

# 抗、感西瓜根系分泌物鉴定及对枯萎病菌生长的影响

张玉锦, 周文丽, 崔梦娇, 耿二康, 苗巧艺, 杨嵩涵, 吕桂云

(河北农业大学园艺学院 河北保定 071000)

**摘要:**为探究西瓜根系分泌物与枯萎病菌互作关系,以2个感病和2个抗病西瓜品种为材料,采用水培法和气相色谱-质谱仪分析抗、感品种在不接种和接种枯萎病菌条件下,根系分泌物的变化及对病原菌生长的影响。结果表明,抗、感西瓜根系分泌物共检测出10类、25种物质。只在抗病品种中鉴定到的物质为十一烷和苯酚,接菌后含量减少;只在感病品种中鉴定到二十烷、硅烷、棕榈酸、癸二酸双酯、2-戊烯二酸、3-羟基-2,4,6-三溴苯甲醛和D-甘露醇,ZJ(S)接菌后二十烷含量增加,2种感病材料接菌后除D-甘露醇含量外均增加,除此外,接菌后其他物质含量均减少。抗、感品种均含有的物质为十八烷酸和邻苯二甲酸二丁酯,接菌后,抗病品种中十八烷酸含量增多,邻苯二甲酸二丁酯含量减少;感病品种中两种物质含量均减少。因此推测十八烷酸可能与抗病有关,D-甘露醇可能与感病有关。抗病品种根系分泌物抑制病原菌菌丝生长、孢子萌发和产孢,未接菌与对照相比,抑制率为37.02%~77.87%、13.51%~40.54%和17.11%~58.14%,并在接菌后抑制作用增强。感病品种根系分泌物促进病原菌菌丝生长、孢子萌发和产孢,未接菌与对照相比,促进率为19.87%~67.11%、21.18%~81.82%和15.38%~72.00%,并在接菌后3~9 d促生作用增强。研究结果为阐明根系分泌物与枯萎病菌互作提供了理论依据。

**关键词:**西瓜;枯萎病;尖孢镰刀菌;根系分泌物

中图分类号:S651

文献标志码:A

文章编号:1673-2871(2022)12-033-07

## Identification of root exudates from resistant and susceptible watermelon varieties and their effects on growth of *Fusarium oxysporum* f. sp. *niveum*

ZHANG Yujin, ZHOU Wenli, CUI Mengjiao, GENG Erkang, MIAO Qiaoyi, YANG Songhan, LÜ Guiyun

(College of Horticulture, Hebei Agricultural University, Baoding 071000, Hebei, China)

**Abstract:** Root exudates of two susceptible varieties and two resistant varieties of watermelons under inoculation of *Fusarium oxysporum* f. sp. *niveum* (*Fon*) and uninoculation were collected to analyze the ingredient and the influence on growth of *Fon*. The results showed that the root exudates of resistant and susceptible watermelon varieties contain 25 substances in 10 categories. Undecane and phenol were detected only in the root exudates of the resistant varieties, which decreased after inoculation of *Fon*. Eicosane, silane, palmitic acid, sebacic acid diesters, 2-pentenoic acid, 3-hydroxy-2,4,6-tribromobenzaldehyde and D-Mannitol were detected only in the root exudates of the susceptible varieties, the content of eicosane in ZJ(S) increased after inoculation, and the content of D-mannitol in the two susceptible materials increased after inoculation, except that the content of other substances decreased after inoculation. Octadecanoic acid and dibutyl phthalate were both detected in the root exudates of the resistant and susceptible varieties. After inoculation, the content of octadecanoic acid in resistant varieties increases and the content of dibutyl phthalate decreases; The contents of both substances in susceptible varieties decreased. Octadecanoic acid may be related to the resistance of watermelon to *Fon*, D-Mannitol may be related to the susceptibility of watermelon to *Fon*. The root exudates from resistant variety inhibited the growth of *Fon*. Compared with control, the inhibitory rates under uninoculation on mycelium growth, spore germination and spore production were 37.02%~77.87%, 13.51%~40.54% and 17.11%~58.14%. The effect was enhanced under inoculation of *Fon*. The root exudates from susceptible variety promoted the *Fon* growth. Compared with control, the promotion rates under uninoculation on mycelium growth, spore germination and spore production were 19.87%~67.11%,

收稿日期:2022-07-30;修回日期:2022-09-16

基金项目:国家自然科学基金项目(31872132);河北省现代农业产业技术体系设施蔬菜创新团队项目(HBCT2021030213);河北省研究生教育质量提升项目(KCJSX2022048)

作者简介:张玉锦,女,在读硕士研究生,从事蔬菜逆境生理与分子生物学研究。E-mail:zyj081227@163.com

通信作者:吕桂云,女,教授,从事蔬菜栽培与植物逆境生理的教学与科研工作。E-mail:yylgy@hebau.edu.cn

21.18%-81.82% and 15.38%-72.00%. The growth promoting effect was enhanced 3~9 days after inoculation. The results provided a basis for clarifying the interaction between root exudates and *Fon*.

