	L2	45813.18 ± 1980.65 a	2.31	84.44 ± 3.02 a
	L3	46674.33 ± 3271.24 a	4.23	86.65 ± 0.37 a
	L4	45181.67 ± 1600.29 a	0.90	85.19 ± 4.50 a
品种 (D)		**		**
施肥水平 (F)		NS		NS
品种 × 施肥水平 (D × F)		NS		NS



洋施用锌肥后平均增产 6.42%，现蕾期施锌（L2）产量达最高，较 L0 显著增产 13.19%；定薯 4 号施用锌肥后平均增产幅度最低，为 2.33%，块茎形成期（L3）产量达最高，较 L0 增产 4.23%。马铃薯商品薯率较未施锌肥有不同幅度增减，但总体上差异不显著。

3 讨论

锌对作物营养物质合成代谢及生长发育有重要作用，参与激素合成与代谢^[13]，也是植物体内谷氨酸脱氢酶、RNA 聚合酶等多种酶的组成成分，能够促进叶绿素的形成与稳定^[14]，促进光合效率的提升^[15-16]，从而影响作物的生长和产量的提高^[17-18]。索海翠等^[19]发现喷施低浓度的锌显著提高马铃薯叶片的 SPAD 值，本研究发现随着锌肥浓度的增加，SPAD 值出现先升高后减低的趋势，喷施浓度在 0.30%~0.40% 之间时 SPAD 值达到最高且较对照差异显著。

外源施用适量锌在马铃薯上的增产率在 7%~25% 之间^[20-22]，这与锌肥类型、施肥方式和马铃薯品种等因素密切相关^[23]。有机态糖醇锌的增产效果明显优于无机态硫酸锌，这与王延明等^[24]、孙小龙等^[25]研究结果一致。但是本研究发现无机硫酸锌和尿素配合施用，其增产效果显著高于硫酸锌单独施用，可能是施入尿素增加了氮肥的转运速率^[26]。不同马铃薯品种上施用锌肥平均增产 14.51%，同时随着叶面施锌浓度的增加，产量呈现先升高后降低的趋势，其中喷施浓度在 0.30%~0.40% 时各品种增产效果最佳，这与吕军等^[27]研究结果一致。

叶面施锌对马铃薯块茎的补锌效果明显，也与锌肥类型、马铃薯品种等密切相关。在马铃薯上施用不同类型锌肥后，块茎锌含量依次显著提升，硫酸锌和尿素的混合液 > 有机锌糖醇锌 > 无机锌硫酸锌，且 3 种锌肥间差异显著，该结果与候叔音^[28]、孙小龙等^[29]研究结果一致。同时，锌肥与大量元素尿素混合配施可有效促进马铃薯对锌的吸收^[30]，尿素可通过影响叶片氮代谢而促进锌向块茎的转运使块茎锌含量进一步提高，比单施锌肥增加 0.3%~14.5%。块茎锌含量提升与马铃薯品种相关，本研究结果表明，叶面喷施浓度为 0.20%~0.60% 的硫酸锌时，马铃薯块茎锌含量显著增加，出现先增加后降低的趋势，喷施用量为

0.30% 时，早熟品种费乌瑞它和中熟品种大西洋块茎锌含量均达到最高，较未施锌肥分别显著增加 37.25% 和 32.26%；但晚熟品种定薯 4 号在喷施浓度为 0.50% 时，块茎锌含量最高，较对照显著增加 31.75%。这与代燕青等^[31]叶面喷施不同浓度 EDTA-Zn 研究结果一致。关于叶面喷施不同浓度硫酸锌在不同熟性马铃薯上的效果本研究为首次报道。

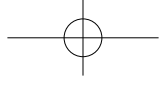
马铃薯生育期内，各器官锌含量随生育期推进先增加后降低，块茎膨大期是马铃薯锌吸收最多、强度最大，也是需求高峰期，块茎锌积累量自块茎形成后持续升高，成熟期块茎分配率可达 50% 以上^[32-34]。高炳德等^[35]通过对马铃薯不同器官进行锌营养元素的测定，发现全株和块茎锌营养元素吸收最快期分别为块茎形成期和块茎膨大期。本研究采用不同方法进行最佳施肥时期测定，即不同生育期进行叶面喷施锌肥，发现在不同马铃薯品种上关键时期不一致，但均在块茎形成期和块茎膨大期，其中早熟品种费乌瑞它和晚熟品种定薯 4 号块茎膨大期、中熟品种大西洋块茎形成期为锌肥喷施关键时期。

4 结论

本研究中，叶面施用锌肥能显著提高马铃薯块茎锌含量及产量，且不同马铃薯品种、不同锌肥种类间差异显著。其中，叶面喷施浓度为 0.30%~0.50% 时，块茎锌含量及产量增加效果最大，平均增加 33.75% 和 23.75%；块茎形成期和块茎膨大期为最佳喷施时期，块茎锌含量显著增加 61.67%。同时，采用尿素配施硫酸锌较未配施增产 15.85%，锌含量增加 6.72%。因此，在实际生产中，因地制宜采用叶面喷施硫酸锌水溶液配施 0.05% 尿素，在马铃薯块茎形成期和块茎膨大期进行两次关键时期喷施，可协同实现最佳肥料利用效率、最大程度的稳产增产和提高马铃薯的锌含量。

