

· 专题论坛 ·

我国旱区乡土豆科植物根际促生菌的应用潜力

郭馨怡¹, 杨珍², 王佳¹, 林雁冰³, 上官周平², 樊妙春^{1*}

¹西北农林科技大学草业与草原学院, 杨凌 712100; ²西北农林科技大学, 水土保持与荒漠化整治全国重点实验室, 杨凌 712100
³西北农林科技大学生命科学学院, 杨凌 712100

摘要 旱区乡土豆科植物对维持生态平衡和推动农业可持续发展至关重要。阐明旱区乡土豆科植物根际促生菌(PGPR)的特征及应用潜力, 对于提高干旱地区植物抗逆性、促进生态修复具有重要价值。然而, 针对旱区乡土豆科植物PGPR功能多样性的系统性研究仍显不足。该综述聚焦我国旱区乡土豆科植物PGPR, 阐明其在干旱环境中的地理分布与生态优势, 解析PGPR的抗逆促生机制及其在提高植物抗逆性方面的应用前景。同时, 建议未来应深入挖掘菌种资源, 明确乡土豆科植物对干旱区不同类型土壤的适应性, 进而推动PGPR在旱区乡土豆科植物中的应用。该文为精准构建与利用合成微生物群落提高植物抗逆性并保障生态与农业可持续发展提供了有价值的线索与实践指导。

关键词 旱区, 乡土豆科植物, 植物根际促生菌, 抗逆促生机制, 合成菌群

郭馨怡, 杨珍, 王佳, 林雁冰, 上官周平, 樊妙春 (2026). 我国旱区乡土豆科植物根际促生菌的应用潜力. 植物学报 61, 170–178.

我国旱区农业与生态系统长期面临水资源短缺、土壤贫瘠、植被退化、作物产量低且不稳定以及生态恢复困难等核心问题。乡土豆科植物具备固氮能力、土壤改良潜力、强抗逆性及高饲用价值, 是推动旱区生态修复与农业可持续发展的关键物种。然而, 在极端干旱、重度盐碱或极度贫瘠的环境中, 这些植物常表现出生长受限、生物量不足以及固氮效率降低等问题, 导致其生态与生产功能难以充分发挥。近年来, 研究发现根际促生菌(plant growth promoting rhizobacteria, PGPR)可通过促生、溶磷、产铁载体和增强抗逆性等多种机制显著提升宿主植物在逆境下的适应性与生产力, 成为改善乡土豆科植物旱区表现的重要突破口。本文系统梳理了旱区乡土豆科植物相关PGPR资源挖掘与研究现状, 并提出未来研究与技术发展的方向, 以期对旱区生态修复与农业可持续发展提供理论支撑与实践路径。

地土壤和气候等自然条件具有较强的适应性, 且抗逆性较强、生存周期长, 所形成的植被群落稳定性高(马子元等, 2022; 南志标等, 2022)。乡土豆科植物, 特指在乡土植物中未受人为引种干扰、在本地自然生境中稳定繁衍的豆科物种。此类植物不仅具备对原生生境水热条件与土壤基质的高度适应性, 如具有发达的根系和适宜的叶面积指数, 还积极参与生态系统中养分循环与能量流动, 改善土壤理化性质, 显著增强了生态系统整体的抗干扰性与稳定性(王丽丽, 2025)。乡土豆科植物因具有豆科植物的特性而具备多种生态功能。例如, 根部与根瘤菌共生固氮, 可显著提升土壤氮素水平; 通过根系活动改善土壤团聚体结构, 以增强通透性与持水能力; 还具有较高的饲用价值。因此, 乡土豆科植物在退化生态系统修复、土壤改良及生物多样性维持等方面具有不可替代的生态功能, 是植被恢复与可持续土地管理的关键植物类群。

1 乡土豆科植物及其生态学内涵

乡土植物(native plants)是指源于本地区原有天然分布且长期适应特定区域自然环境的一类植物, 其对当

2 我国旱区土壤特征及乡土豆科植物的地理分布

我国干旱及半干旱地区土壤质地多为砂质壤土, 土壤

收稿日期: 2025-07-17; 接受日期: 2025-10-11

基金项目: 国家重点研发计划青年科学家项目(No.2023YFD1901600)、新疆维吾尔自治区上海合作组织国际合作专项(No.2025E01024)和内蒙古自治区科技计划(No.2025YFDZ0039)

* 通讯作者。E-mail: miaochunfan@nwafu.edu.cn

普遍面临养分含量低、有机质含量少、结构不良、盐分累积及水分短缺等问题(Ayangbenro and Babalola, 2021)。结构恶化和有机质缺乏降低了土壤的持水能力与保水性能,进而加剧水分胁迫对植物生长的影响。此外,土壤退化不仅导致土壤肥力持续丧失,而且还与温室气体排放增加密切相关(Hobley et al., 2018)。这些限制因素导致自然植被减少和作物减产等多种问题(Ahkami et al., 2017)。在干旱区域自然生长或经长期驯化适应旱区环境的豆科植物类群可在严苛的干旱环境中生存,具备较强的抗逆生长特性。分布在我国旱区的乡土豆科植物主要有黄花苜蓿(*Medicago falcata*)、沙打旺(*Astragalus adsurgens*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、骆驼刺(*Alhagi sparsifolia*)和小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)等。与其它植物相比,乡土豆科植物在固氮、保持水土、生态修复和适应逆境等方面具有显著优势。

