

doi:10.13926/j.cnki.apps.001314

烟粉虱对甘薯种薯带毒率及病毒病发生的影响

王爽^{1,2}, 赵付枚^{1,2}, 田雨婷^{1,2}, 乔奇^{1,2}, 张德胜^{1,2}, 王永江^{1,2}, 张振臣^{1,2*}

(¹河南省农业科学院植物保护研究所, 郑州 450002; ²农业农村部华北南部作物有害生物综合治理重点实验室, 郑州 450002)

摘要: 病毒病是影响甘薯产量和品质的重要限制因素。甘薯褪绿矮化病毒(sweet potato chlorotic stunt virus, SPCSV)和甘薯羽状斑驳病毒(sweet potato feathery mottle virus, SPFMV)是危害我国甘薯的主要病毒。甘薯种薯感染 SPCSV 是甘薯苗期病毒病严重发生的关键因素。本研究分析了甘薯田烟粉虱发生量和带毒率对种薯带毒率及病毒病发生的影响,建立了甘薯种薯感染病毒风险和苗期病毒病发生风险的早期预警方法。结果表明,甘薯田烟粉虱发生量和 SPCSV 带毒率与种薯 SPCSV 带毒率密切相关,在田间烟粉虱发生量和带毒率较高的情况下,即使种植不含任何病毒的脱毒试管苗,也会引起较高的种薯带毒率,但不会引起甘薯地上部植株的严重显症。甘薯种薯 SPCSV 带毒率以及 SPCSV 和 SPFMV 复合带毒率与苗期病毒病显症率呈极显著正相关关系,可以利用种薯带毒率预测甘薯苗期病毒病显症率。

关键词: 甘薯田烟粉虱; 甘薯褪绿矮化病毒; 甘薯羽状斑驳病毒; 烟粉虱带毒率; 种薯带毒率

Impact of whitefly (*Bemisia tabaci*) on viruliferous rate of sweet potato storage root and viral disease occurrence WANG Shuang^{1,2}, ZHAO Fumei^{1,2}, TIAN Yuting^{1,2}, QIAO Qi^{1,2}, ZHANG Desheng^{1,2}, WANG Yongjiang^{1,2}, ZHANG Zhenchen^{1,2*} (¹Institute of Plant Protection, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, China; ²IPM Key Laboratory in Southern Part of North China for Ministry of Agriculture, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: Virus disease is a main constraint that influences sweet potato yield and quality. The most important viruses for sweet potato are the sweet potato chlorotic stunt virus (SPCSV) of the genus *Crinivirus* and sweet potato feathery mottle virus (SPFMV) of the genus *Potyvirus*. SPCSV-infected sweet potato storage roots incline to develop severe viral disease at the seedling stage. However, the effect of whitefly (*Bemisia tabaci*) in sweet potato fields on the proportion of SPCSV-viruliferous storage roots and viral disease occurrence remains largely unknown. Here, we report that the amount of whitefly and the rate of SPCSV-viruliferous whiteflies in sweet potato fields were closely related to the viruliferous rate of storage roots. When there was a high number of viruliferous whiteflies in sweet potato fields, a high rate of viruliferous storage roots were triggered, even though virus-free sweet potato cuttings that would not induce severe symptoms in above ground plants had been planted. The SPCSV infection rate and double infection of storage roots with SPCSV and SPFMV presented significant positive correlations with the virus-like symptom rate in sprouts generated from the storage roots. The symptom rate in sprouts can be predicted by the viruliferous rate of storage roots.

Keywords: whitefly (*Bemisia tabaci*); sweet potato chlorotic stunt virus; sweet potato feathery mottle virus; rate of viruliferous whiteflies; rate of viruliferous storage roots

中图分类号: S432.41

文献标识码: A

文章编号: 0412-0914(2024)01-0180-08

收稿日期: 2022-12-01; 修回日期: 2023-01-31 网络首发时间: 2023-04-21

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2184.Q.20230420.1751.001.html>

基金项目: 国家甘薯产业技术体系建设项目(CARS-10-B15); 河南省优势学科培育联合基金重点项目(222301420029); 河南省农业科学院自主创新基金项目(2022ZC39, 2024ZC058)

