

廖建杰,覃叶欣,李宗俊,等. 植物根际促生菌缓解农作物非生物胁迫和生物胁迫的研究进展[J]. 江苏农业科学,2025,53(11):9-15.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2025.11.002

植物根际促生菌缓解农作物非生物胁迫和生物胁迫的研究进展

廖建杰¹,覃叶欣²,李宗俊²,朱顺莲¹,李福燕¹,巫桂芬¹,李许明¹,潘丽琴¹,
梁云贞¹,韦立台¹,杨敬军¹,冯守富¹

(1. 广西民族师范学院,广西崇左 532200; 2. 广西农业科学院,广西南宁 530007)

摘要:在目前气候急剧变动的情景下,各类农作物正遭受着来自生态环境、非生物因素以及生物因素的严重压力,这种挑战进而引发了农产品在产量及品质方面的显著波动。由于化学药剂对环境和健康的不利影响,对环境友好的生物刺激素成为应对气候变化导致的植物压力和产量损失的必然选择。植物根际促生菌(plant growth-promoting rhizobacteria, PGPR)作为生物刺激素的一种,具有改善土壤理化性质、促进植物生长、提高品质和产量、减少病虫害和减少农药使用等作用,在农林牧业、食品安全、环境保护等方面具有重要的价值和意义。本文综合评述植物根际促生菌(PGPR)在增强农作物对于非生物逆境(包括干旱、低温及盐分胁迫)以及生物逆境(涉及病害与虫害胁迫)的抗逆性方面的研究动态,旨在为该领域提供创新性的研究方向与理论依据。

关键词:植物根际促生菌;生物刺激素;非生物胁迫;生物胁迫;促生机制

中图分类号:S182;S184 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2025)11-0009-07

当前农业面临耕地短缺、气候波动、害虫和病原体增多及杂草困扰等挑战,导致种植生产者不得不加大农药和化肥的使用量。由于化学品的过度使用,对土壤微生物、人类和环境产生极大负面影响,导致土壤持水能力下降、土壤肥力丧失和养分不平衡。为了满足日益增长的粮食需求,亟需一种绿色、高效、可持续且经济的创新技术来确保农业高质量发展。生物促进剂涵盖一系列化合物及微生物,具备激活植物及其根系生长相关基因表达的作用。通过作用于种子、植株或土壤,此类物质能提升作物对营养物质的摄取与运用效能,增强其对环境压力的适应能力,进而促进作物产量的提升及籽粒品质的优化。生物刺激素虽然不属于肥料或

农药,但可通过自身所含的生物活性物质,以多种生化机制促进作物的生长、增产和提高品质,能够有效解决与化肥相关的问题。生物刺激素由生物活性物质或微生物组成,包括海藻和植物提取物、复杂有机物、腐殖质、抗蒸腾剂、甲壳素及其衍生物、各种元素、水解蛋白、含氮化合物和微生物接种剂,能够促进植物生长和提高生产力。其中植物根际促生菌(plant growth-promoting rhizobacteria, PGPR)作为生物刺激素中的一种微生物接种剂,是一类定殖于植物根际的有益细菌,一方面可通过产生植物激素、解钾、固氮、溶磷、产生铁载体等自身代谢来活化土壤中的螯合物,提高土壤养分的利用率,促进植物生长发育和对矿质元素的吸收利用,另一方面能够产生挥发性物质,利用拮抗作用,抑制有害微生物的繁殖或诱导宿主产生防御机制^[1]。当前的研究所识别的植物根际促生菌(PGPR)涵盖了多种菌属,包括但不限于假单胞菌属(*Pseudomonas*)、芽孢杆菌属(*Bacillus*)、肠杆菌属(*Enterobacter*)、农杆菌属(*Agrobacterium*)、埃文氏菌属(*Eriwinia*)、黄杆菌属(*Flavobacterium*)、巴斯德氏菌属(*Pasteuria*)以及沙雷氏菌属(*Serratia*)^[2-3]。

本文旨在探讨基于 PGPR 的生物刺激剂在改善植物应对非生物胁迫(如干旱胁迫、低温胁迫、盐胁迫

收稿日期:2024-11-19

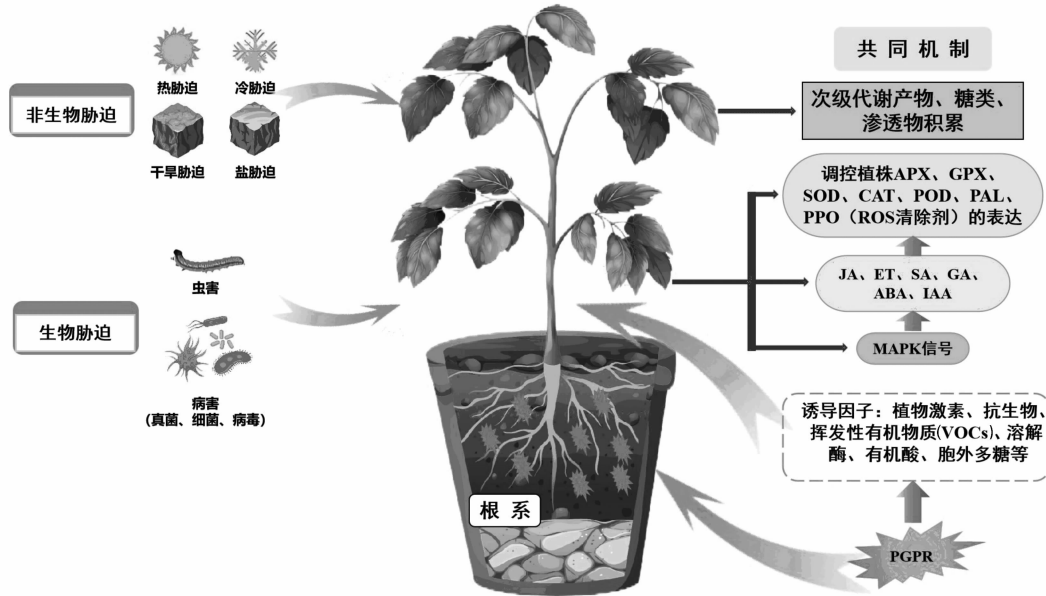
基金项目:广西自然科学基金(编号:2022GXNSFBA035524);广西壮族自治区新工科、新医科、新农科、新文科研究与实践项目(编号:XBK2023016);崇左市科技计划(编号:崇科20220618);广西民族师范学院科研项目(编号:2024YB081);广西民族师范学院高层次人才项目(编号:2023SBNGCC002_2024SBNGCC06)。

