磷酸二氢钾影响马铃薯对晚疫病抗性的初步研究

张 哲[1]， 刘 霞[1]， 王兴国[1]， 杨 俐[2]， 陈 丽[1]，
黄 勋[1]， 张雅敏[1]， 杨艳丽[1*]

(1. 云南农业大学植物保护学院，昆明 650201；2. 云南省大理市植保植检站，大理 671000)

摘要 本研究以马铃薯品种‘丽薯6号’为试材，对叶面喷施不同浓度磷酸二氢钾4 d后的植株接种晚疫病菌，测定晚疫病发生的严重度，并测定磷酸二氢钾和晚疫病菌处理后14 d内马铃薯植株的PAL、SOD、POD、PPO、Chi、GLU活性及SP含量。结果表明，在一定浓度范围内，磷酸二氢钾可减轻马铃薯晚疫病的发生，随着施用浓度的增加，晚疫病发病逐渐减轻。其中磷酸二氢钾质量浓度为0.6%时，晚疫病发病最轻，接种晚疫病菌后8 d防效达35.64%，12 d时仍超过30%，但浓度超过0.6%，晚疫病发生加重。同时，喷施磷酸二氢钾可不同程度地提升健康和接种晚疫病菌的马铃薯植株体内6种防御酶活性及可溶性蛋白含量。因此，磷酸二氢钾在一定时间段内可诱导马铃薯对晚疫病的抗性，减轻晚疫病的发生。

关键词 磷酸二氢钾； 马铃薯晚疫病； 抗病性

中图分类号： S 432.1 **文献标识码：** A **DOI：** 10.16688/j.zwbh.2022070

A preliminary study on the effects of potassium dihydrogen phosphate on the resistance of potato to late blight

ZHANG Zhe[1]， LIU Xia[1]， WANG Xingguo[1]， YANG Li[2]， CHEN Li[1]，
HUANG Xun[1]， ZHANG Yamin[1]， YANG Yanli[1*]

(1. *College of Plant Protection*, *Yunnan Agricultural University*, *Kunming* 650201, *China*;
2. *Dali Station of Plant Protection and Inspection*, *Yunnan Province*, *Dali* 671000, *China*)

Abstract The potato variety ‘Lishu no. 6’ was sprayed with different concentrations of potassium dihydrogen phosphate. Four days later, the plants were inoculated with *Phytophthora infestans* to determine the severity of potato late blight. The activities of PAL, SOD, POD, PPO, Chi, GLU and the contents of SP in potato plants were determined within 14 days after treatment. The results showed that potassium dihydrogen phosphate could reduce the occurrence of potato late blight. With increasing application concentrations, the occurrence of potato late blight gradually decreased, but when the concentration exceeded 0.6%, the occurrence of potato late blight became more serious. When the concentration of potassium dihydrogen phosphate was 0.6%, the severity of potato late blight was the least, and the control effect was 35.64% on day eight after treatment, and remained stable (>30%) 12 days after treatment. At the same time, spraying potassium dihydrogen phosphate increased the activity of six defense enzymes and soluble protein content to varying degrees in healthy and inoculated potato plants. Therefore, potassium dihydrogen phosphate can induce potato resistance to late blight during specific periods of time, and thus reduce the occurrence of potato late blight.

Key words potassium dihydrogen phosphate; potato late blight; disease resistance

马铃薯晚疫病是由致病疫霉 *Phytophthora infestans*(Mont.) de Bary 引起的毁灭性卵菌病害，可造成产量损失20%～40%，甚至绝收，曾导致“爱尔兰大饥荒”[1]。目前，防治该病主要以选育抗病品种

收稿日期： 2022-02-11 **修订日期：** 2022-04-05
基金项目： 云南省重大科技专项(202102AE090018)；国家重点研发计划(2018YFD0200808)；云南省现代农业马铃薯产业技术体系(2020KJTX03)
* 通信作者 E-mail:843151872@qq.com

辅以化学防控为主，然而随着晚疫病菌群体结构的迅速变化，出现了品种抗病性丧失[2]、菌株产生抗药性[3]等问题。因此，探索和实施绿色防控技术尤为重要。

诱导抗病性是由多种生物或非生物因子所激发，依赖植物化学或物理防卫屏障的主动抗病过程[4]。能够激发诱导抗病性的各种因子称为激发子，目前已发现多种激发子可以通过迅速激活植物体内生理生化反应来引起一系列防御酶活性的增强及病程相关蛋白的积累，进而提高植物抗病性。主要有苯丙氨酸解氨酶（phenylalanine ammonia-lyase，PAL）、超氧化物歧化酶（superoxide dismutase，SOD）、过氧化物酶（peroxidase，POD）、多酚氧化酶（polyphenol oxidase，PPO）、几丁质酶（chitinase，Chi）、β-1，3-葡聚糖酶（β-1，3-glucanase，GLU）和可溶性蛋白（soluble protein，SP）等，它们的活性或含量变化与植株的抗病性密切相关[5]。如哈茨木霉 *Trichoderma harzianum* T-1055 诱导向日葵对苗枯病的抗性[6]，枯草芽胞杆菌 *Bacillus subtilis* BS-208 诱导番茄对灰霉病的抗性[7]，苯并噻二唑诱导香蕉对枯萎病的抗性[8]，水杨酸诱导番茄对枯萎病的抗性[9]，亚磷酸钾诱导马铃薯对晚疫病的抗性等[10]。

