

白双琴, 谢秋贤, 刘雪婷, 等. 木薯普通花叶病毒CsCP与MeGRXC3互作分析[J]. 华中农业大学学报, 2026, 45(2): 80-86.  
DOI: 10.13300/j.cnki.hnlkxb.2026.02.009

## 木薯普通花叶病毒CsCP与MeGRXC3互作分析

白双琴<sup>1,2</sup>, 谢秋贤<sup>1,2</sup>, 刘雪婷<sup>2</sup>, 符艳<sup>1,2</sup>, 叶彤<sup>1</sup>, 阮孟斌<sup>2</sup>, 张秀春<sup>2</sup>, 任艳利<sup>1</sup>

1. 伊犁师范大学生物科学与技术学院, 伊宁 835000; 2. 中国热带农业科学院热带生物技术研究所/热带作物生物育种全国重点实验室, 海口 571101

**摘要** 为探究木薯普通花叶病毒(*Cassava common mosaic virus*, CsCMV)外壳蛋白CsCP在病毒侵染中是否通过与木薯谷氧还蛋白MeGRXC3互作协同调控氧化还原稳态, 利用酵母双杂交(yeast two-hybrid, Y2H)、双分子荧光互补(bimolecular fluorescence complementation, BiFC)和亚细胞定位实验, 对CsCP蛋白与MeGRXC3之间的相互作用进行研究。结果显示: MeGRXC3与CsCP在酵母细胞内存在相互作用; MeGRXC3与CsCP在烟草表皮细胞共表达后, 在488 nm激发光下出现绿色荧光, 证实CsCP与MeGRXC3在植物细胞内存在相互作用。亚细胞定位结果显示, CsCP与MeGRXC3在烟草表皮细胞中呈现共定位。以上结果表明, CsCP与MeGRXC3之间存在相互作用。

**关键词** 木薯普通花叶病毒; 木薯普通花叶病毒外壳蛋白(CsCP); 木薯谷氧还蛋白(MeGRXC3); 蛋白互作; 酵母双杂交; 双分子荧光互补

中图分类号 S533 文献标识码 A 文章编号 1000-2421(2026)02-0080-07

木薯(*Manihot esculenta* Crantz)作为大戟科(Euphorbiaceae)木薯属(*Manihot*)的重要热带经济作物, 不仅是全球近十亿人口的膳食能量来源, 更是生物能源产业的核心原料<sup>[1]</sup>。然而, 由马铃薯X病毒属(*Potexvirus*)成员木薯普通花叶病毒(*Cassava common mosaic virus*, CsCMV)引发的病害已对我国木薯产业可持续发展及粮食安全构成严重威胁。该病毒自2019年在我国海南、广西首次报道以来<sup>[2]</sup>, 其发病率呈持续上升趋势, 开展抗病毒分子机制研究已成为保障产业发展的迫切需求。

CsCMV具有马铃薯X病毒属典型分子特征, 为单分体正义单链RNA病毒(ssRNA(+)), 基因组全长6 395个核苷酸, 包含5个开放阅读框, 分别编码RNA依赖性RNA聚合酶(RNA-dependent RNA polymerase, RdRp)、三重基因块(triple gene block, TGB)蛋白及外壳蛋白(capsid protein, CP)等典型功能蛋白<sup>[3-4]</sup>。其中, CP在病毒与宿主互作过程中发挥多重功能, 不仅参与病毒粒子组装和系统移动<sup>[5-6]</sup>, 还能通过干扰宿主防御系统促进病毒侵染。研究表

明, 多种植物病毒CP蛋白通过靶向宿主关键因子调控抗病反应, 如甜菜黑焦病毒(*Beet black scorch virus*, BBSV)CP与14-3-3a互作抑制MAPKKK $\alpha$ 介导的抗病毒免疫<sup>[7]</sup>, 中国小麦花叶病毒(*Chinese wheat mosaic virus*, CWMV)CP19K通过结合GAPC抑制自噬活性<sup>[8]</sup>, 烟草花叶病毒(*Tobacco mosaic virus*, TMV)CP则通过调控水杨酸信号通路促进系统侵染<sup>[9]</sup>。这些发现表明, 解析CsCMV CP的互作网络, 对于阐明其致病机制具有重要意义。

谷氧还蛋白(glutaredoxins, GRXs)作为硫醇氧化还原酶家族成员, 在植物抗逆及免疫调控中发挥重要作用。根据活性位点特征, 植物GRXs可分为CPYC型、CGFS型和CC型3类, 其中CC型GRXs为陆生植物特有, 参与茉莉酸/水杨酸信号转导及病原防御<sup>[10-11]</sup>。拟南芥ROXY19(GRX480)通过调控抗病相关基因表达增强对病原菌抗性<sup>[9]</sup>, 水稻Os-ROXY1/2参与抗病毒免疫反应<sup>[12]</sup>, 辣椒CcGRXS12通过抑制病毒粒子积累减轻病症<sup>[13]</sup>。值得注意的是, 番茄GRXC6(SIGRXC6)被证实通过与病毒蛋

