土传病害抗感品种根系分泌物化感作用研究进展

班胜聪[1,2] 刘 娜[1,2] 张婼涵[1] 吴佳豪[1] 王 晓[1] 高 远[1]
常园园[1] 王树桐[1] 齐永志[1,2*] 甄文超[2,3*]

（1. 河北农业大学植物保护学院，保定 071001；2. 农业农村部华北节水农业重点实验室，河北 保定 071001；
3. 河北农业大学农学院，保定 071001）

摘要：根系分泌物可通过直接或间接化感作用调控土传病害的发生程度。该文基于化感作用基本特征与影响因素，系统综述土传病害抗感品种根系分泌物的组分差异，阐明其对病原物繁殖、病害发生和根际微生物种群的调控作用。抗病品种根系富集酯类、酚酸类和皂苷类等物质及肉桂酸、阿魏酸甲酯和大豆皂苷I等活性成分，这些物质和活性成分能够有效抑制土传病原物增殖，提高根际芽胞杆菌属*Bacillus*等有益菌群丰度，重塑健康根际微生态，降低病害发生风险。感病品种则大量分泌有机酸类、糖类和氨基酸类物质，为病原物定殖和繁殖提供营养基质，加速土传病害的传播与流行。未来研究需系统探究分泌物收集方式对组分检测的影响，精准鉴定核心抑病化感物质并解析其分子抗性机制，揭示根系分泌物与根际微生物的互作调控网络，同时拓展核磁共振等新技术在化感作用方面的应用范围，构建根际化学防御靶向育种体系，以期为完善作物抗性理论体系、推进抗病品种精准选育提供可靠的理论依据与技术支撑。

关键词：抗病品种；化感作用；根系分泌物；抗性机制；土传病害

Research progress in allelopathy of root exudates from resistant and susceptible crop varieties to soil-borne diseases

Ban Shengcong[1,2] Liu Na[1,2] Zhang Ruohan[1] Wu Jiahao[1] Wang Xiao[1] Gao Yuan[1]
Chang Yuanyuan[1] Wang Shutong[1] Qi Yongzhi[1,2*] Zhen Wenchao[2,3*]

（1. College of Plant Protection, Hebei Agricultural University, Baoding 071001, Hebei Province, China;
2. Key Laboratory of North China Water-Saving Agriculture, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Baoding 071001, Hebei Province, China; 3. College of Agriculture, Hebei Agricultural University, Baoding 071001, Hebei Province, China）

Abstract: Root exudates can regulate the incidence of soil-borne diseases via direct or indirect allelopathic effects. Based on the fundamental characteristics and influencing factors of allelopathy, this paper systematically reviews the compositional differences in root exudates between disease-resistant and susceptible crop varieties, and elaborated their regulatory effects on pathogen propagation, disease development and rhizosphere microbial communities. The rhizosphere of resistant varieties accumulates abundant esters, phenolic acids, saponins and other bioactive compounds including cinnamic acid, methyl ferulate and soyasaponin I. These substances effectively suppress the proliferation of soil-borne pathogens, elevate the relative abundance of beneficial rhizospheric microorganisms such as *Bacillus*, reconstruct a healthy rhizosphere microecosystem, and thereby reduce crop disease risks.

基金项目：国家重点研发计划项目(2023YFD2301503)
* 通信作者（Authors for correspondence），E-mail：qiyongzhi@hebau.edu.cn，wenchao@hebau.edu.cn
收稿日期：2025-12-18

In contrast, susceptible varieties secrete massive amounts of organic acids, saccharides and amino acids, which serve as nutritional substrates for pathogen colonization and reproduction, accelerating the spread and epidemics of soil-borne diseases. Future research should systematically investigate how collection methods affect the detection of root exudate components, accurately identify core disease-suppressive allelochemicals and dissect their molecular resistance mechanisms, and uncover the interactive regulatory network between root exudates and rhizosphere microorganisms. Meanwhile, novel analytical techniques such as nuclear magnetic resonance (NMR) should be applied in allelopathy research to establish a targeted breeding system based on rhizosphere chemical defense. This review aimed to provide solid theoretical foundations and technical support for improving the theoretical framework of crop disease resistance and facilitating the precision breeding of disease-resistant varieties.

Key words: resistant variey; allelopathy; root exudate; resistance mechanism; soil-borne disease

化感作用是指植物或微生物通过释放代谢物质(化感物质)对环境中其他植物或微生物产生的有利或不利生化互作效应,包括自促、自毒、偏害和互惠作用(Rice,1984)。根系分泌物是化感物质的主要来源,其对同种植物可产生自毒或自促作用,对其他生物物种则表现偏害、互惠作用(王建花等,2013)。植物通常会将11%~40%的光合产物以根系分泌物形式释放到根际环境中,以此维持根际微生态系统活力并促进根际物质循环(Haichar et al.,2014)。

化感作用与植物对土传病害的抗性密切相关。土传病害是指土壤中的真菌、细菌和线虫等病原物,在条件适宜时从植物根或茎部侵入并引发的病害,其发生情况与根际微生态环境失衡密切相关(任改弟等,2021)。根系分泌物可直接或间接参与寄主植物与土传病原物的识别过程,调控植物防卫反应及抗病性信号传导(Philippot et al.,2013;Haichar et al.,2014)。不同植物及同种植物不同品种根系分泌物的种类和含量均存在差异(韩笑等,2022;夏瑞雪等,2024)。通常抗病品种根系分泌物对病原物增殖具有抑制作用,而感病品种根系分泌物会促进病原物增殖(Wu et al.,2008;Schalchli et al.,2012)。根据植物-土壤反馈理论,植物通过根系分泌物改变根际微环境,进而在生态病理学、生理病理学、组织病理学3个方面影响后续植物的生长与发育;然而,关于根系分泌物如何系统影响植物对土传病害的抗性尚缺乏系统性的梳理与总结。本文在概述化感作用的物质基础与影响因素的基础之上,系统梳理园艺作物(水果、蔬菜)与经济作物中抗、感土传病害品种在根系分泌物种类与含量上的差异,并归纳这些分泌物对土传病原物、病害发生及非病原微生物的化感作用,以期揭示抗、感品种根系分泌物在土传病害发生中的作用机制,为深化抗性机理研究与指导抗病品种选育提供理论依据。

1 化感作用物质基础与其影响因素

1.1 化感作用物质基础

根据结构与成分的差异,化感物质可分为萜类、酚类和糖苷类等14类(Chon et al.,2005);其中,酚类、有机酸类、萜类及生物碱类是最常见类型。

1.1.1 酚类

酚类化合物是指芳香环上的氢原子被一个或多个羟基取代后的芳香族化合物,在化感物质中研究最广泛(Quideau et al.,2011;Khosravi & Razavi,2020)。植物根系分泌的酚类化合物主要包括黄酮类、绿原酸类等多酚单体,以及没食子单宁等单宁类物质(左玉,2013)。花生*Arachis hypogaea*、大蒜*Allium sativum*、玉米*Zea mays*根系可分泌肉桂酸(3-苯基-2-丙烯酸)、邻苯二甲酸、对羟基苯甲酸和阿魏酸等(李庆凯等,2019;吴晓婷等,2021;王云等,2024)。

1.1.2 有机酸类

有机酸是指具有酸性的有机化合物。植物根系分泌物中有机酸种类丰富,常见的有机酸包括甲酸、乙酸、草酸(乙二酸)、柠檬酸(3-羧基-3-羟基戊二酸)、酒石酸(2,3-二羟基丁二酸)、苹果酸(2-羟基丁二酸)、2-羟基己酸、3,3-二甲基戊二酸和5-羟基吲哚乙酸等(李月明等,2022;冯亚丽等,2024;周喜新等,2024)。

1.1.3 萜类

萜类化合物是以异戊二烯为基本单元构成的次

生代谢产物，具有分布广泛、结构多样和化感活性强等特点，主要包括单萜、倍半萜和二萜等（彭少麟等，2002；张秋菊等，2012）。例如，在强化感水稻 *Oryza sativa* 品种 PI312777 和弱化感水稻品种 Lemont 根系分泌物中均检测出柠檬烯氧化物、柠檬烯二氧化物、香芹酮氧化物、香芹醇和雪松醇等物质（何海斌等，2005）。

1.1.4 生物碱类

生物碱是一类含氮杂环结构的碱性有机物，可通过干扰细胞分裂、抑制酶活性等方式影响植物生长。紫茉莉 *Mirabilis jalapa*、紫金龙 *Dactylicapnos scandens* 根系均能分泌葫芦巴碱、小檗碱、表小檗碱、黄连碱、青藤碱、血根碱、巴马汀和药根碱等生物碱（胡焱等，2022；高雯等，2024）。

1.1.5 其他氨基酸类、糖类、黄酮类等

此外，氨基酸类、糖类和黄酮类等也是植物根系分泌的重要化感物质。例如，草莓 *Fragaria ananassa* 根系可分泌丝氨酸、天冬氨酸、谷氨酸、苏氨酸、脯氨酸和精氨酸，其中精氨酸、谷氨酸和天冬氨酸含量相对较高（甄文超等，2004）。在烤烟 *Nicotiana tabacum* K326 和草莓丰香等品种根系分泌物或根际土中均检测到葡萄糖、木糖、阿拉伯糖和半乳糖（甄文超等，2004；桑正林等，2018）。

1.2 化感作用影响因素

1.2.1 生物因素

植物释放的化感物质可对自身及其他植物的生长产生抑制或促进效应，此效应常具有浓度依赖性。例如，臭椿 *Ailanthus altissima* 根系分泌物对臭椿种子萌发的抑制作用随浓度升高而增强（朱美秋等，2015）。而大豆 *Glycine max* 根浸提液对茎瘤芥 *Brassica juncea* var. *tumida* 涪杂 5 号种子发芽率的影响则呈现低浓度促进、高浓度抑制的趋势（周先容等，2016）。

感病植物与健康植物根系分泌物的化感作用存在显著差异。与感枯萎病香草兰 *Vanilla planifolia* 相比，健康植株根系分泌物中含量较低的乳糖和含量较高的柠檬酸均能抑制尖孢镰刀菌 *Fusarium oxysporum* sp. *vanillae* 菌丝生长（邢诒彰等，2025）。感软腐病的魔芋 *Amorphophallus konjac* 根系特有的代谢物麦芽六糖、乳糖-N-岩藻糖 II 均有助于软腐病病菌的识别与侵染，健康植株特有的代谢物苯丙烷和聚酮化合物均能提高自身抗病性（周洁等，2024）。感根腐病的西洋参 *Panax quinquefolius* 根水提液对黄瓜 *Echinochloa crusgalli* 和白菜 *Brassica pekinensis* 种子萌发的抑制率分别为 37.3% 和 24.0%，而健康植株则无明显抑制作用（董艳鑫等，2021）。

植物种类、器官和生育期等均会影响化感物质的种类、数量与作用效应强度。与感枯萎病香蕉 *Musa acuminata* 品种桂蕉 6 号相比，抗病品种南天黄根系分泌物对尖孢镰刀菌的孢子萌发及菌丝生长的抑制作用更强（甘林等，2020）。自根辣椒 *Capsicum annuum* 新丰 2 号根系分泌物对根腐病菌 *Fusarium solani* 菌丝生长表现为促进作用，而砧木卫士对其抑制率高达 27.5%（段曦等，2017）。与自根冬瓜 *Benincasa hispida* 相比，嫁接冬瓜根系分泌物能提高根际土壤 pH、速效磷钾含量、脲酶活性和可培养细菌数量，降低可培养真菌数量（符厚隆等，2022）。

1.2.2 非生物因素

温度、水分、除草剂等环境因素均会影响根系分泌物的化感作用。25 ℃条件下，长雄野生稻 *Oryza longistaminata* 根系分泌物对稗 *Echinochloa crus-galli* 的综合化感效应值为−0.91，而 15 ℃时该值为−0.14（徐高峰等，2016）。节节麦 *Aegilops tauschii* 根系浸提液对白菜发芽率、根长和苗高的综合化感效应值随土壤含水量降低呈先降后升的趋势（王宁等，2018）。在阿特拉津胁迫下，香根草 *Vetiveria zizanioides* 根系分泌物能提高土壤 pH 值，且可促进土壤微生物量碳含量的积累（张发明等，2023）。