表1呈现了我国主要干旱区域土壤类型及代表乡土豆科植物的分布情况。西北干旱区以黑垆土和黄绵土等为主,代表豆科植物多为抗旱性较强的种类,如黄花苜蓿、沙打旺和骆驼刺。其中,黄花苜蓿广泛分布于多个西北干旱区,其对干旱胁迫及贫瘠土壤具有较强的适应能力。东北地区以有机质含量较高的黑土和暗棕壤为主,代表物种包括黄花苜蓿和胡枝子,该类植物不仅具备耐旱性,亦具有较强的耐寒性。西南干旱区以酸性红壤和黄壤为主,代表豆科植物如硬毛木蓝(*Indigofera hirsuta*),其具有发达的根系以及对酸碱胁迫的耐受能力。青藏高原干旱区则以高山草甸土和寒漠土为主,常见耐寒旱物种,如砂生槐(*Sophora moorcroftiana*),体现了极端环境条件下严

格的生态过滤机制。综上所述,我国不同干旱区豆科植物的分布呈现明显的土壤-气候-物种协同适应特征,代表物种普遍表现出较强的生态适应性及固氮能力,因此可作为干旱区植被重建与生态修复的重要种质资源。

尽管上述分布格局显示了豆科植物与特定土壤环境之间的潜在适配关系,但目前仍缺乏对我国不同旱区土壤类型(如黄绵土和沙土)与乡土豆科植物品种适配性的系统性研究。已有研究多集中于植物本身的抗旱性评价或单一区域的品种筛选,尚未形成基于土壤-植物互作关系的品种选择体系。

3 豆科植物在干旱区的生态适应优势与局限性

豆科(Fabaceae)是被子植物中第3大科,涵盖现存751属约19 500种植物。该科植物分布广泛,具有全球性生态分布格局。由于其多用途的特性,豆科植物在农业、经济及生态系统中均发挥至关重要的作用(Ma et al., 2017)。在我国干旱区,豆科植物不仅种类丰富,而且在生态功能上表现出显著优势,主要体现在以下几方面。

3.1 生物固氮能力

豆科植物可与根瘤菌建立共生关系,在根部形成根瘤。在氮素普遍缺乏的干旱和半干旱生态系统中,豆科植物通过与根瘤菌共生固定大气中的氮,显著提高自身氮素获取能力,降低对土壤氮库的依赖(Roy et al., 2020)。豆科植物固定的氮以天冬酰胺或尿囊素等形

表1 中国不同干旱区域土壤类型与代表乡土豆科植物分布

Table 1 Soil types and distribution of representative native leguminous plants in different arid regions of China

干旱区域	代表地区	主要土壤类型	代表乡土豆科植物
西北地区	塔克拉玛干沙漠、准噶尔盆地、毛乌素沙漠和黄土高原等	黑垆土、黄绵土、黑钙土和栗钙土(易秀和李侠, 2004)	黄花苜蓿、沙打旺、骆驼刺、花棒和甘草
东北地区	科尔沁沙地和松嫩平原等	黑土、黑钙土和暗棕壤等(李超等, 2024)	胡枝子、黄花苜蓿、扁蓿豆和小叶锦鸡儿
华北地区	太行山脉部分地区	褐土、栗钙土、盐渍土和风沙土(丁洪等, 2001)	黄花苜蓿、沙打旺、蒙古岩黄芪、胡枝子和米口袋
西南干旱区	云南干热河谷、贵州喀斯特山区和四川攀西地区等	红壤、黄壤和棕壤土(刘小刚等, 2025)	硬毛木蓝和细梗胡枝子
青藏高原干旱区	藏北高原和青海三江源地区等	高山草甸土、高山草原土和高山寒漠土(王一博等, 2006)	砂生槐和红花岩黄芪

式高效转运至生长部位,支持其在低氮胁迫下持续生长与繁殖(Udvardi and Poole, 2013)。部分豆科植物还通过凋落物或根系分泌物将氮输入土壤,改善局部微环境,不仅增强自身竞争力,也为伴生植物提供氮源,从而在干旱区植被恢复与群落构建中发挥关键生态作用(Gou et al., 2023)。

3.2 根系深层分布,优化土壤物理性质

发达的根系是豆科植物的典型特征之一。多数豆科植物根系可深入土层达5 m,这种深层分布不仅有助于植物群落高效地利用水分和吸收养分,还能增强其抗风蚀和固土能力(李强等, 2014)。此外,豆科植物可改善土壤结构,增加孔隙度和透水性,提高土壤持水量。例如,种植苜蓿3年后,耕层土壤容重降低 $0.1\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$,孔隙度增加3.8%, $>0.25\text{ mm}$ 水稳性团聚体增加3.25%(王俊和徐进章, 2005)。

3.3 多重胁迫耐受机制增强其生存能力

许多豆科植物具备生理层面的抗旱机制,如渗透调节物质(脯氨酸和可溶性糖)积累、抗氧化酶系统激活及脱落酸(abscisic acid, ABA)介导的气孔关闭。紫花苜蓿(*M. sativa*)在与根瘤菌建立共生关系后,其在盐胁迫下的存活率和再生能力显著提高。这一机制主要源于共生体系能够增强植物的抗氧化酶系统,如超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)、过氧化氢酶(catalase, CAT)和过氧化物酶(peroxidase, POD)活性,有效清除活性氧,减轻氧化损伤。同时,该共生作用还有助于维持可溶性糖和可溶性蛋白等渗透调节物质的含量,从而确保细胞渗透平衡(Wang et al., 2016)。