收稿日期: 2025-04-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(32560526); 热带作物生物育种全国重点实验室项目(NKLTBCXTD29); 中国热带农业科学院国家热带农业科学中心科技创新团队项目(CATASCXTD202301); 中央公益性科研院所基本科研业务费专项(1630032025010)

白双琴, E-mail: bsq2889331369@163.com

通信作者: 张秀春, E-mail: zhangxiuchun@itbb.org.cn; 任艳利, E-mail: 864672445@qq.com

白竞争性互作影响黄曲叶病毒侵染进程<sup>[14]</sup>,提示 CC 型 GRXs 在植物-病毒互作中可能具有关键调控作用。

基于上述研究背景,本研究聚焦木薯谷氧还蛋白 MeGRXC3 与 CsCP 的互作机制,综合运用酵母双杂交(Y2H)、双分子荧光互补(BiFC)及亚细胞定位技术,揭示二者在亚细胞水平的相互作用特征,以期解析 CsCMV 致病分子机制提供新视角,并为木薯抗病毒遗传改良奠定理论基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

本氏烟草(*Nicotiana benthamiana*)种子、酵母双杂交表达载体 pGADT7、pGBKT7-Lam、pGADT7-T、pGBKT7-53、pGBKT7-MeGRXC3、植物表达载体 p1300-YNs、YN-CsCP、YC-MeGRXC3、MeGRXC3-RFP、pZP-P19 均为中国热带农业科学院三亚研究院木薯逆境生物学实验室保存。限制性内切酶 BamH I、EcoR I 等工具酶购于宝日生物技术(北京)有限公司;高效无缝克隆试剂盒购于莫纳生物科技有限公司;琼脂糖凝胶 DNA 试剂盒、琼脂糖凝胶回收试剂盒购于上海易汇生物科技有限公司;大肠杆菌 DH5 $\alpha$ 、农杆菌感受态 GV3101 和酵母感受态 AH109 均购于上海唯地生物技术有限公司;LB 培养基购于上海生工生物工程有限公司;质粒小提中量试剂盒和 DNAMarker 购于北京天根生化有限公司;SD/-Trp/-Leu (SD-LW)、SD/-Trp/-Leu/-His/-Ade (SD-LWHA)培养基均购于北京酷来博科技有限公司;卡那霉素(kanamycin)、氨苄青霉素(ampicillin)、利福平(rifampicin)购于北京索宝来科技有限公司;壮观霉素(spectinomycin)购于上海翊圣生物技术有限公司。

### 1.2 酵母表达载体 pGADT7-CsCP 的构建

为构建 CsCMV CP 蛋白结合域酵母表达载体 pGADT7-CsCP,参考已报道的 CP 序列(GenBank: PP265030.1),人工合成两端分别添加酵母表达载体 pGADT7 限制性核酸内切酶 EcoR I 和 BamH I 位点两侧序列的目的片段 Y2H-CsCP。参照无缝克隆构建试剂盒说明书,将合成片段 Y2H-CsCP 与经限制性核酸内切酶 EcoR I 和 BamH I 双酶切后的 pGADT7 载体连接,将连接产物转化至 DH5 $\alpha$  感受态细胞中,涂布于含 50  $\mu$ g/mL 卡那霉素的 LB 平板中,37  $^{\circ}$ C 倒置培养 12 h。随机挑取 3~5 个单菌落,使用

CsCP 特异引物 CsCP-1F 和 CsCP-671R(表 1)进行菌落 PCR 鉴定。PCR 反应体系:引物(10  $\mu$ mol/L)各 1  $\mu$ L, 2 $\times$ Magic Green Taq SuperMix 10  $\mu$ L, 用 ddH $_2$ O 补充至 20  $\mu$ L。PCR 反应条件为:94  $^{\circ}$ C 预变性 4 min;98  $^{\circ}$ C 变性 10 s,55  $^{\circ}$ C 退火 15 s,68  $^{\circ}$ C 延伸 40 s,循环 35 次;72  $^{\circ}$ C 延伸 5 min。挑取 4 个经菌落 PCR 鉴定的阳性克隆,委托北京擎科生物科技股份有限公司进行测序鉴定。