2 作物土传病害抗感品种根系分泌物种类与含量差异

研究表明，作物土传病害抗病和感病品种根系分泌物的种类和含量均差异显著（Rengel，2002；Badri & Vivanc，2009）。抗病品种根系分泌的特征化合物分别为酚酸类（绿原酸、香豆酸、丁香酸、肉桂酸）、有机酸类（富马酸、甲酸、乙酸、邻苯二甲酸）、酯类（邻苯二甲酸二丁酯、邻苯二甲酸二甲酯、阿魏酸甲酯、肉豆蔻酸酯、棕榈酸酯）、氨基酸类（丝氨酸、蛋氨酸、精氨酸、苯丙氨酸、N-乙酰-L-酪氨酸）、萜类（虾青素）和皂苷类（大豆皂苷 I）；而感病品种根系分泌的酚酸类（对羟基苯甲酸、苯甲酸）、有机酸类（柠檬酸、棕榈酸、琥珀酸）、糖类（葡萄糖、阿拉伯糖、木糖）、氨基酸类（组氨酸、丙氨酸、缬氨酸）、醇类（甘露醇）和生物碱类（甲基莲心碱）均少于抗病品种（表 1）。上述差异可作为抗病品种选育和病害绿色防控的潜在靶点。

表1 不同作物抗感品种根系分泌物种类与含量差异

Table 1 The differences in the types and contents of root exudates among different resistant and sensitive crop varieties

作物 Crop	病害 Disease	抗病品种 Resistant variety	抗病品种分泌物 Exudate of resistant variety	感病品种 Susceptible variety	感病品种分泌物 Exudate of susceptible variety	参考文献 Reference
水果作物 Fruit crop	香蕉枯萎病 Banana *Fusarium* wilt	南天黄 Nantianhuang	香豆酸、邻苯二甲酸、丁香酸等 Coumaric acid, phthalic acid, syringic acid, et al.	巴西蕉 Brazil banana	—	翟子翔等,2020 Zhai et al., 2020
		GCTCV-119、桂蕉9号 GCTCV-119, Guijiao 9	可溶性总糖、苯丙氨酸、脯氨酸等 Total soluble sugars, phenylalanine, proline, et al.	桂蕉1号 Guijiao 1	有机酸 Organic acids	田丹丹等,2017 Tian et al., 2017
	西瓜枯萎病 Watermelon *Fusarium* wilt	Sugarlee, Calhoun Gray	十一烷、苯酚 Undecane, phenol	早佳8424 Zaojia 8424	二十烷、硅烷、棕榈酸等 Eicosane, silane, palmitic acid, et al.	张玉锦等,2022 Zhang et al., 2022
		安生葫芦、硕丰瓜砧一号 Anshenghulu, Shuofenggua-zhen No. 1	2,4-双(乙氨基)-6-甲硫基-S-三氮苯 2, 4-bis(ethylamino)-6-methylthio-S-triazine	早佳8424 Zaojia 8424	—	郑阳霞等,2011 Zheng et al., 2011
	草莓枯萎病 Strawberry *Fusarium* wilt	土特拉 Tutela	N-*α*-乙酰-l-精氨酸、O-L-脯氨酸等 N-*α*-acetyl-l-arginine, O-L-proline, et al.	全明星 All star	对羟基苯甲酸、苯甲酸 *p*-hydroxybenzoic acid, benzoic acid	赵绪生等,2012 Zhao et al., 2012
蔬菜作物 Vege-table crop	番茄枯萎病 Tomato *Fusarium* wilt	新星101 Xinxing 101	2,6-二叔丁基对甲苯酚、邻苯二甲酸二丁酯等 2, 6-Di-tert-butyl-p-cresol, dibutyl phthalate, et al.	金星1371 Jinxing 1371	甲基莲心碱、油酰胺 Methylnuciferine, oleamide	Liu et al., 2023
	番茄青枯病 Tomato bacterial wilt	番砧1号、茄砧21号 Fanzhen 1, Qiezhen 21	2,6-二叔丁基对甲苯酚、邻苯二甲酸二甲酯、邻苯二甲酸二丁酯 2, 6-Di-tert-butyl-p-cresol, dimethyl phthalate, dibutyl phthalate	粉贝贝 Fenbeibei	—	赵文宗等,2019;刘斯晗等,2021 Zhao et al., 2019; Liu et al., 2021
	番茄根结线虫病 Tomato root knot nematode disease	Baliya, RS2	维生素C、2,6-二棕榈酸酯 Vitamin C, 2, 6-dipalmitate	L-4023	—	Yang et al., 2016
		仙科 Xianke	1,3-二叔丁基苯、十七烷、1-萘氨基苯 1, 3-Di-tert-butylbenzene, heptadecane, 1-naphthylaminobenzene	Money Maker, 888	2,6-二叔丁基甲酚、棕榈酰胺、油酰胺 2, 6-Di-tert-butylcresol, palmitamide, oleamide	Wang et al., 2023
	辣椒根腐病、青枯病 Pepper root rot disease, bacterial wilt	新丰2号/卫士 Xinfeng 2/Weishi	邻苯二甲酸二异辛酯、十四烷、二十七烷醇等 Diisooctyl phthalate, tetradecane, heptacosanol, et al.	新丰2号 Xinfeng 2	—	段曦等,2017 Duan et al., 2017
	茄子黄萎病 Eggplant *Verticillium* wilt	西安绿茄/lydl Xi'an green eggplant/lydl	邻苯二甲酸二丁酯、十三烷等 Dibutyl phthalate, tridecane, et al.	西安绿茄 Xi'an green eggplant	5-二甲萘、2-甲硫基乙醇等 5-dimethylnaphth-alene, 2-methylthio-ethanol, et al.	周宝利等,2011b Zhou et al., 2011b
		西安绿茄/托鲁巴姆 Xi'an green eggplant/Torubam	邻苯二甲酸二丁酯、肉豆蔻酸酯和棕榈酸酯 Dibutyl phthalate, myristate and palmitate	西安绿茄 Xi'an green eggplant	酚类和炔类等 Phenols and alkynes, et al.	周宝利等,2010 Zhou et al., 2010

续表1 Continued

作物 Crop	病害 Disease	抗病品种 Resistant variety	抗病品种分泌物 Exudate of resistant variety	感病品种 Susceptible variety	感病品种分泌物 Exudate of susceptible variety	参考文献 Reference
	黄瓜枯萎病 Cucumber *Fusarium* wilt	力丰 Lifeng	—	B80	柠檬酸、富马酸、琥珀酸等 Citric acid, fumaric acid, succinic acid, et al.	Wen et al., 2020
		津春3号、中农1101 Jinchun 3, Zhongnong 1101	精氨酸 Arginine	津研4号、秋棚 Jinyan 4, Qiupeng	—	潘凯和吴凤芝, 2007 Pan & Wu, 2007,
经济作物 Economic crop	烟草黑胫病 Tobacco black shank disease	革新3号 Gexin 3	邻苯二甲酸二丙酯、邻苯二甲酸二丁酯、硬脂酸、阿魏酸甲酯 Dipropyl phthalate, dibutyl phthalate, stearic acid, ferulic acid methyl ester	小黄金1025 Xiaohuangjin 1025	2,4-二叔丁基酚、2,6-二叔丁基酚 2, 4-Di-tert-butylphenol, 2, 6-Di-tert-butylphenol	Zhang et al., 2020b; Ma et al., 2025
		NC102, K326	—	红花大金元、云87 Honghuadajinyuan, Yun 87	葡萄糖 Glucose	桑正林等,2018 Sang et al., 2018
	烟草青枯病 Tobacco bacterial wilt	K326	富马酸 Fumaric acid	红花大金元 Honghuadajinyuan	棕榈酸、苯甲酸、阿拉伯糖 Palmitic acid, benzoic acid, arabinose	姚云静等,2021 Yao et al., 2021
		云烟97 Yunyan 97	—	长脖黄 Changbohuang	缬氨酸、亮氨酸、6-氨基青霉烷酸 Valine, leucine, 6-aminopenicilla-nic acid	Xia et al., 2024
	棉花黄萎病 Cotton *Verticillium* wilt	81-3	绿原酸 Chlorogenic acid	新陆早36、新陆早8 Xinluzao 36, Xinluzao 8	—	郑倩等,2012 Zheng et al., 2012
		鲁棉29、中棉所41号 Lumian 29, Zhongmiansuo 41	—	冀棉11 Jimian 11	冬氨酸、丝氨酸、谷氨酸 Aspartic acid, serine, glutamic acid	董丽红等,2019 Dong et al., 2019
		抗岱16 Kangdai 16	天门冬氨酸、组氨酸、甲硫氨酸 Aspartic acid, histidine, methionine	冀棉11 Jimian 11	丙氨酸、脯氨酸、葡萄糖、蔗糖 Alanine, proline, glucose, sucrose	任志刚和盖琼辉,2016 Ren & Gai, 2016
	花生根腐病 Peanut root rot disease	泉花7号 Quanhua 7	对羟基苯甲酸、对香豆酸 p-hydroxybenzoic acid, p-coumaric acid	赣花5号 Ganhua 5	糖类、丙氨酸 Sugars, alanine	Li et al., 2013
		鲁花11号 Luhua 11	对羟基苯辛酸 p-hydroxyphenylcaprylic acid	鲁花12 Luhua 12	棕榈酸、硬脂酸、甘露醇 Palmitic acid, stearic acid, mannitol	刘苹等,2015 Liu et al., 2015
其他作物 Other crop	豌豆根腐病 Pea root rot disease	AAC Chrome, CDC Meadow	大豆皂苷I、脱氢大豆皂苷I Soyasaponin I, dehydrosoyasaponin I	PI660736, PI557500	—	Goyal et al., 2024

—：与另一抗病或感病品种相比，该品种根系分泌物中未检测到相对含量显著偏高的物质。—: Compared with other disease-resistant or susceptible varieties, no compounds with significantly higher relative abundance were detected in the root exudates of this variety.

2.1 水果作物抗感品种根系分泌物差异

2.1.1 香蕉

抗枯萎病香蕉品种南天黄根系可分泌香豆酸(2-吡喃酮-5-羧酸)、邻苯二甲酸、丁香酸(3,5-二甲氧基-4-羟基苯甲酸)和苯甲酸,而感病巴西蕉根系分泌物中未检出酚酸物质;接种尖孢镰刀菌后,感病品种中未检到对羟基苯甲酸和肉桂酸,而抗病品种中邻苯二甲酸的含量增至感病品种的2倍(翟子翔等,2020)。抗枯萎病香蕉品种GCTCV-119和桂蕉9号根系分泌的可溶性总糖和游离氨基酸含量较感病品种桂蕉1号的含量分别低53.2%、36.1%和44.3%、42.9%,有机酸含量则呈相反趋势;而苯丙氨酸和脯氨酸仅存在于抗病品种中(田丹丹等,2017)(表1)。

2.1.2 西瓜 *Citrullus lanatus*

十一烷和苯酚仅在抗枯萎病西瓜品种Sugarlee和Calhoun Gray根系的分泌物中检出,二十烷、硅烷、棕榈酸(十六烷酸)、癸二酸双酯、2-戊烯二酸、3-羟基-2,4,6-三溴苯甲醛和D-甘露醇仅存在于感病品种早佳8424和Sugarbaby中;而十八烷酸和邻苯二甲酸二丁酯为抗感品种根系共有分泌物(张玉锦等,2022)表1。此外,嫁接技术亦可改变根系分泌物组成,例如嫁接西瓜根系能分泌2,4-双(乙氨基)-6-甲硫基-S-三氮苯等3种特有物质(郑阳霞等,2011)。

2.1.3 草莓

在草莓中,尽管对羟基苯甲酸含量在抗、感连作障碍品种中均高于苯甲酸,但感病品种全明星根系分泌物中的对羟基苯甲酸和苯甲酸含量分别比抗病品种土特拉高出51.2%和142.9%(赵绪生等,2012)(表1)。

