Advances in Microbiology 微生物前沿, 2025, 14(2), 59-65
Published Online June 2025 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/amb
https://doi.org/10.12677/amb.2025.142008

Hans汉斯

茉莉酸激素与微生物互作研究进展

张钰玲

浙江师范大学生命科学学院，浙江 金华

收稿日期：2025年4月24日；录用日期：2025年5月28日；发布日期：2025年6月6日

摘　要

茉莉酸(JA)作为一种重要的植物激素，在植物生长发育以及应对生物和非生物胁迫中发挥着关键作用。本文综述了茉莉酸的合成方式、信号传导机制、激素功能以及与微生物的互作等方面的最新研究进展，旨在为深入理解茉莉酸在植物生理过程中的作用提供理论依据。

关键词

茉莉酸，微生物，互作

Research Progress on Jasmonic Acid Hormone and Microbe Interaction

Yuling Zhang

College of Life Sciences, Zhejiang Normal University, Jinhua Zhejiang

Received: Apr. 24th, 2025; accepted: May 28th, 2025; published: Jun. 6th, 2025

Abstract

Jasmonic acid (JA), a key plant hormone, is crucial for plant growth, development, and stress responses. This paper reviews the latest studies on JA's biosynthesis, signaling pathways, functions, and microbe interactions, offering a theoretical foundation for understanding its role in plant physiological processes.

Keywords

Jasmonic Acid, Microbes, Interaction

文章引用: 张钰玲. 茉莉酸激素与微生物互作研究进展[J]. 微生物前沿, 2025, 14(2): 59-65.
DOI: 10.12677/amb.2025.142008

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 引言

植物与微生物之间的互作关系是自然界中普遍存在的现象，对植物的生长、发育和免疫反应具有重要影响。其中，根际微生物作为植物微生物组的关键组成部分，可以通过多种机制促进植物生长并增强其抗病能力。茉莉酸(Jasmonic Acid, JA)是一种重要的植物激素，在植物响应生物和非生物胁迫中发挥着关键作用。JA 信号通路参与调节植物的防御反应，特别是针对坏死性病原菌和食草昆虫的防御。近年来，越来越多的研究表明，植物与根际细菌的互作能够诱导植物产生系统抗性，从而提高植物对病原菌的抵抗力。深入研究茉莉酸在植物–微生物互作中的作用机制，有助于开发新型生物防治策略，减少化学农药的使用，实现农业的可持续发展。

2. 茉莉酸的合成方式和信号传导

2.1. 茉莉酸的生物合成途径

茉莉酸(Jasmonic Acid, JA)及其衍生物(统称为茉莉酸类化合物，JAs)的合成涉及多个亚细胞区室和酶促反应。其前体为多不饱和脂肪酸，主要包括 α-亚麻酸(18:3)和十六碳三烯酸(16:3)。合成途径可分为三个阶段：叶绿体中的前体转化、过氧化物酶体的 β-氧化及细胞质中的修饰[1]。

在叶绿体阶段，α-亚麻酸在脂氧合酶(LOX)催化下生成 13-氢过氧化亚麻酸(13-HPOT)，随后经丙二烯氧化物合成酶(AOS)和丙二烯氧化物环化酶(AOC)作用形成 12-氧代植物二烯酸(12-OPDA)。16:3 则通过类似途径生成去甲基化二烯酸。

在过氧化物酶体阶段，12-OPDA 和 dn-OPDA 通过 OPDA 还原酶(OPR3)转化为三羧酸循环中间体，再经 β-氧化生成茉莉酸(JA)。此过程依赖酰基辅酶 A 氧化酶(ACX)和多功能蛋白(MFP)等酶。

在细胞质修饰阶段，JA 在细胞质中进一步代谢为生物活性形式茉莉酸–异亮氨酸(JA-Ile)，或甲基化为挥发性甲基茉莉酸(MeJA)。JA-Ile 是主要的信号分子，其合成由茉莉酸抗性蛋白 1 (JAR1)催化。

2.2. 茉莉酸信号传导机制

植物通过特定的信号分子感知环境信号并启动茉莉酸信号传导。例如，在番茄中发现的 systemin 是一种响应机械损伤的多肽信号分子，它能与细胞表面受体 SR160 结合，激活茉莉酸信号途径[2]。类似地，AtPEP1 在拟南芥中也发挥着类似 systemin 的作用，通过与质膜上的 PEPR1 受体结合，激活茉莉酸信号传导[3]。