**Key words:** Watermelon; Fusarium wilt; *Fusarium oxysporum* f.sp. *niveum*; Root exudates

西瓜枯萎病是由尖孢镰刀菌西瓜专化型(*Fusarium oxysporum* f. sp. *niveum*)寄生所引起的一种土传病害<sup>[1]</sup>,严重降低西瓜的产量及品质,从而导致病田减产,一般减产20%~30%,严重可达50%~60%,甚至绝产<sup>[2]</sup>。已鉴定的生理小种有0、1、2、3,其中生理小种1为我国优势小种<sup>[3]</sup>。目前,西瓜枯萎病常用的防治方法有化学药剂、嫁接、轮作换茬、抗病育种等<sup>[4]</sup>,但化学药剂不能有效防治枯萎病的发生,并且极易造成环境污染;嫁接又操作繁琐且极易降低果实品质;轮作防治容易受到土地资源的限制;抗病育种因抗病资源匮乏、抗病遗传规律复杂,现阶段商品品种中抗病品种还比较少,还未选育出能抗所有生理小种的品种。因此,枯萎病成为西瓜生产中的主要限制因素之一。

根系分泌物是植物与土壤及土传病菌相互作用的桥梁,其不仅可以通过改变土壤环境间接抑制土传病菌,还可以通过自身作用直接抑制土传病菌<sup>[5]</sup>。国内外众多学者对植物根系分泌物进行了研究,发现香蕉抗感品种根系分泌物的酚酸含量在接菌前后发生了改变,接菌后抗病品种特有的对羟基苯甲酸、肉桂酸,以及含量多于感病品种的邻苯二甲酸都对尖孢镰刀菌古巴专化型(*Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*)4号生理小种的生长起抑制作用<sup>[6]</sup>;抗病棉花品种根系分泌物中绿原酸含量多于感病品种,对病原菌的抑制作用较强,耐病品种根系分泌物中绿原酸含量较少,对病原菌先促进后抑制,感病品种根系分泌物中没食子酸含量较高,其对菌丝生长有明显促进作用<sup>[7]</sup>;甜瓜抗感品种根系分泌物中酚酸种类不同,抗病品种根系分泌物中含有邻苯二甲酸二丁酯和苯甲酸苄基酯等,对病原菌有抑制作用,感病品种根系分泌物中含有邻苯二甲酸、丁香酸、苯甲酸等,对病原菌有促进作用<sup>[8]</sup>。在对棉花枯萎病<sup>[9]</sup>与烟草黑胫病<sup>[10]</sup>的研究中,抗病品种根系分泌物抑制病原菌生长,感病品种根系分泌物促进病原菌生长。但关于西瓜抗、感品种间根系分泌物的组分及其与枯萎病菌的相互作用还未见报道。

笔者分别以2个抗、感西瓜品种为材料,采用水培法和气相色谱质谱仪分析,研究不同抗性的西瓜品种在接菌与不接菌条件下,根系分泌物的组成成分及其对枯萎病菌菌丝生长、孢子萌发和产孢量

的影响,进一步明确根系分泌物接菌前后成分的变化及其对枯萎病菌生长的影响,为阐明根系分泌物与枯萎病菌互作提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

西瓜品种: Sugarlee, SL(抗病品种, R); Calhoun Gray, CG(抗病品种, R); 早佳8424, ZJ(感病品种, S); Sugarbaby, SB(感病品种, S)。其中SL, CG, SB由北京市农林科学院蔬菜研究中心许勇研究员惠赠, ZJ从山东寿禾种业有限公司购买。枯萎病菌生理小种1(*Fusarium oxysporum* f. sp. *niveum* race 1)由河北农业大学设施实验室提供,西瓜品种的抗病性已在前期试验中得到验证。

### 1.2 方法

试验于2021年3—8月在河北农业大学创新试验园内进行。将西瓜种子用纱布包好后在1.5%的次氯酸钠溶液中浸泡15 min,消毒后洗去黄色,于28℃黑暗培养箱中催芽后播种。采用50孔穴盘育苗,待西瓜2叶1心时,换至装有21 L营养液(Hoagland)的塑料盒中进行水培,5 d后进行接菌处理。将生理小种1接种到PL培养基中,于摇床培养7 d后,经过菌液过滤、离心,用超纯水溶解孢子沉淀并调整浓度到 $5 \times 10^8$  CFU·mL<sup>-1</sup>。接菌前换新营养液,将孢子液倒入4个接菌处理组中(Inoculation, In),接菌处理组中的孢子浓度最终为 $5 \times 10^6$  CFU·mL<sup>-1</sup>[11],对照的4个处理组不接菌(Uninoculation, Un),加入等量蒸馏水。共8个处理组,每个处理3盒,每盒16株苗。在处理后的3、6、9、12 d取样收集根系分泌物,每组至少取3株,3次重复。从营养液中取出幼苗后冲洗根部,将幼苗放入盛有超纯水的锥形瓶中,超纯水的量需没过根系<sup>[12]</sup>。将锥形瓶在阳光下放置4 h后,倒出溶液并过滤,所得的滤液冷冻干燥至干。由于根系分泌物中所含物质的极性有所不同,因此用丙酮、乙酸乙酯、石油醚、去离子水各3 mL溶解根系分泌物冻干物,将溶解后的液体混合后放置4℃冰箱中。试验共4个品种,每个品种进行接菌和不接菌处理,各4个取样时间点,每个时间点取样3次,共有96管根系分泌物样品。