通信作者: 张振臣, 研究员, 主要从事植物病毒病害研究; E-mail: zhangzhenchen@126.com

第一作者: 王爽, 助理研究员, 研究方向为植物病毒病害; E-mail: wangshuang9981@126.com。

0 引言

甘薯是我国重要的粮食作物,也是营养全面的健康食品^[1]。我国甘薯种植面积约占世界甘薯种植面积的 30.4%,面积和产量均居世界首位^[2]。病毒病是影响甘薯产量和品质的主要限制因素之一。目前,全世界已报道侵染甘薯的病毒有 30 余种^[3],我国有 20 多种^[4-7],其中,重要的有甘薯羽状斑驳病毒(sweet potato feathery mottle virus, SPFMV)等马铃薯 Y 病毒属(*Potyvirus*)病毒、甘薯褪绿矮化病毒(sweet potato chlorotic stunt virus, SPCSV)等^[7-8]。甘薯上的 *Potyvirus* 病毒粒体呈线条状,基因组为单链正义 RNA,大小 10 kb 左右^[9]。SPCSV 属于长线形病毒科(*Closteroviridae*)毛形病毒属(*Crinivirus*)成员,是甘薯上危害最严重的病毒之一^[10]。SPCSV 病毒颗粒为长丝线状,基因组为双组分单链正义 RNA,大小 17.6 kb 左右,主要由烟粉虱(*Bemisia tabaci*)以半持久方式传播^[11]。SPCSV 最早报道于上世纪 70 年代,主要分布在非洲和南美洲^[12]。2011 年我国甘薯上首次检测到 SPCSV^[13],目前全国主要薯区均有发生。前人研究表明,甘薯植株感染 SPFMV 和 SPCSV 后,病毒可以从甘薯植株上移动到块根中,导致从块根上萌发的薯苗发病^[14]。甘薯种薯(块根)感染的病毒种类与其萌发的薯苗的病毒病症状严重度密切相关。当种薯只感染 SPFMV 等 *Potyvirus* 病毒时,其萌发的薯苗无病毒病症状或只有轻微的症状(0 级或 1 级);但是,当种薯感染 SPCSV 时,薯苗病毒病症状显著加重,特别是当种薯同时感染 SPCSV、SPFMV 等 *Potyvirus* 病毒时,症状严重度可达 3~9 级,说明种薯感染 SPCSV 是甘薯苗期病毒病严重发生的关键^[15]。由于我国大部分甘薯种植区都是采用以甘薯块根作为种薯进行育苗的方式为大田生产提供种苗^[16],种薯带毒和苗期病毒病的发生会严重影响种苗的质量和供应。因此,研究影响甘薯种薯病毒感染率的关键因素,阐明甘薯病毒病的发生规律,对于病毒病的有效防控具有重要意义。目前,甘薯田烟粉虱对甘薯种薯带毒率及病毒病发生的影响尚不十分清楚,本研究利用田间试验和人工接种烟粉虱试验,研究了田间烟粉虱发生量、发生时期和 SPCSV 带毒率对甘薯种薯 SPCSV 带毒率以及病毒病发生的影响,

建立了种薯感染病毒风险和苗期病毒病发生风险的预警方法,期望为甘薯病毒病的监测预警和有效防控提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试甘薯品种为商薯 19,包括商薯 19 脱毒试管苗、原原种苗和原种苗。试验用无毒烟粉虱由河南农大昆虫实验室馈赠。

