



杨悦,顾广军,胡颖慧,等.果树与根际微生物互作关系研究进展[J].黑龙江农业科学,2024(5):103-108.

果树与根际微生物互作关系研究进展

杨悦,顾广军,胡颖慧,刘畅,卜海东,于文全,程显敏

(黑龙江省农业科学院 牡丹江分院/寒地果树育种栽培重点实验室,黑龙江 牡丹江 157000)

摘要:根际微生物在果树的生长、发育、病理等方面发挥了重要作用,其既有正向促进作用又有反向抑制作用,而果树又通过根系释放根际分泌物对根际微生物群落产生影响,果树与根际微生物之间相互作用、相互影响,对其之间互作关系进行研究对改善根际微环境、促进果树健康生长具有重要意义。因此,本文结合近年来国内外对果树与根际微生物相互作用的相关研究,综述了包括根际、根际微生物、根际微生物对果树的影响、果树对根际微生物的影响等几方面内容,并对果树与根际微生物未来的研究方向进行了展望。

关键词:果树;根际微生物;相互作用;根际

我国是世界上最大的水果生产国和消费国,果树种植面积逐年增加,占国民生产总值的比例也日益增长,果树产业已经成为我国部分地区的经济支柱产业,在促进当地经济发展、提升果农生活水平等方面起到了举足轻重的作用^[1]。但当前在果树实际生产中,为了提高果园土壤养分含量、提升果实品质、增加果树产量,在实际生产中过量施用化肥农药,有机肥投入不足等问题严重破坏了果树产业的绿色可持续发展,进而导致土壤质量急剧下降、根际有害微生物增多、病虫害日益加剧,制约了果树产业向高产优质发展的历程。

根际是距离植物根系最近、对植物根系活动最敏感的区域,是植物与土壤进行物质交换和能量流动的平台。根际微生物是土壤生态系统中活动最旺盛的部分,同时也是参与物质循环和能量流动的重要组成。在果树根际微生态系统中,根系通过根系分泌物等,影响微生物群落和果树的生理过程,进而对果树的生长、发育、病理等产生不同程度的影响。果树与根际微生物互作关系十分复杂,目前已经成为众多学者研究的热点之一。本文在综合整理相关文献后对根际和根际微生物进行说明,并重点对根际微生物对果树的影响、果树对根际微生物的影响,以及研究展望进行了综述。以期探讨果树与根际微生物的互作机制,为改善根际土壤微生态环境,促进果树健康生长,实现果树产业可持续健康发展等提供参考。

1 根际

每一株植物都不是独立存在的,而是利用植物根系与土壤微生物相互作用,形成了一个独特的微生态环境,是植物-微生物-土壤相互作用的重要区域,即根际^[2]。根际这一概念是由德国微生物学家 Lorenz Hiltner 在 1904 年提出的,自此以后受到众多科研工作者的广泛关注^[3]。根际环境是植物、微生物和土壤共同作用的场所,既受到植物根系活动的影响,又受到土壤生态环境的影响,其物质交换和能量流动都极其活跃。同时,根际环境为植物生长发育提供了充分的营养,是植物根系营养吸收和新陈代谢的重要场所,与植物抗逆性、根系病害防治及土壤修复等密切相关,是养分、水分或有害物质等进入植物体的关键通路,也是根系生命活动对土壤影响最直接强烈的区域^[4]。

根际是植物和土壤生态系统协同作用的特定区域,为给根际微生物的生长繁殖提供充足的营养和能量,植物根系不断分泌代谢产物。同时,根系的细胞组织陆续死亡、脱落,以此丰富了土壤的有机质,改善了土壤的理化性质,也为微生物的大量生长繁殖提供了有利的条件,使得根际微生物的数量和活性显著高于非根际。这种使植物根际中的微生物数量和活性显著高于根外土壤的现象,被称为根际效应。由此根际微生物也受到了研究者广泛的关注和大量的研究^[5]。