作者简介:廖建杰(1992—),男,广西南宁人,硕士,助理研究员,主要研究方向为植物栽培与生理。E-mail:569082230@qq.com。

通信作者:朱顺莲,硕士,教授,主要研究方向为无土栽培及蔬菜新品种引种筛选。E-mail:352794224@qq.com。

胁迫)和生物胁迫(如病害胁迫、虫害胁迫)的耐受性方面的生理、生化调节及信号成分(图 1)。深入了解此类微生物的生物刺激剂引发的生化和分子机

制,尤其是基于 PGPR 的机制,将为设计和开发可持续农业的新型生物制剂提供有力支持。



APX—抗坏血酸过氧化物酶; GPX—谷胱甘肽过氧化物酶; SOD—超氧化物歧化酶; CAT—过氧化氢酶; POD—过氧化物酶; PAL—苯丙氨酸解氨酶; PPO—多酚氧化酶; ROS—活性氧; JA—茉莉酸; ET—乙烯; SA—水杨酸; GA—赤霉素; ABA—脱落酸; IAA—吲哚-3-乙酸; MAPK—促分裂原活化蛋白激酶

图1 PGPR 对植物应对非生物胁迫和生物胁迫调节机制

1 非生物胁迫

1.1 干旱胁迫

在限制农作物产量的诸多非生物因素中,干旱问题已上升至主要核心地位。干旱所造成的胁迫能够引发植物在形态结构、生理机能、生物化学过程以及分子生物学层面上的系列改变^[4]。研究表明,PGPR 能通过溶磷、合成和分泌植物激素、产生胞外多糖(EPS)、合成脱氨酶(ACC)干扰乙烯生物合成途径,以及诱导抗氧化防御系统等作用增强植物的抗旱能力^[5-7]。Lasudee 等研究发现,将嗜热一氧化碳链霉菌(*Streptomyces thermocarboxydus*)接种水稻后,PGPR 通过增强磷元素溶解、产生脯氨酸和吲哚-3-乙酸等作用,激活了水稻的抗氧化能力,维持细胞膜稳定性,提升水稻的抗旱能力^[8]。Ansari 等经过筛选产氮假单胞菌 FAP5,证实能够通过合成 EPS、吲哚-3-乙酸(IAA)、溶解磷酸三钙以及 ACC 等机制,有效减轻小麦所遭受的干旱压力^[9]。通过接种具备 ACC 脱氨酶生成能力的枯草芽孢杆菌 SF48 于番茄植株,Gowtham 等观察到,该处理显著降低了乙烯含量,增强了抗氧化酶的活

性,有效减轻了干旱逆境所引发的氧化伤害,并促进了植物的生长进程^[10]。Lim 等使用地衣芽孢杆菌 K11 处理,可使辣椒中 *Cadh1n*、*VA*、*sHSP* 和 *CaPR10* 基因表达量增加,从而引起脱水蛋白样物质的含量增加,如液泡 H⁺-ATP 酶、小热休克蛋白和有助于植物在严重干旱条件下存活的发病机制相关蛋白^[11]。Abbasi 等研究发现,PGPR 链霉菌菌株通过调节番茄根系转录因子乙烯反应因子 1(ERF1)和 *WRKY70* 的表达,减轻其干旱胁迫^[12]。

1.2 低温胁迫

低温胁迫是限制农业生产的因素之一,植物面临低温胁迫时,会引起体内 ROS 稳态、能量代谢(电子传递链)、光合作用效率和生物分子(酶、蛋白质和核酸)结构的变化等,为适应低温下生存,植物将通过膜脂质、蛋白质、渗透调节物质水平、植物激素和活性氧清除酶的变化来进行调节^[13-14]。研究指出,植物根际促生菌(PGPR)具备合成及调控众多代谢产物、酶类以及植物激素的能力,这其中包括提升脯氨酸与可溶性糖等渗透调节物质的含量。此外,PGPR 还能增强光合作用的效率与抗氧化酶的活性,进而促使植物在低温环境下展现出更高的