2.2 蔬菜作物抗感品种根系分泌物差异

2.2.1 番茄 *Lycopersicon esculentum*

番茄抗、感病品种根系分泌物的差异与其对特定病原菌的抗性密切相关,这种差异在病原菌侵染后尤为显著。针对由尖孢镰刀菌引起的枯萎病,抗病品种新星101通过显著富集N-α-乙酰-l-精氨酸、N-乙酰-L-酪氨酸、L-脯氨酸和虾青素来响应病原菌侵染,其含量分别为感病品种金星1371的7.0倍、1.6倍、4.5倍和1.2倍;而感病品种则大量积累甲基莲心碱和油酰胺,分别增加了28.0倍和1.9倍(Liu et al.,2023)。同样,在应对青枯病时,抗病砧木也表现出显著提升多种酚类物质(如2,6-二叔丁基对甲苯酚、2,4-二叔丁基苯酚)和邻苯二甲酸二丁酯等酯类分泌的能力(赵文宗等,2019;刘斯晗等,2021)。除抵御真菌、细菌性土传病害外,根系分泌物介导的抗性分化同样存在于植株与根结线虫的互作体系。经南方根结线虫*Meloidogyne incognita*胁迫后,抗、感品种的分泌物差异呈现出规律性变化。一方面,如L-4023等感病品种通常会过量分泌邻苯二甲酸二丁酯、邻苯二甲酸二甲酯及2,6-二叔丁基对甲酚等特定物质(Yang et al.,2016);而如仙科、Baliya等抗病品种则倾向于积累可能具有直接抗虫活性的物质,包括1,3-二叔丁基苯、十七烷等(Wang et al.,2023)以及维生素C等抗氧化物质(Yang et al.,2016)。另一方面,油酰胺等物质在感病品种根系中的持续高积累,可能是其易受线虫侵染的一个特征(Wang et al.,2023)(表1)。

2.2.2 辣椒

利用抗性砧木进行嫁接是改善辣椒生长的重要措施,其效果与砧木调控接穗根系分泌物组成密切相关。对辣椒新丰2号、砧木卫士及其嫁接苗的比较研究发现,嫁接能显著增加根系分泌物的多样性与复杂性。在物质种类上,嫁接苗鉴定出的代谢物总数为21种,多于自根苗(8种)和砧木(14种),其中烃类、酯类和醇类物质种类的增加尤为显著;更重要的是,砧木将其分泌谱中的部分特征性物质(如3-甲基-3-乙基庚烷、十四烷等)传递给了嫁接苗,形成了三者共有的特异性代谢图谱(段曦等,2017)。这种分泌谱的改变不仅体现在物质种类上,更关键的是功能性抗病相关物质的特异性富集。靶向分析进一步证实,与自根苗相比,嫁接苗根系分泌物中的水杨酸、苯甲酸、香兰素、木质素和多胺等关键信号分子与防御物质的含量均被显著上调(Duan et al.,2017)(表1)。这表明优良砧木可通过重塑接穗的根系代谢,定向增强其根系微环境的防御信号输出,这可能是嫁接提升辣椒抗逆性的重要机制之一。

2.2.3 茄子 *Solanum melongena*

嫁接作为一种农艺措施,能系统性地重塑茄子根系分泌物的代谢谱。尽管不同砧木存在特异性影响,但均能诱导分泌物组成发生定向改变。首先,酯类物质的显著增加是一个共性特征。无论是采用抗病番茄品种lydl还是抗病茄子品种托鲁巴姆作为砧木,嫁接茄子根系分泌物中邻苯二甲酸二丁酯等酯类物质的含量均比自根苗显著富集;此外,使用托鲁巴姆砧木还能广泛上调控苯类、醇类和胺类物质的相对含量(周宝利等,2010;2011b)。其次,不同砧木也呈现出特异性调控模式。例如,lydl砧木导致烃类含量增加而苯类含量下降(周宝利等,2011b);而

托鲁巴姆砧木在显著提高肉豆蔻酸酯和棕榈酸酯含量的同时，却降低了酚类与炔类物质的含量（周宝利等，2010）（表1）。这种由砧木驱动的根系分泌物重塑，可能是嫁接增强茄子对生物及非生物胁迫抗性的重要生理基础。

2.2.4 黄瓜

黄瓜对枯萎病的抗性与其根系分泌物的特定代谢谱密切相关，这种关联主要体现在有机酸和氨基酸两类关键物质上。一方面，感病黄瓜的根系可能表现出更旺盛的有机酸代谢。研究表明，感病品种B80根系分泌物中多种有机酸（如柠檬酸、琥珀酸、丙酮酸等）的含量普遍高于抗病品种力丰（Wen et al.，2020），这可能为土壤中的病原菌提供了更丰富的碳源。另一方面，抗感品种间氨基酸分泌谱的特异性差异更为关键。潘凯和吴凤芝（2007）比较发现，中抗品种津春3号、中农1101能分泌16种氨基酸，而感病品种津研4号与抗病品种中农13的根系分泌物中均特异性缺失精氨酸，该抗病品种同时还缺失苯丙氨酸（表1）。精氨酸和苯丙氨酸是多种防御物质合成的重要前体，它们的缺失可能意味着感病植株或部分抗病植株的根系防御代谢通路存在不同模式的重编程或缺陷。上述代谢特征的差异共同构成了黄瓜与枯萎病互作的根系化学背景。

2.2.5 其他蔬菜

除上述作物外，蚕豆 *Vicia faba*、冬瓜及油菜 *Brassica napus* 等蔬菜的研究也从不同角度印证了根系分泌物组成与植物抗病性或生长状态密切关联。董艳等（2015）对蚕豆枯萎病的研究发现，感病品种抗性较低可能与根系分泌物中氨基酸过度分泌有关，其氨基酸总量随抗性减弱而升高；且组氨酸只存在于中抗品种8363中，脯氨酸仅在感病品种云豆324、YD324中检测到，这表明不同抗性级别品种拥有独特的根系氨基酸分泌指纹。在嫁接试验中，南瓜 *Cucurbita moschata* 砧木海砧1号显著重塑了冬瓜的根系分泌谱，不仅引入了多种砧木来源的特异性物质（如2，3-丁二硫醇），还普遍提高了丙三醇等8种物质的含量，这可能是嫁接苗增强抗逆性的化学基础（袁飞等，2021）。代谢组学技术为理解这一现象提供了系统视角（Hazrati et al.，2021）。在油菜根肿病抗感材料中，感病品种表现出大规模的代谢紊乱，与抗病品种相比，有数百种代谢物含量发生显著上调或下调，深刻地揭示了其根系代谢网络的系统性失调（陈宇红等，2022）。

2.3 经济作物抗感品种根系分泌物差异

2.3.1 烟草

烟草对不同土传病害的抗性与其根系分泌物组成密切相关。在应对黑胫病时，感病品种小黄金1025根系分泌物中酯类和脂肪酸含量显著高于抗病品种革新3号，而烃类和酚酸含量则显著偏低。更重要的是，邻苯二甲酸二丙酯等物质为抗病品种所特有，阿魏酸甲酯（4-羟基-3-甲氧基肉桂酸甲酯）含量显著高于感病品种，而2，4-二叔丁基苯酚等则为感病品种所特有，呈现出明显的代谢谱差异（Zhang et al.，2020a，b；Ma et al.，2025）。这种差异甚至延伸至根际土壤，如感病品种根际土壤中的葡萄糖含量随抗性减弱而急剧升高（桑正林等，2018）。在应对青枯病时也观察到类似规律。抗病品种K326根系分泌物中富马酸含量较高，而感病品种红花大金元则大量积累棕榈酸、苯甲酸和阿拉伯糖，含量分别为前者的5.26倍、2.29倍和2.07倍（姚云静等，2021）。Xia et al.（2024）的非靶向代谢组学研究进一步证实，抗病品种云烟97根系中藤黄酸等22种代谢物的含量普遍高于感病品种长脖黄的含量，显示出其整体代谢水平活跃（表1）。

2.3.2 棉花 *Gossypium hirsutum*

棉花对不同土传病害的抗性同样反映在根系分泌物的差异上。在应对黄萎病时，抗病品种81-3的根系特异性富集绿原酸等酚酸类物质，其含量可达感病品种新陆早36和新陆早8的3倍以上（郑倩等，2012）。相反，感病品种冀棉11的氨基酸代谢表现更为活跃，其分泌的氨基酸种类最多，且天冬氨酸、丝氨酸等11种氨基酸的含量均显著高于耐（抗）品种鲁棉29和中棉所41（董丽红等，2019）。在应对枯萎病时，抗、感品种也存在着独特的氨基酸与糖类分泌谱。抗病品种抗岱16特异性分泌天门冬氨酸、组氨酸等，而感病品种冀棉11则特异性积累丙氨酸、脯氨酸等。此外，感病品种根系分泌的葡萄糖和蔗糖含量异常升高，约为抗病品种的4.5倍，这可能为病原菌提供了丰富的营养来源（任志刚和盖琼辉，2016）（表1）。

2.3.3 花生

在应对不同胁迫时，花生抗性品种通过调控根系分泌物展现出独特的适应性。针对根腐病，与感病品种赣花5号相比，中抗品种泉花7号通过减少糖类与丙氨酸等病原菌潜在营养物质的分泌，同时显著富集对羟基苯甲酸、对香豆酸等酚酸类防御物质（Li et al.，2013）。面对连作障碍，抗感品种的响应策略迥异，如感病品种鲁花12在连作后大量积累棕

榈酸、硬脂酸等脂肪酸及甘露醇，而抗病品种鲁花11号仅特异性增加对羟基苯辛酸的分泌（刘苹等，2015）（表1），表明抗性品种可能采取了更为精准的代谢调控策略。

2.3.4 *其他作物抗感品种根系分泌物差异*

在豌豆 *Pisum sativum*、木薯 *Manihot esculenta* 和玉米中，根系分泌物的特定组分与其抗病性、抗逆性密切相关。在豌豆中，抗根腐病品种的根系显著富集皂苷类物质，其总皂苷含量可达感病品种的2~3倍，表明皂苷在根系防御中起关键作用（Goyal et al.，2024）（表1）。

3 作物土传病害抗感品种根系分泌物化感作用差异

作为植物–土壤–病原物之间相互作用的桥梁，作物根系分泌物不仅能直接影响土传病原物的繁殖（表2），还能调节根际（围）微生物种群的组成，进而影响植物生长发育和土传病害发生程度（Gu et al.，2016；Stringlis et al.，2018；2019；任改弟等，2021）。

表2 作物抗感品种根系分泌物对不同病原物的化感作用

Table 2 Allelopathy of root exudates of resistant and susceptible crop varieties on different pathogens

病害 Disease	病原物 Pathogen	品种 Variety	抗性类别 Type of resistance	指标 Indicator	作用效应 Effect	参考文献 Reference
棉花枯萎病 Cotton *Fusarium* wilt	尖孢镰刀菌 *F. oxysporum*	新海41号、10702、10727 Xinhai 41, 10702, 10727	R	菌丝生长 Mycelial growth	抑制 Inhibition	娄慧等，2023；苏飞鸿等，2024
		新海14号、10744、10900 Xinhai 14, 10744, 10900	S		促进 Promotion	Lou et al., 2023; Su et al., 2024
香蕉枯萎病 Banana *Fusarium* wilt		抗枯1号、东莞大蕉、南天黄 Kangku 1, Dongguanda-jiao, Nantianhuang	R	菌丝生长 Mycelial growth	抑制 Inhibition	翟子翔等，2020；甘林等，2020；左存武等，2010
		巴西蕉、广粉1号 Brazil banana, Guangfen 1	S		促进 Promotion	Zhai et al., 2020; Gan et al.. 2020; Zuo et al., 2010
蚕豆枯萎病 Faba bean *Fusarium* wilt		89-147	R	产孢量 Spore production	抑制 Inhibition	董艳等，2014
		云豆324 Yundou 324	S		促进 Promotion	Dong et al., 2014
烟草黑胫病 Tobacco black shank	疫霉菌 *Phytophthora*	革新3号 Gexin 3	R	菌丝生长、孢子萌发 Mycelial growth, spore germination	抑制 Inhibition	Zhang et al., 2020a
		小黄金1025 Xiaohuangjin 1025	S		促进 Promotion	
辣椒疫病 Pepper blight		PRMND, DNP56	R	菌丝生长、孢子萌发 Mycelial growth, spore germination	抑制 Inhibition	王继元等，2014
		新机遇、科星6号 New opportunity, Kexing 6	S		促进 Promotion	Wang et al., 2014
花生青枯病 Peanut bacterial wilt	青枯雷尔氏菌 *Ralstonia solanacearum*	Arachis correntina	R	青枯雷尔氏菌增殖 Proliferation of *R. solanacearum*	抑制 Inhibition	Li et al., 2023
		桂花85 Guihua 85	S		促进 Promotion	
番茄青枯病 Tomato bacterial wilt		粉贝贝/茄砧、粉贝贝/番砧 Fenbeibei/Qiezhen, Fenbeibei/Fanzhen	R		抑制 Inhibition	赵文宗等，2019 Zhao et al., 2019
		粉贝贝 Fenbeibei	S		促进 Promotion	
棉花黄萎病 Cotton *Verticillium* wilt	大丽轮枝菌 *V. dahlia*	81-3、新陆早12 81-3, Xinluzao 12	R	菌丝生长 Mycelial growth	抑制 Inhibition	郑倩，2012 Zheng et al., 2012
		新陆早8、新陆早36 Xinluzao 8, Xinluzao 36	S		促进 Promotion	
豌豆根腐病 Pea root rot	根腐丝囊霉 *Aphanomyces euteiches*	PI557500	R	孢子萌发 Spore germination	抑制 Inhibition	Goyal et al., 2024
		AAC Chrome, CDC Meadow	S		促进 Promotion	
辣椒根腐病 Pepper root rot	腐皮镰孢菌 *F. solani*	砧木卫士、新丰2号/卫士 Rootstock Weishi, Xinfeng 2/Weishi	R	菌丝生长 Mycelial growth	抑制 Inhibition	段曦等，2017 Duan et al., 2017

续表2 Continued

病害 Disease	病原物 Pathogen	品种 Variety	抗性类别 Type of resistance	指标 Indicator	作用效应 Effect	参考文献 Reference
		新丰2号 Xinfeng 2	S		促进 Promotion	
向日葵列当病 Sunflower broomrape	向日葵列当 *Orobanche cumana*	TP3313, SH363-M	R	种子萌发 Seed germination	抑制 Inhibition	邸娜等，2020 Qiu et al., 2020
		3638C	S		促进 Promotion	

R和S分别代表抗病品种和感病品种。R and S represented resistant and susceptible varieties, respectively.

