

DOI:10.13718/j.cnki.zwyx.2026.02.004

# 免疫诱抗剂与营养调节剂对烟草病毒病的协同控制作用

王令蝶<sup>1</sup>, 高业朋<sup>1</sup>, 马鹏<sup>2</sup>, 杨柳<sup>2</sup>,  
李莹<sup>1</sup>, 焦裕冰<sup>1</sup>, 申莉莉<sup>1</sup>

1. 中国农业科学院烟草研究所, 山东 青岛 266101;

2. 四川省烟草公司凉山州公司, 四川 西昌 615000

**摘要:** 研究评估了免疫诱抗剂、营养调节剂对烟草花叶病毒(tobacco mosaic virus, TMV)、马铃薯Y病毒(potato virus Y, PVY)的抑制效果。通过对即墨、会理和冕宁等地的田间防效试验表明, 生防菌纳米核酸药物、0.015%灵菌红素水剂、5%氨基寡糖素水剂、20%辛菌胺醋酸盐水剂的钝化作用对TMV的抑制效果分别为88.34%、54.79%、82.01%、93.81%, 先施药再接毒对TMV的抑制效果分别为40.28%、30.75%、35.45%、45.49%; 药剂的钝化作用对PVY的抑制效果分别为40.87%、30.84%、32.24%、37.34%, 先施药再接毒对PVY的抑制效果分别为40.29%、30.04%、29.30%、37.37%。10~50 mg/L石墨烯处理对烟株净重和株高的提升效果分别为19.97%~43.93%、21.68%~47.63%。田间防效试验显示, 0.015%灵菌红素水剂120倍液与石墨烯10 mg/L液协同处理对即墨、会理和冕宁的烟草病毒病的抑制效果分别为50.92%、39.05%和64.00%, 该组合对环境友好且成本低, 可在烟草病毒病绿色防控中推广应用。

**关键词:** 免疫诱抗剂; 营养调节剂;

烟草花叶病毒; 马铃薯Y病毒;

抑制作用

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



中图分类号: S435.72; S572 文献标识码: A

文章编号: 2097-1354(2026)02-0032-11

## Synergistic Control Effect of Immune Induction and Nutritional Regulation Agents against Tobacco Virus Diseases

收稿日期: 2025-09-30

基金项目: 四川省烟草公司凉山州公司科技项目(SCYC202311, SCYC202515)。

作者简介: 王令蝶, 硕士研究生, 从事分子植物病理学研究。

通信作者: 焦裕冰, 助理研究员。

WANG Lingdie<sup>1</sup>, GAO Yepeng<sup>1</sup>, MA Peng<sup>2</sup>, YANG Liu<sup>2</sup>,  
LI Ying<sup>1</sup>, JIAO Yubing<sup>1</sup>, SHEN Lili<sup>1</sup>

1. Tobacco Research Institute of CAAS, Qingdao Shandong 266101, China;

2. Sichuan Liangshan Tobacco Co., Xichang Sichuan 615000, China

**Abstract:** This study aims to evaluate the inhibitory effects of immune induction and nutritional regulator on tobacco mosaic virus (TMV) and potato virus Y (PVY). The inhibition rates of biocidal nano-nucleic acid drug, 0.015% prodigiosin aqueous solution, 5% oligochitosan aqueous solution, and 20% cyenomycin acetate aqueous solution against TMV through passivation were 88.34%, 54.79%, 82.01%, and 93.81%, respectively. The inhibition rates of these agents applied before virus inoculation against TMV were 40.28%, 30.75%, 35.45%, and 45.49%, respectively. For PVY, the inhibition rates via passivation were 40.87%, 30.84%, 32.24%, and 37.34%, respectively, while the inhibition rates with pre-application before virus inoculation were 40.29%, 30.04%, 29.30%, and 37.37%, respectively. Growth promotion tests indicated that treatments with 10–50 mg/L graphene increased the fresh weight of tobacco plants by 19.97%–43.93% and plant height by 21.68%–47.63%. Field efficacy trials demonstrated that the combined treatment of 0.015% prodigiosin aqueous solution at 120-fold dilution and 10 mg/L graphene provided preventive effects against tobacco viral diseases of 50.92%, 39.05%, and 64.00%, respectively. The combination displays environmentally friendly and low-cost, and can be promoted for use in the green control of tobacco virus diseases.

**Key words:** Immune induction; nutritional regulator; tobacco mosaic virus; potato virus Y; inhibitory effect

植物病毒病防治难度极大,素有“植物癌症”之称,作为仅次于真菌病害的第二大植物病害,每年都给全球农业造成沉重的经济损失<sup>[1]</sup>。由植物病毒单独或复合侵染引发的病毒病,是烟草生产中最常见且最难防治的主要难题。我国已发现 31 种烟草病毒及其多个分离物,田间以复合侵染为主,导致病害形势愈发复杂和严重<sup>[2]</sup>。近年来,我国烟草病毒病的发生种类与危害范围均呈上升趋势,以烟草花叶病毒(tobacco mosaic virus, TMV)和马铃薯 Y 病毒(potato virus Y, PVY)为主,以辣椒脉斑驳病毒(chilli veinal mottle virus, ChiVMV)和番茄斑萎病毒(tomato spotted wilt virus, TSWV)为辅的病毒病发生普遍且危害严重,田间的复合侵染现象导致病害症状更加复杂,所造成的损失也进一步加剧<sup>[3-4]</sup>。生产上尚无高效药剂,且杀虫剂和抗病毒剂的高频使用容易导致烟叶农残超标。