收稿日期:2023-08-18

基金项目:黑龙江省省属科研院所科研业务费项目(CZKYF2022-1-B030);国家重点研发计划项目(2022YFD1600503);牡丹江市级科技指导性计划项目(HT2022FG021);财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-27)。

第一作者:杨悦(1987—),女,硕士,助理研究员,从事果树育种与栽培技术研究。E-mail:yangyue8764@163.com。

通信作者:顾广军(1980—),男,硕士,副研究员,从事苹果、梨的栽培与育种研究。E-mail:ggi-163@163.com。

2 根际微生物

根际微生物是指与根际土壤颗粒紧密附着的微生物,是土壤生态系统中最重要的重要组成部分。其功能具有多样性,根际微生物能够分解有机质,释放各种营养物质,直接参与植物营养转化和土壤肥力的形成,是土壤中物质循环和能量流动的主要参与者^[6]。另外,根际微生物能够帮助植物吸收利用养分,如根瘤菌能够与豆科植物共生起到固氮作用,帮助宿主植物吸收利用氮元素^[7]。根际微生物还可以调节激素合成与分解,以此来促进植物生长,增强植物抗逆性。此外,根际微生物能够通过调节自身的降解和代谢促进污染物降解,降低植物毒性,起到植物修复的作用^[8]。根际微生物也可替代农药对病害进行防治。

果树根际微生物数量庞大、种类繁多,细菌、真菌、放线菌、藻类和病毒等都存在于根际微生物中,这些根际微生物有有益和有害之分,有益微生物能促进果树生长,而有害微生物却抑制果树生长,其中,数量最为丰富的类群是细菌。这些根际微生物的组成受植物种类的影响,即使不同时期的果树其根际微生物也会有所差异。宋晓军^[9]对不同种植年限的苹果树根际土壤微生物进行分析发现,根际四大优势菌门有变形菌门、浮霉菌门、放线菌门和酸杆菌门,其中,种植年限为20年时变形菌门的相对丰度最高,15年酸杆菌门最高,5年则表现为浮霉菌门和放线菌门较高。根际微生物不仅受到果树的影响,同时也会对果树产生影响,根际微生物利用竞争、拮抗和诱导系统抗性机制,抑制土壤中病原菌,从而促进果树生长^[10],同时,病原菌的积累也会造成植物体的大量死亡^[11]。

3 果树与根际微生物互作

3.1 根际微生物对果树的影响

3.1.1 根际有益微生物 植物根系微生物受根系活动的影响,使得根际微生物群落与非根际存在着较大的差异,能够显著促进植物生长的微生物被称为有益微生物。根际微生物种类众多,功能多样,如细菌中的固氮螺菌属、根瘤菌属、芽孢杆菌属、假单胞菌属、沙雷氏菌属、寡养单胞菌属、链霉菌属和真菌中的白粉寄生孢属、盾壳霉属和木霉菌属等^[12-14]均被证实能够促进植物生长,属于根际有益微生物。根际有益微生物生活在土壤、植物根际和茎叶上,一般具有生物防治、产生植物激素、促进植物养分吸收、诱导植株抗性增

强、抑制病原菌生长、调节植物生理活性等功能,因而有益于植物生长^[15-18]。

Erturk等^[19]对野生树莓的研究发现,从其根际分离出的促生细菌菌株能够产生IAA,其作用于插条繁殖后的猕猴桃植株的效果与使用了ABA后相似,对其主根数、最大根长、根平均直径及干重等指标均有积极影响。根际有益微生物在促进植物养分吸收方面主要表现在固氮和溶磷作用。丛枝菌根真菌(AMF)是目前研究较为广泛的根际有益微生物,其可与大部分陆地植物共生,实验证明,其根外菌丝能够将不同形式的氮吸收、同化后运输至寄主植物的根系^[20]。另外,AMF还能够以多种形式促进植物对土壤中磷^[21]、铁等元素的吸收。舒波^[22]对柑橘砧木枳进行研究,发现AMF能够促进柑橘砧木枳对磷的吸收,以此解决枳生长中低磷胁迫的问题。王明元等^[23]研究发现,接种AMF可显著增加枳实生苗活性铁和全铁含量,有效缓解柑橘的缺铁症状。