3.4 旱区种植豆科植物的局限性

我国旱区普遍面临降水少、蒸发强、土壤有机质含量低及氮磷养分匮乏等问题,导致自然植被恢复缓慢,人工植被建植成功率低。乡土豆科植物因具有深根系、耐旱性及生物固氮能力,在水土保持、土壤肥力提升和饲草供给等方面展现出独特优势。然而,其在实际推广应用中仍受限于资源短板。根瘤菌共生效率受水分与盐分胁迫的影响,固氮活性低;豆科植物难以在贫瘠土壤中生长;在干旱胁迫下,豆科牧草种子的发芽率和发芽指数显著降低,影响其繁殖和扩散(余如刚等, 2012)。

4 豆科植物根际促生菌的抗逆促生机制

尽管豆科植物在干旱环境中展现出生物固氮、改良土壤及多重胁迫耐受等显著生态优势,但其固有的生理特性仍制约其在极端干旱区的广泛应用。近年来研究发现,豆科植物根际促生菌(PGPR)是定殖于植物根际土壤的有益微生物类群,其不仅通过多种作用机制促进植物的生长发育(罗佳煜等, 2021),还可显著增强植物的养分获取与抗逆能力。因此,深入解析豆科植物根际促生菌的抗逆促生机制是提高豆科植物在干旱区适应性的重要突破口(图1)。

4.1 促进植物氮磷吸收

氮和磷是植物生长不可或缺的元素,对植物生长发育、代谢和生物量形成等具有显著影响。PGPR通过直接增加养分的有效性和植物对养分的吸收率以及间接促进根系生长(Richardson et al., 2009; Oleńska et al., 2020)提升氮磷含量。豆科植物中的固氮菌属(*Azorhizobium*)、中华根瘤菌属(*Sinorhizobium*)和中生根瘤菌属(*Mesorhizobium*)细菌是典型的固氮菌(Kaur and Kaur, 2018),可与豆科植物形成根瘤进行共生固氮。同时,固氮弧菌属(*Azoarcus*)和葡糖酸杆菌属(*Gluconacetobacter*)等典型的非共生固氮菌,以及伯克霍尔德氏菌属(*Burkholderia*)中兼具非共生与共生固氮功能的类群均可以帮助植物获取氮素。*Gluconacetobacter*和*Burkholderia*菌属细菌可改善植物对磷和铁的吸收,并能适应酸性等特殊土壤环境。*Burkholderia*、*Sinorhizobium*、*Azoarcus*、*Azorhizobium*和*Gluconacetobacter*菌属细菌可通过调节植物激素及优化根系形态促进植物生长(Vessey, 2003; Garau et al., 2009)。解磷细菌(phosphate solubilizing bacteria, PSB)存在于土壤和植物根际,可将不溶性磷酸盐转化为可溶性磷(Vassilev et al., 2012)供植物吸收,并通过分泌草酸和柠檬酸等有机酸溶解磷酸钙和磷灰石等难溶性无机磷;也可通过产生酸性磷酸酶和植酸酶等水解酶降解植酸、核酸和磷脂等有机磷化合物(Richardson et al., 2009)。该类群包括假单胞菌属(*Pseudomonas*)、芽孢杆菌属(*Bacillus*)和根瘤菌属(*Rhizobium*)等,这些菌株通常兼具无机磷溶解和有机磷矿化双重功能(Behera et al., 2014)。