免疫诱抗剂能够激活植物的分子免疫系统,并调控一系列代谢通路,从而在诱导抗病性的同时,促进植物根、茎、叶的生长,提高叶绿素含量,最终实现抗病与增产的双重功效<sup>[5-7]</sup>。新型免疫诱抗剂的研发与应用是提升作物病毒病绿色防控水平的关键途径。其中,灵菌红素作为一种由沙雷氏菌(*Serratia marcescens*)或链霉菌(*Streptomyces*)等微生物产生的天然次级代谢产物,其分子结构为三吡咯环,展现出巨大的应用潜力。该物质不仅拥有卓越的广谱生物活性,如抗癌、抗菌和抗疟等医药价值,还在环境修复(如铜污染治理)、工业领域(如食品着色剂、太阳能电池光敏剂)展现出多样化应用前景<sup>[8-11]</sup>。作为最早被发现的灵菌红素产生菌,粘质沙雷氏菌亦是该领域研究最为广泛的物种。前期研究表明,灵菌红素可抑制 TMV 的复制并诱导植株系统抗性,该菌株还能分泌一种对 TMV 具有高效钝化活性的碱性金属蛋白酶<sup>[12-13]</sup>。石墨烯独特的纳米结构和表面性质能够通过气孔途径渗透叶片,直接与叶绿体相互作用,增强叶

片光合作用活性,促进下游关键次生代谢物的积累,进而提升植物健康程度并增加作物产量,优化寄主植物的整体营养水平<sup>[14]</sup>。近年来,石墨烯在农业中作为营养调节剂的应用潜力逐渐被发掘,石墨烯在极低施用量(18 g/hm<sup>2</sup>)下可通过叶面喷施显著提升多种作物的光合效率、抗氧化能力及产量,且不影响作物品质<sup>[14]</sup>。同时,地上部光合产物的增加会协同促进根系的生长发育。研究表明,石墨烯可以有效促进种子萌发、诱导抗氧化酶活性、协调碳氮代谢平衡、提高作物光能利用率及促进生长<sup>[15]</sup>。在适宜浓度下,石墨烯可显著促进玉米<sup>[16]</sup>、白榆<sup>[17]</sup>、番茄<sup>[18]</sup>、芦荟<sup>[19]</sup>、藜麦<sup>[20]</sup>及油松<sup>[21]</sup>等多种植物根系与地上部分的生长发育。

提高烟株抗病毒能力是烟草病毒病防控的关键,免疫诱抗技术对烟草病毒病防控具有一定效果,但尚需配合营养协调才能高效提升烟株抗病毒能力。本文旨在系统研究营养调节剂与免疫诱抗剂对 TMV、PVY 的协同控制作用。通过室内生测和田间药效试验,测定对病毒病的抑制效果,为推广应用模式提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

免疫诱抗剂:0.015%灵菌红素水剂(中国农业科学院烟草研究所中试产品)、生防菌纳米核酸药物(中国农业科学院烟草研究所中试产品)、5%氨基寡糖素水剂(登记证号 PD20160015,青岛滨海泰生作物科学有限公司);营养调节剂:生物质石墨烯(FG,中国农业科学院烟草研究所中试产品);抗病毒剂:20%辛菌胺醋酸盐水剂(登记证号 PD20161522,潍坊万胜生物农药有限公司)。20%辛菌胺醋酸盐水剂处理组为阳性对照,清水处理组为阴性对照。

供试烟草:本氏烟(*Nicotiana benthamiana*),NN 基因型粘烟草(*N. glutinosa*),三生 NN 烟(*N. tabacum* var. Samsun NN),NN 基因型烟草中烟 100 和云烟 87。烟草植株置于通风良好的温室中培养,生长环境设置:温度 25℃,光周期 16 h 光照/8 h 黑暗,相对湿度 55%。

供试病毒:在中烟 100 上活体保存的 TMV、在粘烟草上活体保存的 PVY。

### 1.2 药液和病毒接种液的制备

分别用清水配制 0.015%灵菌红素水剂 120 倍液、生防菌纳米核酸药物 120 倍液、5%氨基寡糖素水剂 500 倍液、20%辛菌胺醋酸盐水剂 500 倍液,以及 10、20、50 mg/L 的生物质石墨烯。

分别取 0.5 g TMV 和 1 g PVY 病叶,于研钵中加入液氮充分研磨后,加 40 mL 0.01 mol/L 的 PBS 配制 TMV 和 PVY 接种液。接种前在叶面上均匀撒少许石英砂,接种后 15~30 min 喷施清水冲洗掉多余石英砂。