抗性^[15-16]。在遭受低温胁迫的条件下,通过对玉米植株施用芽孢杆菌 A28 进行接种处理,有效加速了玉米生长速率,确保了光合作用的效率稳定,并显著提升了玉米的最终产量^[17]。Jha 等在 4 °C 条件下通过接种 2 种溶磷菌(*L. fusiformis* YJ4 和 *L. sphaericus* YJ5)对玉米冷胁迫缓解作用的研究发现,可通过产生渗透物、植物激素、酚类物质和抗氧化酶,提高玉米抗冷能力^[18]。Expósito 等研究发现,接种假单胞菌属、肠杆菌属和窄食单胞菌属菌株,通过增加脯氨酸和可溶性糖等代谢物提高蛋白质含量,增加 N、P、K 等营养素的积累,以及促进抗氧化剂如超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)的积累,提高水稻的耐冷性^[19]。在冷胁迫条件下,Zubair 等对植物接种嗜冷芽孢杆菌(*Psychrophilic bacillus*)进行试验,观察到植物激素表达的积极调控效应,该研究揭示了 PGPR 通过调控 ABA、脂质过氧化过程及脯氨酸积累路径,显著增强了小麦对低温环境的耐受性^[20]。高英等通过小麦在低温胁迫下接种贝莱斯芽孢杆菌(*B. velezensis*) WL911 研究表明,存在 *mnhA*、*mnhE*、*pheT*、*pheS* 和 *proV* 等关键基因参与 Na⁺ 外排的渗透调节机制,编码脯氨酸和酚类化合物等反应;同时也存在编码冷休克蛋白 CspC、CspB 和 CspD 的关键基因 *cspA*,进而增强植物的抗冷性^[21]。

1.3 盐碱胁迫

在盐碱逆境条件下,植物的水分及养分吸收过程受到高浓度钠离子的抑制,这一现象会引起植物体内水分的丧失以及养分的失衡。由此触发的植物生理反应包括渗透、离子和氧化胁迫等一系列应激反应,这些反应进一步激活了植物体内的蛋白质降解、脂质过氧化、细胞膜损伤以及光合作用损伤等生化过程。在盐碱胁迫下,PGPR 能够诱导植物提高这些抗氧化酶的活性,从而降低活性氧的危害,这是植物应对盐胁迫的重要机制之一^[22-23]。Nadeem 等研究表明,在盐胁迫环境下,通过接种携带 1-氨基环丙烷-1-羧酸(ACC)脱氨酶活性的细菌,玉米植株的叶绿素含量得以显著提升,进而显著增强植物的光合作用效能^[24]。Ansari 等研究发现,耐盐短小芽孢杆菌 FAB10 在不同盐浓度下可显著提高小麦中 SOD、CAT、谷胱甘肽还原酶(GR)等抗氧化酶的活性和脯氨酸含量^[25]。Khan 等研究中,用 5 种耐盐菌株接种大豆,包括沃氏节杆菌(AK1)、氧丹微杆菌(AK2)、金色节杆菌(AK3)、

巨大芽孢杆菌(AK4)和阿利巴哈泰杆菌(AK5),这些菌株通过提高 SOD、谷胱甘肽合酶(GSH)的表达以及增强钾离子(K⁺)的吸收,增强大豆的耐盐性。除了增强抗氧化系统的作用外,微生物接种还显著降低了钠离子(Na⁺)浓度和 ABA 水平,同时增强了生长素相关基因的表达,如生长素抗性 1(*GmLAX3*)和耐盐基因^[26]。Ji 等通过在水稻中接种耐盐谷氨酸杆菌 YD01,增强了水稻对盐胁迫的耐受性,接种后促进水稻多种抗氧化酶基因(如 *OsPOX1*、*OsFeSOD*、*OsGR2*)以及非生物胁迫相关基因(*OsWRKY1* 和 *OsDREB2*)的表达,同时上调与离子平衡相关的 *OsHKT1*,并下调与乙烯生产有关的 *OsERF1* 基因^[27]。陈兰等对萎蔫芽孢杆菌 CKL1 在盐胁迫下促进燕麦生长的活性功能基因研究分析,发现该菌株的基因组中包含了一系列编码渗透调节物质的基因簇,这些基因簇涵盖了参与 Na⁺/H⁺ 逆向转运蛋白合成的 *mnhA*、*mnhB*、*mnhC* 等基因,涉及脯氨酸、甜菜碱等合成的 *proS*、*proC* 及 OPU 家族基因,以及参与转录调控的 *desR*、*desK*、*yesM*、*yesN* 等关键基因^[28]。

2 生物胁迫

2.1 病害胁迫

植物抗御病原体的能力主要依赖 2 种机制:一是诱导性系统性抗性(ISR),二是系统性获得性抗性(SAR)。ISR 是一种由有益微生物通过根系定殖和根系免疫调节所介导的抗性机制。有益微生物可以通过与植物根系形成共生关系,产生一些诱导子(如铁载体、多糖、挥发性有机化合物、植物激素、酶等)来激活植物的免疫系统,增强植物对病原体的抵抗能力。SAR 是一种植物的获得性或适应性抗性机制。当植物受到病原体的感染后,它会通过产生一系列的信号分子来激活系统性抗性反应。这些信号分子会在植物体内迁移,并引发抗性反应,增强植物对病原体的抵抗能力^[29]。在植物病变防治领域,深入探索 ISR 与 SAR 机制,可以有效减轻对化学农药的过度依赖,进而减少环境污染问题,促进生态系统的平衡状态。PGPR 可以诱导植物激活特定的防御反应基因和酶,如活性氧清除和抗氧化酶[抗坏血酸过氧化物酶(APX)、谷胱甘肽过氧化物酶(GPX)、CAT、GR、POD 和 SOD],在抗病过程中起关键作用;PGPR 还影响植物激素的调节,例如茉莉酸(JA)、乙烯(ET)、水杨酸(SA)、GA 和