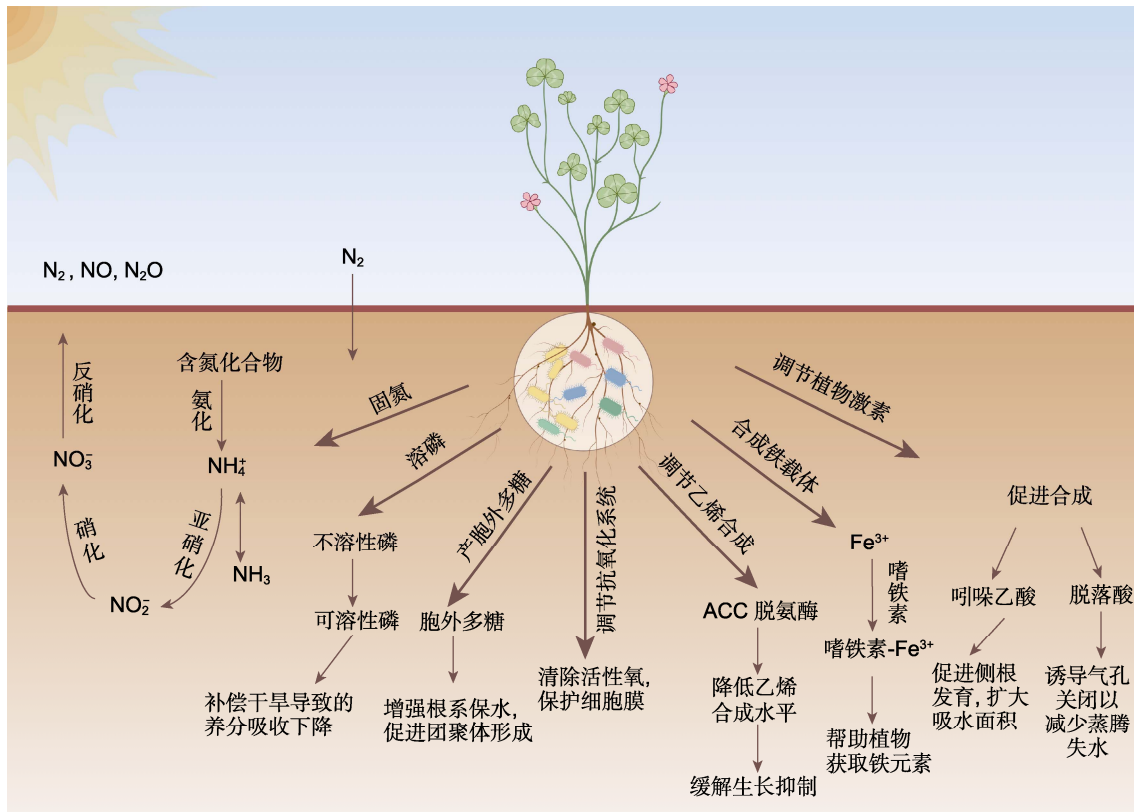


图1 豆科植物根际促生菌(PGPR)抗逆促生机制

Figure 1 The stress resistance and growth-promoting mechanisms of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) in leguminous plants (by Figdraw)

4.2 具有ACC脱氨酶活性

具有ACC脱氨酶活性的PGPR可作为提升不同植物抗逆性的有效候选对象(Glick, 2014)。其主要作用机制是降低乙烯的水平, 可将乙烯合成前体ACC裂解为 α -酮丁酸盐和氨, 这些产物作为能量供细菌生长。这种作用会降低植物体内ACC的水平, 进而抑制乙烯的生物合成, 最终有效缓解乙烯过量积累对植物生长的抑制作用(Glick et al., 1998)。

4.3 产生胞外多糖

除了ACC脱氨酶活性外, PGPR产生的胞外多糖(exopolysaccharides, EPS)可能与植物逆境胁迫相关(Sandhya et al., 2009)。EPS在植物应对干旱胁迫过程中发挥重要作用, 为植物在干旱胁迫条件下的生存和生长提供有力支持。通过产生EPS, 在植物根部形成生物被膜, 从而保持根区水分的有效性以抵御干旱胁迫(Azeem et al., 2023)。

4.4 调节抗氧化系统

在逆境条件下, 植物体内产生大量的活性氧(reactive oxygen species, ROS), ROS对细胞造成损伤, 严重时甚至导致植物死亡(Hou et al., 2016)。干旱胁迫通过增加ROS的积累诱导产生自由基(Gill and Tuteja, 2010)。PGPR通过调节植物的抗氧化系统增强其抗逆性。PGPR能够诱导植物产生抗氧化酶(如SOD和CAT)以及脯氨酸或糖, 从而清除ROS, 减轻氧化损伤。

4.5 调节植物激素

生长素吲哚乙酸(indole-3-acetic acid, IAA)及ABA等植物激素可促进植物生长发育, 但逆境胁迫导致植物体内激素水平降低, 对植物产生不利影响。IAA是重要的天然生长素, PGPR中80% *Azotobacter*和*Pseudomonas*与20% *Bacillus*菌属细菌均可产生IAA。PGPR分泌的IAA能减轻胁迫对植物造成的不利影响。ABA可增强植物的抗逆性, 也能调节气孔运动,

影响光合作用,以提高植物的光合色素和生物量,因此ABA又被称为响应非生物胁迫的应激激素。ABA在植物应对水分亏缺时发挥关键作用,它能够对诸多应激诱导基因进行调节,同时促使气孔关闭(Haworth et al., 2018)。在水分亏缺的情况下,气孔关闭过程至关重要,气孔孔径的减小能有效降低蒸腾作用(Huang et al., 2017)。

4.6 产生铁载体

铁(Fe)是植物和微生物生长发育所必需的重要元素,参与细胞内多种关键蛋白的合成,在植物光合作用、呼吸作用及共生固氮等方面发挥重要作用。PGPR监测到环境中铁浓度较低时,先产生并分泌嗜铁素到胞外,嗜铁素再特异性结合环境中的 Fe^{3+} ,形成嗜铁素- Fe^{3+} 复合物,该复合物能被植物细胞识别并转运到体内,以供植物利用(王丽等, 2024)。

5 豆科植物根际促生菌抗逆促生应用

相关机制研究表明,根际促生菌通过多种生理与分子途径显著提升豆科植物在干旱等逆境条件下的生存与生长能力。接种PGPR不仅促进植物生长和提高生物量,还能增强植物对各种胁迫的抵御能力(Li et al., 2022)。研究发现,豆科植物PGPR在促进作物生长以及应对低肥力、干旱和盐碱等方面具有巨大的应用潜力。然而,目前针对旱区植物PGPR资源挖掘及其抗逆机理研究仍显不足,这限制了将相关理论有效转化为实际应用,主要面临菌株稳定性、环境适应性及接种效率等挑战。因此,如何优化接种策略、构建高效功能菌群,并将其整合到干旱区生态恢复和农业实践中,成为当前的重点研究方向。

5.1 传统接种方式应用

豆科植物根际促生菌应用初期,传统上以单一菌株接种为主,先筛选有潜力的单株菌株,然后回接或接种于其它植物,为促生菌推广奠定了基础。从鹰嘴豆(*Cicer arietinum*)根际分离的*Cedecea davisae* RS3菌株能增强根结瘤和固氮酶活性,在低氮条件下,接种后显著提高鹰嘴豆的根长、生物量、结瘤数和叶绿素含量(Mazumdar et al., 2020)。从胡芦巴(*Trigonella foenum-graecum*)根系分离的*Priestia endophytica*