### 1.3 免疫诱抗剂对 TMV 的钝化作用测定

在 6~7 叶期粘烟草上采用半叶法<sup>[22]</sup>摩擦接种 TMV,即叶片一侧接种处理液,另一侧接种对照液,检测免疫诱抗剂对 TMV 的钝化效果。其中,免疫诱抗剂药液或抗病毒剂药液与病毒接种液等体积混合为处理液,清水与病毒接种液等体积混合为对照液。每处理 15 片叶,重复 3 次。接种 3 d 后,统计 TMV 枯斑数,按式(1)计算药液对 TMV 的抑制效果。

$$\text{抑制效果} = \frac{\text{对照枯斑数} - \text{处理枯斑数}}{\text{对照枯斑数}} \times 100\% \quad (1)$$

### 1.4 免疫诱抗剂对 TMV 的抑制作用测定

在 6~7 叶期三生 NN 烟草上采用先喷淋药液后接种病毒的方法,检测免疫诱抗剂对 TMV

的抑制效果。即在处理组植株上喷淋免疫诱抗剂药液或抗病毒剂药液,在对照组植株上喷淋清水,每株 30 mL。每处理 15 株,重复 3 次。间隔 1 d 连续喷施 3 次。末次喷施后 15 min 摩擦接种 TMV。接种 3 d 后,统计 TMV 枯斑数,按式(1)计算药液对 TMV 的抑制效果。

### 1.5 免疫诱抗剂对 PVY 的钝化作用测定

在 6~7 叶期本氏烟上摩擦接种 PVY,检测免疫诱抗剂对 PVY 的钝化效果。即在处理组植株上接种处理液,在对照组植株上接种对照液。免疫诱抗剂药液或抗病毒剂药液与病毒接种液等体积混合为处理液,清水与病毒接种液等体积混合为对照液。每处理 15 株,重复 3 次。接种 5 d 后,取心叶提取 RNA,反转录为 cDNA,进行 qRT-PCR 检测。以本氏烟 actin 为内参基因,采用相对 CT 法( $2^{-\Delta\Delta CT}$ )计算 PVY 外壳蛋白 mRNA 相对表达量<sup>[13]</sup>,按式(2)计算药液对 PVY 的抑制效果。

$$\text{抑制效果} = \frac{\text{对照组 mRNA 相对表达量} - \text{处理组 mRNA 相对表达量}}{\text{对照组 mRNA 相对表达量}} \times 100\% \quad (2)$$

### 1.6 免疫诱抗剂对 PVY 的抑制作用测定

在 6~7 叶期中烟 100 上采用先喷淋药液后接种病毒的方法,检测免疫诱抗剂对 PVY 的抑制效果。即在处理组植株上喷淋免疫诱抗剂药液或抗病毒剂药液,在对照组植株上喷淋清水,每株 30 mL。每处理 15 株,重复 3 次。间隔 7 d 连续喷施 3 次。末次喷施后 15~30 min 摩擦接种 PVY。接种 14 d 后,按《烟草病虫害分级及调查方法》(GB/T 23222-2008)<sup>[23]</sup>,逐株统计 PVY 病级,按式(3)和式(4)分别计算病情指数和药液对 PVY 的抑制效果。

$$\text{病情指数} = \frac{\sum(\text{各级病株数} \times \text{相对级指数})}{\text{调查总株数} \times 9} \times 100 \quad (3)$$

$$\text{抑制效果} = \frac{\text{对照组病情指数} - \text{处理组病情指数}}{\text{对照组病情指数}} \times 100\% \quad (4)$$

### 1.7 营养调节剂对烟株的促生作用测定

本氏烟假植缓苗后自 6~7 叶期开始叶面喷施营养调节剂,即喷施 10、20、50 mg/L 的生物质石墨烯药液,以喷施清水为空白对照。每处理 15 株,重复 3 次。间隔 2 d 连续喷施 5 次。末次喷施后 2 d 测定烟株的生物量(净重/g、株高/cm)。

### 1.8 营养调节剂与免疫诱抗剂对烟草病毒病的协同控制作用检测

田间药效试验在山东青岛即墨进行,栽植品种为中烟 100。试验面积为 0.2 hm<sup>2</sup>,植烟 15 000~18 000 株/hm<sup>2</sup>。设置 6 个处理(表 1),随机排列,每处理共计 500~600 株。移栽前 1 周和移栽时根系灌施 1 次,50 mL/株;移栽缓苗后伸根期至团棵期叶面喷淋,间隔 7~10 d 连续施用 2 次<sup>[24-26]</sup>。

示范试验在四川凉山会理(0.1 hm<sup>2</sup>)和冕宁(3.3 hm<sup>2</sup>)进行,栽植品种为云烟 87。设置 2 个处理(表 2):营养调节剂+免疫诱抗剂(0.015% 灵菌红素水剂 120 倍液+石墨烯 10 mg/L 液)和清水对照。末次施药 7 d 后,每处理采用随机 5 点取样方法,每点不少于 50 株,调查发病级别<sup>[23]</sup>。按式(5)计算发病率,按式(3)和式(4)分别计算病情指数和抑制效果<sup>[24]</sup>。采用 DPS 进行统计分析。

$$\text{发病率} = \frac{\text{病株数}}{\text{总株数}} \times 100\% \quad (5)$$

表1 田间药效试验设置

处理编号	使用倍数或浓度 * *	试验地点
①	0.015%灵菌红素水剂 120 倍液	即墨
②	生防菌纳米核酸药物 120 倍液	即墨
* ③	5%氨基寡糖素水剂 500 倍液+20%辛菌胺醋酸盐水剂 500 倍液	即墨
* ④	0.015%灵菌红素水剂 120 倍液+石墨烯 10 mg/L 液	即墨
⑤	石墨烯 10 mg/L 液	即墨
⑥	清水对照(与药剂同体积)	即墨