另外,有研究表明,假单胞菌属、芽孢杆菌属和链霉菌属等根际微生物是潜在的生物防治剂,可通过产生抗生素和抗真菌化合物,来抑制病原菌的生长^[24]。假单胞菌属的细菌能够通过产生如2,4-二乙酰基间苯三酚、吩嗪、吡咯菌素及氰酸^[25-26]等拮抗物质实现抗菌和促生功能。芽孢杆菌对病原物的杀灭或抑制作用,依靠其分泌的脂肽类、表面活性剂以及小分子挥发性物质等来完成,以此来减少连作土壤中土传病害的发生^[27]。枯草芽孢杆菌BLG010和淡紫拟青霉E16的复合菌肥能促进香蕉株高、茎围、叶宽等生长,降低枯萎病发生率,同时提高根际三大微生物类群数量^[28]。

3.1.2 根际有害微生物 根际有害微生物能够引起植物病害的发生,但因其引起的地上部症状与干旱、养分缺失等引起的胁迫症状相似,很难分辨。土传病害也由根际微生物引起,其改变土壤养分条件,影响土壤微环境的健康,是较难控制的病害。Agrios^[29]认为,根际有害微生物主要分为病原真菌、病毒、细菌和线虫4类,其中,病原真菌和线虫对果树影响较大。原因在于在土壤中无芽孢型细菌存活时间短暂,且大部分细菌要想侵染植物需要借助伤口,所以只有小部分细菌是导致果树土壤病害的细菌。病毒对植物的侵染途径与细菌相似,也需借助伤口进入植物体,并通过真菌和线虫等传播^[30]。

在果树病害中,病原真菌侵染引起的病害占绝大部分。如尖孢镰刀菌是一种常见且分布广泛的土传病原真菌,即可以在土壤中生存,又能够侵染植物寄主,可引起香蕉、瓜果等多种植物枯萎病的发生,植物根系分泌物的诱导会使其萌发和生长^[31],也会抑制植物营养物质的运输和光合作用^[32]。Horbach 等^[33]研究表明,病原真菌侵染植物细胞的方式是通过产生植物毒素、有毒化合物等低分子化合物来影响植物细胞活性。目前生产上并没有有效控制根际真菌病害的措施,人们常采用施肥、使用根际促生细菌等方法诱导植物产生抗性,增加根际土壤中的生物多样性。

病原线虫是影响果树种植、生产的第二大病害,其中根结线虫是对植物破坏性最大的病原线虫之一,在果树上亦是如此。根结线虫寄主多样,分布广泛、发病率高,能够侵染 3 000 余种植物,发生面积随作物复种指数等的提高而扩大,危害严重时减产率高达 75% 以上,甚至造成植株死亡。其发生途径主要通过植物创口侵入,形成瘤状的根结,吸收植物营养,减少植物对水分、无机盐等的吸收,以此扰乱植物正常代谢活动,并与立枯丝核菌、镰刀菌等其他病原菌一起引起复合侵染^[34-35]。Furusawa 等^[36]研究表明,根结线虫即可破坏寄主根部组织,其胆囊又是青枯菌定植的适宜场所,因此在生产中根结线虫的发生提高了青枯菌根际侵染的成功率和青萎病的发病率。生产上受根结线虫危害的果树有香蕉、柑橘、桃、李等,主要症状表现在根部形成瘤状肿大,地上部分症状不明显,但随受害时间延长,会出现叶片变小、树势变弱等症状,严重时表现出叶片发黄卷曲,产量降低,甚至树木死亡。目前对于果树线虫的防治方法主要有,选用抗病品种、采用抗性砧木、增施有机肥、种植或覆盖具有毒杀线虫的植物以及药剂防治等^[37]。