1.2 方法

1.2.1 样品 RNA 提取及病毒检测 (1)RNA 提取。用灭菌的解剖刀在待检测的薯块中部挖取大小约为 1 cm × 1 cm × 1 cm 的薯皮及其相连的薯肉,用液氮磨成粉状,采用 Omega BIO-TEK 公司生产的 Plant RNA Kit 提取总 RNA。利用 TaKaRa 公司生产的 RNAiso Plus 试剂盒提取单头烟粉虱的总 RNA。具体操作步骤按照各试剂盒所附的说明书进行。利用 NanoVue Plus 超微量分光光度计检测 RNA 浓度和质量。(2)引物及合成。SPCSV 引物序列引用于 ZHAO^[15],正向引物为:5'-TGG-GAAGAMGAGAYATGGAG-3';反向引物为:5'-GAGCGTTCCTTTTCATCATC-3';扩增片段大小为 573 bp;SPFMV 引物序列引用于 QIAO^[4],正向引物为 5'-CCGGGTCTRTGAGARHACT GAAT-TGAATTTAAAGATGC-3';反向引物为:5'-GACTCTCGAGCCTATTGCACACCCCTCATTCC-3';扩增片段大小为 945 bp;上述引物均由 Sangon Biotech (Shanghai) Co, Ltd. 合成。(3) RT-PCR。利用 TaKaRa 公司生产的 PrimeScript II 1st Strand cDNA Synthesis Kit,反转录合成 cDNA 第一链,具体操作步骤参照试剂盒说明书进行。以合成的 cDNA 为模板,利用 Ex Taq DNA 聚合酶进行 PCR 扩增。PCR 反应体系为:2 × Premix Ex Taq 10.0 μL、10 μmol · L⁻¹ 正向引物和反向引物各 1.0 μL、cDNA 模板 2 μL, RNase-Free 水补足至 20.0 μL。扩增程序:95 °C 预变性 5 min;95 °C 变性 30 s, 53~57 °C 退火 30 s, 72 °C 延伸 1 min, 35 个循环;72 °C 延伸 10 min。用 1% 的琼脂糖凝胶电泳检测扩增产物, AlphaImager Mini (ProteinSimple, USA) 凝胶成像仪观察,记录 PCR 阳性薯块数和阳性烟粉虱头数,按以下公式计算种薯带毒率和烟粉虱带

毒率。

$$\text{烟粉虱带毒率}(\%) = \frac{\text{PCR 阳性烟粉虱头数}}{\text{检测总头数}} \times 100$$

$$\text{种薯带毒率}(\%) = \frac{\text{PCR 阳性薯块数}}{\text{检测总块数}} \times 100。$$

1.2.2 烟粉虱传毒试验 在昆虫饲养笼(40 cm×40 cm×40 cm)内的烟草植株上饲养无毒烟粉虱,连续饲养3代以上,建立试验用烟粉虱种群。饲养条件为:温度28℃,相对湿度60%~80%,光周期L:D=16 h:8 h。无毒甘薯苗种植于直径为24 cm、高为26 cm的塑料营养钵内,每钵1株,3~5片叶大小的无毒甘薯植株用于烟粉虱传毒试验。

将无毒烟粉虱成虫接种到实验室保存的感染SPCSV的甘薯植株上饲毒48 h,然后将其转接到3~5片叶大小的无毒甘薯植株上饲养48 h,然后用吹风机将烟粉虱从养虫笼内吹走并喷施200 mg·L⁻¹吡虫啉药液一次。烟粉虱接种量设4个处理,分别为每株0、20、50和100头,每个处理重复10次。甘薯植株放置在规格为60 cm×60 cm×60 cm的养虫笼内生长3个月左右。分别在接种烟粉虱1个月和2个月后取甘薯植株上部叶片,利用RT-PCR方法检测SPCSV,3个月后收获甘薯块根,利用RT-PCR方法检测甘薯薯块的SPCSV带毒率,病毒检测方法同1.2.1。

1.2.3 田间试验方法 (1)田间种植。利用背景相同的脱毒甘薯原原种苗在烟粉虱发生量不同的地区种植。2020年共设7个种植点:包括河南原阳试验点(N35°0′35″ E113°42′31″)、河南延津试验点(N35°15′56″ E114°11′57″)、河南栾川潭头镇试验点(N34°1′7″ E111°45′44″)、河南栾川合峪镇试验点(N33°51′36″ E111°54′20″)、河南栾川庙子镇试验点(N33°46′52″ E111°45′31″)、陕西榆林试验点(N38°29′34″ E109°30′04″)和宁夏银川试验点(N38°25′55″ E106°02′28″);2021年共设5个种植点:包括河南延津试验点(N35°25′15″ E 114°20′51″)、河南栾川庙子镇试验点(N33°46′52″ E111°45′31″)、河南栾川城关镇试验点(N33°46′12″ E111°35′24″)、河南焦作试验点(N35°25′15″ E114°20′51″)和河北石家庄试验点(N37°30′36″ E114°19′12″)。每个试验点种植面积均为666.7 m²左右,6月上旬大田种植,种植密度3 000株/666.7 m²左右,进行常规田间管理。此外,2020年和