\* 为交替用药; \* \* 为表述方便, 以下图、表、文中所涉药剂的稀释倍数均省略。

表2 示范试验设置

处理编号	使用倍数或浓度	试验地点
* ④	0.015%灵菌红素水剂 120 倍液+石墨烯 10 mg/L 液	会理、冕宁
⑥	清水对照(与药剂同体积)	会理、冕宁

注: \* 为交替用药。

## 2 结果与分析

### 2.1 免疫诱抗剂对 TMV 的钝化效果

粘烟草半叶法接种 TMV, 测定免疫诱抗剂对 TMV 的钝化效果。接种 3 d 后的枯斑抑制效果如图 1 和表 3 所示, 免疫诱抗剂或抗病毒剂处理一侧(左)的枯斑数显著低于清水对照一侧(右)。其中, 生防菌纳米核酸药物、0.015%灵菌红素水剂、5%氨基寡糖素水剂、20%辛菌胺醋酸盐水剂处理一侧的枯斑数分别为 7.07、27.87、10.95、3.81, 均显著低于清水对照处理一侧的枯斑数 60.61、61.64、60.87、61.52, 抑制效果分别为 88.34%、54.79%、82.01%、93.81%。这表明免疫诱抗剂对 TMV 有显著的钝化效果。



每一列上下两叶片为同一处理, 各列叶片之间为不同处理; 同一叶片左半部分为植物免疫诱抗剂或抗病毒剂处理, 同一叶片右半部分为清水对照处理。

图1 不同药剂处理对 TMV 钝化效果的发病表型

表 3 不同药剂处理对 TMV 的体外钝化效果

处理	重复 1			重复 2			重复 3			平均		
	左*	右*	抑制效果/%	左*	右*	抑制效果/%	左*	右*	抑制效果/%	左*	右*	抑制效果/%
生防菌纳米核酸药物	6.14	63.12	90.27	8.21	67.71	87.87	6.85	51.00	86.57	7.07±1.05b	60.61±8.63a	88.34
0.015%灵菌红素水剂	24.00	59.47	59.64	29.45	60.12	51.01	30.15	65.33	53.85	27.87±3.37b	61.64±3.21a	54.79
5%氨基寡糖素水剂	9.42	54.12	82.59	13.16	61.45	78.58	10.27	67.03	84.68	10.95±1.96b	60.87±6.47a	82.01
20%辛菌胺醋酸盐水剂	3.98	59.23	93.28	4.12	70.15	94.13	3.33	55.17	93.96	3.81±0.42b	61.52±7.75a	93.81

\* 为平均枯斑数。不同字母表示差异有统计学意义( $p < 0.05$ )。

## 2.2 免疫诱抗剂对 TMV 的抑制效果

三生 NN 烟草上先施药后接种 TMV, 测定免疫诱抗剂对 TMV 的抑制效果。接种 3 d 后的枯斑抑制效果如图 2 和表 4 所示, 免疫诱抗剂或抗病毒剂处理叶片的枯斑数显著低于清水对照处理叶片的枯斑数。其中, 生防菌纳米核酸药物、0.015%灵菌红素水剂、5%氨基寡糖素水剂、20%辛菌胺醋酸盐水剂处理的枯斑数分别为 65.88、76.39、71.21、60.13, 均显著低于清水对照处理的枯斑数 110.31, 抑制效果分别为 40.28%、30.75%、35.45%、45.49%。这表明免疫诱抗剂对 TMV 有显著的抑制效果。



图 2 不同药剂处理对 TMV 抑制效果的发病表型

表 4 不同药剂处理对 TMV 的抑制效果

处理	枯斑数				抑制效果/%
	重复 1	重复 2	重复 3	平均	
生防菌纳米核酸药物	64.17	65.32	68.16	65.88±2.05c	40.28
0.015%灵菌红素水剂	74.67	76.37	78.14	76.39±1.74b	30.75
5%氨基寡糖素水剂	70.33	74.87	68.44	71.21±3.30bc	35.45
20%辛菌胺醋酸盐水剂	57.33	59.70	63.36	60.13±3.04d	45.49
清水对照	109.70	107.48	113.76	110.31±3.18a	0.00