SK1菌株,在盐胁迫下回接到胡芦巴,可提高盐胁迫下胡芦巴的株高、结瘤数和叶绿素含量,降低氧化损伤,增加氮和磷的含量(Sharma et al., 2022)。从荒漠植物骆驼刺根中分离的*Pseudomonas* LTGT-11-2Z菌株能提高小麦(*Triticum aestivum*)在干旱胁迫下的芽长、根长、植株总鲜重和干重(Zhang et al., 2020)。传统接种方式下菌株对环境的适应性相对较弱,在复杂多变的环境里,其活性与功能易受温度和酸碱度等因素影响,稳定性欠佳,难以长效且稳定地发挥作用。

5.2 合成菌群接种方式应用

随着单一菌株接种的开发和应用,发现仅接种单一微生物具有一定的局限性,而将分离的菌株尤其是植物根际核心菌株构建合成菌群,可以克服单一菌株的局限性,功能互补的多种微生物组合在一起,更易适应环境,表现出更强的抗逆促生作用。将多种微生物作为一个整体进行研究,符合微生物以群落形式存在的自然规律。将从沙漠植物银木蓝(*Indigofera argentea*)根际分离的耐盐菌株*Ensifer* sp. SA403和*Bacillus* sp. SA436构建合成菌群,接种后显著提高了盐胁迫下番茄(*Solanum lycopersicum*)地上部生物量(Schmitz et al., 2022)。从刺毛黧豆(*Mucuna pruriens*)根际土壤中分离*Enterobacter* HS9和*Bacillus* G9,混合2株PGPR构建合成菌群,在干旱胁迫下回接到刺毛黧豆,可使其总生物量和根生物量增加,净光合速率提高,异戊二烯排放量增加。此外,接种处理显著降低了ACC含量和乙烯排放速率(Brunetti et al., 2021)。从紫花苜蓿根际分离*Pseudomonas* sp. L1、*Chryseobacterium soli* L2和*Priestia megaterium* L3三种菌株,单独或联合回接到紫花苜蓿植株上,接种后根瘤数量增加,氮含量升高,抗氧化活性增强,并促进了紫花苜蓿在贫瘠土壤中生长(Flores-Duarte et al., 2022)。

5.3 PGPR在提高豆科植物抗逆性中的作用与应用局限

PGPR可通过多种机制弥补乡土豆科植物的生长短板。一是通过产生渗透调节物质缓解干旱胁迫,提高种子萌发率和幼苗存活率(Ahmad et al., 2022);二是与根瘤菌协同促进结瘤固氮,增强植物氮素自给能力

(Gopalakrishnan et al., 2015); 三是促进豆科植物在贫瘠土壤中生长(Flores-Duarte et al., 2022)。

当前, 旱区乡土豆科植物PGPR的应用面临诸多挑战, 多数菌株筛选工作局限于实验室条件, 缺乏在田间长期定殖能力与促生效果稳定性验证; 菌株、宿主植物与旱区复杂土壤环境三者之间的互作机制尚不清晰。同时, 针对干旱等逆境特征设计的高效复合菌剂配方仍十分匮乏。

5.4 未来研究方向

未来豆科植物促生菌研究可从多维度开展。在菌株筛选与改造上, 可挖掘新的高效抗逆促生菌株, 利用合成生物学技术精准改造。例如, 构建产生特定激素的工程菌, 增强促生效果。借助多组学技术, 深入解析促生菌与豆科植物在不同环境下的分子互作网络, 明确关键基因与代谢通路。针对具体应用场景, 研发适配不同区域与种植模式的菌剂产品, 优化接种工艺, 提高菌剂在田间的作用稳定性与定殖效率。此外, 还需开展田间试验, 评估促生菌对土壤生态系统的长期影响, 为其广泛应用提供坚实的科学与技术支持。

6 总结与展望

旱区在我国乃至全世界分布广泛, 旱区的多样环境孕育了丰富的具有抗逆潜力的乡土豆科植物, 通过挖掘具有独特促生和抗逆功能的PGPR菌株, 可进一步丰富PGPR合成菌群的种类, 提升其在改善旱区作物生长和增强植物抗逆能力等方面的效能。为进一步挖掘旱区乡土豆科植物PGPR资源并提升其应用潜力, 今后可从以下3方面开展研究。

(1) 深入挖掘菌种资源。采集范围可从现有旱区乡土豆科植物种植区域拓展至周边生态环境相似但未充分开发的区域, 全面覆盖不同土壤类型、海拔高度以及气候条件下的种植区, 以获取更丰富多样的PGPR菌株。改进分离和筛选技术, 利用高通量测序技术辅助筛选, 提高稀有和难培养菌株的分离成功率, 挖掘新的具有特殊功能的菌种。

(2) 未来可优先从我国旱区几种典型土壤(如黄绵土和灰钙土)入手, 分析土壤持水性、酸碱度、养分含量和本地微生物状况等关键特性。评估不同乡土豆科植物在不同土壤中的出苗率、生物量、结瘤能力、

水分利用效率及抗逆性等指标, 从而建立起适合不同地区的“土壤-品种”适配关系。在此基础上, 将PGPR纳入考量范畴, 评价“土壤-品种-PGPR”三元素组合对豆科植物生长和产量的协同效应, 最终筛选出最优种植方案。

(3) 加强旱区乡土豆科植物PGPR的推广应用。为拓展我国旱区乡土豆科植物PGPR的应用, 需在旱区不同气候、土壤条件和种植方式区域开展田间试验, 记录菌剂对植物产量、品质和抗逆性的影响。此外, 还需构建长期监测体系, 定期采集土壤和植物样本, 分析菌剂在土壤中的定殖动态, 并设立反馈渠道, 根据监测数据不断优化菌剂配方和应用技术, 确保其可持续推广应用。

作者贡献声明

郭馨怡: 论文撰写与修改; 杨珍: 协助文献检索与筛选; 王佳: 论文语言润色与格式修改; 林雁冰: 论文写作框架指导与确定; 上官周平: 论文选题和写作指导; 樊妙春: 论文选题、写作指导和论文修改。

利益冲突: 所有作者均声明不存在利益冲突。

Conflict of Interests: The authors declare that there is no conflict of interests.