3.2 果树对根际微生物的影响

植物在生长发育过程中进行着旺盛的新陈代谢活动,植物的根系是与土壤环境进行交换活动的主体,其从土壤中摄取养分、水分的同时,也向其周围土壤中不断分泌或释放多种物质,包括低分子有机物质如有机酸、糖、酚及各种氨基酸,高分子物质如黏胶、外酶,以及气体、质子、养分离子和根细胞脱落物及其分解产物等,这些物质总称为根系分泌物。根系分泌物为根际微生物的生长繁殖提供了充足的营养和能量,影响着土壤微生物

的活性和分布。果树根系分泌物的组成和数量受到果树种类、树龄及生理状况等因素的影响^[38],进而影响根际微生物群落。果树根系分泌物是果树与土壤环境之间进行物质、能量交换的中间媒介,也是果树根系影响根际微生物群落活性的重要因素^[7]。

3.2.1 果树种类 果树种类的差异影响根际微生物群落特征。研究表明,苹果幼苗的根系分泌物主要含有机酸、乙二醇、酯类和苯酚衍生物;桃根系分泌物除了含有两种未鉴定的化合物外,还包含酚酸和苯酚衍生物;枣的根系分泌物则不含任何酚酸类物质^[39],这些根系分泌物均对其根际微生物产生了不同程度的影响。陈汝等^[40]对 5 种苹果砧木的根际土壤微生物进行研究发现,不同苹果砧木根际微生物群落数量差异显著,微生物多样性与数量变化趋势不一致,且土壤酶活性也各有差异,其中东北山荆子根际微生物总量最高。不同苹果砧木间基因型有所不同,其根系分泌物的数量和组成也不同^[41],通过改变根际 pH、Eh 和螯合作用,根系分泌物特别是低分子有机化合物能对根际元素的溶解度和有效性产生影响,以此直接或间接影响根际土壤微生物的数量和种群结构^[42-43]。此外,果树根系分泌的酚类、生物碱、萜类、酮类、烷烃、酯类、醇类、有机酸等物质具有化感作用。如酚酸类物质对羟基苯甲酸和水杨酸是葡萄的化感物质^[44]。苯甲酸的衍生酯类,芳香烃,脂肪族的醇、醛、酮等都是梨的主要化感物质^[45]。这些根系分泌的化感物质对果树正常的生理生化反应过程产生了重要影响,同时影响了根际微生物的群落结构。

3.2.2 树龄 同种果树的不同树龄其根际微生物也存在差异。这是由于果树生长期间,根系分泌了大量含有充足的碳源和能源物质的根系分泌物,为微生物的生长繁殖所利用,因此根际土壤微生物活性远高于根外^[46]。李智卫等^[47]研究发现,壮龄和老龄苹果树与幼龄苹果树相比,根际可培养细菌数量显著增高。常显波等^[48]对不同种植年限苹果园土壤微生物进行调查研究发现,土壤细菌和真菌数量随种植年限的延长呈上升趋势,而放线菌数量呈下降趋势;且微生物三大类群的相对数量变化不明显。另外,不同的生长阶段果树的根际微生物也存在较大差异。赵帆^[49]对草莓根际微生物变化进行研究发现,在不同连作年限和生长阶段,草莓根际土壤细菌和真菌多样

性、丰富度、群落结构均存在一定的差异,且不同连作年限草莓根际优势细菌和真菌种类均趋于单一,在草莓不同生长阶段变化均较大。

3.2.3 健康状况 果树的健康状况通过对根系分泌物的影响,进而影响根际微生物的群落特征。Wu等^[50]对柑橘须根进行研究发现,与健康的幼苗相比,感染黄龙病的幼苗须根分泌的淀粉和蔗糖含量明显降低。另有研究表明,感染黄龙病的柑橘根系的淀粉、蔗糖等碳水化合物代谢异常,明显降低了根系活力,使得其对柑橘疫霉菌等腐生菌的侵染更加敏感,进而导致根系腐烂,根系分泌物大量减少^[51]。Trivedi等^[52]对柑橘根系的16S rRNA基因克隆文库进行分析,发现健康柑橘的根际中具有大多数与众所周知的促进果树生长的细菌相似的门类,比如芽孢杆菌属、伯克氏菌属、溶杆菌属等,而在感染黄龙病的柑橘根际中并不存在。