3.1 抗感品种根系分泌物对病原物的化感作用

抗感品种的根系混合分泌物或特征化合物对病原物的生长、繁殖和侵染过程具有截然相反的调控作用。抗病品种通常分泌抑制病原物、降低病原物营养供给和招募有益微生物的物质，而感病品种则多分泌能促进病原物增殖和抑制自身防御反应的物质（任改弟等，2021）。抗病品种分泌的肉桂酸、邻苯二甲酸等关键酚酸及有机酸物质对尖孢镰刀菌孢子萌发和菌丝生长的抑制效应强度与浓度密切相关，甚至表现致死作用（甘林等，2020；翟子翔等，2020）。阿魏酸甲酯是抗病品种抑制疫霉菌 *Phytophthora nicotianae* 生长的特征化合物（Ma et al.，2025）；虾青素与N-乙酰-L-酪氨酸是抗病品种抑制青枯雷尔氏菌 *Ralstonia solanacearum* 生长的特征化合物（Liu et al.，2023）；而邻苯二甲酸二丁酯、豆蔻酸及棕榈酸可抑制大丽轮枝菌 *Verticillium dahlia* 生长（周宝利等，2010）。

3.1.1 尖孢镰刀菌

多项研究证实，抗、感病品种根系分泌物对土传病原菌如尖孢镰刀菌的生长与繁殖具有相反的调控作用。在棉花中，抗枯萎病品种的根系分泌物能显著抑制尖孢镰刀菌的菌丝生长与孢子萌发，抑制率最高可达36.8%；而感病品种的分泌物则无此效应，甚至在培养后期表现出促进作用（娄慧等，2023；苏飞鸿等，2024）。在香蕉与蚕豆中也有上述规律，香蕉高抗品种的根系分泌物对尖孢镰刀菌孢子具有致死作用，中抗品种可抑制其萌发与菌丝生长，且其中关键组分（如肉桂酸、对羟基苯甲酸和邻苯二甲酸）的抑菌活性存在浓度依赖效应；与之相反，感病品种的分泌物则普遍表现为促进病原菌发育（甘林等，2020；翟子翔等，2020）。蚕豆高感品种根系分泌物对孢子萌发的促进率高达80.1%，而其抗病品种则表现为16.2%的抑制率（董艳等，2014），清晰地揭示了根系分泌物在根际微环境中所扮演的“双刃剑”角色（表2）。

3.1.2 疫霉菌

抗、感病品种的根系分泌物对疫霉菌的生长发育表现出截然相反的调控作用。在烟草中，抗病品种革新3号的根系分泌物对疫霉菌的菌丝生长和游动孢子萌发均表现出强劲的抑制效果，抑制率最高分别达42.8%和56.6%；而感病品种小黄金1025的分泌物则对菌丝生长存在微弱的促进作用（Zhang et al.，2020a）。阿魏酸甲酯对烟草黑胫病有较强的抑制作用，通过抑制还原型烟酰胺腺嘌呤二核苷酸（nicotinamide adenine dinucleotide，NADH）脱氢酶功能来有效防治烟草黑胫病（Ma et al.，2025）。在辣椒中也存在类似现象，两个辣椒抗病品种的根系分泌物对菌丝生长和游动孢子释放均表现出高抑制率（超过57%），而两个高感品种的分泌物对菌丝生长无显著影响，且对游动孢子释放的抑制能力也显著弱于抗病品种（王继元等，2014）（表2）。

3.1.3 青枯雷尔氏菌

多项研究揭示了植物根系分泌物对病原菌的双重调控作用。Li et al.（2023）研究发现，花生中抗品种桂花85的低浓度根系分泌物促进青枯雷尔氏菌和串珠镰孢菌 *Fusarium verticillioides* 生长，而高抗野生种 *Arachis correntina* 的分泌物则起抑制作用。在番茄中，Liu et al.（2023）报道番茄抗病品种分泌的虾青素可抑制青枯雷尔氏菌的定殖，N-乙酰-L-酪氨酸则促进青枯菌的生长，而感病品种分泌的甲基莲心碱则抑制青枯雷尔氏菌的运动能力。赵文宗等（2019）研究进一步表明，嫁接可诱导抑制效应，与促进病菌增殖的自根品种粉贝贝相比，其茄砧和番砧嫁接苗的根系分泌物分别表现出13.4%和10.5%的抑制率，番砧自根系亦具7.7%的抑制效果（表2）。

3.1.4 大丽轮枝菌

不同作物抗病品种的根系分泌物对大丽轮枝菌普遍表现出抑制潜力。在棉花中，抗病品种81-3和新陆早12的根系分泌物对大丽轮枝菌菌丝生长的抑制率为1.1%~40.0%，而感病品种新陆早8和新陆早36则均表现出10.0%以上的促进率（郑倩等，

2012)(表2)。同样地,在茄子中,抗病品种Solanum tor和S. sis以及耐病品种立原紫茄的根系分泌物均能抑制菌丝生长;其中,品种S. tor的抑菌效果最强且最持久,培养5 d后其抑制率仅下降12.6百分点。与此相反,感病品种西安绿茄的分泌物则促进菌丝生长(周宝利等,2011a)。周宝利等(2010)进一步研究发现,嫁接可通过改变根系分泌物组分来增强抑菌作用,与自根苗品种西安绿茄相比,嫁接苗品种西安绿茄/托鲁巴姆根系分泌的邻苯二甲酸二丁酯含量更高,且该物质对大丽轮枝菌的抑制作用随浓度升高而增强;此外,豆蔻酸和棕榈酸则表现出低浓度促进、高浓度抑制的效应。

3.1.5 根腐丝囊霉菌 *Aphanomyces euteiches*

抗病品种根系分泌物对根腐丝囊霉菌亦具有抑制作用。感根腐病豌豆品种AAC Chrome和CDC Meadow根系分泌物能促进根腐丝囊霉菌卵孢子萌发,萌发率分别超过80%和90%;而抗病品种则表现抑制作用,萌发率仅为20%左右(Goyal et al.,2024)(表2)。

3.1.6 腐皮镰孢菌 *Fusarium solani*

辣椒自根苗品种新丰2号根系分泌物对根腐病菌腐皮镰孢菌菌丝生长表现为促进作用,而砧木卫士根系分泌物对腐皮镰孢菌菌丝生长抑制作用最强,抑制效果为27.5%,嫁接辣椒品种新丰2号/卫士次之,抑制效果为17.9%(段曦等,2017)(表2)。

3.1.7 向日葵列当 *Orobanche cumana*

向日葵 *Helianthus annuus* 不同抗性品种根系分泌物诱导向日葵列当种子萌发率由低到高的品种依次为抗病品种TP3313、耐病品种SH363-M和感病品种3638C(邸娜等,2020)(表2)。与向日葵感病品种星火大白边和白葵杂9号相比,免疫品种MGS的根系分泌物可使向日葵列当种子萌发率分别降低40.7%和33.6%(君睿红等,2014)。

3.2 抗感品种根系分泌物对病害的化感作用

现有研究证实,植物抵御土传病害的能力与根系分泌物组分特征密切相关,且该代谢分泌过程可通过农艺调控、外源化学诱导等手段定向干预。采用番茄专用砧木嫁接或外源施用邻苯二甲酸二甲酯均可显著降低植物青枯病的发病率与病情指数(赵文宗等,2019;刘斯晗等,2021)。作物基因型直接决定根系分泌物抑病功能,如卷心菜 *Brassicaoleracea* var. *capitata* 抗病品种尚品根系分泌物能够显著缓解根肿病发生,而感病品种83-1的根系分泌物则会加重病害发展(Fang et al.,2024)。同时植物内源化学信号的作用效果存在明显特异性,如对羟基苯甲酸整体会加重草莓枯萎病,但该物质造成抗病品种土特拉病情指数的上升幅度远低于感病品种红玫瑰,充分说明植株自身抗性通路可有效缓冲化感物质带来的致病效应(马燕会等,2012)。

3.3 抗感品种根系分泌物对非病原微生物的化感作用

植物根系分泌物是塑造根际微环境、介导植物与微生物互作的关键信号分子,其通过调控非病原微生物的群落结构与动态,进而引发互惠或拮抗效应(Shaposhnikov et al.,2020)。多项研究从不同角度揭示了这一机制的复杂性。在趋化性方面,棉花感病品种冀棉11的根系分泌物对生防菌枯草芽胞杆菌 *Bacillus subtilis* NCD-2的吸引作用(趋化距离2.10 cm)显著强于耐病品种中棉所41(董丽红等,2019)。在群落结构上,樱桃 *Cerasus pseudocerasus* 抗病品种吉塞拉6号的根系分泌物能降低根际土壤致病农杆菌属 *Agrobacterium* 的相对丰度,而感病品种海樱1号则作用相反;同时,自根嫁接处理普遍提高了变形菌门等有益菌的丰度(Chen et al.,2024)。研究表明,特定分泌物成分的作用尤为关键。在抗青枯病番茄砧木中,邻苯二甲酸二甲酯与2,6-二叔丁基对甲苯酚均能抑制根际微生物总量及真菌、细菌数量,且后者效果更强;在发病初期,前者对放线菌 *Actinomycetales* 的抑制作用更为突出(刘斯晗等,2021)。阿魏酸甲酯能增加烟草抗病品种小黄金1025根际土壤中芽胞杆菌属的相对丰度(Ma et al.,2025)。与此形成对比的是,黄瓜感病品种B80通过分泌柠檬酸、丙酮酸等有机酸可能特异性地富集了丛毛单胞菌科等有益菌群,以此调整微生物结构,而这种效应在抗病品种力丰中不明显(Wen et al.,2020)。番茄抗性品种分泌的泌虾青素促进了土壤中生防真菌的生长,降低了病原真菌的相对丰度,感病品种分泌的甲基莲心碱抑制了与生物防细菌如芽胞杆菌属的相对丰度,间接降低了土壤的免疫力。综上所述,无论是不同抗性品种的混合分泌物,还是其中的特定化学成分,均在根际微生物群落的定向塑造中扮演着独特角色,共同构成了植物免疫系统的重要组成部分。

3.4 抗感品种根系分泌物对其他指标的化感作用

植物根系分泌物通过多种途径影响其抗病性与生长。在病原菌互作层面,棉花抗枯萎病品种新海41号的根系分泌物能更有效地诱导尖孢镰刀菌水解酶活性及相关基因的表达,这可能是其抗性机制之一(娄慧等,2023)。在根际微生态方面,嫁接冬瓜