©The author(s) 2026. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

参考文献

- Ahkami AH, White III RA, Handakumbura PP, Jansson C (2017). Rhizosphere engineering: enhancing sustainable plant ecosystem productivity. *Rhizosphere* **3**, 233–243.
- Ahmad HM, Fiaz S, Hafeez S, Zahra S, Shah AN, Gul B, Aziz O, Mahmood-Ur-Rahman, Fakhar A, Rafique M, Chen YL, Yang SH, Wang XK (2022). Plant growth-promoting rhizobacteria eliminate the effect of drought stress in plants: a review. *Front Plant Sci* **13**, 875774.
- Ayangbenro AS, Babalola OO (2021). Reclamation of arid and semi-arid soils: the role of plant growth-promoting archaea and bacteria. *Curr Plant Biol* **25**, 100173.
- Azeem M, Javed S, Zahoor AF (2023). Bacillus species as potential plant growth promoting rhizobacteria for drought stress resilience. *Russ J Plant Physiol* **70**, 59.

- Behera BC, Singdevsachan SK, Mishra RR, Dutta SK, Thatoi HN** (2014). Diversity, mechanism and biotechnology of phosphate solubilising microorganism in mangrove—a review. *Biocatal Agric Biotechnol* **3**, 97–110.
- Brunetti C, Saleem AR, Rocca GD, Emiliani G, De Carlo A, Balestrini R, Khalid A, Mahmood T, Centritto M** (2021). Effects of plant growth-promoting rhizobacteria strains producing ACC deaminase on photosynthesis, isoprene emission, ethylene formation and growth of *Mucuna pruriens* (L.) DC. in response to water deficit. *J Biotechnol* **331**, 53–62.
- Ding H, Cai GX, Wang YS, Chen DL** (2001). Nitrification and denitrification potential in different types of soils in the North China Plain. *J Agro Environ Sci* **20**, 390–393. (in Chinese)
- 丁洪, 蔡贵信, 王跃思, 陈德立 (2001). 华北平原几种主要类型土壤的硝化及反硝化活性. *农业环境保护* **20**, 390–393.
- Flores-Duarte NJ, Mateos-Naranjo E, Redondo-Gómez S, Pajuelo E, Rodriguez-Llorente ID, Navarro-Torre S** (2022). Role of nodulation-enhancing rhizobacteria in the promotion of *Medicago sativa* development in nutrient-poor soils. *Plants* **11**, 1164.
- Garau G, Yates RJ, Deiana P, Howieson JG** (2009). Novel strains of nodulating *Burkholderia* have a role in nitrogen fixation with papilionoid herbaceous legumes adapted to acid, infertile soils. *Soil Biol Biochem* **41**, 125–134.
- Gill SS, Tuteja N** (2010). Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. *Plant Physiol Biochem* **48**, 909–930.
- Glick BR** (2014). Bacteria with ACC deaminase can promote plant growth and help to feed the world. *Microbiol Res* **169**, 30–39.
- Glick BR, Penrose DM, Li JP** (1998). A model for the lowering of plant ethylene concentrations by plant growth-promoting bacteria. *J Theor Biol* **190**, 63–68.
- Gopalakrishnan S, Sathya A, Vijayabharathi R, Varshney RK, Laxmipathi Gowda CL, Krishnamurthy L** (2015). Plant growth promoting rhizobia: challenges and opportunities. *3 Biotech* **5**, 355–377.
- Gou XM, Reich PB, Qiu LP, Shao MG, Wei GH, Wang JJ, Wei XR** (2023). Leguminous plants significantly increase soil nitrogen cycling across global climates and ecosystem types. *Glob Chang Biol* **29**, 4028–4043.
- Haworth M, Marino G, Cosentino SL, Brunetti C, De Carlo A, Avola G, Riggi E, Loreto F, Centritto M** (2018). Increased free abscisic acid during drought enhances stomatal sensitivity and modifies stomatal behaviour in fast growing giant reed (*Arundo donax* L.). *Environ Exp Bot* **147**, 116–124.
- Hobley E, Garcia-Franco N, Hübner R, Wiesmeier M** (2018). Reviewing our options: managing water-limited soils for conservation and restoration. *Land Degrad Dev* **29**, 1041–1053.
- Hou QC, Ufer G, Bartels D** (2016). Lipid signaling in plant responses to abiotic stress. *Plant Cell Environ* **39**, 1029–1048.
- Huang XF, Zhou DM, Lapsansky ER, Reardon KF, Guo JH, Andales MJ, Vivanco JM, Manter DK** (2017). *Mitsuaria* sp. and *Burkholderia* sp. from *Arabidopsis* rhizosphere enhance drought tolerance in *Arabidopsis thaliana* and maize (*Zea mays* L.). *Plant Soil* **419**, 523–539.
- Kaur R, Kaur S** (2018). Biological alternates to synthetic fertilizers: efficiency and future scopes. *Indian J Agric Res* **52**, 587–595.
- Li C, Zhao Y, Yang CC, Zhang C, Yun WJ, Zhang FR, Cheng F** (2024). Spatial distribution characteristics of cultivated land soil conditions in northeast China based on cultivated land resource quality classification. *Chin J Soil Sci* **55**, 601–609. (in Chinese)
- 李超, 赵洋, 杨翠翠, 张超, 郑文聚, 张凤荣, 程锋 (2024). 基于耕地资源质量分类成果的东北地区耕地土壤条件空间分布特征. *土壤通报* **55**, 601–609.
- Li CY, Li XL, Yang YW, Shi Y, Li HL** (2022). Degradation reduces the diversity of nitrogen-fixing bacteria in the alpine wetland on the Qinghai-Tibet Plateau. *Front Plant Sci* **13**, 939762.
- Li Q, Zhou DW, Song YT** (2014). The distribution features of two widespread legumes and their relationships with soil factors in Songnen grassland. *Acta Pratacul Sin* **23**, 31–40. (in Chinese)
- 李强, 周道玮, 宋彦涛 (2014). 松嫩草地两种广布豆科植物分布特征及其与土壤因子关系. *草业学报* **23**, 31–40.
- Liu XG, Pu JP, Han HH, Li JN, Li N, Cui NB** (2025). Suitability area of water-saving and drought-resistant rice cultivation in southwest China under future climate scenarios. *Trans Chin Soc Agric Mach* **56**, 618–626, 652. (in Chinese)
- 刘小刚, 普嘉鹏, 韩焕豪, 李加念, 李娜, 崔宁博 (2025). 未来气候变化下中国西南地区节水抗旱稻适生区变化特征研究. *农业机械学报* **56**, 618–626, 652.
- Luo JY, Song RQ, Deng X, Song Q, Wang JK, Song XS** (2021). PGPR interacts with ectomycorrhizal fungi to