3.2.4 外界环境及栽培条件 另外,外界环境条件及栽培管理制度等因素均会影响根系分泌物的种类和数量,从而对根际微生物产生影响。果树的栽培管理制度包括施肥、喷洒农药、耕作、间套作、整形修剪等。在土壤生态系统中,植物对土壤养分的吸收利用离不开微生物的活动,而微生物的生长繁殖又必须有充足的营养,因而在土壤与微生物之间存在相互促进、相互依存的关系。适宜的栽培管理制度能够改善土壤环境,增加土壤养分,从而影响根际微生物,因此,研究栽培管理制度对根际微生物的影响成为目前国内外研究者关注的课题。吕德国等^[53]对寒富苹果在不同施肥时期和方式的根际微生物数量变化情况进行研究,结果表明,覆膜施肥显著提高了寒富苹果根际微生物数量和土壤酶活性,同时,在任何时期施肥或覆膜均能够提高根际细菌、真菌和放线菌数量。赵兰凤等^[54]研究发现,不同施肥处理对香蕉根际微生物群落结构和功能影响显著,且经生物有机肥处理的香蕉根际微生物利用碳源与有机肥和不施肥处理明显不同,其根际微生物活性较高。蔺君娜等^[55]研究发现,不同栽培方式下巨峰葡萄根际微生物数量差异显著,且随物候期变化发生动态变化。

4 总结与展望

综上所述,果树与根际微生物之间的相互作用关系密切又复杂,研究其之间的互作关系不仅

能够改善果园生态环境,增加果树抗逆性,提高果园经济效益,还对维持果树产业可持续发展和生态系统的稳定性等具有重要意义。另外,研究果树与根际微生物相互作用的机制对防治生物入侵、掌握土壤生态系统功能,改善农业生态功能等都有重要意义。在农业生产中,即能够降低农药化肥的使用,又对果树产业向高产、高效、优质、健康等方向发展做出贡献。

目前,众多学者已经注重对果树与根际微生物的研究,但仍有诸多不足之处或尚未突破的难点有待进一步深入研究。首先,现在针对果树与根际微生物的研究主要着重单因素的分析,但其之间的影响因素多种多样,如分泌物、施肥、重金属、气候因素等多方面共同作用产生的影响应该深入研究。其次,土壤微生物的研究方法已经从传统的平板培养法到现在的高通量测序技术和同位素标记技术等,虽然已经取得了巨大的成就,但每种方法也都存在不足之处,因此对根际微生物的研究方法和技术仍需要进一步探究。另外,果树根际微生物特定菌株的筛选和鉴定应得到重视,其可用于果树外源抗性接种、微生物肥料调配、活性药物制造等方面,必将为果树产业发展带来重大突破。对不可培养微生物的研究也同样不可忽视,目前,地球上可培养的微生物仅占1%~5%,而研究者多集中在这少数的可培养微生物的研究,对不可培养微生物的研究少之又少,虽然其研究存在一定难度,但当前原位收集和检测技术(生物传感器)的改进与发展,将为未来挖掘这部分微生物的潜力提供新的思路。最后,充分利用分子生物学手段,利用宏基因组测序、微生物菌群培养和人工重组等技术,应用探针和特定序列鉴定微生物种类,运用这些新技术和新方法对根际微生物进行全面细致的研究将是未来研究的重要方向。

参考文献:

- [1] 付小猛,毛加梅,杨虹霞,等. 果树根际微生物研究综述[J]. 中国果树,2021(11):5-9.
- [2] 徐文静,靳晓东,杨秋生. 植物根际微生物的影响因素研究进展[J]. 河南农业科学,2014,43(5):6-12.
- [3] 周文杰,吕德国,秦嗣军. 植物与根际微生物相互作用关系研究进展[J]. 吉林农业大学学报,2016,38(3):253-260.
- [4] 张利,邱松,刘建霞,等. 植物根际土壤生态研究进展[J]. 四川农业科技,2021(7):39-40.
- [5] 许衡,杨和生,徐英,等. 果树根际微域环境的研究进展[J]. 山东农业大学学报(自然科学版),2004,35(3):476-480.