2021年还分别利用不同来源的无症薯苗在烟粉虱发生量相同的同一试验地种植。试验种植在河南原阳试验点(N35°0′35″ E113°42′31″)。2020年共种植了5种不同来源和背景的薯苗,包括无毒试管苗和分别来自陕西榆林、宁夏银川、河南延津和河南温县的脱毒原种苗。2021年共种植了7种不同来源和背景的薯苗,包括无毒试管苗和分别来自河南延津、河南原阳、河南栾川潭头镇、河南栾川合峪镇、陕西榆林、宁夏银川的脱毒原种苗。6月上旬大田种植,每个处理种植1 000株,重复3次,进行常规田间管理。(2)田间烟粉虱调查方法。利用黄板诱集法调查烟粉虱的发生量,每666.7 m²悬挂20块黄板,黄板大小为40 cm×25 cm,黄板垂直悬挂,黄板下缘高于甘薯植株5~10 cm,Z字型排列,每10天更换一次黄板。记录每块诱虫板上诱集的烟粉虱数量。同时在不同试验点每点至少采集100头活体烟粉虱,-70℃保存,用于测定烟粉虱SPCSV带毒率。(3)大田病毒病显症率调查。调查不同背景的无症薯苗在相同种植条件下的大田病毒病显症率。方法是薯苗种植大田后一个月开始调查,每月调查一次,记载叶片畸形、花叶、皱缩、植株矮化等病毒病显症株数和调查总株数。(4)种薯收获及病毒检测。每年的10月上旬分别收获各试验点的种薯,从每个试验点随机抽样100 kg种薯,然后再从中随机抽取100块种薯进行SPCSV检测,病毒检测方法同1.2.1。

1.2.4 种薯带毒率与苗期病毒病显症率之间的关系研究 分别从不同试验点收获的种薯中随机抽样100 kg种薯,然后再从中随机抽取100块种薯进行SPCSV和SPFMV带毒率检测,SPCSV和SPFMV病毒检测方法同1.2.1。次年春季将不同试验点抽取的100 kg种薯在温室进行育苗,出苗后调查病毒病显症率。

1.3 数据分析

数据统计分析采用Microsoft Excel 2003软件和SPSS Statistics 17.0软件进行分析。

2 结果与分析

2.1 甘薯田烟粉虱发生量和带毒率对种薯带毒率的影响

2020年利用背景相同的脱毒甘薯原原种苗在

7 个试验点进行了试验。结果表明(表 1),原阳和延津试验点田间烟粉虱的平均发生量相对较高,分别为 2 226.2 和 1 175.3 头/黄板,烟粉虱 SPCSV 带毒率分别为 4.0 和 14.0%,其对应种薯的 SPCSV 带毒率也较高,分别为 16.0 和 37.0%。榆林试验点没有烟粉虱发生,其对应的种薯 SPCSV 带毒率为 0。2021 年在 5 个试验点进行了试验。结果表明(表 2),延津试验点的烟粉虱平均发生量和 SPCSV 带毒率均为最高,分别为 525.6 头/黄板和 4.0%,其对应的种薯 SPCSV 带毒率也最高,为 49.0%;河南栾川庙子镇和城关镇 2 个试验点只有少量烟粉虱发生(分别为 18.8 和 14.4 头/黄板),其对应的种薯带毒率也较低(分别为 0 和 1.0%)。对不同时期烟粉虱发生量与种薯带毒率之间的相关性进行了分析,结果表明,2020 年 8 月 28 日和 9 月 8 日的烟粉虱发生量与种薯带毒率之间的相关系数分别为 0.779 ($P<0.05$) 和 0.869 ($P<0.05$),达到显著水平;2021 年 8 月 28 日烟粉虱发生量与种薯带毒率之间的相关系数为 0.993 ($P<0.01$),达到极显著水平。说明在我国北方薯区,8 月下旬