### 1.3 项目测定及方法

1.3.1 根系分泌物成分分析 将处理后3、6、9、

12 d 收集的溶解液各取 2 mL, 均匀混合后, 用 GC-MS 检测溶解液中的成分。所用仪器由 Agilent 公司提供: 6890 GC/5973 MSD, 色谱柱为 HP-5 MS 毛细管柱。以 He 作为载气,  $1 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$  的流速,  $1 \mu\text{L}$  体积的进样量。程序升温到柱温  $80 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $0.5 \text{ min}$  后以  $15 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$  升温, 到  $230 \text{ }^\circ\text{C}$  时停顿  $0.5 \text{ min}$ , 以  $20 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$  升温, 到  $280 \text{ }^\circ\text{C}$  时停顿  $20 \text{ min}$  后开始测定。扫描范围  $30\sim 600 \text{ m} \cdot \text{z}^{-1}$ ,  $70 \text{ eV}$  轰击电压,  $250 \text{ }^\circ\text{C}$  离子源温, 四极杆温度  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  全扫描方式。

1.3.2 根系分泌物对病原菌菌丝生长和孢子萌发的影响 制备 PDA<sup>[13]</sup> 培养基, 在 PDA 不烫手时加入过滤除菌后的根系分泌物, 体积比为 1:2, 对照组加入等量无菌水, 混匀后倒入培养皿中。培养基凝固后在中央接种大小一致的枯萎病菌菌饼, 试验重复 3 次, 随后观察根系分泌物对菌丝生长的影响; 调整孢子悬浮液的浓度到  $1 \times 10^3 \text{ CFU} \cdot \text{mL}^{-1}$ , 将  $0.1 \text{ mL}$  的孢子悬浮液涂布于 PDA 上, 封口膜密封后, 于  $28 \text{ }^\circ\text{C}$  下倒置培养, 7 d 后计算菌落直径<sup>[14]</sup>并记录平板上的菌落数, 用于观察根系分泌物对孢子萌发的影响。

菌丝生长促进率/% = (处理组菌落面积 - 对照组菌落面积) / (对照组菌落面积 - 菌饼面积) × 100;

菌丝生长抑制率/% = (对照组菌落面积 - 处理组菌落面积) / (对照组菌落面积 - 菌饼面积) × 100;

孢子萌发促进率/% = (处理组菌落数 - 对照组菌落数) / 对照组菌落数 × 100;

孢子萌发抑制率/% = (对照组菌落数 - 处理组菌落数) / 对照组菌落数 × 100。

1.3.3 根系分泌物对病原菌产孢的影响 在 PL 培养基中加入过滤除菌后的根系分泌物, 体积比为 1:2, 对照组加入等量的无菌水, 混匀。将浓度为  $2 \times 10^5 \text{ CFU} \cdot \text{mL}^{-1}$  的孢子悬液  $0.1 \text{ mL}$  加入到 PL 培养基中, 于  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $125 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  的摇床中培养。7 d 后经过菌液过滤、离心, 用去离子水溶解孢子沉淀, 在显微镜下采用血球计数板记录 3 个相邻视眼内的孢子数。

孢子产生促进率/% = (处理组孢子数 - 对照组孢子数) / 对照组孢子数 × 100;