不同字母表示差异有统计学意义( $p < 0.05$ )。

## 2.3 免疫诱抗剂对 PVY 的钝化效果

本氏烟接种 PVY 并测定免疫诱抗剂对 PVY 的钝化效果。接种 5 d 后对系统花叶的抑制效果如图 3 和图 4 所示, 免疫诱抗剂或抗病毒剂处理的花叶皱缩症状显著轻于清水对照处理。

qRT-PCR 检测显示,相对于清水对照处理的 PVY 外壳蛋白 mRNA 表达量,生防菌纳米核酸药物、0.015%灵菌红素水剂、5%氨基寡糖素水剂、20%辛菌胺醋酸盐水剂处理的 PVY 外壳蛋白 mRNA 相对表达量分别为 0.5913、0.6916、0.6776、0.6266,对 PVY 的抑制效果分别为 40.87%、30.84%、32.24%、37.34%。这表明免疫诱抗剂对 PVY 有显著的钝化效果。

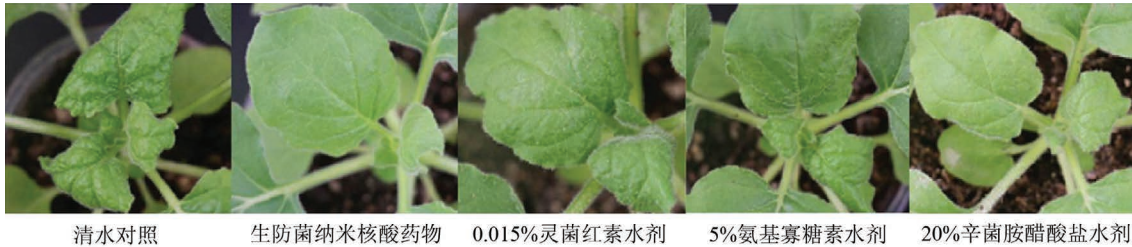
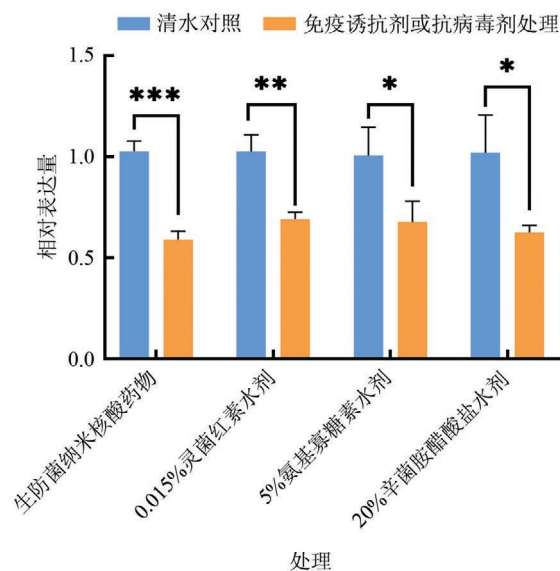


图3 不同药剂处理对 PVY 钝化效果的发病表型



\*,  $p < 0.05$ ; \*\*,  $p < 0.01$ ; \*\*\*,  $p < 0.001$ 。

图4 不同药剂处理对 PVY 的体外钝化效果

#### 2.4 免疫诱抗剂对 PVY 的抑制效果

中烟 100 先施药后接种 PVY 并测定免疫诱抗剂对 PVY 的抑制效果。接种 14 d 后对系统花叶的抑制效果如图 5 和表 5 所示,免疫诱抗剂或抗病毒剂处理的花叶皱缩症状和病情显著轻于清水对照处理。其中,生防菌纳米核酸药物、0.015%灵菌红素水剂、5%氨基寡糖素水剂、20%辛菌胺醋酸盐水剂处理的病情指数分别为 40.25、47.16、47.66、42.22,均显著低于清水对照处理的病情指数 67.41,抑制效果分别为 40.29%、30.04%、29.30%、37.37%。这表明免疫诱抗剂对 PVY 有显著的抑制效果。



生防菌纳米核酸药物 0.015%灵菌红素水剂 清水对照 5%氨基寡糖素水剂 20%辛菌胺醋酸盐水剂

每列上下两植株为同一处理, 各列植株之间为不同处理。

图 5 不同药剂处理对 PVY 抑制效果的发病表型

表 5 不同药剂处理对 PVY 的抑制效果

处理	病情指数				抑制效果/%
	重复 1	重复 2	重复 3	平均	
生防菌纳米核酸药物	43.70	39.26	37.78	40.25±3.08 c	40.29
0.015%灵菌红素水剂	51.11	42.22	48.15	47.16±4.53 b	30.04
5%氨基寡糖素水剂	45.19	52.59	45.19	47.66±4.27 b	29.30
20%辛菌胺醋酸盐水剂	45.19	39.26	42.22	42.22±2.97 bc	37.37
清水对照	65.93	67.41	68.89	67.41±1.48 a	0.00

不同小写字母表示差异有统计学意义( $p < 0.05$ )。

### 2.5 营养调节剂石墨烯对烟株的促生作用

生物质石墨烯按照 10、20、50 mg/L 进行配制, 分别对本氏烟叶面喷施 5 次后, 对烟株的促生效果如图 6 和表 6 所示。与清水对照处理相比, 营养调节剂石墨烯处理的植株净重和株高均显著增加。其中, 10、20、50 mg/L 石墨烯处理的新鲜植株净重分别为 24.03、26.40、28.83 g, 均显著高于清水对照处理净重的 20.03 g, 对烟株净重的提升效果分别为 19.97%、31.80%、43.93%; 地上部株高分别为 20.77、23.47、25.20 cm, 均显著高于清水对照处理株高的 17.07 cm, 对株高的提升效果分别为 21.68%、37.49%、47.63%。这表明营养调节剂生物质石墨烯对烟株有显著的促生效果。