通过其根系分泌物显著改善了根际土壤肥力（提高碱解氮、速效磷、速效钾含量）和酶活性（脲酶、酸性磷酸酶），并优化了微生物区系，表现为促细菌、抑真菌生长（符厚隆等，2022）。在植物自身生理代谢上，烟草抗黑胫病品种革新3号能通过根系分泌物激活其根系中的苯丙烷代谢关键酶（如苯丙氨酸解氨酶等），从而增强代谢活性（Zhang et al.，2020a）。此外，根系分泌物对植物生长有浓度效应，在低浓度时，嫁接西瓜根系分泌物对种子萌发和幼苗生长的促进作用强于自根苗；而在高浓度时，其抑制作用则弱于自根苗（郑阳霞等，2011）。然而，某些分泌物成分也可能产生胁迫效应；例如，较高浓度的对羟基苯甲酸会普遍抑制草莓抗、感品种的光合作用以及抗氧化酶活性，具体表现为光合色素含量、净光合速率、气孔导度和超氧化物歧化酶下降，同时初始荧光和非光化学猝灭系数显著上升；其中，感枯萎病品种全明星和中抗品种丰香的非光化学猝灭系数增幅尤为剧烈，分别达190.5%和131.3%，表明其光系统承受了较大压力（马燕会等，2012；齐永志和甄文超，2016）。

4 展望

综上所述，抗、感病品种的根系分泌物通过其特异性组分在调控病原物、根际微生物、土壤酶活及植物生理等方面发挥着不同作用，最终决定病害发生程度。为深化该领域研究并推动其应用，未来可重点从以下五个方面进行探索。

4.1 收集方法对抗感品种根系分泌物组成的影响

根系分泌物的收集方法直接影响其种类与含量的鉴定结果，进而干扰对抗性品种特异性分泌物质的准确判断。目前主流方法各具有优缺点。水培法能维持稳定的液态环境，减缓微生物降解，从而获取更接近自然状态的分泌物样本；然而，该体系易引发根系缺氧损伤，并导致黏液或细胞渗出液等非生理性物质的释放，从而改变分泌物的真实组成（Ma et al.，2022）。人工基质培养法（如琼脂培养）具有良好的通气性，能模拟土壤的机械阻力，且不易与分泌物发生反应（Phillips et al.，2008；2009；吴晓婷等，2022）；然而，其保水能力较差且缺乏必要营养元素等问题。土培法能通过土壤颗粒对根系的机械压力刺激更多化合物分泌（Pétriacq et al.，2017；张允等，2018），但其弊端也较为突出，在淋洗过程可能引入土壤本底成分的干扰，分离根际土壤时的机械应力易造成根系微损伤，且复杂的土壤环境难以完全排除微生物活动的影响。土培法获得的抗病品种初始分泌物虽易受土壤生物、物理和化学因素的影响，可能会被降解或转化，但可用于验证复杂根际中的抗病表型。近年来，基于微透析原理的原位采样技术备受关注。该技术将灌流与透析相结合，能实现连续、微量、无创的动态采样（Miró & Hansen.，2006；Miró et al.，2010）。尽管其仅能针对特定组分进行有效监测，难以实现多组分同步分析，但该方法具有采样量小、对根系无损伤、可动态观察的突出优势（Brackin et al.，2017），其能克服传统方法的局限性，是未来的重要发展方向。

4.2 抗性品种根系分泌化感物质的作用机制解析

当前，抗性品种根系分泌物中化感物质的作用机制尚待深入阐明。例如，虽已明确抗枯萎病棉花品种81-3根系分泌物中的绿原酸能抑制尖孢镰刀菌生长（郑倩等，2012），但其具体作用靶标与信号通路仍不明确。现有研究多集中于物质的分离鉴定，在分子机制层面解析不足。在解析化感物质对病原物的直接作用机制方面，可采纳一套整合多组学与基因编辑技术的策略。首先，利用转录组学与代谢组学联合分析，筛选化感物质处理后的病原物差异表达基因。例如，抗枯萎病棉花品种新海41号根系分泌物能诱导尖孢镰刀菌中水解酶活性、水解O-糖基化合物相关基因的富集（娄慧等，2023）。为验证这些基因是否参与病原物的解毒过程，可利用成簇规律间隔短回文重复序列–相关联蛋白9（clustered regularly interspaced short palindromic repeats-associated protein 9，CRISPR-Cas9）技术构建相应的基因敲除突变体，并借助表面等离子体共振等技术直接测定化感物质与靶蛋白的结合亲和力，从而系统揭示物质–基因–表型的关联机制。在植物自身层面，解析化感物质如何通过调控关键酶活性来激活抗病代谢通路，同样是研究的重点。例如，为探究抗黑胫病烟草根系分泌物对苯丙素代谢的激活机制，可借鉴CRISPR干扰（CRISPR interference，CRISPRi）系统技术沉默关键酶肉桂酸-4-羟化酶的策略，以验证其对下游类黄酮产物合成的调控作用（Karlson et al.，2022）。因此，综合运用基因沉默等功能性验证技术，是阐明植物体内化感物质调控网络的关键。

4.3 抗感品种根系分泌物与根际微生物互作解析

根系分泌物是宿主植物调控功能微生物组互作的重要介质。抗冠瘿病樱桃品种吉塞拉6号根系分泌物能降低根际农杆菌属相对丰度，感病品种海樱1号则呈现相反趋势（Chen et al.，2024）。多数研究仅探明植物根系分泌物中特定物质能抑制病原物，

但宿主通过根系分泌物调控功能微生物组成与维持根际微环境稳态的相关机制尚不明确。以气生根黏液–功能微生物为核心，构建植物功能基因–根系分泌物–功能微生物组的根际互作新模型，为解析植物到大量微生物时，如何通过根系分泌物特异性塑造与功能微生物的互作关系提供了全新视角；该模型还提出，可整合基因组、转录组、代谢组和微生物组等多组学技术与分子生物学试验，系统分析并验证宿主黏液代谢物和微生物组的互作机制，进而深入探究根际生态位中微生物稳态的调控规律（Pang & Xu，2024）。因此，未来可进一步通过宏转录组筛选该物质处理后根际微生物的差异表达基因，以明确其对微生物代谢通路的调控机制。此外，微生物对化感物质的转化过程亦值得重点关注。已有研究证实，YNK-FS0019等4株放线菌和YNK-FB0022等3株细菌可降解苯甲酸，进而降低番茄枯萎病发病率，并显著提高番茄地上部分鲜重、干重等农艺性状（廖永琴等，2024）。但当前相关研究多局限于上述基础试验及表型分析，这类微生物降解化感物质、调控植物病害与生长的深层作用机理，仍需开展更为系统的探究。

4.4 抗病性导向的化感育种技术路径

与传统抗病育种主要关注植株自身免疫不同，化感育种将根系分泌物–病原物互作纳入考量，其核心在于通过定向改良根系分泌物的抑菌特性，实现对土传病害的生态防控，从而减少化学农药依赖。此思路已在水稻品种化感稻3号中初步取得成效（Kong et al.，2011），展现出向经济作物拓展的巨大潜力。为将该育种理念转化为可操作的技术路线，亟需建立从特征根系分泌物筛选到新品种田间应用的多层次育种体系。首先，利用基因组学、转录组学和代谢组学等多组学技术，全面绘制主要化感物质通路的基因图谱与代谢网络，构建覆盖绿原酸、肉桂酸和大豆皂苷I等特征化合物代谢路径的基因编辑资源库，如在烟草中已筛选到与苯丙素代谢相关的基因标记（Zhang et al.，2020a）。其次，基于多组学数据与遗传分析，筛选出同时影响多个代谢途径的枢纽基因或转录因子，运用CRISPR-Cas9等基因编辑技术进行多靶点协同调控，该技术能敲除抗白叶枯病水稻品种L214中的*Xa47(t)a*基因获得突变体，并对其抗性进行评价（卢源达等，2023）；Zhang et al.（2021）也在成功定位到水稻中酚类物质合成的数量性状位点（quantitative trait locus，QTL）。最后，在田间试验中，通过杂交手段将经过优化的代谢模块逐步整合到优良的遗传背景中，同时运用分子标记辅助选择技术对目标性状进行精准跟踪与筛选，持续对入选材料的抗病能力与综合农艺性状进行系统评估，培育出一类根系代谢网络运行高效、抗病活性物质能够持续稳定分泌的新型品种。该路线从植物根系分泌物的系统性调控出发，可开创一条以增强根际化学防御为核心的育种新路径。

4.5 新兴技术在抗感品种化感作用中的应用

传统植物土传病害抗感品种根系分泌物研究多依赖化学分析与生物测定手段，研究深度与维度受限，而新兴技术的引入为该领域研究带来突破性拓展。成像质谱、核磁共振等先进分析技术，不仅能从植物抗感品种根系分泌物复杂组分中精准识别关键化感物质，还可实现根系分泌物在根际微域的原位可视化表征，清晰揭示化感物质的空间释放特征与分布规律（彭钰洁等，2018；Li et al.，2023）。此外，人工智能算法凭借强大的数据处理能力，可高效解析植物土传病害抗感品种根系分泌物化感作用相关的海量多维数据，通过构建多参数预测模型，实现对作物化感潜力的精准评估。针对抗枯萎病棉花品种新海41号与感病品种新海号的对比研究，研究者将根系分泌物中特定酚类、有机酸的种类及含量、根际土壤pH值、速效养分含量、土壤酶活性，以及尖孢镰刀菌菌丝生长速率、孢子萌发率等多维度指标作为输入参数，构建机器学习模型；经训练后，该模型可有效识别关键抗病特征，如抗枯萎病棉花品种新海41号分泌的绿原酸对病原菌菌丝生长的抑制作用随其浓度增加而增强（郑倩等，2012），从而实现对未知棉花品种枯萎病化感抑制能力的精准预测。此外，微流控芯片技术能够精准模拟根际微环境，精确调控化感物质浓度梯度，可实时动态观测病原物的趋化行为。一款集成色度传感器的纸基微流控装置，更可实现小麦根系分泌物生化成分的连续提取、高精度筛选与快速诊断（Patko et al.，2024）。

参 考 文 献（References）

Badri DV, Vivanco JM, 2009. Regulation and function of root exudates[J]. Plant, Cell & Environment, 32(6): 666−681

Brackin R, Atkinson BS, Sturrock CJ, Rasmussen A, 2017. Roots-eye view: using microdialysis and microCT to non-destructively map root nutrient depletion and accumulation zones[J]. Plant, Cell & Environment, 40(12): 3135−3142

Chen L, Bian LS, Ma QH, Li Y, Wang XH, Liu YP, 2024. Defensive alteration of root exudate composition by grafting *Prunus* sp. onto resistant rootstock contributes to reducing crown gall disease[J].

Horticulture Research, 11(4): uhae049

Chen YH, Jiang XF, Su Y, Wang ML, 2022. Metabolome studies of root exudates from different clubroot resistance *Brassica napus*[J]. Journal of Sichuan University (Natural Science Edition), 59(3): 163−171 (in Chinese) [陈宇红, 蒋学飞, 苏滢, 王茂林, 2022. 不同根肿病抗性油菜根系分泌物的代谢组研究[J]. 四川大学学报(自然科学版), 59(3): 163-171]

Chon SU, Jang HG, Kim DK, Kim YM, Boo HO, Kim YJ, 2005. Allelopathic potential in lettuce (*Lactuca sativa* L.) plants[J]. Scientia Horticulturae, 106(3): 309−317

Di N, Zheng N, Han HJ, Wang J, Cui C, Zheng XQ, 2020. The stimulatory effect of different sunflower varieties root exudates on germination of sunflower broomrape[J]. Crops(6): 197−201 (in Chinese) [邸娜, 郑娜, 韩海军, 王靖, 崔超, 郑喜清, 2020. 不同向日葵品种根系分泌物对向日葵列当萌发的刺激作用[J]. 作物杂志(6): 197−201]

Dong LH, Guo QG, Zhang XY, Zhao WS, Wang PP, Su ZH, Lu XY, Li SZ, Ma P, 2019. Effect of cotton root exudates on the chemotaxis of *Bacillus subtilis* strain NCD-2[J]. Acta Phytopathologica Sinica, 49(3): 399−407 (in Chinese) [董丽红, 郭庆港, 张晓云, 赵卫松, 王培培, 苏振贺, 鹿秀云, 李社增, 马平, 2019. 棉花根系分泌物对枯草芽胞杆菌NCD-2菌株趋化性的影响[J]. 植物病理学报, 49(3): 399−407]

Dong Y, Dong K, Tang L, Zheng Y, Li XR, Hu GB, Liu YM, 2015. Relationship of free amino acids in root exudates with wilt disease (*Fusarium oxysporum*) of faba bean[J]. Acta Pedologica Sinica, 52(4): 919−925 (in Chinese) [董艳, 董坤, 汤利, 郑毅, 李欣然, 胡国彬, 刘一鸣, 2015. 蚕豆根系分泌物中氨基酸含量与枯萎病的关系[J]. 土壤学报, 52(4): 919−925]