### 1.3 荧光双分子互补表达载体 YN-CsCP 的构建

为构建 CsCP 蛋白含绿色荧光蛋白 N 端序列的 BiFC 载体 YN-CsCP,参照已报道的 CP 序列(GenBank: PP265030.1),人工合成两端分别添加表达载体 p1300-YNs 限制性核酸内切酶 Spe I 和 BamH I 位点两侧序列的目的片段 BiFC-CsCP。参考无缝克隆试剂盒说明书将目的片段 BiFC-CsCP 与经限制性核酸内切酶 Spe I 和 BamH I 进行双酶切后的 p1300-YNs 进行连接反应,连接产物转化大肠杆菌 DH5 $\alpha$  感受态细胞中,并涂布到含有 50  $\mu$ g/mL 卡那霉素的 LB 培养基中,将平板倒置于 37  $^{\circ}$ C 恒温培养箱中培养 12 h。挑取 3~5 个单菌落进行 PCR 检测,使用 CsCP 基因特异引物 CsCP-1F 和 CsCP-671R(表 1)进行扩增。PCR 反应体系与反应条件与本文“1.2”一致,挑取经 PCR 鉴定为阳性的克隆,委托北京擎科生物科技股份有限公司进行测序鉴定。

表 1 所用引物

Table 1 Primers used in this study

引物名称 Primer name	引物序列(5'-3') Primer sequence (5'-3')
CsCP-1F	ATGGCCACCCCACTCAAC
CsCP-671R	CTACTCATCCACCCTGTGA

### 1.4 酵母自激活性鉴定

具体步骤参照 AH109 Chemically Competent Cell 产品说明书。将 pGADT7-T+pGBKT7-53(阳性对照)、pGADT7+pGBKT7-Lam(阴性对照)、pGADT7-CsCP+pGBKT7、pGBKT7-MeGRXC3+pGADT7 分别共转化酵母 AH109 感受态细胞,将转化菌液涂布于 SD-LW 营养缺陷型培养基中,28  $^{\circ}$ C 恒温培养箱倒置培养 2~3 d,经 PCR 鉴定选取阳性克隆,重悬于 0.9% NaCl 溶液进行梯度稀释( $10^0$ 、 $10^{-1}$ 、 $10^{-2}$ 、 $10^{-3}$ ),取 2.5  $\mu$ L 稀释液分别点板于 SD-LW 和 SD-LWHA 培养基,以 pGADT7-T+pGBKT7-53 和 pGADT7-T+pGBKT7-Lam 为基准,将自激活菌液进行同步点板。28  $^{\circ}$ C 恒温培养箱倒置培养并观察菌

落生长情况,得以判断是否具有自激活活性。若菌落仅在SD-LW培养基增殖而SD-LWHA无生长,则判定质粒无自激活活性;若在2种培养基中均观察到生长现象,则可确认该质粒存在自激活活性<sup>[15]</sup>。

### 1.5 酵母双杂交实验

为验证CsCP蛋白是否与寄主MeGRXC3相互作用,参照AH109 Chemically Competent Cell产品说明书进行实验验证。首先将pGADT7-CsCP与pGBKT7-MeGRXC3共转化至感受态酵母细胞中,将菌液涂布到SD-LW培养基中,28℃倒置培养2~3 d。待菌落长出后,随机挑取单克隆菌落分别用激活域载体引物pGADT7-F/R和诱饵载体引物pGBKT7-F/R进行PCR鉴定。鉴定正确的菌落梯度稀释后,各取2.5 μL不同浓度稀释的菌液平行点板于SD-LW培养基和SD-LWHA培养基上。28℃恒温培养箱倒置培养2~3 d,通过比较2种培养基上的菌落生长情况,判断CsCP与MeGRXC3是否互作<sup>[16]</sup>。

### 1.6 荧光双分子互补实验

参照GV3101 Chemically Competent Cell产品说明书,将植物表达载体YC-MeGRXC3、YN-CsCP、p1300-YNs、pPTN-P19转化农杆菌GV3101感受态细胞,转化后的农杆菌涂布含对应抗生素的LB平板,28℃恒温倒置培养2~3 d。挑取单克隆菌落进行菌落PCR鉴定。将阳性克隆接种至含抗生素的500 μL LB液体培养基,28℃200 r/min恒温振荡培养16 h。取50 μL转接至5 mL LB培养基继续扩培,将扩培后的菌液经8 000 r/min离心10 min后弃上清,用注射缓冲液[1 mmol/L MgCl<sub>2</sub>、10 mmol/L 2-吗啉乙磺酸(MES)、0.1 mg/mL 乙酰丁香酮(AS)]重悬并调至OD<sub>600 nm</sub>=0.5,室温静置2~3 h。等体积混合YC-MeGRXC3、pPTN-P19、YN-CsCP或p1300-YNs组合菌液,使用无针头注射器接种3株本氏烟草,每株注射3片叶。暗培养24 h后转光照培养48 h,各取2片叶进行激光共聚焦荧光显微镜(Olympus FV3000;GFP 488 nm,RFP 561 nm)观察并拍照<sup>[17]</sup>。