- promote growth of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* and to effect of rhizosphere microecological environment. *J Cent South Univ For Technol* **41**(9), 22–34. (in Chinese)
- 罗佳煜, 宋瑞清, 邓勋, 宋倩, 王俊凯, 宋小双 (2021). PGPR与外生菌根菌互作对樟子松促生作用及根际微生态环境的影响. *中南林业科技大学学报* **41**(9), 22–34.
- Ma FJ, Liu S, Sun BN, Yan DF, Dong JL, Zhang FT, Wang QJ** (2017). Legume fruits from the Oligocene Ningming Formation of Guangxi, China, and their biogeographical and palaeoclimatic implications. *Rev Palaeobot Palynol* **244**, 192–202.
- Ma ZY, Qian ZH, Ma HB, Fu BZ, Peng WD, Liu DX** (2022). Adaptability evaluation of several native plants in the desert steppe of Ningxia. *Pratacul Sci* **39**, 1006–1014. (in Chinese)
- 马子元, 钱志豪, 马红彬, 伏兵哲, 彭文栋, 刘定鑫 (2022). 宁夏荒漠草原5种乡土植物适应性评价. *草业科学* **39**, 1006–1014.
- Mazumdar D, Prasad Saha S, Ghosh S** (2020). Isolation, screening and application of a potent PGPR for enhancing growth of chickpea as affected by nitrogen level. *Int J Veg Sci* **26**, 333–350.
- Nan ZB, Wang YR, He JS, Hu XW, Liu ZP, Li CJ, Nie B, Xia C** (2022). Achievements, challenges and prospects of herbage seeds industry in China. *Acta Pratacul Sin* **31**(6), 1–10. (in Chinese)
- 南志标, 王彦荣, 贺金生, 胡小文, 刘志鹏, 李春杰, 聂斌, 夏超 (2022). 我国草种业的成就、挑战与展望. *草业学报* **31**(6), 1–10.
- Oleńska E, Małek W, Wójcik M, Swiecicka I, Thijs S, Vangronsveld J** (2020). Beneficial features of plant growth-promoting rhizobacteria for improving plant growth and health in challenging conditions: a methodical review. *Sci Total Environ* **743**, 140682
- Richardson AE, Barea JM, McNeill AM, Prigent-Combaret C** (2009). Acquisition of phosphorus and nitrogen in the rhizosphere and plant growth promotion by microorganisms. *Plant Soil* **321**, 305–339.
- Roy S, Liu W, Nandety RS, Crook A, Mysore KS, Pislariu CI, Frugoli J, Dickstein R, Udvardi MK** (2020). Celebrating 20 years of genetic discoveries in legume nodulation and symbiotic nitrogen fixation. *Plant Cell* **32**, 15–41.
- Sandhya V, Sk ZA, Grover M, Reddy G, Venkateswarlu B** (2009). Alleviation of drought stress effects in sunflower seedlings by the exopolysaccharides producing *Pseudomonas putida* strain GAP-P45. *Biol Fertil Soils* **46**, 17–26.
- Schmitz L, Yan ZC, Schneijderberg M, de Roij M, Pijnenburg R, Zheng Q, Franken C, Dechesne A, Trindade LM, van Velzen R, Bisseling T, Geurts R, Cheng X** (2022). Synthetic bacterial community derived from a desert rhizosphere confers salt stress resilience to tomato in the presence of a soil microbiome. *ISME J* **16**, 1907–1920.
- Sharma K, Sharma S, Vaishnav A, Jain R, Singh D, Singh HB, Goel A, Singh S** (2022). Salt-tolerant PGPR strain *Priestia endophytica* SK1 promotes fenugreek growth under salt stress by inducing nitrogen assimilation and secondary metabolites. *J Appl Microbiol* **133**, 2802–2813.
- Udvardi M, Poole PS** (2013). Transport and metabolism in legume-rhizobia symbioses. *Annu Rev Plant Biol* **64**, 781–805.
- Vassilev N, Eichler-Löbermann B, Vassileva M** (2012). Stress-tolerant P-solubilizing microorganisms. *Appl Microbiol Biotechnol* **95**, 851–859.
- Vessey JK** (2003). Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizers. *Plant Soil* **255**, 571–586.
- Wang J, Xu JZ** (2005). The eco-agricultural model of the development of rainwater-harvesting technology in semiarid area. *Chin J Eco-Agric* **13**, 207–209. (in Chinese)
- 王俊, 徐进章 (2005). 半干旱地区发展集水型生态农业模式研究. *中国生态农业学报* **13**, 207–209.
- Wang L, Wang JF, Kong X, Chen XL, Chen LL, Wu YJ, Yi Y, Liu J, Gong JY** (2024). Progress on the mechanism of PGPR to promote plant growth and enhance cadmium tolerance in plants. *Seed* **43**(6), 73–85. (in Chinese)
- 王丽, 王剑峰, 孔鑫, 陈显磊, 陈兰兰, 吴亚娟, 乙引, 刘杰, 龚记熠 (2024). PGPR促进植物生长及增强植物耐镉机制研究进展. *种子* **43**(6), 73–85.
- Wang LL** (2025). Selection and configuration of native plants in ecological restoration projects. *Contemp Hortic* **48**(8), 180–182. (in Chinese)
- 王丽丽 (2025). 乡土植物在生态修复工程中的选择与配置. *现代园艺* **48**(8), 180–182.
- Wang YB, Wang GX, Cheng YF, Li YS** (2006). Response of typical high-cold frozen soil to change of the high-cold ecosystem on Tibetan Plateau. *J Glaciol Geocryol* **28**, 633–641. (in Chinese)
- 王一博, 王根绪, 程玉菲, 李元寿 (2006). 青藏高原典型寒冻土壤对高寒生态系统变化的响应. *冰川冻土* **28**, 633–641.
- Wang YF, Zhang ZQ, Zhang P, Cao YM, Hu TM, Yang PZ** (2016). Rhizobium symbiosis contribution to short-term salt stress tolerance in alfalfa (*Medicago sativa* L.). *Plant Soil* **402**, 247–261.
- Yi X, Li X** (2004). Characteristics of soil resources and de-