Dong Y, Dong K, Zheng Y, Yang ZX, Tang L, Xiao JX, 2014. Allelopathic effects and components analysis of root exudates of faba bean cultivars with different degrees of resistance to *Fusarium oxysporum*[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 22(3): 292−299 (in Chinese) [董艳, 董坤, 郑毅, 杨智仙, 汤利, 肖靖秀, 2014. 不同抗性蚕豆品种根系分泌物对枯萎病菌的化感作用及根系分泌物组分分析[J]. 中国生态农业学报, 22(3): 292−299]

Dong YX, Jiang JL, Li L, Yang N, Jiao CJ, Chen DJ, 2021. Difference analysis of allelopathy of water extract of healthy and root rot *Panax quinquefolium* L. [J]. Northern Horticulture(12): 9−16 (in Chinese) [董艳鑫, 蒋景龙, 李丽, 阳妮, 焦成瑾, 陈德经, 2021. 健康和患根腐病西洋参根水提液化感作用差异性分析[J]. 北方园艺(12): 9−16]

Duan X, Bi HG, Li T, Wu GX, Li QM, Ai XZ, 2017. Root characteristics of grafted peppers and their resistance to *Fusarium solani*[J]. Biologia Plantarum, 61(3): 579−586

Duan X, Sun CC, Sun SN, Wu GX, Wang HT, Bi HG, Ai XZ, 2017. Effects of grafted pepper root exudates on root rot and bacterial wilt[J]. Acta Horticulturae Sinica, 44(2): 297−306 (in Chinese) [段曦, 孙晨晨, 孙胜楠, 吴帼秀, 王洪涛, 毕焕改, 艾希珍, 2017. 嫁接辣椒根系分泌物对根腐病和青枯病的影响[J]. 园艺学报, 44(2): 297−306]

Fang TY, Han XY, Yue YL, 2024. Disease-resistant varieties of Chinese cabbage (*Brassica rapa* L. ssp. *pekinensis*) inhibit *Plasmodiophora brassicae* infestation by stabilising root flora structure[J]. Frontiers in Plant Science, 15: 1328845

Feng YL, Du CY, Ye HM, Tan J, Wang R, Zhao XY, 2024. Chemical identification of tobacco root exudates and their chemotaxis effects on *Ralstonia solanacearum*[J]. Journal of Plant Protection, 51(4): 841−851 (in Chinese) [冯亚丽, 杜晨阳, 叶慧敏, 谭军, 王瑞, 赵秀云, 2024. 烟草根系分泌物成分的鉴定及青枯雷尔氏菌对其的趋化性[J]. 植物保护学报, 51(4): 841−851]

Fu HL, Liao DL, Liu ZF, Yun TH, Hu YP, Zhu CF, 2022. Root exudates affect soil microecology of grafted wax gourd with pumpkin as rootstock[J]. China Cucurbits and Vegetables, 35(6): 56−61 (in Chinese) [符厚隆, 廖道龙, 刘子凡, 云天海, 胡艳平, 朱昌飞, 2022. 南瓜作砧木嫁接冬瓜根系分泌物对土壤微生态的影响[J]. 中国瓜菜, 35(6): 56−61]

Gan L, Dai YL, Yang XJ, Du YX, Shi NN, Ruan HC, Chen FR, 2020. Biological effects of root exudates from resistant and susceptible banana varieties on *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* and *Bacillus subtilis*[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 31(7): 2279−2286 (in Chinese) [甘林, 代玉立, 杨秀娟, 杜宜新, 石妞妞, 阮宏椿, 陈福如, 2020. 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, 31(7): 2279−2286]

Gao W, Wu H, Hu XG, Yu HF, Zhang RP, Ding CF, 2024. Isoquinoline alkaloids from the roots of *Dactylicapnos scandens* and their antibacterial activities[J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 32(4): 555−561 (in Chinese) [高雯, 吴昊, 胡显光, 于浩飞, 张荣平, 丁彩凤, 2024. 紫金龙根中异喹啉生物碱及其抗菌活性研究[J]. 热带亚热带植物学报, 32(4): 555−561]

Goyal RK, Hui JPM, Ranches J, Stefanova R, Jones A, Banskota AH, Burton I, Yu BY, Berrue F, Hannig A, et al., 2024. Untargeted metabolomic analysis reveals a potential role of saponins in the partial resistance of pea (*Pisum sativum*) against a root rot pathogen, *Aphanomyces euteiches*[J]. Phytopathology, 114(12): 2502−2514

Gu YA, Wei Z, Wang XQ, Friman VP, Huang JF, Wang XF, Mei XL, Xu YC, Shen QR, Jousset A, 2016. Pathogen invasion indirectly changes the composition of soil microbiome *via* shifts in root exudation profile[J]. Biology and Fertility of Soils, 52(7): 997−1005

Haichar FEZ, Santaell C, Heulin T, Achouak W. 2014. Root exudates mediated interactions belowground[J]. Soil Biology & Biochemistry, 77(10): 69−80

Han X, Yang WX, Qin FY, Fan XS, Li LW, Huang K, Yang TY, Shen ZY, Wei MG, 2022. Extraction and characterization of root exudates of different cassava varieties[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 43(6): 1248−1258 (in Chinese) [韩笑, 杨慰贤, 覃锋燕, 范晓苏, 黎亮武, 黄凯, 阳太亿, 申章佑, 韦茂贵, 2022. 不同木薯品种主要根系分泌物提取与鉴定[J]. 热带作物学报, 43(6): 1248−1258]

Hazrati H, Fomsgaard IS, Ding L, Kudsk P, 2021. Mass spectrometry-based metabolomics unravel the transfer of bioactive compounds between rye and neighbouring plants[J]. Plant Cell and Environment, 44(12): 3492−3501

He HB, He HQ, Lin WX, Chen XX, Jia XL, Xiong J, Shen LH, Liang YY, 2005. Terpenoids in root exudates of different allelopathic rice varieties[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 16(4): 732−736 (in Chinese) [何海斌, 何华勤, 林文雄, 陈祥旭, 贾小丽, 熊

君, 沈荔花, 梁义元, 2005. 不同化感水稻品种根系分泌物中萜类化合物的差异分析[J]. 应用生态学报, 16(4): 732−736]

Hu Y, Wang HJ, Wang HB, 2022. Allelopathic effects of alkaloids in *Mirabilis jalapa* L. under cadmium stress[J]. Journal of Agro-Environment Science, 41(10): 2139−2157 (in Chinese) [胡焱, 王海娟, 王宏镔, 2022. 镉胁迫下紫茉莉生物碱的化感效应[J]. 农业环境科学学报, 41(10): 2139−2157]

Jun RH, Chen GL, Li MJ, Li W, 2014. Effect of different resistant sunflower varieties root exudates on germination of *Orobanche cumana* seeds[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 34(7): 1397−1403 (in Chinese) [君睿红, 陈贵林, 李美佳, 李伟, 2014. 不同列当抗性的向日葵品种根系分泌物对向日葵列当种子萌发的影响[J]. 西北植物学报, 34(7): 1397−1403]

Karlson CKS, Mohd Noor SN, Khalid N, Tan BC, 2022. CRISPRi-mediated down-regulation of the cinnamate-4-hydroxylase (C4H) gene enhances the flavonoid biosynthesis in *Nicotiana tabacum*[J]. Biology, 11(8): 1127

Khosravi A, Razavi SH, 2020. The role of bioconversion processes to enhance bioaccessibility of polyphenols in rice[J]. Food Bioscience, 35: 100605

Kong CH, Chen XH, Hu F, Zhang SZ. 2011. Breeding of commercially acceptable allelopathic rice cultivars in China. Pest Management Science, 67(9): 1100−1106

Li QK, Guo F, Tang ZH, Liu P, Song XZ, Lin HT, Shen YW, Li L, Wan SB, 2019. Ecological effects of three phenolic acids on formation of continuous cropping obstacle in peanut (*Arachis hypogaea* L.)[J]. Chinese Journal of Oil Crops Sciences, 41(1): 53−63 (in Chinese) [李庆凯, 郭峰, 唐朝辉, 刘苹, 宋效宗, 林海涛, 沈玉文, 李林, 万书波, 2019. 三种酚酸类物质在花生连作障碍中的生态效应分析[J]. 中国油料作物学报, 41(1): 53−63]

Li XG, Zhang TL, Wang XX, Hua K, Zhao L, Han ZM, 2013. The composition of root exudates from two different resistant peanut cultivars and their effects on the growth of soil-borne pathogen[J]. International Journal of Biological Sciences, 9(2): 164−173

Li YM, Yang F, Han PL, Zhou WL, Wang JH, Yan XF, Lin JX, 2022. Research progress on the mechanism of root exudates in response to abiotic stresses[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 28(5): 1384−1392 (in Chinese) [李月明, 杨帆, 韩沛霖, 周万里, 王竞红, 阎秀峰, 蔺吉祥, 2022. 植物根系分泌物响应非生物胁迫机理研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 28(5): 1384−1392]

Li Z, Guo WF, Mo CM, Tang RH, He LQ, Du L, Li M, Wu HN, Tang XM, Huang ZP, et al., 2023. Root metabolism and effects of root exudates on the growth of *Ralstonia solanacearum* and *Fusarium* moniliforme were significantly different between the two genotypes of peanuts[J]. Genes, 14(2): 528

Liao YQ, Wang N, Shen YX, Tang JC, Shi ZF, Yi XP, Feng LY, Li MG, He YH, Yang PW, 2024. Three phenolic acid-degrading bacterial strains: screening, identification, and biological activities[J]. Microbiology China, 51(6): 2193−2214 (in Chinese) [廖永琴, 王楠, 申云鑫, 唐加菜, 施竹凤, 矣小鹏, 冯路遥, 李铭刚, 何永宏, 杨佩文, 2024. 三株酚酸降解菌的筛选与鉴定及其生物活性[J]. 微生物学通报, 51(6): 2193−2214]

Liu C, Geng HY, Li WX, Li YY, Lu YS, Xie KZ, Sun LL, Zhang JX, Peng HL, Shi CH, et al., 2023. Innate root exudates contributed to contrasting coping strategies in response to *Ralstonia solanacearum* in resistant and susceptible tomato cultivars[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 71(50): 20092−20104

Liu P, Zhao HJ, Tang ZH, Zhang YF, Lin HT, Shen YW, Wang JT, Wan SB, 2015. Effects of continuous cropping on root exudates of different resistance peanut (*Arachis hypogaea* L.) varieties and allelochemicals content in soil[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 37(4): 467−474 (in Chinese) [刘苹, 赵海军, 唐朝辉, 张玉凤, 林海涛, 沈玉文, 王江涛, 万书波, 2015. 连作对不同抗性花生品种根系分泌物和土壤中化感物质含量的影响[J]. 中国油料作物学报, 37(4): 467−474]

Liu SH, Zheng XY, Zhong C, Wang P, Yang YJ, Yu WJ, 2021. Effects of active substances secreted from roots of two grafted tomato plants on tomato bacterial wilt and rhizosphere microorganisms[J]. Journal of Southern Agriculture, 52(12): 3382−3391 (in Chinese) [刘斯晗, 郑旭阳, 钟川, 王鹏, 阳燕娟, 于文进, 2021. 2种嫁接番茄根系分泌活性物质对番茄青枯病及根际微生物的影响[J]. 南方农业学报, 52(12): 3382−3391]

Lou H, Zhu JC, Yang Y, Zhang W, 2023. Effects of root exudates in resistant and susceptible varieties of cotton on the growths and gene expressions of *Fusarium oxysporum*[J]. Biotechnology Bulletin, 39(9): 156−167 (in Chinese) [娄慧, 朱金成, 杨洋, 张薇, 2023. 抗、感品种棉花根系分泌物对尖孢镰刀菌生长及基因表达的影响[J]. 生物技术通报, 39(9): 156−167]

Lu YD, Zhang DY, Wang LX, Xiao SQ, Du YL, Chen L, 2023. Knockout and identification of rice bacterial blight resistance gene *Xa47*(*t*)*a*[J]. Journal of Plant Protection, 50(4): 883−893 (in Chinese) [卢源达, 张敦宇, 王玲仙, 肖素勤, 杜云龙, 陈玲, 2023. 水稻抗白叶枯病基因 *Xa47*(*t*)*a* 的敲除及抗性鉴定[J]. 植物保护学报, 50(4): 883−893]