### 1.7 CsCP与MeGRXC3的亚细胞共定位

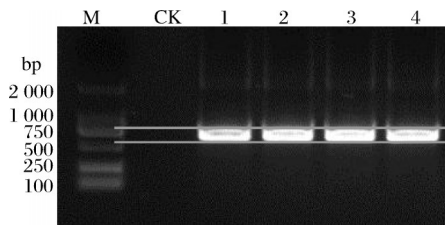
参照农杆菌GV3101介导的瞬时表达体系,将重组质粒CsCP-GFP、MeGRXC3-RFP、pZP-P19分别转化农杆菌感受态。挑取单克隆菌落进行菌落PCR鉴定。将阳性克隆接种至含抗生素的500 μL LB液体培养基,28℃200 r/min恒温振荡培养16 h。取

50 μL转接至5 mL LB培养基继续扩培,将扩培后的菌液在8 000 r/min离心10 min后弃上清,用注射缓冲液重悬并调至OD<sub>600 nm</sub>=0.5,室温静置2~3 h。将CsCP-GFP、MeGRXC3-RFP与pZP-P19三种农杆菌菌液以1:1:1的比例混匀,使用无针头注射器接种3株本氏烟草,每株注射3片叶。暗培养24 h后转光照培养48 h,各取2片叶进行激光共聚焦荧光显微镜(Olympus FV3000;GFP 488 nm,RFP 561 nm)观察并拍照<sup>[18]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 酵母表达载体pGADT7-CsCP的构建

将EcoR I和BamH I双酶切后的pGADT7大片段与合成片段Y2H-CsCP连接,连接产物转化DH5α感受态细胞。使用CsCP特异引物CsCP-1F和CsCP-671R对选取的4个大肠杆菌单克隆菌落进行PCR扩增鉴定。由图1可知,所有菌落扩增产物均呈现约500~750 bp的清晰条带,与CsCP基因预期片段大小相符。将以上4个菌落全部进行测序验证,序列比对均正确。结果表明,目的片段CsCP已成功插入pGADT7载体,酵母诱饵表达载体pGADT7-CsCP构建成功。



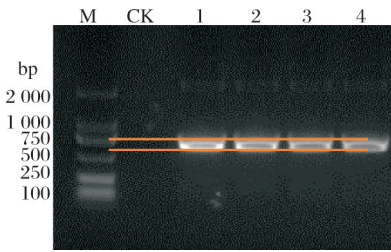
M: DL2000 DNA marker; CK: 空白对照,未加入模板DNA的PCR扩增产物;泳道1~4:大肠杆菌单克隆菌落PCR扩增产物。CK: Blank control, PCR amplification products without template DNA; Lanes 1-4: PCR amplification products of pGADT7-CsCP recombinant colonies.

图1 菌落pGADT7-CsCP扩增产物

Fig. 1 Amplification product of colony pGADT7-CsCP

### 2.2 荧光双分子表达载体YN-CsCP构建

将Spe I和BamH I双酶切的p1300-YNs载体大片段与人工合成片段BiFC-CsCP连接,连接产物转化至大肠杆菌感受态细胞。使用CsCP特异引物CsCP-1F和CsCP-671R对选取的4个大肠杆菌单克隆菌落进行扩增。由图2可知,不同单克隆菌落PCR产物片段大小约为690 bp,与预期目的基因片段大小一致,其中2个阳性克隆的测序序列比对正确,表明荧光双分子表达载体YN-CsCP构建成功。



M: DL2000 DNA marker; CK: 空白对照, 未加入模板 DNA 的 PCR 扩增产物; 泳道 1~4: 大肠杆菌单克隆菌落的 PCR 扩增产物。CK: Blank control, PCR amplification products without template DNA; Lanes 1-4: PCR amplification products of YN-CsCP recombinant colonies.