50 mg/L石墨烯 20 mg/L石墨烯 10 mg/L石墨烯 清水对照

图 6 不同浓度生物质石墨烯处理的烟株

表 6 不同浓度生物质石墨烯对烟株的促生效果

处理	净重/g				增效/%	株高/cm				增效/%
	重复 1	重复 2	重复 3	平均		重复 1	重复 2	重复 3	平均	
50 mg/L	28.00	31.00	27.50	28.83±1.89a	43.93	25.30	23.90	26.40	25.20±1.25a	47.63
20 mg/L	26.50	27.30	25.40	26.40±0.95ab	31.80	23.50	22.90	24.00	23.47±0.55ab	37.49
10 mg/L	25.00	23.40	23.70	24.03±0.85b	19.97	20.60	19.70	22.00	20.77±1.16b	21.68
* 0 mg/L	20.70	21.00	18.40	20.03±1.42c	0.00	16.70	17.50	17.00	17.07±0.40c	0.00

\* 为清水对照。不同字母表示差异有统计学意义( $P < 0.05$ )。

## 2.6 营养调节剂与免疫诱抗剂对烟草病毒病的协同控制效果

青岛即墨烟草试验示范区内 2025 年病毒病发病率和病情指数较高, 主要种类为 TMV 和 PVY, 以及零星发生的 TSWV。营养调节剂与免疫诱抗剂末次施药 7 d 后对病毒病的抑制效果如表 7 所示。与清水对照相比, 营养调节剂、免疫诱抗剂各处理的病情指数均显著下降, “营养调节剂+免疫诱抗剂”的协同控制效果最好。其中, 清水对照⑥发病率为 100%, 病情指数为 64.93; “免疫诱抗剂+营养调节剂”处理④(0.015% 灵菌红素水剂 120 倍液+石墨烯 10 mg/L 液)的发病率为 96.88%, 病情指数为 31.87, 对病毒病抑制效果为 50.92%, 与抗病毒剂处理③(5% 氨基寡糖素水剂 500 倍液+20% 辛菌胺醋酸盐水剂 500 倍液)的抑制效果 47.91% 相当。

此外, 会理和冕宁试验示范区内 2025 年主要发生 TMV 和 PVY, 病情显著低于即墨试验区, “营养调节剂+免疫诱抗剂”协同处理对烟草主要病毒病亦表现较好的抑制效果。其中, 会理示范区内, 清水对照⑥发病率为 21.23%, 病情指数为 14.57; “营养调节剂+免疫诱抗剂”处理④发病率为 15.16%, 病情指数为 8.88, 对病毒病抑制效果为 39.05%。冕宁示范区内, 清水对照⑥发病率为 12.70%, 病情指数为 32.33; “营养调节剂+免疫诱抗剂”处理④发病率为 2.40%, 病情指数为 11.64, 对病毒病抑制效果为 64.00%。

表 7 营养调节剂与免疫诱抗剂对烟草病毒病的抑制效果

地点	编号	处理	发病率/%					病情指数					抑制效果/%
			I	II	III	IV	平均	I	II	III	IV	平均	
即墨	①	0.015% 灵菌红素水剂 120 倍液	96.20	97.50	98.72	100	98.11±1.63	27.00	35.56	35.19	46.27	36.00±7.90 b	44.56
	②	生防菌纳米核酸药物 120 倍液	100	100	100	98.75	99.69±0.63	26.67	34.17	37.50	42.64	35.25±6.70 b	45.71
	③*	5% 氨基寡糖素水剂 500 倍液+20% 辛菌胺醋酸盐水剂 500 倍液	95.00	100	100	100	98.75±2.50	31.39	35.00	41.11	27.78	33.82±5.69 b	47.91
	④*	0.015% 灵菌红素水剂 120 倍液+石墨烯 10 mg/L 液	93.75	96.25	97.50	100	96.88±2.60	30.69	33.47	34.44	28.89	31.87±2.55 b	50.92
	⑤	石墨烯 10 mg/L 液	98.75	100	100	100	99.69±0.63	34.03	38.89	40.08	49.17	40.54±6.32 b	37.56
	⑥	清水对照	100	100	100	100	100±0.00	65.83	63.06	56.94	73.89	64.93±7.03 a	0.00
会理	④*	0.015% 灵菌红素水剂 120 倍液+石墨烯 10 mg/L 液	15.16	16.67	13.64		15.16±1.52	8.88	10.19	7.58		8.88±1.31 b	39.05
	⑥	清水对照	23.81	19.05	20.83		21.23±2.41	17.46	13.76	12.50		14.57±2.58 a	0.00
冕宁	④*	0.015% 灵菌红素水剂 120 倍液+石墨烯 10 mg/L 液	0.90	4.60	2.70	1.40	2.40±1.65	10.24	14.60	13.10	8.60	11.64±2.71 b	64.00
	⑥	清水对照	12.40	9.60	15.70	13.10	12.70±2.51	28.80	43.50	23.60	33.40	32.33±8.46 a	0.00