velopment and protection in the northwest region. *J Earth Sci Environ* **26**(4), 85–89. (in Chinese)

易秀, 李侠 (2004). 西北地区土壤资源特征及其开发利用与保护. *地球科学与环境学报* **26**(4), 85–89.

Yu RG, Du XL, Chen C, Zhou XJ, Shi GR (2012). Effect of PEG stress on seed germination and seeding physiology of three legumes. *Agric Res Arid Areas* **35**(5), 99–103. (in Chinese)

余如刚, 杜雪玲, 陈楚, 周秀杰, 史刚荣 (2012). PEG胁迫对三种豆科牧草种子萌发及幼苗生理影响. *干旱地区农业研究* **35**(5), 99–103.

Zhang L, Zhang WP, Li QQ, Cui R, Wang Z, Wang Y, Zhang YZ, Ding W, Shen XH (2020). Deciphering the root endosphere microbiome of the desert plant *Alhagi sparsifolia* for drought resistance-promoting bacteria. *Appl Environ Microbiol* **86**, e02863–19.

The Application Potential of the Rhizobacteria of the Native Leguminous Plants in the Arid Regions of China

Xinyi Guo¹, Zhen Yang², Jia Wang¹, Yanbing Lin³, Zhouping Shangguan², Miaochun Fan^{1*}

¹College of Grassland Agriculture, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; ²State Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Control, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; ³College of Life Sciences, Northwest A&F University, Yangling 712100, China

Abstract Leguminous plants in arid regions are crucial for maintaining ecological balance and promoting sustainable agricultural development. The classification and characterization of the plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) originated from these legumes is of great value for their application in enhancing plant stress resistance and facilitating ecological restoration in arid areas. However, systematic research on the functional diversity of the PGPR of leguminous plants in arid zones remains insufficient. This review focuses on the PGPR of the leguminous plants in arid regions of China, clarifies their geographical distribution and ecological advantages in arid environments, and elucidates the stress resistance and growth promoting mechanisms of the PGPR, along with their application prospects in enhancing plant stress tolerance. Furthermore, we suggest that future research should focus on in-depth exploration of microbial resources, clarifying the adaptability of legumes to different soil types in arid regions, and promoting the application of PGPR for legumes in arid areas. This study provides valuable clues and guidance for the precise construction and application of synthetic microbial communities to enhance plant stress resistance and ensure ecological and agricultural sustainability in arid regions.

Key words arid regions, native leguminous plants, plant growth promoting rhizobacteria (PGPR), stress resistance and growth promoting mechanisms, synthetic microbial community

Guo XY, Yang Z, Wang J, Lin YB, Shangguan ZP, Fan MC (2026). The application potential of the rhizobacteria of the native leguminous plants in the arid regions of China. *Chin Bull Bot* **61**, 170–178.

* Author for correspondence. E-mail: miaochunfan@nwfau.edu.cn

(责任编辑: 白羽红)

通讯作者简介

樊妙春, 博士生导师。主要从事草地恢复生态与根际微生物生态调控研究。