至 9 月上旬烟粉虱的发生量对种薯带毒率影响较大。

2.2 不同背景无症薯苗在同一种植条件下的种薯带毒率和大田病毒病显症率

为了进一步明确烟粉虱对种薯带毒率和病毒病发生的影响,选用不同来源和背景的无症薯苗在相同条件下进行种植,调查种薯的带毒率和田间病毒病显症率。种薯带毒率检测结果表明(表 3 和表 4),2020 年试验田烟粉虱平均发生量为 2 226.2 头/黄板,带毒率为 4.0%,在此条件下 5 种不同背景无症薯苗的种薯带毒率在 16.0~59.0%之间,其中脱毒试管苗的种薯带毒率最高,为 59.0%;2021 年试验田烟粉虱平均发生量为 731.2 头/黄板,带毒率为 4.0%,7 种不同背景薯苗的种薯带毒率在 2.0~38.0%之间。说明不论薯苗背景和病毒状态如何,即使是不含任何病毒的脱毒试管苗,在烟粉虱发生量和带毒率较高的条件下,都可引起种薯较高的带毒率。大田病毒病显症率调查结果表明(表 3 和表 4),2020 年 5 种不同背景的无症薯

Table 1 Correlation between whitefly occurrence, viruliferous whitefly rate and viruliferous storage root rate in 2020

Test site (Geographic location)	Number of whitefly in different periods (head/yellow sticky card)							Rate of viruliferous whitefly /%	Rate of viruliferous storage roots/%
	August 8th	August 18th	August 28th	September 8th	September 18th	September 28th	Average		
Yuanyang Henan (N35°0'35" E113°42'31")	388	1 078	2 021	2 853	3 801	3 216	2 226.2	4.0	16.0
Yanjin Henan (N35°15'56" E114°11'57")	338	498	1 402	2 645	1 316	853	1 175.3	14.0	37.0
Tantou Town Luanchuan Henan (N34°1'7" E111°45'44")	388	362	350	289	86	67	257.0	1.0	4.0
Heyu Town Luanchuan Henan (N33°51'36" E111°54'20")	25	50	4	13	0	0	15.3	0.0	0.0
Miaozi Town Luanchuan Henan (N33°46'52" E111°45'31")	34	36	42	19	8	8	24.5	0.0	1.0
Yulin Shanxi (N38°29'34" E109°30'04")	0	0	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0
Yinchuan Ningxia (N38°25'55" E106°02'28")	35	-	156	-	105	-	49.3	0.0	0.0

Table 2 Correlation between whitefly occurrence , viruliferous whitefly rate and viruliferous storage root rate in 2021

Test site (Geographic location)	Number of whitefly in different periods (head/yellow sticky card)						Rate of viruliferous whitefly/%	Rate of viruliferous storage roots/%
	August 18th	August 28th	September 8th	September 18th	September 28th	Average		
Yanjin Henan (N35°25'15" E114°20'51")	512	797	488	731	100	525.6	4.0	49.0
Miaozi town Luanchuan Henan (N33°46'52" E111°45'31")	10	55	20	9	0	18.8	0.0	0.0
Chengguan town Luanchuan Henan (N33°46'12" E111°35'24")	2	33	21	16	0	14.4	0.0	1.0
JiaozuoHenan (N35°25'15" E114°20'51")	405	368	644	1215	133	553.0	3.0	17.0
ShijiazhuangHebei (N37°30'36" E114°19'12")	430	247	614	324	200	363.0	3.0	15.0

Table 3 Rates of viral symptoms in vines and viruliferous storage roots of symptomless sweet potato cuttings from different sources under the same planting conditions in 2020 *

Source of sweet potato cuttings	Rate of viral symptoms of vines/%			SPCSV-viruliferous rate of storage roots/%
	July 23th	August 21th	September 23th	
Yulin Shanxi	0.0	0.0	0.0	16.0
Yinchuan Ningxia	2.7	3.2	3.8	33.0
Wenxian Henan	9.9	7.0	7.6	41.0
Yanjin Henan	0.4	0.9	0.5	20.0
Virus-free sweet potato cutting	0.0	0.5	0.8	59.0

* The whitefly occurrence amount was 2 226.2, and the viruliferous whitefly rate was 4.0% in Yuanyang.