生长素,这些激素在植物生理和免疫反应中具有重要地位;PGPR 促使植物增加葡聚糖酶、几丁质酶、糖、渗透调节剂、抗病相关蛋白(PR)和次生代谢物的积累。这些物质直接参与抑制病原体的生长和繁殖,全面提升植物的抗病能力^[30-32]。

芽孢杆菌属(*Bacillus* spp.)在 PGPR 的广泛群体中被认为是一种优秀的药剂,具有产生抗生素和抗性物质的能力,可以用于控制多种植物中的病原体攻击。研究表明,多种作物,包括番茄、黄瓜、水稻及小麦等,均受到芽孢杆菌属细菌的庇护,此类细菌通过多元化的策略有效抑制病原体的侵害,这些研究揭示了多种机制,诸如合成抗生素、生成抗性化合物以及实施竞争性排斥,此外,还包括激活植物免疫系统的过程^[33-35]。经过系统性的筛选与分析,谢学文团队从黄瓜根系周边的土壤中成功分离出 1 株甲基营养型芽孢杆菌,命名为 WF-3,此菌株对于黄瓜炭疽病的防治具有显著效果^[36]。Ta 等研究得出,贝莱斯芽孢杆菌(*B. velezensis*) F9 能产生 IAA、固定氮、铁载体和形成生物膜,对黄瓜枯萎病具有生物防治效果,并显著增加黄瓜叶片中的 SOD 活性以及根际土壤中的中性磷酸酶、蔗糖酶和脲酶活性^[37]。Hamid 等研究指出,各类芽孢杆菌属菌株具备分泌多种抗真菌性化合物以抵抗病原体的能力,诸如小芽孢杆菌 QST713、小芽孢杆菌 C2、小芽孢芽孢杆菌 OEE1 及枯草芽孢杆菌等菌株,均能产生脂肽类物质(包括丰霉素、杆菌霉素和表面活性素)、聚酮类化合物(如杆菌烯、大环内酯和四环素)以及具有抗真菌特性的挥发性有机化合物(例如苯乙醇、苯乙酸、苯甲醛、1-癸烯和十四烷)^[38]。此类化合物和酶类具备协同作用,增强了植物对病原体的抵抗力,有效抑制了绿霉菌和黄萎病的发生。He 等研究发现,经枯草芽孢杆菌(BJ-1)处理感染稻瘟病的水稻,其 2 种病原蛋白相关基因(*OsPRIa* 及 *OsPRI0*)与 3 种在水杨酸及茉莉酸依赖性防御信号途径中扮演核心角色的基因(*OsPAL*、*OsICSI* 和 *OsAOS2*)的转录活性显著提升^[39]。李春雨证实了解淀粉芽孢杆菌(SQRT3)对番茄青枯病的防控效果显著,且应用 SQRT3 可以增加番茄中多种防御相关酶[POD、多酚氧化酶(PPO)等]的表达,此外,SQRT3 的应用还能提高一些与植物抵御病害相关的基因的表达水平,包括与 JA 通路相关的蛋白酶抑制剂 2(PIN2),与 SA 通路相关的发病机制相关蛋白-1a(PR-1a),以及与 ET 通路相关的

Omsotin 样蛋白^[40]。宛甜甜研究发现,解淀粉芽孢杆菌(*Bacillus amyloliquefaciens*, SN16-1)可以抑制水稻稻瘟病的发生,并增强水稻的防御反应,在解淀粉芽孢杆菌成功定殖于水稻植株之后,它激活了水稻叶片中相关防御酶的活性,并触发了多种信号传导路径的调整,这一过程进一步促使植物激素浓度的增加,尤其是水稻体内 SA 和 JA 的浓度显著上升^[41]。李紫英等研究发现,贝莱斯芽孢杆菌(*B. velezensis*) SY01 通过诱导苹果树关键抗性基因(*MdNPR1*、*MdPDF1*、*MdPR2*、*MdPR4*)的表达,以及分泌抗菌次级代谢产物来抑制苹果树腐烂病菌的生长^[42]。Ze 等研究得出,莫哈韦芽孢杆菌(*Bacillus mojavensis*) MTC-8 菌株能够溶解无机磷并具有固氮能力,经过 14 d 的处理后,MTC-8 能够促进水稻幼苗阶段的生长,同时显著触发植物免疫相关基因(*OsMAS*、*OsPRIa*、*OsPRI0* 和 *OsKS4*)的表达^[43]。