磷酸二氢钾（KH_2PO_4）作为农业生产上常用的叶面肥，具有污染小、吸收快的特点，可显著提升作物的产量和品质[11]，也具备提升作物抗寒[12]、抗倒伏[13]及抗干热风[14]的能力，然而磷酸二氢钾在马铃薯抗晚疫病方面的研究未见报道。本研究通过对马铃薯喷施磷酸二氢钾后接种晚疫病菌，测定了不同浓度处理下晚疫病发生的严重度，并对 6 种防御酶活性及可溶性蛋白含量的变化情况进行分析，以期探究磷酸二氢钾能否影响马铃薯对晚疫病的抗性。

1 材料与方法

1.1 材料

供试马铃薯为中抗马铃薯晚疫病品种‘丽薯 6 号’，由云南省丽江市农科所选育。供试晚疫病菌 *Phytophthora infestans* 菌株共 12 株，由云南农业大学马铃薯病害研究室保存，分别采自云南马铃薯大春作一季作区中的 12 个县市，涵盖了目前能够鉴定出的晚疫病菌的 1～11 个致病基因。

供试培养基为黑麦番茄培养基[3]。配制方法为：称取黑麦 60 g/L，加入适量水后灭菌、榨汁、煮沸，筛网过滤，加入琼脂 20 g/L，番茄汁 150 mL/L、$CaCO_3$ 1.2 g/L，调节 pH 至 6.5～7.0，灭菌备用。

栽培基质为蛭石、珍珠岩体积比 1∶1的混合基质。试验所用肥料包括尿素（N≥46%）、过磷酸钙（P_2O_5≥12%）、硫酸钾（K_2O≥52%）及磷酸二氢钾（有效成分≥99%，P_2O_5≥52%，K_2O≥34%），除尿素购自安阳中盈化肥有限公司外，其他均购自河北先正农业科技有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 孢子悬浮液的制备

将 12 个晚疫病菌菌株分别接种至黑麦番茄培养基中，18℃黑暗培养 10～14 d，使用无菌水冲洗刮下菌丝，270 目无菌网筛过滤，用血球计数器调节孢子囊数目为 5×10^4 个/mL，然后将所有菌株菌悬液混合，置于 4℃中 1 h，释放游动孢子，备用。

1.2.2 喷施磷酸二氢钾后马铃薯晚疫病发生情况调查

试验在云南农业大学温室内进行，挑选经过催芽且大小一致的健康种薯种植于花盆中，每盆种植一个种薯。化肥施用量为尿素 4.4 g/盆、过磷酸钙 8.3 g/盆、硫酸钾 3.9 g/盆，其中 2/3 的量与基质拌匀后装盆作为基肥，1/3 的量作为追肥，齐苗后 14 d 进行追施。

种植后 45 d，用无菌水将磷酸二氢钾配制成质量浓度分别为 0%、0.15%、0.3%、0.6%、1.2%的溶液，于傍晚无风时将溶液喷洒至植株叶片，直到正反面均有明显液滴为止。每处理 3 盆，重复 3 次。磷酸二氢钾处理后 4 d，使用 1.2.1 中制备的孢子悬浮液进行整株喷雾接种，然后用保鲜袋保湿 24 h，以喷无菌水为对照。

接种后，每 4 d 调查 1 次病级，总共调查 2 次。分级标准按照田间药效试验准则（一）杀菌剂防治马铃薯晚疫病：GB/T 17980-34-2000 中的标准[15]，根据调查结果计算病情指数和防效。

病情指数＝∑（各级病叶数×相应病级值）×100/（调查总叶数×9）；

防效＝（对照病情指数－处理病情指数）/对照病情指数×100%。

1.2.3　试验设计及样品采集

经过预试验,发现使用不同浓度磷酸二氢钾处理马铃薯后接种晚疫病菌,以 0.6%浓度处理发病最轻。因此在进行上述试验的同时,取与 1.2.2 中同一批种植且生长 45 d 的马铃薯,分别于当天和第 4 天按表 1 的方案进行处理(方法、接种浓度与 1.2.2 一致),每处理 3 盆,重复 3 次。分别于处理后 0、2、4、6、8、10、12、14 d 对同一处理各植株自顶端向下第 3~5 叶位长势一致、充分展开的复叶进行混合采样,每次采样 3.0 g,然后立即放入冰盒中,使用液氮速冻后−80℃保存备用。测定样品中防御酶活性及可溶性蛋白含量。

表 1　试验设计

Table 1　Experimental design

处理编号 Code	处理 Treatment	
	第 0 天　0 day	第 4 天　The 4th day
CK	无菌水喷雾	无菌水喷雾
T1	0.6% 磷酸二氢钾喷雾	无菌水喷雾
T2	无菌水喷雾	接种晚疫病菌
T3	0.6% 磷酸二氢钾喷雾	接种晚疫病菌