Table 4 Rates of viral symptoms in vines and viruliferous storage roots of symptomless sweet potato cuttings from different sources under the same planting conditions in 2021 *

Soure of sweet potato cuttings	Rate of viral symptoms of vines /%				SPCSV-viruliferous rate of storage roots /%
	July 30th	August 16th	September 16th	October 14th	
Yuanyang Henan	0.0	0.4	0.9	0.9	32.0
Yanjin Henan	0.0	0.8	1.6	1.8	38.0
Tantou town Luanchuan Henan	0.0	0.0	0.2	0.2	5.0
Heyu town Luanchuan Henan	0.0	0.0	0.0	0.0	4.0
Yulin Shanxi	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0
Yinchuan Ningxia	0.1	0.1	0.1	0.3	20.0
Virus-free sweet potato cutting	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0

* The whitefly occurrence amount was 731.2, and the viruliferous whitefly rate was 4.0% in Yuanyang.

苗种植到大田,整个生育期甘薯地上部植株的病毒病显症率在 0~9.9%之间;2021 年 7 种不同背景薯苗的大田病毒病显症率在 0~1.8%之间,两年的大田病毒病显症率均较低(<10%),说明在田间烟粉虱发生量和带毒率较高的条件下,虽然可引起甘薯地下块根较高的带毒率,但地上部甘薯植株在大田生长期间的病毒病显症率并不高,不会引起病毒病大发生。研究结果为无症薯苗的合理利用提供了重要依据。

2.3 人工接种烟粉虱对甘薯种薯带毒的影响

将饲养的无毒烟粉虱在感染 SPCSV 的甘薯植株上饲毒,然后接种到无毒甘薯植株上,在甘薯不同生长时期分别检测甘薯叶片带毒情况,收获时检测甘薯块根带毒情况。结果表明(表 5),每株接种

20 头烟粉虱的甘薯植株叶片和块根都没检测到 SPCSV;每株接种 50 和 100 头烟粉虱的甘薯植株叶片 SPCSV 带毒率均为 30%,叶片未见明显症状,所结块根的 SPCSV 带毒率分别为 40%和 60%,说明甘薯植株上的烟粉虱数量与种薯带毒率密切相关,烟粉虱数量越大,种薯带毒率越高,这与田间试验结果一致。

2.4 甘薯种薯带毒率与苗期病毒病显症率之间的关系

2020 和 2021 年共对 12 批次不同来源的种薯进行抽样,首先检测种薯 SPCSV 和 SPFMV 的带毒率,然后将这些不同来源的种薯进行育苗,调查苗期病毒病显症率,分析种薯带毒率与苗期病毒病显症率之间的关系。两年的试验结果表明(表 6),

Table 5 Influence of sweet potato cuttings artificially inoculated with viruliferous whiteflies on the rates of viruliferous storage roots and leaves

Treatment		Viruliferous rate of leaves /%		Rate of viruliferous storag
Numbers of whitefly inoculated per plant		One month	Two months	Three months
		post-inoculation/mpi	post-inoculation/mpi	post-inoculation/mpi
0		0	0	0
20		0	0	0
50		30	30	40
100		30	30	60

Table 6 Correlation between the rates of viruliferous storage roots and virus-like symptom in sprouts

Year	Source of storage roots	Rate of viruliferous sweet potatoes/%			Virus-like symptom on sprouts/%
		SPCSV	SPFMV	SPCSV +SPFMV	
2020	Yanjin	37.0	55.0	18.0	12.1
	Yuanyang	16.0	9.0	13.0	10.8
	Tantou Town, Luanchuan	4.0	25.0	1.0	4.8
	Heyu Town, Luanchuan	0.0	23.0	0.0	0.2
	Miaozi Town, Luanchuan	1.0	18.0	1.0	0.4
	Yunlin	0.0	9.0	0.0	0.0
	Yinchuan	0.0	30.0	0.0	4.0
2021	Yanjin	49.0	90.0	45.0	18.4
	Miaozi Town, Luanchuan	0.0	91.0	0.0	0.0
	Chengguan Town, Luanchuan	1.0	92.0	1.0	0.0
	Jiaozuo	17.0	76.0	12.0	4.7
	Shijiazhuang	15.0	97.0	14.0	7.2