除了芽孢杆菌属在病害胁迫中起重要作用外,其他菌属和复合 PGPR 菌剂也能提升作物的抗病性。通过对葡萄根际土壤进行分离处理,梁卫驱团队成功获取了铜绿假单胞菌 F13 菌株;采用平板对峙法进行评估,发现该菌株对 8 类植物病原菌的抑制效果达到 60% 以上;在田间试验中,该菌株对豆角生长具有显著的促进作用,豆角细胞内的维生素 C 及可溶性蛋白含量明显提高^[44]。Monnier 等阐明了铜绿假单胞菌通过诱导转录因子(*BnWRKY33*)、丝裂原活化蛋白激酶(*BnMPK3* 和 *BnMPK4*)和发病机制相关蛋白(*BnPR1* 和 *BnPR4*)的表达来降低油菜灰霉病的发生^[45]。通过对常见豆科植物进行联合接种,Mohamed 等引入了枯草芽孢杆菌与荧光假单胞菌,随后实施了罗氏菌的感染处理,结果表明,该接种策略显著地发挥了抗菌作用,激活了植物体内有益酶的活性,同时促进了植物对磷元素与铁元素的吸收,进而显著促进了植物的生长发育^[46]。经过深入分析,娄义的研究成果揭示了混合 PGPR 菌剂对于抵御番茄黄化曲叶病毒(TYLCV)的显著防病效能;研究指出,此类细菌能够通过增强植物体内与系统抗性相关的基因表达,从而促进番茄植株的生长状况,涉及的基因包括与病害防御机制密切相关的蛋白 PR1、PR2、PR3,以及几丁质酶、苯丙氨酸氨解酶(PAL)、POD、PPO、 β -1,3-葡聚糖酶等关键因子^[47]。

2.2 虫害胁迫

虫害是影响植物生长发育的重要因素,不仅会直接造成植物的损伤,如食叶、吸汁和破坏根系,导

致光合作用减弱和营养吸收受限,还会通过传播病原体引发多种病害,进一步加剧植物的衰弱。此外,虫害造成的减产和病害传播会直接影响农业经济,增加农民的管理成本。在减少化学农药杀虫剂的同时,采用根际促生菌对抗虫害的策略被视为一种理想的替代方案。此类菌体通过其拮抗特性及促进植物生长的健康功能,有效遏制害虫的繁衍与活动^[48-49]。

由于大多数 PGPR 具有容易分离、易于培养、安全性高的优点,近年来对 PGPR 控制植物病虫害的研究逐渐增多。Li 等揭示了解淀粉芽孢杆菌 (*Bacillus amyloliquefaciens*) 这一内生细菌,能够通过合成脂肽类物质激发植物针对草地贪夜蛾的系统性诱导抗性反应^[50]。Myresiotis 等研究 2 种芽孢杆菌 PGPR 配方产品 Companion (*B. subtilis* GB03) 和 FZB24 (*B. subtilis* FZB24) 对玉米生长和杀虫剂噻虫嗪根系吸收的影响,发现单独或联合接种 PGPR 枯草芽孢杆菌 FZB24 和枯草芽孢杆菌 GB03 的植物中,与对照相比,不同生长阶段的玉米地上部分噻虫嗪含量显著升高,研究结论揭示了植物生长促进根际细菌 (PGPR) 显著增强玉米对噻虫嗪的吸收能力。通过植物与 PGPR 的协同作用,不仅能够显著降低农药施用量,还能确保作物保护效能不受影响^[51]。Harun - Or - Rashid 等研究发现,在将水稻植株施以 BV - YC7010 稀释液浸根处理后,显著提高了对褐飞虱的抵抗力。运用高通量转录组技术进行分析,结果显示水稻体内 SA 及 JA 信号途径被显著激活,相关基因表达水平显著上升。此外,该处理促使环脂肽大量合成,并激发 POD、PPO、PAL 的活性增强^[52]。Zebelo 等通过使用芽孢杆菌混合液处理棉花,促进棉花植株分泌棉酚和 JA,使其对甜菜夜蛾的抵抗力显著增强,减少了幼虫的摄食行为;在基因表达方面,该处理激活棉花生物合成基因[如 (+) - δ - 杜松烯合成酶基因家族]表达,强化直接抗虫化学防御、诱导 JA 积累及其响应基因表达,增强系统性抗性,协调植物防御反应^[53]。通过对番茄植株施用芽孢杆菌 T8 - 64 的悬浮液,孙少志研究发现,接种 PGPR 的番茄植株在虫害处理 24 h 后,POD、PPO 和胰蛋白酶抑制剂 (PI) 含量显著升高;在虫害处理 6 h 后,蛋白酶抑制剂基因 (*PI - II*)、丙二烯氧化物环化酶基因 (*AOC*)、脂氧合酶基因 (*LOXD*) 和丙二烯氧化物合酶基因 (*AOS*) 均显著升高,接种 PGPR 可提升番茄对斜纹夜蛾侵害的抵抗力^[54]。曾健杰经接虫生测试验发现,斜纹夜蛾取

食经使用贝莱斯芽孢杆菌 (*B. velezensis*) 处理的成苗番茄后,其体重增量显著低于取食对照组番茄的体重增量,抗虫性增强。在针对防御酶活性进行测定分析的过程中,观察到 PPO、POD 的活性显著增强,茉莉酸类激素的含量亦高于对照试验组;此外,该过程激活了茉莉酸合成过程中至关重要的基因,以及防御酶合成关键基因 *PI - II*、*TD*,表现为其表达水平的显著提升^[55]。Hosseini 等研究了 3 种 PGPR,即圆褐固氮菌 (*Azotobacter chroococcum*)、巴西固氮螺菌 (*Azospirillum brasilense*) 和芸薹假单胞菌 (*Pseudomonas brassicacearum*),对草莓上双斑蜘蛛螨种群动态及植物生长和生理参数的影响,研究表明,3 种 PGPR 可加强和诱导植物地上部分的抗性,增强了生化抗食草动物防御水平。PGPR 通过诱导或上调酚类、类黄酮和花青素等次生植物代谢物的表达增强对蜘蛛螨的抗性^[56]。Cortez 等研究玉米接种 PGPR 后对植株生长及斜纹夜蛾的影响,经 GC - MS 分析发现,相比对照,接种后玉米植株顶空挥发性有机化合物排放显著提高,叶片损伤面积和产卵率显著降低;由此可推断,PGPR 接种可通过增加挥发性有机化合物排放,增强玉米对斜纹夜蛾的抗性,抑制斜纹夜蛾对叶片的取食和产卵行为^[57]。