- [6] SCHIMEL D, MELILLO J, TIAN H, et al. Contribution of increasing CO₂ and climate to carbon storage by ecosystems in the United States [J]. *Science*, 2000, 287 (5460): 2004-2006.
- [7] BAIS H P, WEIR T L, PERRY L G, et al. The role of root exudates in rhizosphere interactions with plants and other organisms [J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2006, 57(1):233-266.
- [8] WEYENS N, vander LELIE D, TAGHAVI S, et al. Phytoremediation; plant-endophyte partnerships take the challenge [J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 2009, 20 (2): 248-254.
- [9] 宋晓军. 苹果根际微生物群落结构分析及苹果根际促生细菌的筛选[D]. 泰安:山东农业大学, 2017.
- [10] BAKKER P A H M, DOORNBOS R F, ZAMIUDIS C, et al. Induced systemic resistance and the rhizosphere microbiome [J]. *The Plant Pathology Journal*, 2013, 29(2):136-143.
- [11] SANTHANAM R, WEINHOLD A, GOLDBERG J, et al. Native root-associated bacteria rescue a plant from a sudden-wilt disease that emerged during continuous cropping [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(36):E5013-E5020.
- [12] BERG G. Plant-microbe interactions promoting plant growth and health: perspectives for controlled use of microorganisms in agriculture[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2009, 84(1):11-18.
- [13] 秦嗣军, 吕德国, 李志霞, 等. 东北山樱根际细菌群落结构多样性分析 [J]. *吉林农业大学学报*, 2011, 33 (6): 643-648.
- [14] 周文杰, 吕德国, 杨丹丹, 等. 根际优势细菌对甜樱桃幼树光合及根系活力的影响 [J]. *吉林农业大学学报*, 2015, 37 (5):555-561, 567.
- [15] 刘涛, 刁治民, 祁永青, 等. 根际微生物及对植物生长效应的初步研究 [J]. *青海草业*, 2008, 17(4):41-44, 47.
- [16] 王学翠, 童晓茹, 温学森, 等. 植物与根际微生物关系的研究进展 [J]. *山东科学*, 2007, 20(6):40-44, 50.
- [17] AHMED A, HASNAIN S. Auxins as one of the factors of plant growth improvement by plant growth promoting rhizobacteria [J]. *Polish Journal of Microbiology*, 2014, 63 (3):261-266.
- [18] MENDES R, GARBEVA P, RAAIJMAKERS J M. The rhizosphere microbiome: significance of plant beneficial, plant pathogenic, and human pathogenic microorganisms [J]. *FEMS Microbiology Reviews*, 2013, 37(5):634-663.
- [19] ERTURK Y, ERCISLI S, HAZNEDAR A, et al. Effects of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) on rooting and root growth of kiwifruit (*Actinidia deliciosa*) stem cuttings [J]. *Biological Research*, 2010, 43(1):91-98.
- [20] JIN H R, LIU J, LIU J, et al. Forms of nitrogen uptake, translocation, and transfer via arbuscular mycorrhizal fungi: a review [J]. *Science China Life Sciences*, 2012, 55 (6): 474-482.