参考文献：

- [1] 卢肖平. 马铃薯主粮化战略的意义、瓶颈与政策建议 [J]. 华中农业大学学报 (社会科学版), 2015 (3): 1-7.
- [2] 李红霞, 汤瑛芳, 沈慧. 甘肃马铃薯省域竞争力分析 [J]. 干旱区资源与环境, 2019 (8): 36-41.
- [3] 王新右. 浅谈甘肃省特色农业产业发展现状和模式 [J]. 甘肃农业, 2021, 21 (2): 63-67.
- [4] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 中国居民膳食

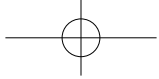


- 营养素参考摄入量 第3部分:微量元素:WS/T 578.3—2017 [S]. 北京:中国标准出版社, 2018.
- [5] 杨维东. 微量元素与健康 [M]. 武汉:华中科技大学出版社, 2007.
- [6] 仇志军, 高祥照, 汤松, 等. 石灰性土壤地区富锌马铃薯锌肥施用技术 [J]. 中国农技推广, 2020, 36 (12): 50–51, 49.
- [7] Hirsch C D, Buell C R, Hirsch C N. A toolbox of potato genetic and genomic resources [J]. American Journal of Potato Research, 2016, 93 (1): 21–32.
- [8] Baker D A, Moorby J. The transport of sugar, water, and ions into developing potato tubers [J]. Annals of Botany, 1969, 33 (4): 729–741.
- [9] 孙红, 郑涛, 刘宁, 等. 高光谱图像检测马铃薯植株叶绿素含量垂直分布 [J]. 农业工程学报, 2018, 34 (1): 149–156.
- [10] Kromann P, Valverde F, Alvarado S, et al. Can Andean potatoes be agronomically biofortified with iron and zinc fertilizers? [J]. Plant and Soil, 2017, 411 (1/2): 121–138.
- [11] 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.
- [12] 靳立国. 火焰原子吸收法连续测定水系样品中的铜、锌等六种元素 [D]. 长春:吉林大学, 2013.
- [13] 刘丹, 徐梦薇, 胡月清, 等. 马铃薯块茎发育期主要植物激素的动态变化 [J]. 分子植物育种, 2019, 17 (6): 1998–2003.
- [14] Zhang J, Wang S, Song S, et al. Transcriptomic and proteomic analyses reveal new insight into chlorophyll synthesis and chloroplast structure of maize leaves under zinc deficiency stress [J]. Journal of Proteomics, 2019, 199: 123–134.
- [15] Puzina T I, Effect of zinc sulfate and boric acid on the hormonal status of potato plants in relation to tuberization [J]. Russian Journal of Plant Physiology, 2004, 51 (2): 209–215.
- [16] 马光恕, 廉华, 冯云霞, 等. 叶面喷施硫酸锌对马铃薯淀粉合成和积累的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2010 (4): 46–52.
- [17] 张梦真, 李亚婷, 马超, 等. 施锌对作物生长发育及籽粒产量和品质的影响 [J]. 河南农业, 2022 (7): 25–26.
- [18] 陆景陵, 陈伦寿. 植物营养失调症彩色图谱: 诊断与施肥 [M]. 北京:中国林业出版社, 2009.
- [19] 索海翠, 王丽, 李成晨, 等. 叶面施锌对马铃薯叶片光合特性、超微结构及产量的影响 [J]. 热带作物学报, 2021, 42 (7): 1963–1970.
- [20] 罗磊, 李亚杰, 黄凯, 等. 不同增施微肥方式对马铃薯块茎产量和 Zn、Fe 含量的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35 (2): 152–156.
- [21] Murmu S, Saha S, Saha B, et al. Influence of Zn and B on the yield and nutrition of two widely grown potato cultivars (*Solanum tuberosum* L.) [J]. Annals of Biology, 2014, 30 (1): 37–41.
- [22] Mousavi S R, Galavi M, Ahmadvand G. Effect of zinc and manganese foliar application on yield, quality and enrichment on potato (*Solanum tuberosum* L.) [J]. Asian Journal of Plant Sciences, 2007, 6 (8): 1256–1260.
- [23] White P J, Broadley M R. Biofortification of crops with seven mineral elements often lacking in human diets—iron, zinc, copper, calcium, magnesium, selenium and iodine [J]. New Phytologist, 2009, 182 (1): 02738.
- [24] 王延明, 张春红, 邱慧珍, 等. 半干旱雨养条件下不同锌肥对马铃薯‘新大坪’干物质积累和产量的影响 [J]. 甘肃农业大学学报, 2014, 49 (6): 35–40.
- [25] 孙小龙, 王延明, 张春红, 等. 不同锌肥对旱作马铃薯植株锌的吸收、积累与分配的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33 (3): 72–78.
- [26] 赵雪君. 不同氮钾用量对马铃薯块茎钾、铁、锌素积累影响的研究 [D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2015.
- [27] 吕军, 高青青, 赵帆, 等. 叶面喷施锌肥对马铃薯农艺性状、产量及品质的影响 [J]. 陕西农业科学, 2021, 67 (9): 5–8.
- [28] 侯叔音. 不同锌肥对旱作马铃薯产量形成及锌素吸收和积累的影响 [D]. 兰州:甘肃农业大学, 2013.
- [29] 孙小龙, 王延明, 张春红, 等. 不同锌肥对旱作马铃薯植株锌的吸收、积累与分配的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33 (3): 72–78.
- [30] White P J, Thompson J A, Wright G, et al. Biofortifying Scottish potatoes with zinc [J]. Plant and Soil, 2017, 411 (1): 151–165.
- [31] 代燕青, 贾小霞, 杨维俊, 等. 锌肥施用对马铃薯品质和产量的影响 [J]. 土壤与作物, 2021, 10 (2): 230–236.
- [32] 习敏. 马铃薯不同品种锰锌吸收、积累、分配规律及施肥响应 [D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2011.
- [33] 马丽美. 不同马铃薯品种钾钙铁锌的吸收积累规律 [D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2014.
- [34] 郝智勇. 中微量元素在马铃薯生产上的应用 [J]. 中国马铃薯, 2017, 31 (5): 307–311.
- [35] 高炳德, 张胜, 白艳妹, 等. 不同营养条件下马铃薯锌素吸收分配规律的研究 [J]. 内蒙古农业大学学报 (自然科学版), 2010 (4): 24–28.