3 讨论与展望

通过精准调控植物生理活动,微生物源生物激活剂 PGPR 显著增强作物对多种生物与非生物压力的适应能力,从而显著减少对化肥、杀虫剂及杀菌剂的依赖,采用更为环保的策略,促进农作物产量的提升及收益的增加。PGPR 在提升农业生产效率方面展现出极大的应用前景,其环境友好属性与推进绿色可持续农业的理念相吻合。作为生物肥料或农药,PGPR 不仅能提升土壤中的酶和养分,还改善了微生物多样性和土壤质量。在农业实践中,PGPR 的应用显著提高了作物的生长、产量和质量,同时优化了土壤的微生物群落,增强了土壤的生产力和可持续性。在当前 PGPR 研究范畴内,研究重点普遍聚焦于其对于植物生长及产出效率的正面影响,然而,关于其作用机理的探讨仍处于不充分状态。大量研究倾向于进行孤立的分析,这导致了对植物整体生长促进机制的理解尚显片面与不完整。

探究植物与微生物间的交互作用机理,在未来科研中占据重要地位,同时,从宏观角度审视其信号传递系统亦为关键。研究旨在创造新型微生物

生物促进剂,进而以可持续发展的策略,增进农作物的产量及品质。采用功能基因探针、基因组学、转录组学、蛋白质组学以及群落代谢分析等前沿科技手段开展研究工作,同时借助单细胞技术等生物信息学工具进行深入的数据解析与评估。进一步的研究可以采用基因工程手段对 PGPR 进行改造,提高其抗逆性和促生效果,以实现更具实际应用的应用。未来 PGPR 研究需重点扩展菌株库,开发多功能菌株,研究多菌株联合使用的协同效应,并确保菌株的稳定性;还需深入探讨 PGPR 与植物、土壤及微生物群落的互作机制,开发监测工具评估其应用效果,建立生长模型以优化应用,促进 PGPR 在可持续农业中的发展,提高作物产量并保护环境。

参考文献:

- [1] Khoso M A, Wagan S, Alam I, et al. Impact of plant growth - promoting rhizobacteria (PGPR) on plant nutrition and root characteristics: Current perspective [J]. *Plant Stress*, 2024, 11:100341.
- [2] Etesami H, Beattie G A. Mining halophytes for plant growth - promoting halotolerant bacteria to enhance the salinity tolerance of non - halophytic crops [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2018, 9:148.
- [3] 李江, 靳艳玲, 赵海. 根际促生菌对植物生长的影响及其作用机制 [J]. *黑龙江农业科学*, 2023 (10): 132 - 137.
- [4] Huang J P, Yu H P, Dai A G, et al. Drylands face potential threat under 2 °C global warming target [J]. *Nature Climate Change*, 2017, 7:417 - 422.
- [5] Slimani A, Raklami A, Oufdou K, et al. Isolation and characterization of PGPR and their potencial for drought alleviation in barley plants [J]. *Gesunde Pflanzen*, 2023, 75 (2): 377 - 391.
- [6] Azeem M, Javed S, Zahoor A F. *Bacillus* species as potential plant growth promoting rhizobacteria for drought stress resilience [J]. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2023, 70 (4): 59.
- [7] 伍国强, 于祖隆, 魏明. PGPR 调控植物响应逆境胁迫的作用机制 [J]. *草业学报*, 2024, 33 (6): 203 - 218.
- [8] Lasudee K, Tokuyama S, Lumyong S, et al. Actinobacteria associated with arbuscular mycorrhizal *Funneliformis mosseae* spores, taxonomic characterization and their beneficial traits to plants: evidence obtained from mung bean (*Vigna radiata*) and Thai jasmine rice (*Oryza sativa*) [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2018, 9:1247.
- [9] Ansari F A, Jabeen M, Ahmad I. *Pseudomonas azotoformans* FAP5, a novel biofilm - forming PGPR strain, alleviates drought stress in wheat plant [J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2021, 18 (12): 3855 - 3870.
- [10] Gowtham H G, Brijesh Singh S, Murali M, et al. Induction of drought tolerance in tomato upon the application of ACC deaminase producing plant growth promoting rhizobacterium *Bacillus subtilis* Rhizo SF 48 [J]. *Microbiological Research*, 2020, 234:126422.
- [11] Lim J H, Kim S D. Induction of drought stress resistance by multi - functional PGPR *Bacillus licheniformis* K11 in pepper [J]. *The Plant Pathology Journal*, 2013, 29 (2): 201 - 208.
- [12] Abbasi S, Sadeghi A, Safaie N. *Streptomyces* alleviate drought stress in tomato plants and modulate the expression of transcription factors *ERF1* and *WRKY70* genes [J]. *Scientia Horticulturae*, 2020, 265:109206.
- [13] 王伟, 岳政府, 刘孝文, 等. 低温适应型植物根际促生细菌的筛选及促生效应研究 [J]. *南京农业大学学报*, 2017, 40 (1): 93 - 100.
- [14] 柴加丽, 姚拓. 高寒草甸多枝黄耆根际促生菌特性研究与鉴定 [J]. *中国草地学报*, 2022, 44 (10): 68 - 74.
- [15] Ahmad M, Imtiaz M, Shoib Nawaz M, et al. What did we learn from current progress in heat stress tolerance in plants? Can microbes be a solution? [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13:794782.
- [16] Liu X J, Xu N, Wu Y N, et al. Photosynthesis, chilling acclimation and the response of antioxidant enzymes to chilling stress in mulberry seedlings [J]. *Journal of Forestry Research*, 2019, 30 (6): 2021 - 2029.
- [17] Chen L, Hao Z H, Li K K, et al. Effects of growth - promoting rhizobacteria on maize growth and rhizosphere microbial community under conservation tillage in Northeast China [J]. *Microbial Biotechnology*, 2021, 14 (2): 535 - 550.
- [18] Jha Y, Mohamed H I. Inoculation with *Lysinibacillus fusiformis* strain YJ4 and *Lysinibacillus sphaericus* strain YJ5 alleviates the effects of cold stress in maize plants [J]. *Gesunde Pflanzen*, 2022, 75 (1): 77 - 95.
- [19] Expósito C D V, López J Á, Liu J Q, et al. Development of a cold - active microbial compound biofertilizer on the improvement for rice (*Oryza sativa* L.) tolerance at low - temperature [J]. *Rhizosphere*, 2022, 24:100586.
- [20] Zubair M, Hanif A, Farzand A, et al. Genetic screening and expression analysis of psychrophilic *Bacillus* spp. reveal their potential to alleviate cold stress and modulate phytohormones in wheat [J]. *Microorganisms*, 2019, 7 (9): 337.
- [21] 高英, 谢永丽, 陈兰, 等. 芽孢杆菌 WL911 促低温下小麦生长效应及其功能基因分析 [J]. *微生物学通报*, 2024, 51 (1): 209 - 224.
- [22] Zhao S S, Zhang Q K, Liu M Y, et al. Regulation of plant responses to salt stress [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2021, 22 (9): 4609.
- [23] Pan J, Peng F, Xue X, et al. The growth promotion of two salt - tolerant plant groups with PGPR inoculation: a meta - analysis [J]. *Sustainability*, 2019, 11 (2): 378.
- [24] Nadeem S M, Hussain I, Naveed M, et al. Performance of plant growth promoting rhizobacteria containing ACC - deaminase activity for improving growth of maize under salt - stressed conditions [J]. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*, 2006, 4343 (3/4): 114 - 121.
- [25] Ansari F A, Ahmad I, Pichtel J. Growth stimulation and alleviation of salinity stress to wheat by the biofilm forming *Bacillus pumilus* strain FAB10 [J]. *Applied Soil Ecology*, 2019, 143:45 - 54.