孢子产生抑制率/% = (对照组孢子数 - 处理组孢子数) / 对照组孢子数 × 100。

#### 1.4 数据分析

采用 Microsoft Excel 2016、SPSS 20.0 软件进行数据分析与作图, 采用 Duncan 新复极差检验法进

行多重比较检验差异显著性。

## 2 结果与分析

### 2.1 抗感西瓜品种根系分泌物成分的鉴定

由表 1 可知, 抗、感西瓜品种根系分泌物中共检测出 10 大类, 25 种物质。只在抗病品种根系分泌物中鉴定出的物质为十一烷和苯酚, CG 接菌后十一烷、苯酚分别减少 44.13%、100.00%, SL 接菌后十一烷、苯酚分别减少 89.12%、59.15%。只在 2 个感病品种根系分泌物中共同鉴定出的物质为二十烷、硅烷、棕榈酸、2-戊烯二酸、癸二酸双酯、3-羟基-2, 4, 6-三溴苯甲醛和 D-甘露醇。ZJ 接菌后二十烷和 D-甘露醇含量分别增加 125.93%、88.89%, 其他 5 种物质含量分别减少 100.00%、32.89%、70.00%、43.18%、100.00%; SB 接菌后 D-甘露醇含量增加 485.71%, 其他 6 种物质分别减少 93.10%、100.00%、40.28%、100.00%、77.78%、90.24%。接菌后感病品种 ZJ、SB 中 D-甘露醇含量增加, 推测 D-甘露醇可能与西瓜感病有关。在抗、感品种根系分泌物中鉴定到十八烷酸和邻苯二甲酸二丁酯, 接菌后, 抗病品种 CG、SL 中十八烷酸含量分别增加 79.49%、112.68%, 邻苯二甲酸二丁酯含量分别减少 96.33%、25.93%; 感病品种 ZJ、SB 中十八烷酸含量分别减少 6.00%、37.66%, 邻苯二甲酸二丁酯含量分别减少 19.67%、24.14%。推测十八烷酸可能与西瓜抗病有关, 邻苯二甲酸二丁酯含量改变可能与病菌侵染有关。综上, 十一烷、苯酚、硅烷、棕榈酸、癸二酸双酯、2-戊烯二酸、3-羟基-2, 4, 6-三溴苯甲醛、邻苯二甲酸二丁酯等物质含量的改变可能与枯萎病菌侵染有关, 十八烷酸可能与西瓜对枯萎病的抗性有关, D-甘露醇可能与感病有关。

### 2.2 根系分泌物对病原菌菌丝生长的影响

由表 2 可以看出, 与对照相比, 2 个感病品种未接菌处理 3~12 d 的根系分泌物菌落直径增加了  $0.90\sim 3.04 \text{ cm}$ , 促进率为 19.87%~67.11%, 第 3 天促进作用最强; 接菌后 3~9 d 根系分泌物菌落直径大于未接菌菌落, 促进率提高了 2.88%~12.36%。与对照相比, 抗病品种未接菌处理的 3~12 d 的根系分泌物菌落直径减少了  $1.84\sim 3.87 \text{ cm}$ , 抑制率为 37.02%~77.87%, 第 9 天的抑制作用最强; 接菌后根系分泌物的菌落直径小于未接菌菌落, 抑制率提高了 2.01%~9.26%。感病品种根系分泌物对病原菌菌丝的促进作用在前期较为明显, 抗

表1 西瓜根系分泌物的组成成分

成分	含量/%								
	CG(R)		SL(R)		ZJ(S)		SB(S)		
	Un(CK)	In	Un(CK)	In	Un(CK)	In	Un(CK)	In	
1 烷类	二十烷					0.27	0.61 ↑	0.29	0.02 ↓
	硅烷					1.11	0.00 ↓	0.79	0.00 ↓
	丙烷	1.99	0.18 ↓			2.87	0.58 ↓	0.47	0.60 ↑
	癸烷	0.27	0.02 ↓					0.21	0.18 ↓
	孕烷-20-酮	0.59	0.00 ↓	1.07 ↑		1.21	1.10 ↓		
	十一烷	1.79	1.00 ↓	4.41	0.48 ↓				
2 酸类	十八烷酸	0.39	0.70 ↑	0.71	1.51 ↑	2.00	1.88 ↓	2.31	1.44 ↓
	棕榈酸					2.98	2.00 ↓	2.88	1.72 ↓
	2-戊烯二酸					0.20	0.06 ↓	0.93	0.00 ↓
	二羟基丁酸			0.80 ↑		0.07	0.30 ↑		
3 酯类	邻苯二甲酸二丁酯	6.00	0.22 ↓	1.35	1.00 ↓	0.61	0.49 ↓	0.58	0.44 ↓
	癸二酸双酯					0.88	0.50 ↓	1.44	0.32 ↓
	水杨酸甲酯					0.30	0.27 ↓		
	十六烷酸丙基酯	1.47	0.78 ↓			0.50	0.11 ↓		0.31 ↑
	苯甲酸甲酯							0.39	0.60 ↑
4 酚类	苯酚	0.40	0.00 ↓	0.71	0.29 ↓				
5 糖类	1,6-脱水-β-D-葡萄糖	0.30	0.00 ↓		0.38 ↑			0.04	0.22 ↑
	吡喃葡萄糖							0.05	0.87 ↑
6 苯类	晕苯, 甲基				2.25 ↑	2.92	2.41 ↓	3.54	2.36 ↓
	2-苯基呋喃并[3',2':5,6][1,2,4]三嗪并[2,3-α]苯并咪唑							0.29	0.40 ↑
	3H,3'H,3"H-三茛[1,2-A:2',1'-C:1",2"-E]苯			1.40 ↑		1.09	1.27 ↑	1.04	1.30 ↑
7 醛类	3-羟基-2,4,6-三溴苯甲醛					0.28	0.00 ↓	0.41	0.04 ↓
8 醇类	D-甘露醇					0.18	0.34 ↑	0.07	0.41 ↑
9 萘类	2-乙酰基-6-甲氧基萘			0.54	0.27 ↓		0.24 ↑	0.30	0.27 ↓
10 酮类	2-吡咯烷酮	0.59	0.00 ↓					0.14	0.40 ↑