Ma SQ, Chen QR, Zheng YF, Ren TT, He R, Cheng LR, Zou P, Jing CL, Zhang CS, Li YQ, 2025. A tale for two roles: root-secreted methyl ferulate inhibits *P. nicotianae* and enriches the rhizosphere *Bacillus* against black shank disease in tobacco[J]. Microbiome, 13(1): 33

Ma WM, Tang SH, Dengzeng ZM, Zhang D, Zhang T, Ma XL, 2022. Root exudates contribute to belowground ecosystem hotspots: a review[J]. Frontiers in Microbiology, 13: 937940

Ma YH, Qi YZ, Zhao XS, Zhen WC, 2012. Wilt disease resistance of different strawberry cultivars under root autotoxins stress[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 35(2): 93−97 (in Chinese) [马燕会, 齐永志, 赵绪生, 甄文超, 2012. 自毒物质胁迫下不同草莓品种枯萎病抗性变化的研究[J]. 河北农业大学学报, 35(2): 93−97]

Miró M, Fitz WJ, Swoboda S, Wenzel WW, 2010. *In-situ* sampling of soil pore water: evaluation of linear-type microdialysis probes and suction cups at varied moisture contents[J]. Environmental Chemistry, 7(1): 123−131

Miró M, Hansen EH, 2006. Recent advances and perspectives in analytical methodologies for monitoring the bioavailability of trace metals in environmental solid substrates[J]. Microchimica Acta, 154(1): 3−13

Pan K, Wu FZ, 2007. Correlation analysis of amino acids components

in cucumber root exudates and *Fusarium* wilt resistance[J]. Acta Ecologica Sinica, 27(5): 1945−1950 (in Chinese) [潘凯, 吴凤芝, 2007. 枯萎病不同抗性黄瓜(*Cucumis sativus* L.)根系分泌物氨基酸组分与抗病的相关性[J]. 生态学报, 27(5): 1945−1950]

Pang ZQ, Xu P, 2024. Probiotic model for studying rhizosphere interactions of root exudates and the functional microbiome[J]. The ISME Journal, 18: wrae223

Patko D, Gunatilake UB, Gonzalez-Gaya B, Dupuy LX, Basabe-Desmonts L, Benito-Lopez F, 2024. Spatial and temporal detection of root exudates with a paper-based microfluidic device[J]. Soil Biology and Biochemistry, 195: 109456

Peng SL, Nan P, Zhong Y, 2002. Terpenoids in higher plants and their roles in ecosystems[J]. Chinese Journal of Ecology, 21(3): 33−38 (in Chinese) [彭少麟, 南蓬, 钟扬, 2002. 高等植物中的萜类化合物及其在生态系统中的作用[J]. 生态学杂志, 21(3): 33−38]

Peng YJ, Cheng N, Li JJ, Kong YL, Sun CX, 2018. Effects of nitrogen fertilizer reduction on root exudates of maize seedling analyzed by rhizosphere metabonomics[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 26(6): 807−814 (in Chinese) [彭钰洁, 程楠, 李佳佳, 孔杨鹭, 孙彩霞, 2018. 氮肥减施对玉米幼苗根系分泌物影响的根际代谢组学分析[J]. 中国生态农业学报, 26(6): 807−814]

Pétriacq P, Williams A, Cotton A, McFarlane AE, Rolfe SA, Ton J, 2017. Metabolite profiling of non-sterile rhizosphere soil[J]. The Plant Journal, 92(1): 147−162

Philippot L, Raaijmakers JM, Lemanceau P, van der Putten WH, 2013. Going back to the roots: the microbial ecology of the rhizosphere[J]. Nature Reviews Microbiology, 11(11): 789−799

Phillips RP, Bernhardt ES, Schlesinger WH, 2009. Elevated CO_2 increases root exudation from loblolly pine (*Pinus taeda*) seedlings as an N-mediated response[J]. Tree Physiology, 29(12): 1513−1523

Phillips RP, Erlitz Y, Bier R, Bernhardt ES, 2008. New approach for capturing soluble root exudates in forest soils[J]. Functional Ecology, 22(6): 990−999

Qi YZ, Zhen WC, 2016. Impacts of 4-hydroxybenzoic acid on characteristics of photosynthesis and chlorophyll fluorescence of different strawberry cultivars[J]. Acta Horticulturae Sinica, 43(6): 1157−1166 (in Chinese) [齐永志, 甄文超, 2016. 对羟基苯甲酸胁迫对不同草莓品种光合作用及叶绿素荧光特性的影响[J]. 园艺学报, 43(6): 1157−1166]

Quideau S, Deffieux D, Douat-Casassus C, Pouységu L, 2011. Root exudates of resistant and susceptible cotton cultivars sand its effects on *Fusarium oxysporum* f. sp. *vasinfectum*[J]. Angewandte Chemie International Edition, 50(3): 586−621

Ren GD, Wang GF, Ma Y, 2021. Research progresses on relationship between plant root exudates and soil-borne diseases[J]. Soils, 53(2): 229−235 (in Chinese) [任改弟, 王光飞, 马艳, 2021. 根系分泌物与土传病害的关系研究进展[J]. 土壤, 53(2): 229−235]

Ren ZG, Gai QH, 2016. Root exudates of resistant and susceptible cotton cultivars sand its effects on *Fusarium oxysporum* f. sp. *vasinfectum*[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 25(5): 702−706 (in Chinese) [任志刚, 盖琼辉, 2016. 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, 25(5): 702−706]

Rengel Z, 2002. Genetic control of root exudation[J]. Plant and Soil, 245(1): 59−70

Rice LE. 1984. Allelopathy[M]. New York: Academic Press

Sang ZL, Yang SQ, Wu T, Wu YM, Zhao QJ, 2018. Monosaccharide secreted by root of different resistant flue-cured tobacco and its allelopathy to *Phytophora parasitica* var. *nicotiana*[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 38(4): 698−705 (in Chinese) [桑正林, 杨顺强, 武婷, 吴银梅, 赵启君, 2018. 不同抗性烤烟根系分泌单糖特征及其对黑胫病菌的化感效应[J]. 西北植物学报, 38(4): 698−705]

Schalchli H, Pardo F, Hormazábal E, Palma R, Guerrero J, Bensch E, 2012. Antifungal activity of wheat root exudate extracts on *Gaeumannomyces graminis* var. *tritici* growth[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 12(2): 329−337

Shaposhnikov AI, Shakhnazarova VY, Vishnevskaya NA, Borodina EV, Strunnikova OK, 2020. Aromatic carboxylic acids in barley-root exudates and their influence on the growth of *Fusarium culmorum* and *Pseudomonas fluorescens*[J]. Applied Biochemistry and Microbiology, 56(3): 344−351

Stringlis IA, de Jonge R, Pieterse CMJ, 2019. The age of coumarins in plant-microbe interactions[J]. Plant and Cell Physiology, 60(7): 1405−1419

Stringlis IA, Ke Y, Feussner K, de Jonge R, Van Bentum S, Van Verk MC, Berendsen RL, Bakker PAHM, Feussner I, Pieterse CMJ, 2018. MYB72-dependent coumarin exudation shapes root microbiome assembly to promote plant health[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 115(22): 5213−5222

Su FH, Liu ZQ, He D, Song DB, Gu AX, 2024. Identification of disease resistance of different island cotton lines and effects of root exudates on the growth of cotton *Fusarium oxysporum*[J]. China Cotton, 51(8): 32−38 (in Chinese) [苏飞鸿, 柳自清, 何丹, 宋东博, 顾爱星, 2024. 不同海岛棉品系枯萎病抗性鉴定及其根系分泌物对棉花枯萎病菌生长的影响[J]. 中国棉花, 51(8): 32−38]

Tian DD, Zhou W, Huang SM, Qin LY, Wei D, Wei SL, Long SF, Li CS, 2017. The effects of root exudates screated by different resistant banana varieties on *Fusaiurm oxysporum* f. sp. *cubense* and the components analysis[J]. Journal of Tropical Crops, 38(5): 910−914 (in Chinese) [田丹丹, 周维, 黄素梅, 覃柳燕, 韦弟, 韦绍龙, 龙盛风, 李朝生, 2017. 不同香蕉品种根系分泌物对香蕉枯萎病致病菌的影响及组成分析[J]. 热带作物学报, 38(5): 910−914]

Wang JH, Chen T, Lin WX, 2013. Plant allelopathy types and their application in agriculture[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 21(10): 1173−1183 (in Chinese) [王建花, 陈婷, 林文雄, 2013. 植物化感作用类型及其在农业中的应用[J]. 中国生态农业学报, 21(10): 1173−1183]

Wang JY, Lü YY, Yu D, Zhang WN, Piao FZ, Shen SS, 2014. Effects of root exudates from different resistant pepper varieties on *Phytophthora capsici*[J]. China Vegetables(1): 13−16 (in Chinese) [王继元, 吕雅悠, 于迪, 张维娜, 朴凤植, 申顺善, 2014. 不同抗性辣椒品种根系分泌物对疫霉菌的影响[J]. 中国蔬菜(1): 13−16]

Wang N, Chen H, Dong YY, Yuan ML, 2018. Effects of soil-water conditions on morphological plasticity and allelopathic potential of invasive plant *Aegilops tauschii* Coss[J]. Acta Agrestia Sinica,

26(2): 402−408 (in Chinese) [王宁, 陈浩, 董莹莹, 袁美丽, 2018. 土壤水分对入侵植物节节麦表型可塑性和化感作用的影响[J]. 草地学报, 26(2): 402−408]

Wang XM, Wang CY, Chen R, Wang WX, Wang DD, Tian XL, 2023. Plant genotype shapes the soil nematode community in the rhizosphere of tomatoes with different resistance to *Meloidognye incognita*[J]. Plants, 12(7): 1528

Wang Y, Jiang L, Yang Q, Xie SS, 2024. Identification of root exudate components during the *Fusarium graminearum*-maize interaction and their antifungal activity[J]. Journal of Plant Protection, 51(1): 219−227 (in Chinese) [王云, 江林, 杨倩, 谢珊珊, 2024. 禾谷镰刀菌–玉米互作根系分泌物组分的鉴定及其抑菌活性分析[J]. 植物保护学报, 51(1): 219−227]

Wen T, Yuan J, He X, Liu Y, Hung QW, Shen QR, 2020. Enrichment of beneficial cucumber rhizosphere microbes mediated by organic acid secretion[J]. Horticulture Research, 7(1): 154

Wu XT, Lai RQ, Mi YE, Gu G, Zhang B, Wang QN, 2021. Control effects of garlic root exudates on *Fusarium oxysporum* root rot of tobacco[J]. Chinese Journal of Biological Control, 37(3): 555−563 (in Chinese) [吴晓婷, 赖荣泉, 米月娥, 顾钢, 张榜, 王巧妮, 2021. 大蒜根系分泌物对烟草镰刀菌根腐病的控制作用[J]. 中国生物防治学报, 37(3): 555−563]

Wu XT, Lai RQ, Zhang F, Gu G, Zhou T, Zhang B, 2022. Effects of garlic root exudates on *Ralstonia solanacearum*[J]. Chinese Journal of Biological Control, 38(6): 1592−1597 (in Chinese) [吴晓婷, 赖荣泉, 张帆, 张帆, 顾钢, 周挺, 张榜, 2022. 大蒜根系分泌物对烟草青枯病的影响[J]. 中国生物防治学报, 38(6): 1592−1597]

Wu YX, Fang WP, Zhu SJ, Jin KY, Ji DF, 2008. The effects of cotton root exudates on the growth and development of *Verticillium dahliae*[J]. Frontiers of Agriculture in China, 2(4): 435−440

Xia H, Shen J, Riaz M, Yang HY, Dong Q, Zu CL, Yu F, Yan YF, Li JX, Liu B, et al., 2024. Microbial regulatory mechanisms of disease-resistant tobacco varieties in the prevention and control of bacterial wilt disease[J]. Applied Soil Ecology, 202: 105598

Xia RX, Liu J, Zhao WQ, Fang K, Liu L, Liu Q, 2024. Differences in the chemical composition and content of root exudates of dominant coniferous and broadleaf tree species in subalpine forests of western Sichuan, China[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 30(1): 26−34 (in Chinese) [夏瑞雪, 刘佳, 赵文强, 方楷, 刘露, 刘庆, 2024. 川西亚高山森林优势针阔树种根系分泌物的化学组分与含量差异[J]. 应用与环境生物学报, 30(1): 26−34]