- [26] Khan M A, Asaf S, Khan A L, et al. Thermotolerance effect of plant growth – promoting *Bacillus cereus* SA1 on soybean during heat stress [J]. BMC Microbiology, 2020, 20(1): 175.
- [27] Ji C L, Zhang M L, Kong Z R, et al. Genomic analysis reveals potential mechanisms underlying promotion of tomato plant growth and antagonism of soilborne pathogens by *Bacillus amyloliquefaciens* Ba13 [J]. Microbiology Spectrum, 2021, 9(3): e0161521.
- [28] 陈 兰, 谢永丽, 吴晓晖, 等. 萎缩芽孢杆菌 CKL1 促盐胁迫下燕麦生长活性及其功能基因分析 [J]. 微生物学通报, 2022, 49(8): 3150 – 3164.
- [29] Meena M, Yadav G, Sonigra P, et al. Role of elicitors to initiate the induction of systemic resistance in plants to biotic stress [J]. Plant Stress, 2022, 5: 100103.
- [30] 霍佳慧, 毕少杰, 于欣卉, 等. 植物根际促生菌作用机制研究进展 [J]. 现代农业科技, 2022(9): 90 – 96.
- [31] Yi H S, Yang J W, Ryu C M. ISR meets SAR outside: additive action of the endophyte *Bacillus pumilus* INR7 and the chemical inducer, benzothiadiazole, on induced resistance against bacterial spot in field – grown pepper [J]. Frontiers in Plant Science, 2013, 4: 122.
- [32] Yadav U, Anand V, Kumar S, et al. *Bacillus subtilis* NBRI – W9 simultaneously activates SAR and ISR against *Fusarium chlamydosporum* NBRI – FOL7 to increase wilt resistance in tomato [J]. Journal of Applied Microbiology, 2024, 135(3): lxae013.
- [33] Boro M, Samyasi S, Chettri D, et al. Microorganisms in biological control strategies to manage microbial plant pathogens: a review [J]. Archives of Microbiology, 2022, 204(11): 666.
- [34] Zhang N, Wang Z Q, Shao J H, et al. Biocontrol mechanisms of *Bacillus*; improving the efficiency of green agriculture [J]. Microbial Biotechnology, 2023, 16(12): 2250 – 2263.
- [35] Samaniego – G3mez B Y, Valle – Gough R E, Garru3a – Hern3ndez R, et al. Induced systemic resistance in the *Bacillus* spp. – *Capsicum chinense* Jacq. – PepGMV interaction, elicited by defense – related gene expression [J]. Plants, 2023, 12(11): 2069.
- [36] 谢学文, 董瑞利, 石延霞, 等. 黄瓜炭疽病拮抗细菌的筛选及其抑制效果 [J]. 中国生物防治学报, 2016, 32(2): 215 – 220.
- [37] Ta Y Q, Fu S W, Liu H, et al. Evaluation of *Bacillus velezensis* F9 for cucumber growth promotion and suppression of *Fusarium* wilt disease [J]. Microorganisms, 2024, 12(9): 1882.
- [38] Hamid B, Zaman M, Farooq S, et al. Bacterial plant biostimulants: a sustainable way towards improving growth, productivity, and health of crops [J]. Sustainability, 2021, 13(5): 2856.
- [39] He Y W, Zhu M L, Huang J B, et al. Biocontrol potential of a *Bacillus subtilis* strain BJ – 1 against the rice blast fungus *Magnaporthe oryzae* [J]. Canadian Journal of Plant Pathology, 2019, 41(1): 47 – 59.
- [40] 李春雨. 解淀粉芽孢杆菌 SQR3 防控番茄土传青枯病及其机理研究 [D]. 南京: 南京农业大学, 2014: 73 – 93.
- [41] 宛甜甜. 解淀粉芽孢杆菌 SN16 – 1 对水稻稻瘟病的防治作用及其诱抗机理研究 [D]. 上海: 华东理工大学, 2023: 23 – 49.
- [42] 李紫英, 沙帅帅, 唐御忻, 等. 贝莱斯芽孢杆菌 SY01 诱导苹果树抗性基因表达及其脂肽类抑菌物质分析 [J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2024, 55(5): 711 – 719.
- [43] Ze M, Ma F M, Zhang J H, et al. Beneficial effects of *Bacillus mojavensis* strain MTC – 8 on plant growth, immunity and disease resistance against *Magnaporthe oryzae* [J]. Frontiers in Microbiology, 2024, 15: 1422476.
- [44] 梁卫驱, 胡 珊, 黄 皓, 等. 植物根际促生菌 F13 的筛选、鉴定及对豆角促生、抗病的效果 [J]. 中山大学学报(自然科学版)(中英文), 2024, 63(2): 150 – 159.
- [45] Monnier N, Furlan A, Botcazon C, et al. Rhamnolipids from *Pseudomonas aeruginosa* are elicitors triggering *Brassica napus* protection against *Botrytis cinerea* without physiological disorders [J]. Frontiers in Plant Science, 2018, 9: 1170.
- [46] Mohamed I, Eid K E, Abbas M H H, et al. Use of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) and mycorrhizae to improve the growth and nutrient utilization of common bean in a soil infected with white rot fungi [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019, 171: 539 – 548.
- [47] 姜 义. 芽孢杆菌对番茄促生及防治番茄黄化曲叶病毒病机制研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018: 35 – 54.
- [48] 李笑淳, 宋 凯, 陈博, 等. 植物根际促生菌: 作用机制与未来 [J]. 激光生物学报, 2024, 33(3): 193 – 200.
- [49] 孙韵雅, 陈 佳, 王悦, 等. 根际促生菌促生理及其增强植物抗逆性研究进展 [J]. 草地学报, 2020, 28(5): 1203 – 1215.
- [50] Li H Y, Soares M A, Torres M S, et al. Endophytic bacterium, *Bacillus amyloliquefaciens*, enhances ornamental *Hosta* resistance to diseases and insect pests [J]. Journal of Plant Interactions, 2015, 10(1): 224 – 229.
- [51] Myresiotis C K, Vryzas Z, Papadopoulou – Mourkidou E. Effect of specific plant – growth – promoting rhizobacteria (PGPR) on growth and uptake of neonicotinoid insecticide thiamethoxam in corn (*Zea mays* L.) seedlings [J]. Pest Management Science, 2015, 71(9): 1258 – 1266.
- [52] Harun – Or – Rashid M, Kim H J, Yeom S I, et al. *Bacillus velezensis* YC7010 enhances plant defenses against brown planthopper through transcriptomic and metabolic changes in rice [J]. Frontiers in Plant Science, 2018, 9: 1904.
- [53] Zebelo S, Song Y Y, Klopper J W, et al. Rhizobacteria activates (+) – δ – cadinene synthase genes and induces systemic resistance in cotton against beet armyworm (*Spodoptera exigua*) [J]. Plant, Cell & Environment, 2016, 39(4): 935 – 943.
- [54] 孙少志. 根际细菌对番茄生长与抗虫性的影响 [D]. 福州: 福建农林大学, 2019: 21 – 35.
- [55] 曾健杰. 根际促生菌预处理萌发番茄种子诱导成苗番茄对斜纹夜蛾的抗性研究 [D]. 福州: 福建农林大学, 2020: 22 – 48.
- [56] Hosseini A, Hosseini M, Schausberger P. Plant growth – promoting rhizobacteria enhance defense of strawberry plants against spider mites [J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 12: 783578.
- [57] Cortez A O Jr, Yoshinaga N, Mori N, et al. Plant growth – promoting rhizobacteria modulate induced corn defense against *Spodoptera litura* (Lepidoptera: Noctuidae) [J]. Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry, 2024, 88(8): 872 – 884.