Effect of foliar zinc application on yield and zinc concentration of potato

FAN Yi^{1, 2}, LI Ya-jie^{1, 2}, LUO Lei^{1, 2}, YAO Yan-hong^{1, 2}, LI Feng-xian^{1, 2}, DONG Ai-yun^{1, 2}, LIU Hui-xia^{1, 2}, NIU Cai-ping^{1, 2}, LI De-ming^{1, 2*} (1. Dingxi Academy of Agricultural Sciences, Dingxi Gansu 743000; 2. Gansu Potato Industry Technology Innovation Center, Dingxi Gansu 743000)

Abstract: Applying zinc fertilizer on zinc deficient soil can not only improve potato yield, but also significantly improve



potato tuber zinc content. The purpose of this study is to reveal the differences in the optimal spraying amount, spraying period and spraying type of zinc fertilizer on the leaves of different maturity and varieties of potatoes in improving potato yield and tuber zinc content. Three groups of experiments were conducted under field conditions from April 2020 to October 2021 with potato varieties feiruita, Atlantic and Dingshu No. 4 as test materials. In experiment 1, different types of zinc fertilizer spraying tests were conducted. There were 4 treatments: no zinc fertilizer control (G0), spraying zinc sulfate aqueous solution (G1), spraying zinc sulfate + urea aqueous solution (G2) and spraying ximelo sugar alcohol zinc aqueous solution (G3); In experiment 2, different zinc fertilizer spraying rates were tested, with 6 treatments of spraying concentration of 0.00% (F0), 0.02% (F1), 0.03% (F2), 0.04% (F3), 0.05% (F4) and 0.06% (F5); In experiment 3, spraying zinc fertilizer in different periods was conducted with five treatments: without spraying zinc fertilizer in growth period (L0), spraying in seedling period (L1), spraying in budding period (L2), spraying in tuber formation period (L3) and spraying in tuber expansion period (L4). The results showed that the yield of potato, the content of zinc in tuber and the SPAD value of leaves were increased by spraying appropriate amount of zinc sulfate on the leaves. When the concentration of zinc fertilizer was 0.30%, the content of zinc in the tubers of early maturing cultivar Feiwuruita and middle maturing cultivar Atlantic significantly increased by 37.25% and 32.26%, respectively, compared with that of non-spraying treatment. When the concentration of zinc fertilizer was 0.50%, the tuber zinc content of late maturing variety Dingshu 4 increased significantly by 31.75%. The key period of spraying different varieties of potato was the tuber formation and expansion period, and the tuber zinc content increased by 46.26% on average compared with that without spraying treatment. Spraying zinc sulfate and urea solution on leaves increased yield and efficiency significantly, zinc content in tubers increased by 42.11%, and yield increased by 12.86%. To sum up, based on the analysis of the field application effect of foliar zinc application on increasing potato yield and tuber zinc content, 0.30% zinc sulfate solution can be used on early and medium maturing potatoes, 0.50% zinc sulfate solution can be applied on late maturing varieties, and 0.05% urea can be combined applied with foliar zinc sulfate solution according to local conditions at two key stages of potato tuber formation and tuber expansion, which can achieve the best fertilizer utilization efficiency, maximize and increase the yield, and improve the zinc nutrition content of potatoes.

Key words: potato; foliar zinc application; type of zinc fertilizer; yield; zinc content; spraying period