1.2.4　防御酶活性及可溶性蛋白含量的测定方法

PAL、SOD、POD、PPO、Chi、GLU 活性及 SP 含量的测定分别采用苯丙氨酸法[8]、氮蓝四唑法[8]、愈创木酚法[8]、邻苯二酚法[16]、3,5-二硝基水杨酸法[17-18]、考马斯亮蓝 G-250 法[19],稍有修改。

1.3　数据分析

使用 Excel 进行数据统计,DPS 7.05 进行单因素方差分析,多重比较方法为 Duncan 氏新复极差法。

2　结果与分析

2.1　喷施磷酸二氢钾后马铃薯晚疫病的发生情况

不同浓度的磷酸二氢钾喷施马铃薯植株后第 4 天接种晚疫病菌,之后每 4 d 调查发病情况,总共 2 次。结果表明,随着磷酸二氢钾施用浓度的增加,发病严重度逐渐减轻,超过一定浓度后,病害的发生加重。0.6%浓度处理的植株发病最轻,8 d 时防效为 35.64%,12 d 时为 30.94%。而 1.2%浓度处理,虽然处理后 8 d 发病程度最低,但 12 d 时发病较重,8 d 时防效达 40.54%,但 12 d 时大幅下降,仅为 17.40%。因此,磷酸二氢钾在一定时间段内可减轻马铃薯晚疫病的发生,喷施 0.6%的磷酸二氢钾效果最佳(图 1,表 2)。

a~e: 磷酸二氢钾施用浓度分别为0%、0.15%、0.3%、0.6%、1.2%。
a–e: KH_2PO_4 concentrations are 0%, 0.15%, 0.3%,0.6%, 1.2%, respectively.

图 1　不同浓度磷酸二氢钾处理后 12 d 马铃薯对晚疫病的抗病表型

Fig. 1　The resistance phenotypes of potato to late blight 12 days after treatment with different concentration of KH_2PO_4

表 2　叶面喷施磷酸二氢钾对马铃薯晚疫病的防效1)

Table 2　The control effect of KH_2PO_4 by foliar spraying on potato late blight

磷酸二氢钾浓度/% KH_2PO_4 concentration	病情指数 Disease index		防效/% Control effect	
	8 d	12 d	8 d	12 d
0	(40.36±1.90)aA	(48.70±2.90)aA	—	—
0.15	(34.33±2.18)bAB	(41.20±3.05)bB	14.94	15.41
0.3	(30.85±2.61)bBC	(37.45±0.96)bcBC	23.56	23.09
0.6	(25.97±1.66)cCD	(33.63±1.12)cC	35.64	30.94
1.2	(24.00±2.56)cD	(40.23±2.15)bBC	40.54	17.40

1) 同列数据后不同小写和大写字母分别表示经 Duncan 氏新复极差法检验在 0.05 和 0.01 水平差异显著。下同。
Different lowercase and uppercase letters in the same column indicate significant differences at 0.05 and 0.01 levels by Duncan's new multiple range test, respectively. The same applies below.

2.2　喷施磷酸二氢钾对马铃薯防御酶活性及可溶性蛋白含量的影响

喷施磷酸二氢钾可不同程度地提升健康和感病的马铃薯植株 PAL、SOD、POD、PPO、Chi、GLU 活性及 SP 含量。

2.2.1　苯丙氨酸解氨酶(PAL)活性的变化

空白对照植株 PAL 活性呈先下降后缓慢上升然后稳定的趋势,而喷施磷酸二氢钾不接种晚疫病

菌的处理(T1),处理后 PAL 活性迅速上升,4 d 时显著高于对照,是对照的 1.32 倍。10 d 时 PAL 活性达到最高水平,高出空白对照 41.44%,随后有所下降,但仍显著高于对照。喷无菌水后接种晚疫病菌的处理(T2)、喷施磷酸二氢钾后接种晚疫病菌的处理(T3),处理后 6 d 植株 PAL 活性均急剧增加,分别是空白对照的 1.60 倍、2.06 倍。8 d 时 T2、T3 处理均达到峰值,T3 处理 PAL 活性高于 T2 处理 28.06%,随后均呈下降趋势,但 T3 处理相比 T2 处理仍具显著差异(表 3)。

2.2.2 超氧化物歧化酶(SOD)活性的变化

喷施磷酸二氢钾不接种晚疫病菌的处理(T1)在处理后 2 d 植株 SOD 活性显著高于空白对照,10 d 后 T1 处理和空白对照 SOD 活性均呈下降趋势,但 T1 处理 SOD 活性仍显著高于空白对照。喷无菌水后接种晚疫病菌的处理(T2)、喷施磷酸二氢钾后接种晚疫病菌的处理(T3),处理后植株 SOD 活性均显著增强,处理后 6 d 和 8 d 时 T3 处理 SOD 活性分别比 T2 处理高 8.87% 和 12.45%。处理后 10~14 d,T2、T3 处理 SOD 活性均下降,但 T3 处理 SOD 活性仍处于较高水平,平均比 T2 处理高 1.43 U/(g·min)且差异显著(表 4)。