种薯 SPCSV 带毒率与苗期病毒病显症率之间的相关系数为 0.938 ($p < 0.01$), SPCSV 和 SPFMV 复合带毒率与苗期病毒病显症率之间的相关系数为 0.922 ($P < 0.01$), 均呈极显著的正相关关系。说明可以利用种薯 SPCSV 带毒率或 SPCSV 和 SPFMV 的复合带毒率预测苗期病毒病显症率。利用 SPSS 多元线性回归分析建立的预测模型为: $Y = 0.235 X_1 + 0.137 X_2 + 1.275$, $R^2 = 0.888$, 其中, Y 为苗期病毒病显症率, X_1 为种薯 SPCSV 带毒率, X_2 为 SPCSV 和 SPFMV 复合带毒率。

3 讨论

本研究利用背景相同的脱毒甘薯原原种苗, 分别在烟粉虱发生量不同的地区种植, 利用背景不同的薯苗, 在烟粉虱发生量相同的同一试验田种植, 研究了烟粉虱发生量、发生时期和带毒率对种薯带毒率和田间病毒病显症率的影响。明确了甘薯田烟粉虱发生量和带毒率是影响甘薯种薯病毒感染率的关键因素。同时, 通过研究种薯带毒率与苗期病毒病显症率之间的关系, 明确了甘薯苗期病毒病显症率与种薯 SPCSV 带毒率以及 SPCSV 和 SPFMV 复合带毒率呈极显著正相关关系。据此, 我们可以在甘薯生长期, 通过调查繁种田的烟粉虱发生量和带毒率预测甘薯种薯带毒率; 在甘薯收获期或育苗前通过检测种薯带毒率预测苗期病毒病显症率, 可以实现对种薯感染病毒风险和苗期病毒病发生风险的早期预警。研究结果对于甘薯病毒病的监测预警和有效防控具有重要价值。

病毒病是甘薯上的重要病害, 种植无病毒种薯、种苗是防治病毒病、提高甘薯产量最有效的方法^[17]。目前主要采用茎尖培养的方法获得甘薯脱毒茎尖苗, 然后进行脱毒种薯的繁育。在我国北方薯区主要采用原原种、原种和良种三级繁育脱毒种薯的模式^[17]。农民在生产上主要种植脱毒原种和良种。脱毒茎尖苗经原原种、原种和良种的三级繁育, 繁殖倍数呈几何增长, 这样可有效降低农民的用种成本^[8]。但是, 近年来甘薯田烟粉虱的大发生给脱毒种薯的三级繁育带极大挑战。从本研究结果看, 在烟粉虱大发生的情况下, 不论是种植脱毒原原种苗、原种苗, 还是种植不含任何病毒的脱毒茎尖苗, 都可能会引起较高的种薯带毒率, 从而引起下一代苗期病毒病的发生, 这给种薯种苗繁育

带来极大风险。因此, 传统的脱毒甘薯三级繁育模式已不能满足当前甘薯生产的需要, 急需探索在烟粉虱大发生条件下脱毒甘薯种薯的繁育方法和模式。

本研究连续两年调查了不同来源、不同背景的无症薯苗在大田生长期的病毒病显症率。结果表明, 无症薯苗在大田生长期间的病毒病显症率均在 10% 以下, 并没有引起田间病毒病的大发生。特别是 2020 年试验田烟粉虱发生量和带毒率均相对较高, 脱毒茎尖苗所结种薯的带毒率高达 59.0%, 但其地上部甘薯植株的病毒病显症率却很低 ($< 1\%$), 推测烟粉虱在田间传毒后病毒主要向甘薯块根转移, 大部分甘薯植株的叶片并不表现明显症状, 甘薯块根成为病毒主要的储备库和下一代的传染源。本研究结果为无症薯苗的合理利用提供了重要依据。但 SPCSV 在甘薯植株内的迁移规律、影响甘薯植株显症的关键因素以及无症带毒薯苗对产量的影响还有待进一步深入研究。