茉莉酸信号传导的核心是 SCFCOI1 复合体、JAZ 蛋白及转录因子的动态调控，受体复合体与 JAZ 蛋白降解：COI1 (CORONATINE INSENSITIVE 1)作为 F-box 蛋白，与 SKP1 和 Cullin 形成 SCFCOI1 E3 泛素连接酶复合体。JA-Ile 通过直接结合 COI1-JAZ 复合体，触发 JAZ 蛋白的泛素化及 26S 蛋白酶体降解。JAZ 蛋白家族包含 13 个成员，其 Jas 结构域介导与 COI1 的互作，而 ZIM 结构域则参与与其他转录因子的结合[4]。

转录因子的释放与下游基因激活：JAZ 蛋白的降解释放被抑制的转录因子，如 MYC2、MYC3 和 MYC4。MYC2 作为核心调控因子，激活防御基因(如 VSP2、PDF1.2)的表达。此外，JAZ 蛋白还可与 MYB、NAC、ERF 等转录因子结合，形成复杂的调控网络[5]。

信号传导的动态平衡：茉莉酸信号的强度与持续时间受 JAZ 蛋白稳定性及 JA-Ile 浓度的调控。低浓

度 JA-Ile 通过核膜 ABC 转运蛋白(如 AtJAT1/AtABCG16)进入细胞核，而高浓度时则通过质膜转运蛋白外排，避免过度激活防御反应[6]。

近年研究发现，茉莉酸信号传导中存在非经典途径。例如，某些病原菌效应蛋白(如 HopZ1a)通过乙酰化 JAZ 蛋白直接激活茉莉酸信号，绕过 COI1 依赖的降解途径。此外，DELLA 蛋白(赤霉素信号抑制因子)与 JAZ 蛋白互作，介导茉莉酸与赤霉素的交叉调控[7]。

2.3. 茉莉酸信号传导的调控网络

2.3.1. 茉莉酸与转录因子的相互作用

除了 MYC 转录因子外，茉莉酸信号还涉及其他多种转录因子，如 MYB、NAC、ERF 和 WRKY 等。这些转录因子通过与 JAZ 蛋白相互作用，形成复杂的调控网络，调控植物对不同胁迫的响应。例如，WRKY 转录因子在茉莉酸信号传导中发挥重要作用，调控植物对病原菌的防御反应。

2.3.2. 茉莉酸与其他激素的交叉对话

茉莉酸信号途径与其他植物激素信号途径之间存在广泛的交叉对话。例如，茉莉酸与乙烯(ET)信号途径在植物对病原菌的防御中协同作用，通过共用转录因子如 ORA59 整合信号，激活防御基因的表达。茉莉酸与水杨酸(SA)信号途径则在调控植物对不同类型的病原菌的防御中表现出拮抗作用，这种拮抗作用有助于植物在面对不同胁迫时进行资源分配[8]。

3. 茉莉酸激素的功能

3.1. 内源茉莉酸的生理功能

茉莉酸在植物生长发育的多个阶段发挥精细调控作用。在植物生长方面，茉莉酸能够诱导气孔开放，调节植物对二氧化碳的吸收和水分散失，从而影响光合作用和蒸腾作用的效率。此外，茉莉酸还参与调控植物细胞周期，影响细胞分裂和伸长，进而调节植物的整体生长速度。在植物发育过程中，茉莉酸对花发育的调控尤为关键，它通过调节花器官的形成和发育，确保植物的生殖生长顺利进行。茉莉酸还参与调控叶衰老过程，通过促进叶绿素降解和营养物质的再分配，为植物的其他生长阶段提供养分支持。在种子萌发方面，茉莉酸能够响应环境信号，调节种子的萌发率和萌发时间，以适应不同的环境条件。

茉莉酸在植物防御机制中扮演着核心角色。当植物受到病原菌侵袭时，茉莉酸能够迅速诱导一系列防御基因的表达，合成抗菌和抗病毒物质，如植保素、病程相关蛋白(PR 蛋白)等，从而抑制病原菌的生长和扩散。茉莉酸还能够调节植物细胞壁的强化，通过增加木质素和几丁质的合成，提高细胞壁的机械强度，阻止病原菌的侵入。此外，茉莉酸能够激活植物的系统获得性抗性(SAR)，使植物在受到局部病害后，能够迅速启动全身防御反应，提高对后续病原菌侵袭的抵抗力。