图2 菌落 YN-CsCP 扩增产物

Fig. 2 Amplification product of colony YN-CsCP

### 2.3 酵母自激活验证

为排除假阳性干扰,通过营养缺陷型培养基验证载体自激活特性。由图3可知,在SD-LW培养基中, pGADT7-CsCP+pGBKT7、pGBKT7-MeGRXC3+pGADT7 共转化体系及 pGADT7-T+pGBKT7-53 (阳性对照)、pGADT7+pGBKT7-Lam (阴性对照) 均呈现正常生长特性;而在SD-LWHA培养基中,仅 pGADT7-T+pGBKT7-53 (阳性对照) 可形成菌落。上述结果证实 pGADT7-CsCP 与 pGBKT7-MeGRXC3 载体均未产生自激活效应,满足后续酵母双杂交互作实验要求。

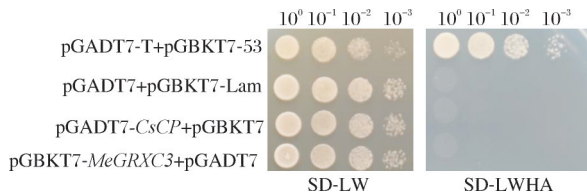


图3 pGBKT7-MeGRXC3 和 pGADT7-CsCP 酵母自激活验证

Fig. 3 Autoactivation verification of pGBKT7-MeGRXC3 and pGADT7-CsCP in yeast

### 2.4 CsCP 与 MeGRXC3 互作的酵母双杂交验证

将 pGADT7-CsCP 与 pGBKT7-MeGRXC3 共转化酵母 AH109 细胞。如图4所示,共转化菌株在SD-LWHA培养基中可形成典型菌落,其生长状态与阳性对照一致,而阴性对照则无法存活,表明 CsCP 与 MeGRXC3 在酵母细胞内存在特异性互作。

### 2.5 荧光双分子互补实验验证 CsCP 与 MeGRXC3 互作

通过酵母双杂交实验初步验证了 CsCP 可与 MeGRXC3 存在相互作用,因此采取 BiFC 实验进

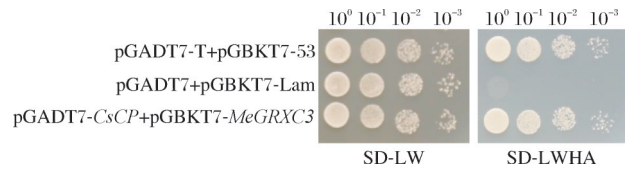


图4 pGBKT7-MeGRXC3 和 pGADT7-CsCP 酵母互作验证

Fig. 4 Yeast two-hybrid interaction between pGBKT7-MeGRXC3 and pGADT7-CsCP

一步验证在植物体内的互作关系。由图5可知, YC-MeGRXC3 与 YN-CsCP 共注射本氏烟草叶片在激发光 488 nm 下,细胞核及细胞核周区域可检测到绿色荧光信号,而对照组 p1300-YNs 与 YC-MeGRXC3 共注射本氏烟草叶片未检测到荧光信号,表明 CsCP 与 MeGRXC3 在植物细胞内具有直接相互作用。

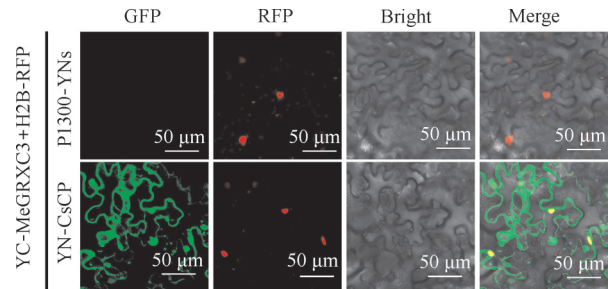


图5 CsCP 与 MeGRXC3 在烟草中的相互作用  
Fig. 5 The interaction between CsCP and MeGRXC3 in *Nicotiana benthamiana*

### 2.6 CsCP 与 MeGRXC3 的亚细胞共定位分析

为探究 CsCP 与 MeGRXC3 在烟草表皮细胞中的共定位情况,通过农杆菌介导的瞬时表达系统,将 MeGRXC3-RFP 和 CsCP-GFP 以及 pZP-P19 共注射本氏烟草表皮细胞。由图6可知, CsCP-GFP 的绿色荧光(488 nm)与 MeGRXC3-RFP 的红色荧光(546 nm)在细胞核及核周区域高度重叠(黄色荧光,红色箭头所示),表明二者在植物细胞中具有空间共定位特征。

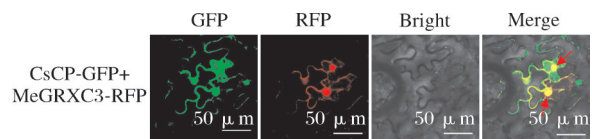


图6 CsCP 与 MeGRXC3 在烟草中的共定位  
Fig. 6 Nuclear localization of CsCP and MeGRXC3 in *Nicotiana benthamiana*