2.2.3 过氧化物酶(POD)活性的变化

喷施磷酸二氢钾可使植株 POD 活性快速增加,处理后 2~8 d,喷施磷酸二氢钾不接种晚疫病菌的处理(T1)POD 活性分别比空白对照高 25.47%、52.20%、40.08%、44.90%,随后其 POD 活性持续下降,但仍显著高于空白对照。接种晚疫病菌后植株 POD 活性均急剧增加,处理后 6 d 和 8 d 时变化最为明显,喷无菌水后接种晚疫病菌的处理(T2)POD 活性在 6 d 和 8 d 时分别是 4 d 时的 2.09 倍和 2.27 倍,而喷施磷酸二氢钾后接种晚疫病菌的处理(T3)POD 活性在 6 d 和 8 d 时分别比 T2 处理高 18.69% 和 16.20%。8 d 后 T2 处理 POD 活性大幅下降,而 T3 处理下降幅度较小,且与 T2 处理相比具有显著差异(表 5)。

2.2.4 多酚氧化酶(PPO)活性的变化

喷施磷酸二氢钾后植株 PPO 活性上升,处理后 4 d,喷施磷酸二氢钾不接种晚疫病菌的处理(T1)相比空白对照达到显著水平,且在处理后 4~14 d 保持了较高活性,平均高出空白对照 25.71%。喷无菌水后接种晚疫病菌的处理(T2)、喷磷酸二氢钾后接种晚疫病菌的处理(T3),处理后植株 PPO 活性均迅速提升,而 T3 处理的植株 PPO 活性提升更明显,处理后 6 d 时 T2、T3 处理分别比空白对照高 25.50%、47.64%。8 d 时,T2、T3 处理达到最高水平,T3 处理 PPO 活性比 T2 处理高 15.54%。此后,T3 处理在 12 d 内维持了较高水平,然后下降,而 T2 处理 PPO 活性迅速下降,12 d 时与 T3 处理差异最显著,仅为 T3 处理植株 PPO 活性的 74.68%(表 6)。

2.2.5 几丁质酶(Chi)活性的变化

喷施磷酸二氢钾不接种晚疫病菌的处理(T1)在处理后 2~12 d 植株的 Chi 活性显著提高,平均比空白对照高 0.94 U/(g·h),而空白对照 Chi 活性在整个采样期在一个较低的水平上下波动。接种晚疫病菌可导致植株 Chi 活性大幅增加,处理后 6 d,喷无菌水后接种晚疫病菌的处理(T2)、喷施磷酸二氢钾后接种晚疫病菌的处理(T3)分别是空白对照的 1.62、1.91 倍。T2、T3 处理在处理后 6~10 d 维持了较高的 Chi 活性,随后下降,且 10~12 d 时下降最为明显,T2 处理降幅为 19.76%,而 T3 处理降幅较低,仅为 10.78%(表 7)。

2.2.6 *β*-1,3-葡聚糖酶(GLU)活性的变化

喷施磷酸二氢钾不接种晚疫病菌的处理(T1)在处理后 2~10 d 植株 GLU 活性显著提高,随后虽有所下降,但其与空白对照仍具显著差异,而对照植株 GLU 活性一直处于较低的水平,无明显变化。喷无菌水后接种晚疫病菌的处理(T2)、喷施磷酸二氢钾后接种晚疫病菌的处理(T3),处理后 GLU 活性均急剧上升,处理后 6 d 时 T2、T3 处理 GLU 活性分别是空白对照的 1.45、1.73 倍,8 d 时 T2、T3 处理 GLU 活性达到最高水平,且 T3 处理比 T2 处理高 16.08%。此外,T3 处理 GLU 活性在处理后 6~10 d 保持了较高水平,而 T2 处理的较高水平仅保持在 6~8 d,持续时间短,之后 T2、T3 处理 GLU 活性大幅下降,但 14 d 时 T3 处理仍比 T2 处理高 21.74%,而 T2 处理 GLU 活性已低于对照(表 8)。

2.2.7 可溶性蛋白(SP)含量的变化

喷施磷酸二氢钾不接种晚疫病菌的处理(T1)植株 SP 含量显著提升,而对照植株 SP 含量变化较小。处理后 2~14 d,T1 处理植株 SP 含量平均比 0 d 高 16.83%。接种马铃薯晚疫病菌后,植株 SP 含量均大幅上升,6 d 时喷无菌水后接种晚疫病菌的

表 3　PAL 活性的变化1)