内源茉莉酸在植物生长发育和胁迫响应中具有重要作用。在植物生长方面，茉莉酸能够诱导气孔开放、抑制 Rubisco 生物合成、影响氮和磷的吸收以及有机物质的运输。在植物发育过程中，茉莉酸参与调控花发育、叶衰老、种子萌发等过程。在胁迫响应方面，茉莉酸能够诱导植物对病原菌和昆虫的防御反应，增强植物的抗逆性。

内源茉莉酸参与植物的生长发育调控，茉莉酸参与植物多个发育过程，包括花粉成熟、花器官发育和根系生长。例如 MYB21 和 MYB24 在 JA 调控的花药开裂中起关键作用[9]。

内源茉莉酸还参与植物的防御反应，茉莉酸是植物应对昆虫取食和坏死性病原菌的核心信号分子，JA 信号通过激活蛋白酶抑制剂(如 PINII)和次生代谢物(如萜类、生物碱)的合成，增强抗虫性[9]。此外，茉莉还一定程度上响应非生物胁迫，茉莉酸在干旱、盐胁迫和低温响应中发挥重要作用。例如干旱诱导的 LOX6 促进 12-OPDA 积累，通过调控气孔关闭提高抗旱性。低温胁迫下，JA 信号通过 ICE-CBF 通路

激活冷响应基因[10]。

3.2. 外源茉莉酸的应用

外源施用茉莉酸或其衍生物能够显著影响植物的生长和发育。研究表明，外源茉莉酸处理可以调节植物的株高、叶面积和根系发育，提高植物的生物量。在农业生产中，外源茉莉酸被用作植物生长调节剂，通过调节植物的生长节奏，提高作物的产量和品质。外源茉莉酸还能够促进植物对养分的吸收和利用，提高植物对氮、磷、钾等营养元素的吸收效率，增强植物的生长活力。

外源施用茉莉酸或其衍生物也能显著影响植物的生长和抗逆性。研究表明，外源茉莉酸能够提高植物对干旱、盐胁迫、重金属毒性和病原菌感染的耐受性。在干旱条件下，外源茉莉酸能够增加植物体内抗氧化酶的活性，如超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)，减少活性氧的积累，减轻干旱对植物细胞的氧化损伤。在盐胁迫下，外源茉莉酸能够调节植物的渗透压平衡，提高植物的脯氨酸和可溶性糖含量，降低细胞内的钠离子浓度，从而缓解盐胁迫对植物的毒害作用。此外，外源茉莉酸还能够提高植物对重金属毒性的耐受性，通过增加抗氧化物质的合成和金属螯合物的形成，减少重金属对植物细胞的损伤。

外源 MeJA 处理可增强植物对多种胁迫的耐受性。例如 MeJA 预处理显著提高香蕉(*Musa acuminata*)的耐冷性，通过诱导 MYC 转录因子和冷响应基因(如 CBFs)的表达。外源茉莉酸调控次生代谢，茉莉酸可诱导药用植物的活性成分合成。例如 MeJA 处理促进沉香(*Aquilaria sinensis*)中倍半萜的积累。

在农业应用中，外源 JA 用于果蔬采后保鲜。例如，MeJA 处理减少芒果(*Mangifera indica*)冷藏期间的冷害，通过提高抗氧化酶活性维持品质。

3.3. 茉莉酸在非生物胁迫响应中的作用

干旱是全球农业生产中最为严重的非生物胁迫之一。茉莉酸在植物应对干旱胁迫中发挥着关键作用。干旱条件下，植物体内的茉莉酸含量迅速上升，通过调节气孔开闭减少水分散失，同时激活一系列干旱响应基因的表达，合成具有保护功能的蛋白质和代谢物质。茉莉酸还能够与脱落酸(ABA)信号途径协同作用，增强植物的干旱耐受性。研究表明，茉莉酸和 ABA 在调节气孔运动和干旱响应基因表达方面具有协同效应，通过整合两种激素的信号，植物能够更有效地应对干旱胁迫。