Xing YZ, Wang J, Wang H, Zhuang HF, Xu F, Zhao QY, 2025. Differential root metabolites secreted by newly planted and continuously cropping *Vanilla* orchids and their effects on *Fusarium oxysporum*[J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 45(3): 30−36 (in Chinese) [邢诒彰, 王洁, 王辉, 庄辉发, 徐飞, 赵青云, 2025. 健康与连作发病香草兰根系分泌物差异成分筛选及其对尖孢镰刀菌的影响[J]. 热带农业科学, 45(3): 30−36]

Xu GF, Shen SC, Zhang FD, Zhang YH, 2016. Allelopathic response to different temperature conditions of wild rice (*Oryza longistaminata*) and its descendants[J]. Chinese Journal of Rice Science, 30(5): 559−566 (in Chinese) [徐高峰, 申时才, 张付斗, 张玉华, 2016. 温度对不同叶龄长雄野生稻及其后代化感作用的影响[J]. 中国水稻科学, 30(5): 559−566]

Yang GD, Zhou BL, Zhang XY, Zhang ZJ, Wu YY, Zhang YM, Lü SW, Zou QD, Gao Y, Teng L, 2016. Effects of tomato root exudates on *Meloidogyne incognita*[J]. PLoS ONE, 11(4): e0154675

Yao YJ, Liu YX, Li X, Li H, Wang F, 2021. Identification and antagonistic effect of chemotactic microorganisms from tobacco root exudates on *Ralstonia solanacearum*[J]. Molecular Plant Breeding, 19(22): 7510−7518 (in Chinese) [姚云静, 刘艳霞, 李想, 李寒, 王丰, 2021. 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, 19(22): 7510−7518]

Yuan F, Liu ZF, Liao DL, Gao Z, Cao XX, 2021. Allelopathy mechanism of grafting with pumpkin rootstock on improving resistance to *Fusarium* wilt in wax gourd[J]. China Cucurbits and Vegetables, 34(5): 26−29 (in Chinese) [袁飞, 刘子凡, 廖道龙, 高瞻, 曹鑫鑫, 2021. 南瓜嫁接提高冬瓜枯萎病抗性的化感机制[J]. 中国瓜菜, 34(5): 26−29]

Zhai ZX, Li DM, Deng T, Deng DH, Yang LY, Zhou Y, Guo LJ, Huang JS, 2020. Inhibition of *Fusarium oxysporum* by different phenolic acids secreted from roots of different resistant banana varieties[J]. Acta Horticulturae Sinica, 47(11): 2207−2214 (in Chinese) [翟子翔, 李得铭, 邓涛, 邓大豪, 杨腊英, 周游, 郭立佳, 黄俊生, 2020. 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, 47(11): 2207−2214]

Zhang CS, Feng C, Zheng YF, Wang J, Wang FL, 2020a. Root exudates metabolic profiling suggests distinct defense mechanisms between resistant and susceptible tobacco cultivars against black shank disease[J]. Frontiers in Plant Science, 11: 559775

Zhang CS, Zheng YF, Peng LJ, Cao JM, 2020b. Rootstock-scion interaction affects the composition and pathogen inhibitory activity of tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) root exudates[J]. Plants, 9(12): 1652

Zhang FM, Wang QL, Yang SC, Li L, Rong YH, Sun SX, Zheng Y, 2023. Response of vetiver root exudates to atrazine exposure and its effect on removal of atrazine in soil[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 39(10): 1323−1331 (in Chinese) [张发明, 王秋玲, 杨树春, 李良, 荣渝虹, 孙仕仙, 郑毅, 2023. 香根草根系分泌物对阿特拉津胁迫的响应及对土壤中阿特拉津残留的去除[J]. 生态与农村环境学报, 39(10): 1323−1331]

Zhang QJ, Zhang AH, Sun JB, Zhang LX, 2012. Advances of research on allelopathic potencial of terpenoids in plants[J]. Ecology and Environmental Sciences, 21(1): 187−193 (in Chinese) [张秋菊, 张爱华, 孙晶波, 张连学, 2012. 植物体中萜类物质化感作用的研究进展[J]. 生态环境学报, 21(1): 187−193]

Zhang Y, Ma SY, Lu X, Chai Q, Zhang XC, Li S, 2018. Isolation, identification and biological effects of allelochemicals from the root exudates of pea[J]. Plant Physiology Communications, 54(3): 500−508 (in Chinese) [张允, 马绍英, 卢旭, 柴强, 张绪成, 李胜, 2018. 豌豆根系中分泌物质的分离鉴定及其化感效应的研究[J]. 植物生理学报, 54(3): 500−508]

Zhang YJ, Zhou WL, Cui MJ, Geng EK, Miao QY, Yang SH, Lü GY, 2022. Identification of root exudates from resistant and susceptible watermelon varieties and their effects on growth of *Fusarium oxysporum* f. sp. *niveum*[J]. China Cucurbits and Vegetables,

35(12): 33−39 (in Chinese) [张玉锦, 周文丽, 崔梦娇, 耿二康, 苗巧艺, 杨嵩涵, 吕桂云, 2022. 抗、感西瓜根系分泌物鉴定及对枯萎病菌生长的影响[J]. 中国瓜菜, 35(12): 33−39]

Zhang YM, Yu HX, Ye WW, Shan JX, Dong NQ, Guo T, Kan Y, Xiang YH, Zhang H, Yang YB, et al., 2021. A rice QTL *GS3.1* regulates grain size through metabolic-flux distribution between flavonoid and lignin metabolons without affecting stress tolerance[J]. Communications Biology, 4: 1171

Zhao WZ, Zheng XY, Zhang YQ, Zhong C, Yang YJ, Yu WJ, 2019. Effects of root exudates from tomato grafted with different rootstocks on *Ralstonia solanacearum* and seedling growth[J]. China Vegetables, (5): 58−63 (in Chinese) [赵文宗, 郑旭阳, 张映卿, 钟川, 阳燕娟, 于文进, 2019. 不同砧木嫁接番茄根系分泌物对青枯病菌和幼苗生长的影响[J]. 中国蔬菜, (5): 58−63]

Zhao XS, Qi YZ, Zhen WC, 2012. Allelochemicals and allelopathy of the root exudates of different resistant strawberry cultivars to replant disease[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 35(3): 100−105 (in Chinese) [赵绪生, 齐永志, 甄文超, 2012. 不同抗连作障碍品种草莓根系分泌物化感物质差异分析及其化感效应[J]. 河北农业大学学报, 35(3): 100−105]

Zhen WC, Wang XY, Cao KQ, Jin ZJ, 2004. Study on determination and allelopathy of amino acids in strawberry root exudates and decomposing products[J]. Journal of Hebei Agricultural University, 27(2): 76−80 (in Chinese) [甄文超, 王晓燕, 曹克强, 靳增军, 2004. 草莓根系分泌物和腐解物中氨基酸的检测及其化感作用研究[J]. 河北农业大学学报, 27(2): 76−80]

Zheng Q, Li JH, Wei CZ, Chu GX, 2012. Effects of root exudates and phenolic acids from differently resistant cotton cultivars on *Verticillium dahliae*[J]. Cotton Science, 24(4): 363−369 (in Chinese) [郑倩, 李俊华, 危常州, 褚贵新, 2012. 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, 24(4): 363−369]

Zheng YX, Tang HD, Li HX, Yan ZS, Guo XJ, 2011. Allelopathic effects and identification of allelochemicals in root exudates of grafted watermelons[J]. Journal of Fruit Science, 28(5): 863−868 (in Chinese) [郑阳霞, 唐海东, 李焕秀, 严泽生, 郭学君, 2011. 嫁接西瓜根系分泌物的化感效应及其化感物质的鉴定[J]. 果树学报, 28(5): 863−868]

Zhou BL, Chen ZX, Du L, Xie YH, Ye XL, 2011a. Allelopathy of the root exudates from different resistant eggplants to *Verticillium* wilt (*Verticillium dahliae* Kleb.) [J]. Acta Ecologica Sinica, 31(14): 3964−3972 (in Chinese) [周宝利, 陈志霞, 杜亮, 谢玉宏, 叶雪凌, 2011a. 不同抗病性茄子根系分泌物对黄萎菌的化感作用[J]. 生态学报, 31(14): 3964−3972]

Zhou BL, Liu N, Ye XL, Lu B, 2011b. Effect of grafting eggplant on root exudates and disease resistance under *Verticillium dahliae* stress[J]. Acta Ecologica Sinica, 31(3): 749−759 (in Chinese) [周宝利, 刘娜, 叶雪凌, 鲁博, 2011b. 嫁接茄子根系分泌物变化及其对黄萎菌的影响[J]. 生态学报, 31(3): 749−759]

Zhou BL, Yin YL, Li YP, Xu Y, Chen SL, Ye XL, 2010. Relationship between root exudates of grafted eggplants and *Verticillium* wilt resistance and their components identification[J]. Acta Ecologica Sinica, 30(11): 3073−3079 (in Chinese) [周宝利, 尹玉玲, 李云鹏, 徐妍, 陈绍莉, 叶雪凌, 2010. 嫁接茄根系分泌物与抗黄萎病的关系及其组分分析[J]. 生态学报, 30(11): 3073−3079]

Zhou J, Zhao QH, Zhang J, Yang CZ, Qi CD, Guo FL, Wu JP, 2024. Comparative analysis of root exudates between healthy and soft rot diseased *Amorphophallus konjac*[J]. China Cucurbits and Vegetables, 37(11): 145−152 (in Chinese) [周洁, 赵清华, 张杰, 杨朝柱, 齐传东, 郭凤领, 吴金平, 2024. 魔芋软腐病病株与健株根系分泌物比较分析[J]. 中国瓜菜, 37(11): 145−152]

Zhou XH, Gao EL, Wang YJ, Li YL, Yuan DJ, Zhu LF, 2022. GhROP6 involved in cotton resistance to *Verticillium* wilt through regulating jasmonic acid synthesis and lignin metabolism[J]. Cotton Science, 34(2): 79−92 (in Chinese) [周雪慧, 高二林, 王钰静, 李焱龙, 袁道军, 朱龙付, 2022. GhROP6通过调控茉莉酸合成与木质素代谢参与棉花抗黄萎病反应[J]. 棉花学报, 34(2): 79−92]

Zhou XR, Jiang B, Gong XH, Xiao CH, Xiong TT, Zhou L, Niu XY, 2016. Allelopathic effects of soybean root extracts on seed germination and seedling growth of tumorous stem mustard (*Brassica juncea* var. *tumida*) [J]. Soybean Science, 35(1): 74−79 (in Chinese) [周先容, 江波, 龚小华, 肖春红, 熊婷婷, 周林, 牛贤宇, 2016. 大豆根系浸提液对茎瘤芥种子萌发和幼苗生长的化感作用[J]. 大豆科学, 35(1): 74−79]

Zhou XX, Yuan SL, Yang L, Xia T, Zhang Y, Fan W, 2024. Identification of continuous cropping tobacco root exudates and screening of potential allelopathic substances[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 26(7): 136−146 (in Chinese) [周喜新, 袁世林, 杨柳, 夏滔, 张毅, 范伟, 2024. 连作烟草根系分泌物鉴定及潜在化感物质的筛选研究[J]. 中国农业科技导报, 26(7): 136−146]

Zhu MQ, Liu CP, Deng MJ, Du KJ, 2015. Allelopathy of aqueous extracts obtained from roots of *Ailanthus altissima*[J]. Journal of Forest and Environment, 35(3): 284−288 (in Chinese) [朱美秋, 刘春鹏, 邓明静, 杜克久, 2015. 臭椿根系水浸提液的化感效应[J]. 森林与环境学报, 35(3): 284−288]

Zuo CW, Sun QM, Huang BZ, Li CY, Yi GJ, 2010. Screening method for resistance to *Fusarium* wilt of banana basing on green fluorescent protein tagged pathogen and root exudates[J]. Acta Horticulturae Sinica, 37(5): 713−720 (in Chinese) [左存武, 孙清明, 黄秉智, 李春雨, 易干军, 2010. 利用根系分泌物与绿色荧光蛋白标记的病原菌互作关系鉴定香蕉对枯萎病的抗性[J]. 园艺学报, 37(5): 713−720]

Zuo Y, 2013. Research progress on polyphenols[J]. Cereals & Oils, 26(4): 6−10 (in Chinese) [左玉, 2013. 多酚类化合物研究进展[J]. 粮食与油脂, 26(4): 6−10]

（责任编辑：王 璇）