注: ↑表示接菌后与不接菌对照相比物质含量增加, ↓表示物质含量减少。

表2 根系分泌物对枯萎病菌菌丝生长的影响

处理	SB(S)		ZJ(S)		CG(R)		SL(R)		
	菌落直径/cm	促进率/%	菌落直径/cm	促进率/%	菌落直径/cm	抑制率/%	菌落直径/cm	抑制率/%	
无菌水(CK)	5.00±0.058 h		5.03±0.010 g		5.93±0.006 a		5.47±0.012 a		
Un	3 d	8.00±0.020 b	66.67±0.064 a	8.07±0.058 b	67.11±0.009 b	3.73±0.000 c	40.52±0.011 de	3.07±0.006 c	48.09±0.010 d
	6 d	7.77±0.058 e	61.56±0.032 ab	7.77±0.000 c	60.52±0.009 d	3.40±0.015 d	46.59±0.011 bc	2.53±0.006 d	59.15±0.012 bc
	9 d	7.30±0.058 e	51.11±0.013 c	6.47±0.058 e	31.79±0.013 f	2.90±0.012 f	55.80±0.012 a	1.60±0.010 f	77.87±0.012 a
	12 d	6.63±0.079 f	36.00±0.017 d	5.93±0.058 f	19.87±0.004 g	3.90±0.006 b	37.38±0.010 e	3.63±0.021 b	37.02±0.014 e
In	3 d	8.13±0.058 a	69.56±0.013 a	8.30±0.017 a	72.19±0.013 a	3.53±0.010 d	44.20±0.014 cd	2.63±0.006 d	57.14±0.013 c
	6 d	7.90±0.058 c	64.44±0.013 a	7.93±0.058 bc	63.80±0.015 c	3.20±0.006 e	50.28±0.021 b	2.30±0.010 e	63.78±0.035 b
	9 d	7.43±0.058 e	54.00±0.007 bc	7.03±0.053 d	44.15±0.004 e	2.73±0.002 g	58.93±0.015 a	1.50±0.010 f	79.88±0.018 a
	12 d	5.67±0.000 g	14.37±0.022 e	5.30±0.000 g	5.96±0.013 h	3.70±0.006 c	41.07±0.022 de	3.17±0.015 c	46.28±0.015 d

注: 同列后不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。下同。

病品种的抑制作用在中期较为明显。

### 2.3 根系分泌物对病原菌孢子萌发的影响

由表3可以看出,与对照相比,感病品种未接菌处理3~12 d的根系分泌物菌落数增加了2.00~6.00个,促进率为21.18%~81.82%,第12天的促进

作用最强;接菌后3~9 d根系分泌物的菌落数多于未接菌菌落,促进率提高了4.55%~22.73%。与对照相比,抗病品种未接菌处理3~12 d的根系分泌物菌落数减少了1.66~6.00个,抑制率为13.51%~40.54%,第12 d的抑制作用最强。接菌后根系分泌



表3 根系分泌物对枯萎病菌孢子萌发的影响

处理	SB(S)		ZJ(S)		CG(R)		SL(R)		
	菌落数/个	促进率/%	菌落数/个	促进率/%	菌落数/个	抑制率/%	菌落数/个	抑制率/%	
无菌水(CK)	7.33±0.015 c		11.00±0.100 f		16.67±0.153 a		12.33±0.103 a		
Un	3 d	9.33±0.050 abc	27.27±0.091 g	13.33±0.098 cdef	21.18±0.080 f	14.33±0.052 b	14.00±0.095 f	10.67±0.073 ab	13.51±0.082 e
	6 d	10.00±0.050 ab	36.36±0.079 e	15.67±0.153 abcd	42.42±0.053 d	13.00±0.097 bc	22.00±0.084 e	8.67±0.085 bc	29.73±0.103 d
	9 d	13.00±0.051 ab	77.35±0.136 c	16.00±0.100 abc	45.45±0.030 c	12.00±0.102 d	28.01±0.035 c	7.67±0.015 c	37.84±0.075 bc
	12 d	13.33±0.041 ab	81.82±0.236 b	16.33±0.158 ab	48.48±0.080 b	10.67±0.083 e	36.00±0.040 b	7.33±0.061 c	40.54±0.080 b
In	3 d	9.67±0.080 abc	31.82±0.046 f	14.33±0.103 bcde	30.30±0.034 e	12.67±0.077 cd	24.00±0.059 d	9.00±0.070 bc	27.03±0.052 d
	6 d	11.67±0.080 abc	59.09±0.095 d	16.33±0.088 ab	48.48±0.109 b	9.67±0.013 e	42.00±0.101 a	8.33±0.043 bc	32.43±0.034 cd
	9 d	14.00±0.061 a	90.91±0.089 a	17.67±0.108 a	60.61±0.098 a	9.33±0.043 e	44.00±0.110 a	5.00±0.004 d	59.46±0.110 a
	12 d	8.00±0.070 bc	9.09±0.079 h	12.00±0.100 def	9.09±0.023 g	10.33±0.053 de	38.00±0.082 b	7.00±0.015 c	43.22±0.107 b