盐胁迫影响植物的生长发育和代谢过程。茉莉酸通过调节植物的抗氧化防御系统，提高植物对盐胁迫的耐受性。在盐胁迫下，茉莉酸能够诱导超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和抗坏血酸过氧化物酶(APX)等抗氧化酶的活性，清除体内积累的活性氧，减轻氧化损伤。茉莉酸还能够调节植物的离子平衡，通过增加钠离子的排除和钾离子的吸收，维持细胞内的渗透压平衡。此外，茉莉酸能够诱导盐胁迫响应基因的表达，合成具有保护功能的蛋白质和兼容性溶质，提高植物的盐胁迫耐受性。

重金属污染对植物生长和生态安全构成严重威胁。茉莉酸在植物应对重金属胁迫中具有重要作用。茉莉酸能够诱导植物产生金属螯合物，如金属硫蛋白和 phytochelatins，这些物质能够与重金属离子结合，减少重金属对植物细胞的毒性。茉莉酸还能够激活植物的抗氧化防御系统，提高抗氧化酶的活性，清除重金属诱导产生的活性氧，减轻氧化损伤。此外，茉莉酸能够调节植物的生长发育，通过促进根系发育和调整植株形态，提高植物对重金属胁迫的耐受性[11]。

4. 茉莉酸与微生物的互作

4.1. 茉莉酸在植物－病原菌互作中的作用

病原菌能够感知植物产生的茉莉酸，并通过分泌效应子来干扰茉莉酸信号途径，从而增强自身的致

病力。例如，稻瘟病菌能够分泌 Abm 来抑制茉莉酸活性和免疫反应，而当与水稻不亲和时，Abm 被降解，导致 MeJA 积累，激活茉莉酸下游响应和免疫反应。这种复杂的互作关系使得植物和病原菌之间形成了一种动态的协同进化机制[11]。茉莉酸信号通过激活 PDF1.2、THI2.1 等防御基因，抵抗坏死性病原菌(如灰霉菌 *Botrytis cinerea*)和半活体营养型病原菌(如稻瘟病菌 *Magnaporthe oryzae*) [12]。例如，稻瘟病菌分泌 Abm 酶将 JA 转化为无活性的 12-OH-JA，抑制宿主免疫反应。某些细菌(如 *Pseudomonas syringae*)分泌冠菌素(COR)，模拟 JA-Ile 结构携带 COI1-JAZ 复合体，抑制水杨酸(SA)介导的抗病反应[13]。

4.2. 茉莉酸与有益微生物的互作

研究表明茉莉酸参与根际微生物调控，茉莉酸通过调控根系分泌物成分，影响根际微生物群落结构。例如，JA 信号促进植物分泌类黄酮，招募有益菌如丛枝菌根真菌(AMF) [14]。茉莉酸参与根际微生物调控的过程中存在一定程度的共生信号交叉，例如茉莉酸与独脚金内酯(SL)协同调控植物–微生物共生，且研究发现，SL 缺陷突变体对根瘤菌的侵染率显著降低，而 JA 信号可部分补偿这一缺陷。在植物受到病原菌侵染时，JA 信号通路被激活，导致根系分泌物的成分发生改变，吸引更多的有益微生物，抑制病原菌的生长[15]；JA 可以影响植物的根系构型，如主根长度、侧根数量和根毛密度等。这些改变会影响根系与土壤的接触面积，进而影响根际微生物组的组成和功能[16]。

茉莉酸在植物防御昆虫取食中发挥关键作用。当植物受到昆虫取食损伤时，茉莉酸信号途径被迅速激活，诱导合成和释放挥发性物质，如 terpenoids 和 green leaf volatiles，这些物质能够吸引昆虫的天敌，如寄生蜂和捕食性昆虫，从而实现生物防治。茉莉酸还能够调节植物叶片的营养品质和防御物质含量，降低昆虫对植物的取食偏好和营养吸收效率。此外，茉莉酸能够诱导植物产生抗虫蛋白，如蛋白酶抑制剂和凝集素，这些蛋白能够干扰昆虫的消化和生长发育，减少昆虫对植物的损害。