## 3 讨论

CsCMV 作为危害木薯生产的重要病原,其致病

分子机制尚未完全解析<sup>[19]</sup>。本研究通过Y2H、BiFC及亚细胞定位技术,系统证实CsCP与木薯CC型谷氧还蛋白MeGRXC3存在互作关系。研究表明,二者的相互作用在酵母和植物细胞中均稳定存在,且共定位于细胞核及核周区域。值得注意的是,共定位信号在远离细胞核的胞质区域也被观察到。这一发现为揭示CsCMV通过CP靶向宿主氧化还原调控系统实现免疫逃逸提供了关键证据。

植物CC型GRXs通过调控氧化还原稳态参与抗病反应,如拟南芥ROXY19通过抑制JA信号通路负调控抗性<sup>[15]</sup>,辣椒CcGRXS12则通过抑制自噬途径限制病毒增殖<sup>[20]</sup>。本研究推测,CsCP可能通过竞争性结合MeGRXC3干扰其功能:一方面,抑制MeGRXC3活性可能会干扰植株体内ROS的稳态,宿主ROS清除能力下降可能会诱发防御相关ROS异常累积,进而造成细胞损伤;同时ROS信号传导受阻,也会削弱宿主基础免疫应答<sup>[21-22]</sup>;另一方面,CP与MeGRXC3在核周及核内共定位,提示其可能干扰防御相关基因的转录调控,例如通过抑制SA或JA信号通路关键因子来影响抗病毒基因表达<sup>[23]</sup>。此外,二者在胞质中存在互作并呈现共定位,同样具有重要的生物学意义。GRXs是关键的胞质氧化还原调控因子,负责维持胞质蛋白质的氧化还原状态,清除过量的活性氧(ROS),并参与氧化还原信号转导<sup>[12-13]</sup>。CsCP在胞质中与MeGRXC3互作,暗示可能直接干扰其胞质氧化还原调控功能,例如抑制其硫醇还原酶活性或破坏其与胞质靶蛋白(如参与防御反应的酶或信号分子)的结合,从而破坏宿主细胞的氧化还原稳态,削弱基础抗性并可能为病毒复制创造有利的还原环境<sup>[13,24]</sup>。

尽管CP-GRXs互作在*Potexvirus*属中首次报道,但其功能与其他病毒属存在趋同进化特征。例如,CWMV CP19K通过结合GAPC抑制自噬途径<sup>[8]</sup>,BBSV CP则通过阻断MAPKKK $\alpha$ 与14-3-3a互作干扰抗病毒信号<sup>[7]</sup>,均表明病毒CP作为多效性致病因子,可通过劫持宿主关键调控蛋白实现免疫逃逸<sup>[5-10]</sup>。本研究拓展了病毒CP的功能谱,揭示其可能通过靶向GRXs氧化还原系统这一新途径促进侵染。特别是,CsCP与MeGRXC3在核(潜在转录调控)和胞质(氧化还原调控)的多区室互作,提示病毒可能利用单一蛋白(CP)同时干扰宿主在不同细胞区室的关键防御机制,实现更高效的侵染。然而,CsCP-MeGRXC3互作的具体分子机制仍需深入探

究:二者结合是否影响MeGRXC3的酶活性?其对木薯抗氧化系统及防御基因表达的影响如何?特别是互作对胞质和核内不同氧化还原池(redox pools)的具体影响是什么?后续需通过酶活检测、转基因沉默/过表达实验及多组学联用解析其调控网络。

本研究的发现可为抗病育种提供新思路。通过基因编辑技术修饰MeGRXC3的CP结合域,或设计小分子抑制剂阻断该互作,可能增强木薯对CsCMV的抗性。此外,鉴于GRXs在植物抗病中的保守性<sup>[13-15]</sup>,该机制研究可为其他*Potexvirus*病害防控提供跨物种参考。未来需在木薯原生系统中验证互作功能,并结合CRISPR/Cas9技术创制MeGRXC3功能缺失突变体,明确其在CsCMV侵染过程中的具体作用,特别是明确区分其在细胞核与胞质中对病毒侵染的相对贡献,从而为基于宿主-病原互作调控的抗病策略奠定理论基础。