\* 为交替用药。不同字母表示差异有统计学意义( $p < 0.05$ )。

## 3 讨论

烟草病毒病害的防治主要基于病毒的机械或介体传播特性及流行规律, 针对传播途径与流行的关键环节, 采取综合措施控制初侵染源并阻断传播途径, 主要包括选用抗(耐)病品种、改进栽培技术及化学防治 3 个方面。抗病毒剂对病毒病有良好的抑制效果, 8% 宁南霉素水剂和

5%氨基寡糖素水剂稀释800倍叶面喷施,对烟草病毒病具有较好的防控作用<sup>[26]</sup>;0.06%甾烯醇微乳剂900 g/hm<sup>2</sup>叶面喷施,对番茄病毒病有较好的抑制效果<sup>[27]</sup>。实验室现有研究表明,灵菌红素可抑制TMV的复制增殖,又可诱导植株产生系统抗性<sup>[28]</sup>,0.015%灵菌红素水剂在烟草移栽至团棵期施用,可预防病毒病发生<sup>[29]</sup>。此外,10 mg/L石墨烯溶液处理,可提高作物的光能利用率,降低热能耗散,增加能量积累。其中,植物的净光合速率( $P_n$ )、气孔导度( $G_s$ )、胞间二氧化碳浓度( $C_i$ )以及叶绿素含量( $Chl$ )显著提升,光能吸收和转化能力显著提高,进而增加植物生物量的积累,达到促生目的<sup>[14]</sup>。灵菌红素与石墨烯组合施用抗病毒机制在于二者的功能协同。一方面,灵菌红素可激活植物蛋白泛素化水平,促使与病毒侵染复制密切相关的HSP70蛋白家族泛素化降解,激活寄主植物天然免疫活性<sup>[30]</sup>;另一方面,石墨烯提高叶片的光合效率,增加能量积累,增强植物抵抗病原物的能力<sup>[14]</sup>。

本研究的室内生测试验以生防菌纳米核酸药物、0.015%灵菌红素水剂、5%氨基寡糖素水剂处理植株作为处理组,20%辛菌胺醋酸盐水剂处理植株作为阳性对照组,清水处理植株作为阴性对照组。粘烟草半叶法接种TMV后测定免疫诱抗剂对TMV的钝化效果,接种TMV 3 d后,处理组一侧的枯斑密度显著低于对照组一侧,对TMV的抑制效果分别为88.34%、54.79%、82.01%、93.81%;三生NN烟上先施药后接种TMV再测定免疫诱抗剂对TMV的抑制效果,接种3 d后,对TMV的抑制效果分别为40.28%、30.75%、35.45%、45.49%,这表明免疫诱抗剂对TMV有显著的抑制效果。本氏烟接种PVY后测定免疫诱抗剂对PVY的钝化效果,接种5 d后对PVY的抑制效果分别为40.87%、30.84%、32.24%、37.34%;在中烟100先施药后接种PVY再测定免疫诱抗剂对PVY的抑制效果,接种14 d后,处理组的花叶皱缩症状和病情显著轻于对照组,对PVY的抑制效果分别为40.29%、30.04%、29.30%、37.37%,这表明免疫诱抗剂对PVY有显著的抑制效果。营养调节剂生物质石墨烯以10、20、50 mg/L为处理组,清水处理为对照组,在对本氏烟叶片喷施5次后,处理组植株的净重和株高均显著增加,这表明营养调节剂石墨烯对烟株有显著的促生效果。田间药效试验以免疫诱抗剂和营养调节剂的协同处理对病毒病的抑制效果良好,即墨、会理、冕宁示范区的抑制效果分别为50.92%、39.05%、64.00%。上述示范试验均表明,营养调节剂与免疫诱抗剂协同控制烟草病毒病的效果较好,且该组合施用成本不高于375元/hm<sup>2</sup>,具有推广应用前景。

## 4 结论

“免疫诱抗剂+营养调节剂”处理(0.015%灵菌红素水剂120倍液+石墨烯10 mg/L液)对TMV、PVY表现出良好的诱抗效果,并可通过移栽前1周和移栽时根系灌施以及移栽缓苗后伸根期至团棵期叶面喷淋的方式进行施药,有效促进了烟株营养和提高烟株抗性。协同作用效果总体优于单独作用效果,且该组合施用成本低,可在烟草病毒病绿色防控中推广应用。

### 参考文献:

- [1] 肖钦之,邓斌,邹海露,等.植物病毒病生物防治研究进展[J].南方农业,2021,15(34):64-69.
- [2] SCHOLTHOF K G, ADKINS S, CZOSNEK H, et al. Top 10 Plant Viruses in Molecular Plant Pathology[J]. Molecular Plant Pathology, 2011, 12(9): 938-954.
- [3] 沈广材,张富强,郭应成,等.云南省保山市烟草病毒多样性及其危害特征[J].植物医学,2024,3(6):23-31.
- [4] 刘东升,郭梅燕,陈玉国,等.7种农药对烟草病毒病的田间防治效果[J].浙江农业科学,2020,61(3):443-444,447.
- [5] 吕金慧,安娜,陈萍.海岛素在植物中的应用研究进展[J].绿色科技,2017,19(1):15-17,19.
- [6] 邱德文.植物免疫诱抗剂的研究进展与应用前景[J].中国农业科技导报,2014,16(1):39-45.