Table 3　Changes of PAL activity

处理 Treatment	PAL 活性/U·g^{-1}·h^{-1} PAL activity							
	0 d	2 d	4 d	6 d	8 d	10 d	12 d	14 d
CK	(203.11±10.33)aA	(162.04±11.14)aA	(152.89±11.58)bB	(170.13±12.01)dC	(211.07±10.33)dD	(228.13±9.21)cC	(220.67±16.98)cC	(226.27±15.04)cB
T1	(199.02±14.24)aA	(180.36±8.72)aA	(201.51±10.68)aA	(239.60±15.98)cB	(295.47±12.63)cC	(322.67±14.62)bB	(293.73±16.00)bB	(303.47±17.85)abA
T2	(201.42±13.16)aA	(160.44±14.99)aA	(150.31±13.64)bB	(271.47±6.58)bB	(323.60±8.43)bB	(302.93±7.26)bB	(303.20±9.73)bAB	(272.27±15.23)bAB
T3	(199.11±13.87)aA	(179.20±15.95)aA	(202.04±17.47)aA	(350.67±13.03)aA	(414.40±12.40)aA	(368.27±13.40)aA	(346.27±6.38)aA	(311.73±12.07)aA

1）表中处理编号对应的处理方法见表 1。下同。
The treatment method corresponding to the treatment code were shown in Table 1. The same applies below.

表 4　SOD 活性的变化

Table 4　Changes of SOD activity

处理 Treatment	SOD 活性/U·g^{-1}·min^{-1} SOD activity							
	0 d	2 d	4 d	6 d	8 d	10 d	12 d	14 d
CK	(10.43±0.40)aA	(10.65±0.32)bA	(10.66±0.23)bA	(10.22±0.55)cC	(10.67±0.36)dC	(8.63±0.57)cB	(7.79±0.29)cB	(7.51±0.35)bB
T1	(10.49±0.61)aA	(11.38±0.21)aA	(11.50±0.32)aA	(11.34±0.43)bBC	(11.65±0.44)cB	(9.66±0.56)bAB	(8.76±0.21)abAB	(9.84±0.69)aA
T2	(10.50±0.47)aA	(10.56±0.39)bA	(10.87±0.59)bA	(11.95±0.22)bAB	(12.29±0.39)bB	(8.99±0.40)bcB	(8.27±0.38)bcAB	(7.54±0.42)bB
T3	(10.56±0.47)aA	(11.22±0.30)abA	(11.49±0.33)aA	(13.01±0.53)aA	(13.82±0.36)aA	(10.83±0.27)aA	(9.13±0.48)aA	(9.12±0.29)aA

表 5　POD 活性的变化

Table 5　Changes of POD activity

处理 Treatment	POD 活性/U·g^{-1}·min^{-1} POD activity							
	0 d	2 d	4 d	6 d	8 d	10 d	12 d	14 d
CK	(156.44±15.19)aA	(154.67±10.25)bB	(161.19±8.07)bB	(220.67±11.02)dC	(233.56±10.03)dD	(219.56±12.37)cC	(223.56±16.13)dC	(204.44±12.10)dD
T1	(168.00±9.61)aA	(194.07±14.67)aA	(245.33±13.09)aA	(309.11±15.50)cB	(338.44±12.62)cC	(302.22±16.74)bB	(285.78±11.78)cB	(230.89±12.37)cC
T2	(162.37±11.43)aA	(153.78±9.37)bB	(164.74±10.23)bB	(343.56±15.12)bB	(374.44±11.48)bB	(300.89±10.84)bB	(317.78±12.33)bB	(266.89±7.13)bB
T3	(158.22±12.82)aA	(181.93±13.78)aAB	(240.59±9.42)aA	(407.78±14.37)aA	(435.11±11.95)aA	(400.67±11.02)aA	(391.33±13.38)aA	(341.11±12.81)aA

表 6　PPO 活性的变化

Table 6　Changes of PPO activity

处理 Treatment	PPO 活性/U·g^{-1}·min^{-1} PPO activity							
	0 d	2 d	4 d	6 d	8 d	10 d	12 d	14 d
CK	(7.76±0.44)aA	(7.85±0.40)abA	(8.03±0.27)bB	(8.04±0.47)cC	(7.33±0.23)cC	(7.64±0.34)cC	(7.96±0.20)cC	(7.51±0.47)bB
T1	(7.82±0.62)aA	(8.44±0.39)aA	(9.78±0.32)aA	(9.64±0.31)bB	(10.09±0.34)bB	(10.04±0.43)bB	(9.96±0.34)bB	(8.89±0.50)aAB
T2	(7.64±0.41)aA	(7.59±0.22)bA	(7.23±0.31)cB	(10.09±0.28)bB	(10.62±0.63)bB	(9.82±0.34)bB	(8.76±0.38)cBC	(8.62±0.20)aAB
T3	(7.79±0.31)aA	(8.47±0.67)aA	(9.75±0.34)aA	(11.87±0.48)aA	(12.27±0.35)aA	(11.56±0.28)aA	(11.73±0.67)aA	(9.51±0.47)aA