## 参考文献 References

- [1] 陈松笔,蔡杰,安飞飞,等. 木薯育种现状及发展趋势[J]. 中国科学:生命科学,2024,54(10):1833-1842.CHEN S B, CAI J, AN F F, et al. Current status and development trend of cassava breeding[J]. *Scientia sinica (vitae)*, 2024, 54(10): 1833-1842 (in Chinese with English abstract).
- [2] TUO D C, ZHAO G Y, YAN P, et al. First report of *Cassava common mosaic virus* infecting cassava in mainland China[J/OL]. *Plant disease*, 2020, 104(3):997[2025-04-08]. <https://doi.org/10.1094/PDIS-08-19-1585-PDN>.
- [3] LEGG J P, LAVA KUMAR P, MAKESHKUMAR T, et al. Chapter four cassava virus diseases biology, epidemiology, and management[J]. *Advances in virus research*, 2015, 91:85-142.
- [4] WEI Y X, XIE H Q, XU L L, et al. Coat protein of *Cassava common mosaic virus* targets RAV1 and RAV2 transcription factors to subvert immunity in cassava[J]. *Plant physiology*, 2024, 194(2):1218-1232.
- [5] GAO Z Y, ZHANG D L, WANG X L, et al. Coat proteins of necroviruses target 14-3-3a to subvert MAPKKK $\alpha$ -mediated antiviral immunity in plants[J/OL]. *Nature communications*, 2022, 13:716[2025-04-08]. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-28395-5>.
- [6] NIU E B, YE C Z, ZHAO W Y, et al. Coat protein of *Chinese wheat mosaic virus* upregulates and interacts with cytosolic glyceraldehyde-3-phosphate dehydrogenase, a negative regulator of plant autophagy, to promote virus infection[J]. *Journal of integrative plant biology*, 2022, 64(8):1631-1645.
- [7] KEŽAR A, KAVČIČ L, POLÁK M, et al. Structural basis for

- the multitasking nature of the potato virus Y coat protein [J/OL]. *Science advances*, 2019, 5(7): eaaw3808 [2025-04-08]. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaw3808>.
- [8] SHI Y J, YANG X, YANG L L, et al. Interaction between *Cucumber green mottle mosaic virus* MP and CP promotes virus systemic infection [J]. *Molecular plant pathology*, 2023, 24(3): 208-220.
- [9] VENTURUZZI A L, RODRIGUEZ M C, CONTI G, et al. Negative modulation of SA signaling components by the capsid protein of *Tobacco mosaic virus* is required for viral long-distance movement [J]. *The plant journal*, 2021, 106(4): 896-912.
- [10] KAY S. Analysis of gene functions in *Maize chlorotic mottle virus* [J]. *Virus research*, 2016, 222: 71-79.
- [11] FOLIMONOVA S Y, TILSNER J. Hitchhikers, highway tolls and roadworks: the interactions of plant viruses with the phloem [J]. *Current opinion in plant biology*, 2018, 43: 82-88.
- [12] ROUHIER N, LEMAIRE S D, JACQUOT J P. The role of glutathione in photosynthetic organisms: emerging functions for glutaredoxins and glutathionylation [J]. *Annual review of plant biology*, 2008, 59: 143-166.
- [13] JUNG J Y, AHN J H, SCHACHTMAN D P. CC-type glutaredoxins mediate plant response and signaling under nitrate starvation in *Arabidopsis* [J/OL]. *BMC plant biology*, 2018, 18(1): 281 [2025-04-08]. <https://doi.org/10.1186/s12870-018-1512-1>.
- [14] DELORME-HINOUX V, BANGASH S A K, MEYER A J, et al. Nuclear thiol redox systems in plants [J]. *Plant science*, 2016, 243: 84-95.
- [15] 刘琳玉, 赵平娟, 符艳, 等. 木薯花叶病毒 AC4 蛋白与 AtPARN 互作研究 [J]. *热带作物学报*, 2024, 45(1): 197-204. LIU L Y, ZHAO P J, FU Y, et al. The interaction between *Cassava mosaic virus* AC4 protein and AtPARN [J]. *Chinese journal of tropical crops*, 2024, 45(1): 197-204 (in Chinese with English abstract).
- [16] 刘雪婷, 谢秋贤, 刘琳玉, 等. 斯里兰卡木薯花叶病毒 AC2 与拟南芥 SGS3 蛋白互作研究 [J]. *热带作物学报*, 2024, 45(7): 1323-1331. LIU X T, XIE Q X, LIU L Y, et al. Interactions Between Sri Lankan *Cassava mosaic virus* AC2 and At SGS3 Proteins [J]. *Chinese journal of tropical crops*, 2024, 45(7): 1323-1331 (in Chinese with English abstract).
- [17] 李安, 童伟杨, 罗维, 等. 二穗短柄草 *BdFKF1* 基因表达、亚细胞定位及蛋白互作分析 [J]. *分子植物育种*, 2021, 19(20): 6697-6707. LIA, TONG W Y, LUO W, et al. The expression, subcellular localization and protein interaction of *BdFKF1* gene in *Brachypodium distachyon* [J]. *Molecular plant breeding*, 2021, 19(20): 6697-6707 (in Chinese with English abstract).
- [18] 刘晓烽, 林贺, 陈斌卿, 等. 一个假定微管相关蛋白 PEMAP1 的克隆和亚细胞定位 [J]. *分子植物育种*, 2021, 19(11): 3598-3604. LIU X F, LIN H, CHEN B Q, et al. Cloning and subcellular localization of a putative microtubule-associated protein PEMAP1 [J]. *Molecular plant breeding*, 2021, 19(11): 3598-3604 (in Chinese with English abstract).
- [19] BART R S, TAYLOR N J. New opportunities and challenges to engineer disease resistance in cassava, a staple food of African small-holder farmers [J/OL]. *PLoS pathogens*, 2017, 13(5): e1006287 [2025-04-08]. <https://doi.org/10.1371/journal.ppat.1006287>.
- [20] KUMAR R M S, RAMESH S V, SUN Z, et al. *Capsicum chinense* Jacq. derived glutaredoxin (*CcGRXS12*) alters redox status of the cells to confer resistance against *Pepper mild mottle virus* (PMMoV-I) [J/OL]. *Plant cell reports*, 2024, 43(4): 108 [2025-04-08]. <https://doi.org/10.1007/s00299-024-03174-2>.
- [21] HE H H, YUAN K, PAN J M, et al. Shrimp virus regulates ROS dynamics via the Nrf2 pathway to facilitate viral replication [J/OL]. *Advanced science*, 2025, 12(18): 2407695 [2025-04-08]. <https://doi.org/10.1002/advs.202407695>.
- [22] LIU Y J, ZHU F, SHEN Z J, et al. Glutaredoxins and thioredoxin peroxidase involved in defense of emamectin benzoate induced oxidative stress in *Grapholita molesta* [J/OL]. *Pesticide biochemistry and physiology*, 2021, 176: 104881 [2025-04-08]. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2021.104881>.
- [23] JIMÉNEZ A, LÓPEZ-MARTÍNEZ R, MARTÍ M C, et al. The integration of TRX/GRX systems and phytohormonal signalling pathways in plant stress and development [J/OL]. *Plant physiology and biochemistry*, 2024, 207: 108298 [2025-04-08]. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2023.108298>.
- [24] ZHAO W H, ZHOU Y J, ZHOU X P, et al. Host GRXC6 restricts *Tomato yellow leaf curl virus* infection by inhibiting the nuclear export of the V2 protein [J/OL]. *PLoS pathogens*, 2021, 17(8): e1009844 [2025-04-08]. <https://doi.org/10.1371/journal.ppat.1009844>.