- [21] SMITH S E, JAKOBSEN I, GRÖNLUND M, et al. Roles of arbuscular mycorrhizas in plant phosphorus nutrition: interactions between pathways of phosphorus uptake in arbuscular mycorrhizal roots have important implications for understanding and manipulating plant phosphorus acquisition [J]. *Plant Physiology*, 2011, 156 (3):1050-1057.
- [22] 舒波. 丛枝菌根真菌促进枳 (*Poncirus trifoliata* L. Raf) 磷吸收效应及其机理研究 [D]. 武汉:华中农业大学, 2013.
- [23] 王明元, 夏仁学. 不同 pH 值下丛枝菌根真菌对枳生长及铁吸收的影响 [J]. *微生物学报*, 2009, 49(10):1374-1379.
- [24] CHAITHANYA B H. Biocontrol potentiality and plant growth promoting activity of *Pseudomonas fluorescens*-a review [J]. *International Journal of Agricultural Science and Research*, 2016, 6:169-176.
- [25] MAZURIER S, CORBERAND T, LEMANCEAU P, et al. Phenazine antibiotics produced by fluorescent pseudomonads contribute to natural soil suppressiveness to *Fusarium* wilt [J]. *The ISME Journal*, 2009, 3(8):977-991.
- [26] WELLER D M, LANDA B B, MAVRODI O V, et al. Role of 2, 4-diacetylphloroglucinol-producing fluorescent *Pseudomonas* spp. in the defense of plant roots [J]. *Plant Biology*, 2007, 9(1):4-20.
- [27] XU Z H, SHAO J H, LI B, et al. Contribution of bacillomycin D in *Bacillus amyloliquefaciens* SQR9 to antifungal activity and biofilm formation [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2013, 79(3):808-815.
- [28] 汪军, 周游, 杨腊英, 等. 施用复合菌肥与套作对香蕉枯萎病控病作用的影响 [J]. *中国果树*, 2019(6):69-72, 86.
- [29] AGRIOS G N. *Plant pathology* [M]. 5th ed. Burlington, MA: Elsevier Academic Press, 2005.
- [30] RAAIJMAKERS J M, PAULITZ T C, STEINBERG C, et al. The rhizosphere: a playground and battlefield for soilborne pathogens and beneficial microorganisms [J]. *Plant and Soil*, 2009, 321(1):341-361.
- [31] 高子勤, 张淑香. 连作障碍与根际微生态研究 I. 根系分泌物及其生态效应 [J]. *应用生态学报*, 1998, 9(5):549-554.
- [32] ZHAO X S, ZHEN W C, QI Y Z, et al. Coordinated effects of root autotoxic substances and *Fusarium oxysporum* Schl. f. sp. *fragariae* on the growth and replant disease of strawberry [J]. *Frontiers of Agriculture in China*, 2009, 3 (1):34-39.
- [33] HORBACH R, NAVARRO-QUESADA A R, KNOGGE W, et al. When and how to kill a plant cell: infection strategies of plant pathogenic fungi [J]. *Journal of Plant Physiology*, 2011, 168(1):51-62.
- [34] 胡玉金, 冯敏, 郭文秀, 等. 作物根结线虫病综合防治技术概述 [J]. *山东农业科学*, 2019, 51(4):149-156.
- [35] YI X, GUO Y C, ALIKHAN R A, et al. Understanding the pathogenicity of *Pochonia chlamydosporia* to root knot nematode through omics approaches and action mechanism [J]. *Biological Control*, 2021, 162:104726.