表 7　Chi 活性的变化

Table 7　Changes of Chi activity

处理 Treatment	Chi 活性/U·g^{-1}·h^{-1}　Chi activity							
	0 d	2 d	4 d	6 d	8 d	10 d	12 d	14 d
CK	(3.61±0.13)aA	(3.51±0.16)bC	(3.68±0.23)bB	(3.74±0.23)dC	(3.89±0.36)dC	(4.24±0.34)cC	(4.12±0.34)cB	(4.24±0.46)bB
T1	(3.58±0.12)aA	(4.47±0.16)aA	(4.42±0.31)aAB	(5.23±0.34)cB	(4.88±0.34)cBC	(4.83±0.42)cBC	(5.16±0.47)bB	(4.98±0.46)abAB
T2	(3.48±0.16)aA	(3.74±0.16)bBC	(3.58±0.23)bB	(6.06±0.36)bB	(6.21±0.47)bAB	(5.92±0.54)bAB	(4.75±0.46)bcB	(4.47±0.19)bB
T3	(3.53±0.20)aA	(4.34±0.27)aAB	(4.85±0.35)aA	(7.16±0.38)aA	(7.57±0.42)aA	(7.14±0.42)aA	(6.37±0.23)aA	(5.66±0.27)aA

表 8　GLU 活性的变化

Table 8　Changes of GLU activity

处理 Treatment	GLU 活性/U·g^{-1}·h^{-1}　GLU activity							
	0 d	2 d	4 d	6 d	8 d	10 d	12 d	14 d
CK	(28.43±1.10)aA	(27.32±1.46)bB	(27.51±0.84)bB	(25.49±1.15)cC	(26.96±1.15)dC	(26.59±1.15)cC	(28.61±1.39)cC	(28.98±0.55)bBC
T1	(28.98±1.10)aA	(32.28±0.95)aA	(35.95±1.59)aA	(35.04±1.10)bB	(36.32±0.64)cB	(34.12±1.39)bB	(32.65±1.15)bB	(32.10±1.15)aAB
T2	(28.61±0.84)aA	(27.69±0.64)bB	(26.96±1.15)bB	(36.87±1.39)bB	(39.99±1.10)bB	(33.20±0.84)bB	(32.28±1.46)bBC	(27.87±1.10)bC
T3	(28.79±1.15)aA	(32.83±1.10)aA	(35.22±1.39)aA	(44.03±0.84)aA	(46.42±1.39)aA	(44.77±1.15)aA	(36.51±1.39)aA	(33.93±0.95)aA

表 9　SP 含量的变化

Table 9　Changes of SP content

处理 Treatment	SP 含量/mg·g^{-1}　SP content							
	0 d	2 d	4 d	6 d	8 d	10 d	12 d	14 d
CK	(9.94±0.37)aA	(10.33±0.31)bA	(9.96±0.49)bB	(9.66±0.28)cC	(9.77±0.34)dC	(10.01±0.37)dC	(9.91±0.59)cC	(10.33±0.55)bBC
T1	(10.00±0.31)aA	(11.60±0.42)aA	(11.78±0.14)aA	(11.73±0.47)bB	(11.29±0.27)cB	(11.52±0.31)bB	(12.31±0.37)aA	(11.55±0.35)aAB
T2	(10.05±0.20)aA	(10.28±0.51)bA	(9.73±0.42)bB	(12.30±0.37)bB	(12.67±0.51)bB	(10.79±0.30)cBC	(11.09±0.21)bB	(9.36±0.36)cC
T3	(10.07±0.26)aA	(11.64±0.55)aA	(11.86±0.44)aA	(14.15±0.53)aA	(14.27±0.50)aA	(13.90±0.44)aA	(12.59±0.50)aA	(12.08±0.27)aA

处理(T2)、喷施磷酸二氢钾后接种晚疫病菌的处理(T3)的 SP 含量相比空白对照分别增加了 27.33%、46.48%。T2 处理 SP 含量在处理后 6～8 d 维持在较高水平,第 10 天开始大幅下降,14 d 时其 SP 含量已低于空白对照,而 T3 处理在处理后 6～10 d 处于比 T2 处理更高的水平,之后有所下降,但降幅较小(表 9)。

综上,喷施磷酸二氢钾可降低马铃薯晚疫病发生的严重度,并提升植株防御酶活性及可溶性蛋白含量,进而诱导马铃薯对晚疫病的抗性,且处理后 6～10 d 最为明显。因此,可结合马铃薯晚疫病预警系统,在大田晚疫病发生前 6～10 d 喷施磷酸二氢钾,不仅可减轻晚疫病的发生,还可降低化学农药的施用量,实现马铃薯晚疫病绿色防控的同时增加马铃薯产量。

3　结论与讨论

近年来,诱导抗性作为一种稳定、有效的防治方法被广泛应用和研究。林敏等[10]利用亚磷酸钾处理马铃薯后,植株体内防御基因表达量、氧化酶活性及可溶性蛋白含量均显著提升,进而提升了马铃薯对晚疫病的抗性。朱毅勇等[20]使用磷酸盐处理黄瓜后,黄瓜 POD、Chi、GLU 活性明显提升,减轻了炭疽病的发生。Ata 等[21]使用两种磷酸盐处理甜菜,均可诱导 POD、PPO、PAL 活性提升,使甜菜对锈病的抗性增强。本研究通过测定 4 个质量浓度的磷酸二氢钾处理马铃薯后晚疫病的发生情况,发现磷酸二氢钾可减轻马铃薯晚疫病的发生,且浓度为 0.6%的处理晚疫病发生最轻,而浓度为 1.2%的处理出现前期发病轻微,但后期发病加重的情况,未见相关报道可以参考,需要进一步加以验证。