4.3. 茉莉酸与其他激素的协同与拮抗

茉莉酸与其他植物激素之间存在广泛的协同和拮抗作用，共同调控植物的生长发育和胁迫响应。茉莉酸与水杨酸(SA)在植物防御中的协同与拮抗作用尤为复杂。通常，茉莉酸和水杨酸在植物对不同病原菌的防御中发挥不同作用。茉莉酸主要参与植物对坏死营养型病原菌和食草昆虫的防御，而水杨酸则主要参与植物对生物营养型病原菌的防御。茉莉酸和水杨酸信号途径之间通过共用转录因子和信号组分进行相互调控，形成复杂的调控网络。在某些情况下，茉莉酸和水杨酸能够协同作用，增强植物的防御反应；而在其他情况下，茉莉酸和水杨酸则表现出拮抗作用，植物通过调节两种激素的信号平衡来适应不同的病原菌侵袭。茉莉酸与水杨酸(SA)在抗病反应中常呈拮抗关系，例如 SA 通过 NPR1 激活 WRKY70，抑制 JA 信号通路；反之，MYC2 通过诱导 NAC 转录因子(如 ANAC019)抑制 SA 合成基因 ICS1。茉莉酸与乙烯(ET)在植物防御和非生物胁迫响应中也表现出协同作用。茉莉酸和乙烯信号途径通过共用转录因子如 ORA59 整合信号，激活防御基因的表达。在干旱和盐胁迫等非生物胁迫下，茉莉酸和乙烯协同调节气孔运动和抗氧化酶活性，提高植物的胁迫耐受性[17]。

茉莉酸与脱落酸(ABA)在植物生长和非生物胁迫响应中存在协同和拮抗作用。在干旱和盐胁迫下，茉莉酸和 ABA 能够协同调节气孔关闭，减少水分散失。然而，在植物生长发育过程中，茉莉酸和 ABA 可能表现出拮抗作用，茉莉酸促进植物生长，而 ABA 则抑制植物生长，植物通过调节两种激素的信号平衡来适应不同的环境条件[18]。

5. 讨论

茉莉酸信号网络的复杂性和动态性是植物适应多变环境的关键。茉莉酸信号途径通过与多种转录因子、共抑制子、共激活子和其他信号组分的相互作用，形成多层次的调控网络。这种复杂的调控网络使

得植物能够根据不同环境信号的强度和持续时间，灵活调整茉莉酸信号的输出，从而实现对生长发育和胁迫响应的精细调控。近年来，随着蛋白质组学、转录组学和代谢组学等组学技术的发展，研究人员能够更全面地解析茉莉酸信号网络的动态变化，揭示茉莉酸在植物生理过程中的核心作用机制。

茉莉酸作为一种重要的植物激素，在植物生长发育和环境适应中具有多方面的功能。近年来，随着研究的深入，茉莉酸的合成、信号传导以及与其他激素和微生物的互作机制逐渐被揭示。然而，目前对于茉莉酸信号网络的复杂性和动态性仍有许多问题尚未解决。未来的研究需要进一步探索茉莉酸与其他激素信号途径的交叉对话机制，以及茉莉酸在植物与微生物互作中的具体作用模式。此外，如何利用茉莉酸及其衍生物提高作物的抗逆性和产量也是未来研究的重要方向。

参考文献

[1] Ali, M.S. and Baek, K. (2020) Jasmonic Acid Signaling Pathway in Response to Abiotic Stresses in Plants. *International Journal of Molecular Sciences*, **21**, Article 621. https://doi.org/10.3390/ijms21020621

[2] Cui, J., Sa, E., Wei, J., Fang, Y., Zheng, G., Wang, Y., *et al*. (2024) The Truncated Peptide AtPEP1(9-23) Has the Same Function as AtPEP1(1-23) in Inhibiting Primary Root Growth and Triggering of ROS Burst. *Antioxidants*, **13**, Article 549. https://doi.org/10.3390/antiox13050549

[3] Safaeizadeh, M. and Boller, T. (2019) Differential and Tissue-Specific Activation Pattern of the *AtPROPEP* and *AtPEPR* Genes in Response to Biotic and Abiotic Stress in *Arabidopsis thaliana*. *Plant Signaling & Behavior*, **14**, e1590094. https://doi.org/10.1080/15592324.2019.1590094

[4] Carvalhais, L.C., Schenk, P.M. and Dennis, P.G. (2017) Jasmonic Acid Signalling and the Plant Holobiont. *Current Opinion in Microbiology*, **37**, 42-47. https://doi.org/10.1016/j.mib.2017.03.009

[5] Jarocka-Karpowicz, I. and Markowska, A. (2021) Therapeutic Potential of Jasmonic Acid and Its Derivatives. *International Journal of Molecular Sciences*, **22**, Article 8437. https://doi.org/10.3390/ijms22168437