- [7] 王胤, 郑建秋, 李云龙, 等. 植物免疫诱抗剂氨基寡糖素在北京地区的应用效果与前景分析[J]. 安徽农学通报, 2018, 24(12): 41-43.
- [8] 冯苗, 朱坤福, 田延军, 等. 灵菌红素的研究进展[J]. 中国酿造, 2021, 40(10): 19-28.
- [9] 李洪波, 杜巍, 赵凯, 等. 灵菌红素研究进展[J]. 生物技术通讯, 2011, 22(1): 139-142.
- [10] 刘云飞, 时增增, 朱宇锟, 等. 灵菌红素抗肿瘤与生物防治研究进展[J]. 四川农业科技, 2023(6): 110-113.
- [11] 任燕飞. 纳米灵菌红素的发酵制备及对织物抗菌染色研究[D]. 天津: 天津工业大学, 2018.
- [12] 葛明, 冯佳, 李莹, 等. 粘质沙雷氏菌高产发酵灵菌红素的工艺优化及抗病毒活性[J]. 中国烟草科学, 2022, 43(3): 20-25.
- [13] QIN Y X, WANG J, WANG F L, et al. Purification and Characterization of a Secretory Alkaline Metalloprotease with Highly Potent Antiviral Activity from *Serratia marcescens* Strain S3[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2019, 67(11): 3168-3178.
- [14] JIAO Y B, ZHU X D, YU F B, et al. Upcycling Trace Amounts of Biomass Waste into Flash Graphene Can Boost Crop Yields by More than a Quarter and Offer Climate Benefits[J]. One Earth, 2025, 8(10): 101486.
- [15] 李琼玮, 毕言亮, 闫宁, 等. 氧化石墨烯提高花生种子萌发率和幼苗耐盐性的生理机制 [J]. 中国农业科学, 2025, 58(15): 2993-3006.
- [16] 曹慧, 张晓, 赵建国, 等. 氧化石墨烯对银白杨扦插苗生长的影响 [J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2021, 42(3): 31-36.
- [17] 张晓, 曹慧芬, 赵建国, 等. 石墨烯对白榆扦插苗生长和生理生化特征的影响 [J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2020, 40(4): 97-103.
- [18] GUO X H, ZHAO J G, WANG R R, et al. Effects of Graphene Oxide on Tomato Growth in Different Stages [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2021, 162: 447-455.
- [19] ZHANG X, CAO H F, ZHAO J G, et al. Graphene Oxide Exhibited Positive Effects on the Growth of *Aloe vera* L[J]. Physiology and Molecular Biology of Plants, 2021, 27(4): 815-824.
- [20] 郭绪, 赵建国, 温日宇, 等. 石墨烯对藜麦幼苗根系形态及生物量的影响 [J]. 山西农业科学, 2019, 47(8): 1395-1398.
- [21] ZHANG X, CAO H F, WANG H Y, et al. Effects of Graphene on Morphology, Microstructure and Transcriptional Profiling of *Pinus tabulaeformis* Carr. Roots[J]. PLoS One, 2021, 16(7): e0253812.
- [22] 吴惠惠, 王凤龙, 申莉莉, 等. 一种细菌蛋白 CZ 控制烟草花叶病毒(TMV)的作用机理初探[J]. 植物保护, 2008, 34(3): 74-77.
- [23] 国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会. 烟草病虫害分级及调查方法(GB/T 23222—2008)[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [24] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 烟用农药田间药效试验方法(GB/T 23223—2019)[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
- [25] 王克, 王晶, 吴磊, 等. 不同叶面免疫诱抗剂对烟草生长和抗性的影响 [J]. 植物医学, 2023, 2(1): 67-74.
- [26] 杨苹, 朱冉志, 冯涛, 等. 不同药剂防治烤烟病毒病药效对比试验 [J]. 农业科技通讯, 2022, (3): 142-144.
- [27] 张上林, 毕艳, 张祝华, 等. 0.06% 甾烯醇微乳剂防治番茄病毒病田间药效试验 [J]. 天津农林科技, 2019(5): 25-26.
- [28] 毕建华, 杨金广, 欧阳明安, 等. 黏质沙雷氏菌次生代谢物对 TMV 的抑制机理 [J]. 中国农业科学, 2014, 47(5): 912-922.
- [29] 申莉莉, 安东, 岳梦阳, 等. 0.015% 灵菌红素水剂对烟草主要病毒的抑制作用 [J]. 西南农业学报, 2024, 37(增刊): 211-215.
- [30] GE M, GONG M Y, JIAO Y B, et al. *Serratia marcescens*-S3 Inhibits Potato Virus Y by Activating Ubiquitination of Molecular Chaperone Proteins NbHsc70-2 in *Nicotiana benthamiana* [J]. Microbial Biotechnology, 2022, 15(4): 1178-1188.