病原菌和激发子的作用可引起植物体内多种防御酶活性及蛋白含量的变化,它们在抵抗病害过程中发挥了非常关键的作用。其中,PAL 是苯丙烷代谢途径中的关键限速酶,大量植保素及酚类物质通过该途径合成[9]。SOD、POD 可清除组织或细胞中过多活性氧,保护植株免受氧化作用造成的损伤。此外,POD 还参与木质素的合成,也可将酚类物质氧化成对病原菌毒性更强的醌类物质[7,22]。Chi 和 GLU 常协同表达,具有降解病原菌细胞壁中的几丁质和 β-1,3-葡聚糖成分的作用。病程相关蛋白是植物受病原菌侵染后诱导产生的一类可溶性蛋白,其含量反映了植株在逆境胁迫下对自身的保护能力[23]。本研究发现喷施磷酸二氢钾后,均可显著提升马铃薯植株体内 PAL、SOD、POD、PPO、Chi、GLU 活性及 SP 含量,表明磷酸二氢钾可通过提升防御酶活性及可溶性蛋白含量的形式,诱导马铃薯植株对晚疫病的抗性,这与林敏等[10]、朱毅勇等[20]使用磷酸盐诱导植物抗性提升的研究结果相似。

综上,磷酸二氢钾可在一定时间段内诱导马铃薯对晚疫病的抗性,从而减轻晚疫病的发生。但本研究尚未对其他抗病机制进行深入探讨,因此关于喷施磷酸二氢钾后马铃薯植株防御基因的表达、防卫信号的识别和传递等方面的研究将是下一阶段工作的重点。此外,在使用磷酸二氢钾增强植株对晚疫病抗性的同时,综合运用多种防治措施,将更有利于实现马铃薯晚疫病的绿色防控。

参考文献

[1]　杨艳丽, 刘霞. 马铃薯病害[M]. 北京: 科学出版社, 2019: 2-3.

[2]　卢丽丽, 曹继芬, 潘哲超, 等. 云南省马铃薯主要品种晚疫病抗性评价[J]. 中国马铃薯, 2016, 30(6): 356-361.

[3]　钱红洁, 刘霞, 郭琳, 等. 云南省马铃薯春作区晚疫病菌对甲霜灵敏感性测定[J]. 西北农业学报, 2021, 30(7): 1083-1088.

[4]　商鸿生, 井金学, 宋凤鸣, 等. 植物免疫学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2010: 66-68.

[5]　宋瑞芳, 丁永乐, 宫长荣, 等. 烟草抗病性与防御酶活性间的关系研究进展[J]. 中国农学通报, 2007, 23(5): 309-314.

[6]　SINGH B N, SINGH A, SINGH B R, et al. *Trichoderma harzianum* elicits induced resistance in sunflower challenged by *Rhizoctonia solani* [J]. Journal of Applied Microbiology, 2014, 116(3): 654-666.

[7]　杜立新, 冯书亮, 王容燕, 等. 拮抗 BS-208 菌株对番茄灰霉病诱导抗性的初步研究[J]. 华北农学报, 2005, 20(6): 84-87.

[8]　黄永辉, 杨媚, 权永兵, 等. 苯并噻二唑对香蕉枯萎病的诱导抗性[J]. 华中农业大学学报, 2015, 34(3): 36-41.

[9]　MANDAL S, MALLICK N, MITRA A. Salicylic acid-induced resistance to *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* in tomato [J]. Plant Physiology Biochemistry, 2009, 47(7): 642-649.

(下转 140 页)