表4 根系分泌物对枯萎病菌产孢量的影响

处理	SB(S)		ZJ(S)		CG(R)		SL(R)		
	孢子数/个	促进率/%	孢子数/个	促进率/%	孢子数/个	抑制率/%	孢子数/个	抑制率/%	
无菌水(CK)	8.33±0.058 d		8.67±0.043 c		13.67±0.053 a		14.33±0.108 a		
Un	3 d	9.67±0.053 d	16.00±0.104 f	10.00±0.073 bc	15.38±0.102 g	11.33±0.058 ab	17.11±0.075 f	9.67±0.075 bc	32.56±0.139 e
	6 d	10.00±0.084 cd	20.00±0.142 e	10.67±0.083 bc	23.07±0.098 f	10.67±0.082 abcd	21.95±0.094 d	7.33±0.054 cd	48.84±0.215 c
	9 d	12.67±0.075 abc	52.00±0.250 c	11.67±0.105 abc	34.62±0.087 d	9.33±0.015 bcde	26.36±0.152 c	7.00±0.010 cd	51.16±0.301 b
	12 d	14.33±0.108 a	72.00±0.300 a	14.67±0.123 a	69.23±0.181 a	8.33±0.073 e	39.06±0.160 a	6.00±0.045 d	58.14±0.421 a
In	3 d	11.00±0.100 bcd	32.00±0.087 d	11.00±0.080 abc	26.92±0.095 e	11.00±0.101 abc	19.53±0.097 e	8.67±0.063 cd	39.53±0.200 d
	6 d	13.67±0.113 ab	64.00±0.184 b	13.33±0.078 ab	53.85±0.324 b	8.67±0.023 de	36.58±0.200 b	6.67±0.053 d	53.49±0.164 ab
	9 d	14.00±0.094 a	68.00±0.201 a	13.00±0.100 ab	50.00±0.268 c	9.00±0.061 cde	34.16±0.134 b	6.33±0.075 d	55.81±0.152 ab
	12 d	9.33±0.058 d	12.00±0.086 f	9.67±0.051 bc	11.54±0.056 h	7.67±0.058 e	43.89±0.218 a	5.67±0.008 d	60.47±0.302 a

物的菌落数少于未接菌菌落,抑制率提高了 2.00%~21.62%。

#### 2.4 根系分泌物对病原菌产孢量的影响

由表4可以看出,与对照相比,感病品种未接菌处理3~12 d的根系分泌物孢子数增加了1.33~6.00个,促进率为15.38%~72.00%,第12天的促进作用最强;接菌后3~9 d根系分泌物的孢子数多于未接菌孢子数,促进率提高了11.54%~44.00%。与对照相比,抗病品种未接菌处理3~12 d的根系分泌物孢子数减少了2.34~8.33个,抑制率为17.11%~58.14%,第12天的抑制作用最强;接菌后根系分泌物的孢子数少于未接菌孢子数,抑制率提高了2.33%~14.63%。

### 3 讨论与结论

不同抗性作物品种根系分泌物的组成成分存在差异并且在病原菌侵染下会发生改变,目前发现根系分泌物的组成成分主要有糖类、苯类、酚类、酯类和酸类等<sup>[15-17]</sup>。在对西瓜丛枝菌根真菌研究中发现,感病品种接种枯萎病菌后,丛枝菌根真菌降低了根系分泌物中琥珀酸和草酸含量,提高了香豆酸和苹果酸的含量,植株发病减轻,抗性增强<sup>[18]</sup>。抗枯