## Interaction between *Cassava common mosaic virus* CsCP and MeGRXC3 protein

BAI Shuangqin<sup>1,2</sup>, XIE Qiuxian<sup>1,2</sup>, LIU Xueting<sup>2</sup>, FU Yan<sup>1,2</sup>, YE Tong<sup>1</sup>,  
RUAN Mengbin<sup>2</sup>, ZHANG Xiuchun<sup>2</sup>, REN Yanli<sup>1</sup>

1.College of Biological Science and Technology, Yili Normal University, Yining 835000, China;  
2.Institute of Tropical Biotechnology/National Key Laboratory of Tropical Crop Biological Breeding,  
Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Haikou 571101, China

**Abstract** *Cassava common mosaic virus* (CsCMV) is the primary agent causing cassava mosaic disease. Its capsid protein (CP) plays a crucial role in virus-plant interactions during infection. Glutaredoxins (GRXs) are thiol oxidoreductases with low molecular weight, among which CC-type GRXs are key regulators of resistance to plant disease. Given that CP is a key pathogenicity factor of CsCMV involved in modulating host immune responses, this article investigated whether CsCP interacts with MeGRXC3 to synergistically regulate redox homeostasis and thereby modulate viral infection. The yeast two-hybrid (Y2H), bimolecular fluorescence complementation (BiFC), and subcellular localization assays were used to examine the interaction between CsCP and MeGRXC3. The results showed that there was an interaction between cassava MeGRXC3 and CsCP in yeast cells. Green fluorescence appeared at 488 nm after co-expressing MeGRXC3 and CsCP in *Nicotiana benthamiana* epidermal cells, confirming the interaction between CsCP and MeGRXC3 in plant cells. CsCP and MeGRXC3 exhibited co-localization in *Nicotiana benthamiana* epidermal cells. It is indicated that there is an interaction between CsCP and MeGRXC3. It will lay the groundwork for further elucidating the molecular mechanisms by which CP facilitates the infection of CsCMV.

**Keywords** *Cassava common mosaic virus*; CsCP; MeGRXC3; protein interactions; Y2H; BiFC

(责任编辑:葛晓霞)