[6] Nie, R., Chen, D., Hu, T., Zhang, S. and Qu, G. (2024) A Review: The Role of Jasmonic Acid in Tomato Flower and Fruit Development. *Plant Molecular Biology Reporter*. https://doi.org/10.1007/s11105-024-01505-x

[7] Liu, H. and Timko, M.P. (2021) Jasmonic Acid Signaling and Molecular Crosstalk with Other Phytohormones. *International Journal of Molecular Sciences*, **22**, Article 2914. https://doi.org/10.3390/ijms22062914

[8] Yang, L., Zhou, Y., Guo, L., Yang, L., Wang, J., Liang, C., *et al*. (2022) The Effect of Banana Rhizosphere Chemotaxis and Chemoattractants on *Bacillus velezensis* LG14-3 Root Colonization and Suppression of Banana Fusarium Wilt Disease. *Sustainability*, **15**, Article 351. https://doi.org/10.3390/su15010351

[9] Nawfetrias, W., Devy, L., Esyanti, R.R. and Faizal, A. (2024) *Phyllanthus* Lignans: A Review of Biological Activity and Elicitation. *Horticulturae*, **10**, Article 195. https://doi.org/10.3390/horticulturae10020195

[10] Raza, A., Charagh, S., Zahid, Z., Mubarik, M.S., Javed, R., Siddiqui, M.H., *et al*. (2020) Jasmonic Acid: A Key Frontier in Conferring Abiotic Stress Tolerance in Plants. *Plant Cell Reports*, **40**, 1513-1541. https://doi.org/10.1007/s00299-020-02614-z

[11] Chen, S., Tao, Z., Shen, Y., Yang, R., Yan, S., Chen, Z., *et al*. (2024) *Magnaporthe oryzae* Infection Triggers Rice Resistance to Brown Planthopper through the Influence of Jasmonic Acid on the Flavonoid Biosynthesis Pathway. *Insect Science*, **32**, 243-259. https://doi.org/10.1111/1744-7917.13378

[12] Ma, J., Morel, J., Riemann, M. and Nick, P. (2022) Jasmonic Acid Contributes to Rice Resistance against *Magnaporthe oryzae*. *BMC Plant Biology*, **22**, Article No. 601. https://doi.org/10.1186/s12870-022-03948-4

[13] de Torres Zabala, M., Zhai, B., Jayaraman, S., Eleftheriadou, G., Winsbury, R., Yang, R., *et al*. (2015) Novel JAZ Co-operativity and Unexpected JA Dynamics Underpin *Arabidopsis* Defence Responses to *Pseudomonas syringae* Infection. *New Phytologist*, **209**, 1120-1134. https://doi.org/10.1111/nph.13683

[14] Panda, S.K. and Das, S. (2024) Potential of Plant Growth-Promoting Microbes for Improving Plant and Soil Health for Biotic and Abiotic Stress Management in Mangrove Vegetation. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, **23**, 801-837. https://doi.org/10.1007/s11157-024-09702-6

[15] Tyagi, A., Lama Tamang, T., Kashtoh, H., Mir, R.A., Mir, Z.A., Manzoor, S., *et al*. (2024) A Review on Biocontrol Agents as Sustainable Approach for Crop Disease Management: Applications, Production, and Future Perspectives. *Horticulturae*, **10**, Article 805. https://doi.org/10.3390/horticulturae10080805

[16] Chauhan, P., Sharma, N., Tapwal, A., Kumar, A., Verma, G.S., Meena, M., *et al*. (2023) Soil Microbiome: Diversity, Benefits and Interactions with Plants. *Sustainability*, **15**, Article 14643. https://doi.org/10.3390/su151914643

[17] Ranjan, A., Rajput, V.D., Prazdnova, E.V., Gurnani, M., Sharma, S., Bhardwaj, P., *et al*. (2024) Augmenting Abiotic Stress Tolerance and Root Architecture: The Function of Phytohormone-Producing PGPR and Their Interaction with Nanoparticles. *South African Journal of Botany*, **167**, 612-629. https://doi.org/10.1016/j.sajb.2024.02.041

[18] Lv, Q., Chi, B., He, N., Zhang, D., Dai, J., Zhang, Y., *et al*. (2023) Cotton-Based Rotation, Intercropping, and Alternate Intercropping Increase Yields by Improving Root-Shoot Relations. *Agronomy*, **13**, Article 413. https://doi.org/10.3390/agronomy13020413