萎病香蕉品种根系分泌物中乙酸和脯氨酸的含量高于感病品种<sup>[19]</sup>。抗枯萎病草莓品种根系分泌物中邻苯二甲酸二丁酯含量高于感病品种,阿魏酸、丁香酸等含量低于感病品种<sup>[20]</sup>。在对烟草黑胫病的研究中发现,抗病品种接菌后根系分泌物中水杨酸、阿魏酸等含量高于感病品种,酒石酸、月桂酸等含量低于感病品种<sup>[21]</sup>,其通过抑制病原菌生长增强抗病性。赵媛媛<sup>[22]</sup>研究发现,接菌后辣椒根系分泌物中正十八烷的含量与抗病性呈正相关。汤丽川等<sup>[23]</sup>发现,十八碳脂肪酸含量的提高可以抑制大豆种子传播的茎溃疡病菌的定殖。黄玉茜等<sup>[24]</sup>发现,高浓度的花生根系分泌物中,D-甘露醇可作为碳源影响土壤微生物群落结构多样性,从而导致连作障碍。前人研究发现,根系分泌物中酚类、酸类以及酯类可能与抗病有关,部分酸类可能与感病有关,其可以通过自身作用直接抑制病原菌生长,也可以为病原菌提供碳源促进其生长<sup>[25]</sup>。在笔者的研究中,抗、感品种根系分泌物组成成分存在差异并且接菌前后发生了改变,其中十八烷酸在抗、感品种根系分泌物中均鉴定到,但接菌后抗病品种CG和SL中十八烷酸的含量增加,感病品种ZJ和SB中含量减少,可能与西瓜抗病有关,D-甘露醇仅在感病品种

根系分泌物中鉴定到并且在接菌后含量增加,可能与西瓜枯萎病感病有关。关于十八烷酸与D-甘露醇在西瓜枯萎病抗感反应中的作用还有待进一步研究。

抗、感品种的根系分泌物对病原菌生长产生的影响不同。Zhang等<sup>[10]</sup>研究发现,在烟草黑胫病中,抗病品种根系分泌物在接菌前后对菌落生长和孢子萌发的抑制率分别为30.00%~46.00%和25.00%~40.00%,感病品种根系分泌物未接菌时对病原菌菌落生长的促进率为7.00%~14.00%,而接菌后有轻微的抑制作用(<5.00%),但对孢子萌发没有影响。娄晓平等<sup>[26]</sup>发现,烟草黑胫病中抗病品种根系分泌物对病原菌菌丝生长的抑制率为5.93%~20.78%;感病品种根系分泌物对病原菌菌丝生长的促进率为2.15%~16.47%。李巍等<sup>[20]</sup>在草莓枯萎病研究中发现,抗病品种根系分泌物对菌丝生长和孢子萌发的抑制率为18.20%~21.40%,感病品种根系分泌物对菌丝生长和孢子萌发的促进率为22.10%~34.50%。抗病品种根系分泌物主要对病原菌菌丝生长、孢子萌发起抑制作用,感病品种根系分泌物起促进作用,并且在棉花黄萎病<sup>[27]</sup>、烟草青枯病<sup>[28]</sup>、番茄青枯病<sup>[29]</sup>上也有类似结论。在笔者的研究中,抗病品种根系分泌物抑制病原菌菌丝生长、孢子萌发与产孢,未接菌抑制率分别为37.02%~77.87%、13.51%~40.54%和17.11%~58.14%,并在接菌后抑制作用增强;感病品种根系分泌物促进病原菌菌丝生长、孢子萌发与产孢,未接菌促进率分别为19.87%~67.11%、21.18%~81.82%和15.38%~72.00%,并在接菌后3~9 d促进作用增强。接菌后前期根系分泌物对菌丝生长影响较大,后期对孢子萌发与产孢影响较大。

综上,在笔者的试验中西瓜抗感品种根系分泌物中共检测出10大类、25种物质,十八烷酸可能与西瓜抗病有关,D-甘露醇可能与西瓜感病有关;抗病品种根系分泌物抑制病原菌菌丝生长、孢子萌发与产孢;感病品种根系分泌物促进病原菌菌丝生长、孢子萌发与产孢,并在接菌后抑制或促进作用增强。