[13] 陈万义，王明安. 对我国植物源农药研发的思考[J]. 现代农药，2002(2)：1-4.
[14] 胡云飞，徐国兵. 牡丹皮及其主要成分丹皮酚的药理作用研究进展[J]. 安徽医药，2014，18(4)：589-592.
[15] 朴颖，宋艺兰，李良昌，等. 牡丹皮乙醇提取物对帕金森病模型小鼠多巴胺能神经元功能障碍的保护作用[J]. 延边医学院学报，2021，44(2)：89-92.
[16] YANG Xiaolu，XUE Xingyang，LIN Yan，et al. Chemical constituents from the Moutan Cortex charcoal and their potential coagulation activities [J]. Journal of Chinese Pharmaceutical Sciences，2018，27(9)：608-616.
[17] 马喆. 10种植物提取物对南方根结线虫毒杀活性研究[J]. 中国植保导刊，2019，39(6)：22-26.
[18] 朱立成，王祥胜，刘文，等. 牡丹皮等16种中草药提取物抑制植物病原菌的研究[J]. 植物保护，2007，33(3)：83-86.
[19] 夏传国，陈杰林，李隆术，等. 丹皮及其提取物对几种中药材仓储害虫的忌避作用研究[J]. 粮食储藏，2000(1)：3-9.
[20] 吴梅，韩瑞，周典，等. 丹皮酚对马铃薯块茎蛾雌虫产卵选择及幼虫的忌避作用研究[J]. 环境昆虫学报，2021，43(2)：500-506.
[21] 罗小勇. 牡丹不同器官的除草活性研究[J]. 植物保护，2011，37(2)：87-90.
[22] 郭凤，罗小勇. 牡丹叶及其不同溶剂提取物对生菜等幼苗生长的抑制效应[J]. 杂草科学，2012，30(3)：21-26.
[23] 李晶晶，田赐，王明思，等. 113种植物的乙醇提取物对反枝苋和马唐种子萌发及生长的抑制活性[J]. 中国生物防治学报，2022，38(2)：374-382.
[24] MEKKY M S，HASSANIEN A，KAMEL E M，et al. Allelopathic effect of *Ocimum basilicum* L. extracts on weeds and some crops and its possible use as new crude bio-herbicide [J]. Annals of Agricultural Sciences，2019，64(2)：211-221.
[25] 孙永艳，桑晓清，杨文杰，等. 6种植物甲醇提取物对外来入侵杂草的除草活性[J]. 华中农业大学学报，2012，31(3)：346-350.
[26] 闫超，陈敏，周颖，等. 石蝉草乙醇提取物除草活性初探[J]. 植物保护，2018，44(2)：199-203.
[27] 张城嘉，李祖任，柏连阳. 棉籽壳中除草活性物质提取及鉴定[J]. 农药学学报，2019，21(2)：146-150.
[28] 卢海博，万树青. 黄皮甲醇提取物的除草活性及有效成分研究[J]. 农药，2012，51(7)：539-542.
[29] SHAO Hua，HU Yunxia，HAN Caixia，et al. Chemical composition and phytotoxic activity of *Seriphidium terrae-albae* (krasch.) Poljakov (Compositae) essential oil [J/OL]. Chemistry & Biodiversity，2018，15(11)：e1800348. DOI：10.1002/cbdv.201800348.
[30] 王祝举，唐力英，赫炎. 牡丹皮的化学成分和药理作用[J]. 现代药物与临床，2006(4)：155-159.

（责任编辑：杨明丽）

（上接91页）

[10] 林敏，王荣波，陈庆河，等. 亚磷酸钾对马铃薯晚疫病病原菌的作用机理[J]. 植物保护学报，2018，45(6)：1389-1395.
[11] 张东昱，夏叶，张文斌，等. 叶面喷施磷酸二氢钾对加工型马铃薯生长的影响[J]. 中国马铃薯，2010，24(5)：298-300.
[12] 李效超，李茂富，李绍鹏，等. 磷酸二氢钾对香蕉幼苗抗冷性的影响[J]. 广东农业科学，2009(9)：61-64.
[13] 李娜，房鑫，王玉鑫. 磷酸二氢钾叶面肥在水稻上的应用效果[J]. 农业科技通讯，2021(4)：57-60.
[14] 刘文欢，李胜楠，候阁阁，等. 不同营养复配剂叶面喷施对冬小麦干热风抗性及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2019，25(9)：1600-1606.
[15] 农业部农药检定所. 农药田间药效试验准则(一)杀菌剂防治马铃薯晚疫病：GB/T 17980-34-2000 [S]. 北京：中国标准出版社，2000.
[16] AQUINO-BOLANOS E N，MERCADO-SILVA E. Effects of polyphenol oxidase and peroxidase activity，phenolics and lignin content on the browning of cut jicama [J]. Postharvest Biology Technology，2004，33(3)：275-283.
[17] BOLLER T，GEHRI A，MAUCH F，et al. Chitinase in bean leaves induction by ethylene，purification，properties，and possible function [J]. Planta，1983，157(1)：22-31.
[18] 傅俊范，孙嘉曼，周如军，等. 茉莉酸甲酯对人参 β-1,3-葡聚糖酶和几丁质酶活性的影响[J]. 中国农学通报，2012，28(9)：214-217.
[19] BRADFORD M M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding [J]. Analytical Biochemistry，1976，72(1/2)：248-254.
[20] 朱毅勇，沈其荣，谢学东，等. 磷酸盐诱导黄瓜系统抗病中主要酶活性的变化[J]. 南京农业大学学报，1999，22(2)：50-54.
[21] ATA A A，EI-SAMMAN M G，MOURSY M A，et al. Inducing resistance against rust disease of sugar beet by certain chemical compounds [J]. Egyptian Journal of Phytopathology，2008，36(2)：113-132.
[22] ALSCHER R G，ERTURK N，HEATH L S. Role of superoxide dismutases (SODs) in controlling oxidative stress in plants [J]. Journal of Experimental Botany，2002，53(372)：1331-1341.
[23] 王勇刚，曾富华，吴志华，等. 植物诱导抗病与病程相关蛋白[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版)，2002，28(2)：177-182.

（责任编辑：杨明丽）