甘薯育苗期病毒病的发生严重影响种苗的质量和供应, 发病薯苗栽入大田也会造成田间病毒病的发生和传播。因此建立甘薯育苗期病毒病显症率的预测方法, 对于病毒病的有效防控具有重要意义。本研究从群体水平上分析了种薯带毒率与苗期病毒病显症率之间的关系, 建立了根据种薯 SPCSV 和 SPFMV 带毒率预测苗期病毒病显症率的方法, 可以在种薯收获后或育苗前抽样检测种薯的带毒率, 对带毒率较高的种薯及时进行管控, 不仅可以减少甘薯育苗期病毒病的发生, 也可减少种薯种苗企业的经营风险。为了进一步提高预警的准确性, 需要进一步建立规范的种薯抽样方法和病毒检测方法。

参考文献

- [1] MA D F, LI Q, CAO Q H, *et al.* Development and prospect of sweet potato industry and its technologies in China (in Chinese) [J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences (江苏农业学报), 2012, 28(5): 969-973.
- [2] FAOSTAT. Food and agricultural data. <http://faostat.fao.org/> [2]. 2020.
- [3] CLARK C A, DAVIS J A, ABAD J A, *et al.* Sweet potato viruses: 15 years of progress on understanding and managing complex diseases [J]. Plant Disease,

- 2012, 96(2): 168-185.
- [4] QIAO Q, ZHANG Z C, ZHANG D S, *et al.* Serological and molecular detection of viruses infecting sweet potato in China (in Chinese)[J]. *Acta Phytopathologica Sinica* (植物病理学报), 2012, 42(1): 10-16.
- [5] LIU Q L, WANG Y J, ZHANG Z C, *et al.* Diversity of sweepoviruses infecting sweet potato in China[J]. *Plant Disease*, 2017, 101(12): 2098-2103.
- [6] MA S Q, ZHENG Q F, YE J J, *et al.* Identification of viruses infecting sweet potato in southern China by small RNA deep sequencing and PCR detection [J]. *Journal of General Plant Pathology*, 2019, 85(2): 122-127.
- [7] WANG Y J, QIN Y H, WANG S, *et al.* Species and genetic variability of sweet potato viruses in China[J]. *Phytopathology Research*, 2021, 3: 20.
- [8] ZHANG Z C. Problems and suggestions for breeding of virus-free sweet potato seeds in China (in Chinese) [J]. *Plant Protection* (植物保护), 2020, 46(6): 10-13.
- [9] ATKA E M, BARG E, NJERU R W, *et al.* Further characterization of “sweet potato virus 2”: a distinct species of the genus *potyvirus*[J]. *Archives of Virology*, 2004, 149(2): 225-239.
- [10] KREUZE J F, SAVENKOV E I, VALKONEN J P T. Complete genome sequence and analyses of the sub-genomic RNAs of sweet potato chlorotic stunt virus reveal several new features for the genus *crinivirus*[J]. *Journal of Virology*, 2002, 76(18): 9260-9270.
- [11] VALVERDE R A, SIM J, LOTRAKUL P. Whitefly transmission of sweet potato viruses [J]. *Virus Research*, 2004, 100(1): 123-128.
- [12] SCHAEFERS G A, TERRY E R. Insect transmission of sweet potato disease agents in Nigeria[J]. *Phytopathology*, 1976, 66: 642-645.
- [13] QIAO Q, ZHANG Z C, QIN Y H, *et al.* First report of sweet potato chlorotic stunt virus infecting sweet potato in China[J]. *Plant Disease*, 2011, 95(3): 356-356.
- [14] ADIKINI S, Mukasa S B, MWANGA R O M, *et al.* Virus movement from infected sweet potato vines to roots and reversion on root sprouts[J]. *Hort Science*, 2019, 54(1): 117-124.
- [15] ZHAO F M, WANG S, TIAN Y T, *et al.* An investigation into key factors influencing the occurrence of virus disease in sweet potato (in Chinese)[J], *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2021, 54(15): 3232-3240.
- [16] ZHANG Z C, QIAO Q, JIN X L, *et al.* Studies and application of virus-free techniques in sweet potato in Henan Province (in Chinese) [J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences* (河南农业科学), 2003(9): 33-35.
- [17] ZHANG L M, WANG Q M, Wang J J, *et al.* Potato classification standard and production and breeding system of virus-free sweet potato(in Chinese)[J]. *Journal Shan dong Agricultural Science* (山东农业科学), 1999, (1): 24-26.

责任编辑:张宗英