### 参考文献

- [1] PETKAR A, JI P S. Infection courts in watermelon plants leading to seed infestation by *Fusarium oxysporum* f. sp. *niveum*[J]. *Phytopathology*, 2017, 107(7): 828-833.
- [2] 吕湘江,李清萍,范淑英. 西瓜枯萎病综合防治研究进展[J]. *北方园艺*, 2015(6): 187-190.
- [3] ZHOU X G, EVERTS K L, BRUTON B D. Race 3, a new and highly virulent race of *Fusarium oxysporum* f. sp. *niveum* causing Fusarium wilt in watermelon[J]. *Plant Disease*, 2010, 94(1): 92-98.
- [4] RAHMAN M Z, AHMAD K, BASHIR K A, et al. Biology, diversity, detection and management of *Fusarium oxysporum* f. sp. *niveum* causing vascular wilt disease of watermelon (*Citrus lanatus*): A review[J]. *Agronomy-Basel*, 2021, 11(7): 1310.
- [5] 任改弟,王光飞,马艳. 根系分泌物与土传病害的关系研究进展[J]. *土壤*, 2021, 53(2): 229-235.
- [6] 翟子翔,李得铭,邓涛,等. 不同抗性香蕉品种根系分泌差异酚酸对尖孢镰刀菌的抑制[J]. *园艺学报*, 2020, 47(11): 2207-2214.
- [7] 郑倩,李俊华,危常州,等. 不同抗性棉花品种根系分泌物及酚酸类物质对黄萎病菌的影响[J]. *棉花学报*, 2012, 24(4): 363-369.
- [8] 刘畅. 甜瓜不同抗性品种根系分泌物对枯萎病菌的化感作用研究[D]. 沈阳:沈阳农业大学, 2018.
- [9] 任志刚,盖琼辉. 抗感棉花品种根系分泌物及其对枯萎菌的影响[J]. *西北农业学报*, 2016, 25(5): 702-706.
- [10] ZHANG C S, ZHENG Y F, PENG L J, et al. Rootstock-scion interaction affects the composition and pathogen inhibitory activity of tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) root exudates[J]. *Plants (Basel)*, 2020, 9(12): 1652.
- [11] LU G Y, GUO S G, ZHANG H Y, et al. Colonization of Fusarium wilt-resistant and susceptible watermelon roots by a green-fluorescent-protein-tagged isolate of *Fusarium oxysporum* f. sp. *niveum*[J]. *Journal of Phytopathology*, 2014, 162(4): 228-237.
- [12] 张新星,李睿琦,伊章华,等. 黄瓜次生代谢产物抑制反硝化作用的研究[J]. *河北农业大学学报*, 2022, 45(2): 38-43.
- [13] 马璐璐,闫翠梅,冯彩莲,等. 玉米秸秆还田对假禾谷镰刀菌及小麦茎基腐病化感效应的模拟研究[J]. *河北农业大学学报*, 2019, 42(3): 38-44.
- [14] 杜佳燕,武菊平,王婧瑶,等. 木醋液对辣椒种子萌发及其抑菌作用的影响研究[J]. *河北农业大学学报*, 2021, 44(1): 91-96.
- [15] ZHANG Y, MA S Y, LU X, et al. Isolation, identification and biological effects of allelochemicals from the root exudates of pea [J]. *Plant Physiology Journal*, 2018, 54(3): 500-508.
- [16] VIVES-PERIS V, DE OLLAS C, GOMEZ-CADENAS A, et al. Root exudates: from plant to rhizosphere and beyond[J]. *Plant Cell Reports*, 2020, 39(1): 3-17.
- [17] 刘婷. 番茄根际土壤代谢特征及其对青枯菌入侵的影响[D]. 南京:南京农业大学, 2020.
- [18] REN L X, ZHANG N, WU P, et al. Arbuscular mycorrhizal colonization alleviates fusarium wilt in watermelon and modulates the composition of root exudates[J]. *Plant Growth Regulation*, 2015, 77(1): 77-85.
- [19] 甘林,代玉立,杨秀娟,等. 香蕉抗(感)病品种根系分泌物对枯萎病菌和枯草芽孢杆菌的生物效应[J]. *应用生态学报*, 2020,

- 31(7):2279-2286.
- [20] 李巍,梁中午,冯彩莲,等.草莓连作障碍抗、感品种根系分泌物对尖孢镰刀菌的抑制作用及其成分分析[C]//中国园艺学会2018年学术年会论文摘要集,2018:2570.
- [21] ZHANG C S, FENG C, ZHENG Y F, et al. Root exudates metabolic profiling suggests distinct defense mechanisms between resistant and susceptible tobacco cultivars against black shank disease[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2020, 11: 559775.
- [22] 赵媛媛.四川辣椒疫霉菌分离、鉴定及辣椒根系分泌物与辣椒疫病抗性的关系[D].四川雅安:四川农业大学,2017.
- [23] 汤丽川,赵永亮,毛龙,等.植物脂肪酸及其衍生物防御信号研究进展[J].河南师范大学学报(自然科学版),2012,40(2): 127-131.
- [24] 黄玉茜,韩晓日,杨劲峰,等.花生根系分泌物对土壤微生物学特性及群落功能多样性的影响[J].沈阳农业大学学报,2015,46(1):48-54.
- [25] 李石力.有机酸类根系分泌物影响烟草青枯病发生的机制研究[D].重庆:西南大学,2017.
- [26] 娄晓平,赵炯平,王海波,等.烟草根系分泌物对黑胫病菌菌丝生长的影响[J].烟草科技,2019,52(6):30-34.
- [27] 张新宇.棉花不同抗性品种根系分泌物对黄萎病菌(*V. dahliae*)基因表达的影响[D].新疆石河子:石河子大学,2020.
- [28] 姚云静,刘艳霞,李想,等.烟草根系分泌物趋化微生物的分离鉴定及其对青枯菌的拮抗作用[J].分子植物育种,2021,19(22):7510-7518.
- [29] 刘斯晗.嫁接番茄根系分泌物活性物质鉴定及抗青枯病机理研究[D].南宁:广西大学,2021.