- [36] FURUSAWA A, UEHARA T, IKEDA K, et al. *Ralstonia solanacearum* colonization of tomato roots infected by *Meloidogyne incognita* [J]. *Journal of Phytopathology*, 2019,167(6):338-343.
- [37] 孔祥娟. 果树主要线虫病害及防治方法[J]. 中国园艺文摘, 2015,31(6):196,216.
- [38] SEMCHENKO M, SAAR S, LEPIK A. Plant root exudates mediate neighbour recognition and trigger complex behavioural changes [J]. *The New Phytologist*, 2014, 204 (3): 631-637.
- [39] ZHANG J H, MAO Z Q, WANG L Q, et al. Bioassay and Identification of Root Exudates of Three Fruit Tree Species[J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2007, 49 (3):257-261.
- [40] 陈汝, 王海宁, 姜远茂, 等. 不同苹果砧木的根际土壤微生物数量及酶活性 [J]. *中国农业科学*, 2012, 45 (10): 2099-2106.
- [41] 张江红, 张殿生, 毛志泉, 等. 苹果砧木幼苗根系分泌物的分离与鉴定 [J]. *河北农业大学学报*, 2009, 32(4): 29-32.
- [42] RUMBERGER A, YAO S R, MERWIN I A, et al. Rootstock genotype and orchard replant position rather than soil fumigation or compost amendment determine tree growth and rhizosphere bacterial community composition in an apple replant soil[J]. *Plant and Soil*, 2004, 264(1):247-260.
- [43] WALKER T S, BAIS H P, GROTEWOLD E, et al. Root exudation and rhizosphere biology[J]. *Plant Physiology*, 2003, 132(1):44-51.
- [44] 郭修武, 李坤, 孙英妮, 等. 葡萄根系分泌物的化感效应及化感物质的分离鉴定[J]. *园艺学报*, 2010, 37(6):861-868.
- [45] 李兴发. 梨根系化感成分及接种 AMF 抗化感作用的研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2015.
- [46] 王静. 不同株龄苹果树土壤微生物群落特征研究 [D]. 西安: 陕西师范大学, 2012.
- [47] 李智卫, 王超, 陈伟, 等. 不同树龄苹果园土壤微生物生态特征研究[J]. *土壤通报*, 2011, 42(2):302-306.
- [48] 常显波, 刘举, 韩京龙, 等. 不同种植年限苹果园土壤理化性质及微生物数量[J]. *安徽农业科学*, 2007, 35(5):1423, 1426.
- [49] 赵帆. 不同连作年限草莓根际土壤微生物多样性变化 [D]. 合肥: 安徽大学, 2018.
- [50] WU J, JOHNSON E G, BRIGHT D B, et al. Interaction between *Phytophthora nicotianae* and *Candidatus Liberibacter asiaticus* damage to citrus fibrous roots [J]. *Journal of Citrus Pathology*, 2017, 4(1):35789.
- [51] WU J, JOHNSON E G, GERBERICH K M, et al. Contrasting canopy and fibrous root damage on Swingle citrumelo caused by 'Candidatus *Liberibacter asiaticus*' and *Phytophthora nicotianae* [J]. *Plant Pathology*, 2018, 67(1):202-209.
- [52] TRIVEDI P, DUAN Y P, WANG N. Huanglongbing, a systemic disease, restructures the bacterial community associated with citrus roots [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2010, 76(11):3427-3436.
- [53] 吕德国, 孟倩, 秦嗣军, 等. 冷凉地区不同施肥时期与方式对苹果根际微生物和土壤酶活性的影响 [J]. *江苏农业科学*, 2010, 38(4):133-136.
- [54] 赵兰凤, 胡伟, 刘小锋, 等. 生物有机肥对香蕉根际土壤生物多样性的影响 [J]. *华南农业大学学报*, 2013, 34(2):144-148.
- [55] 蒯君娜, 刘芳, 吴三林. 避雨栽培及物候期对葡萄根际土壤微生物的影响 [J]. *南方农业*, 2018, 12(19):6-10.

Research Progress on the Interaction Between Fruit Trees and Rhizosphere Microorganisms

YANG Yue, GU Guangjun, HU Yinghui, LIU Chang, BU Haidong, YU Wenquan, CHENG Xianmin
(Mudanjiang Branch, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences / Key Laboratory of Cold Region Fruit Tree Breeding and Cultivation, Mudanjiang 157000, China)

Abstract: Rhizosphere microorganisms play an important role in the growth, development, pathology, and other aspects of fruit trees. They have both positive and negative promoting effects, and fruit trees affect the rhizosphere microbial community through the release of rhizosphere secretions from their roots. Fruit trees and rhizosphere microorganisms interact and influence each other. Studying the interaction between them is of great significance for improving the rhizosphere microenvironment and promoting the healthy growth of fruit trees. Therefore, this article reviewed the relevant research on the interaction between fruit trees and rhizosphere microorganisms in recent years both domestically and internationally, including rhizosphere, rhizosphere microorganisms, the impact of rhizosphere microorganisms on fruit trees, and the impact of fruit trees on rhizosphere microorganisms. Based on this, future research directions are also prospected.

Keywords: fruit tree; rhizosphere microorganisms; interaction; rhizosphere