

Applied Research and Outlook of P-Solubilizing Microbes

Yifan Wang¹, Wei Liu², Hongshun Li², Qili Zhu², Weifeng Leng², Yanfeng Li^{2*}, Jianqiang Zhu^{1*}

¹Engineering Research Center of Ecology and Agricultural Use of Wetland, Ministry of Education, Yangtze University, Jingzhou Hubei

²Linyi Limited Company of China Sinochem Agriculture R & D Center, Linyi Shandong
Email: 2473915580@qq.com, *250478237@qq.com, *2277131116@qq.com

Received: May 20th, 2020; accepted: Jun. 4th, 2020; published: Jun. 11th, 2020

Abstract

Phosphorus is an important nutrient element for plant, which impacts vegetation growth and metabolism. Based on literature search and analysis, the paper summarized species of P-solubilizing microbes and their phosphate-solubilizing mechanisms, as well as their application in agricultural production practice, probed into technical approaches to enhance utilization rate of phosphorus in soil, looked forward to applied research of P-solubilizing microbes, finally pointed out the striving direction in the future in light of problems existed in the research and application of P-solubilizing microbes.

Keywords

P-Solubilizing Microbes, Agricultural Application, Research Progress, Outlook

解磷微生物应用研究与展望

王怡凡¹, 刘 巍², 李洪顺², 朱其立², 冷伟峰², 李延锋^{2*}, 朱建强^{1*}

¹长江大学, 湿地生态与农业利用教育部工程研究中心, 湖北 荆州

²中化农业(临沂)研发中心有限公司, 山东 临沂

Email: 2473915580@qq.com, *250478237@qq.com, *2277131116@qq.com

收稿日期: 2020年5月20日; 录用日期: 2020年6月4日; 发布日期: 2020年6月11日

摘 要

磷是重要的植物营养元素, 影响植物的生长和代谢。在文献调查与分析的基础上, 本文归纳总结了解磷

*通讯作者。

文章引用: 王怡凡, 刘巍, 李洪顺, 朱其立, 冷伟峰, 李延锋, 朱建强. 解磷微生物应用研究与展望[J]. 农业科学, 2020, 10(6): 380-385. DOI: 10.12677/hjas.2020.106056

菌的种类、解磷机理以及在生产中的应用,探讨了提高土壤中磷素利用率的技术途径,对解磷微生物的应用研究进行了展望,最后,根据解磷菌研究和应用中存在的问题指出了今后努力的方向。

关键词

解磷菌, 农业应用, 研究进展, 展望

Copyright © 2020 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

磷是维持植物体正常生长不可或缺的营养元素之一,可提高植物的抗性及其对环境的缓冲能力,在植物体的新陈代谢活动中发挥着重要作用。对于缺磷土壤,农业生产实践中,人们通常施用磷肥来解决磷素缺乏问题,但磷在土壤中易被固定,转化效率较低且对土壤、水体以及生态环境等造成了负面影响。土壤中存在大量的有益微生物,其中解磷微生物即解磷菌能够将难溶性的磷通过其代谢活动转化为土壤和植物可吸收利用的形态;同时,由于解磷菌对于土壤、植物以及环境之间的物质循环等具有积极影响,而受到了广泛地关注。因此,本文将重点围绕解磷菌的研究与应用进行阐述。

2. 解磷菌分类及其功能

在生态系统中,磷在土壤、植物以及微生物之间进行流通,主要以无机磷和有机磷两种形式存在,其中难溶性磷约占全磷的95% [1]。在农业生产中,人们采用施磷肥的方法来解决土壤缺磷问题,但是磷元素进入土壤中易与 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Al^{3+} 、 Fe^{3+} 等阳离子结合,形成难溶性的磷酸盐,如磷酸钙、磷酸铁、磷酸铝等,导致磷肥利用率较低(约15%左右)。众所周知,土壤中存在大量有益微生物,对土壤肥力演变、植物生长发育以及它们之间的物质循环等具有重要影响。H. Ram等田间试验结果表明,根际有益微生物如溶磷真菌(Phosphate-solubilizing fungus, PSF)能提高土壤磷素有效性,提高作物产量[2]。其中解磷微生物即解磷菌(phosphate-solubilizing microorganisms, PSM)能够将土壤中植物难以吸收利用的磷转化为容易吸收利用的形态,如 $Ca(H_2PO_4)_2$ 、 KH_2PO_4 、 NaH_2PO_4 、 $Mg(H_2PO_4)_2$ 、 $CaHPO_4$ 、 $MgHPO_4$ 等。张云霞的盆栽小麦试验结果表明,解磷菌*B. sub-tilis* JT-1作为生物菌肥,施用后不仅能提高植物对磷的利用率,而且使农作物增产[3]。

由于气候条件、土壤类型、土壤性质、作物类型、根际环境、种植模式、施肥情况以及管理水平等的不同,导致解磷菌的种类和数量存在差异。解磷菌主要分为细菌、真菌、放线菌。根据其分解底物的不同,分为解无机磷微生物和解有机磷微生物。研究表明,有些微生物如链霉菌属(*Streptomyces*)既可以溶解有机磷,又可以溶解无机磷,所以它们之间没有明确的界限[4] [5] [6]。其中,解磷细菌的种类和研究较多,主要涉及芽孢杆菌属(*Bacillus*)、假单胞菌属(*Pseudomonas*)、固氮菌(*Azotobacter*)、土壤杆菌属(*Agrobacterium*)、黄杆菌属(*Flavobacterium*)、欧文氏菌属(*Erwinia*)等[5] [7]。在这些解磷细菌中,研究应用较多的是巨大芽孢杆菌和胶质芽孢杆菌,它们的解磷能力最强[1] [8]。解磷真菌主要有青霉菌属(*Penicillium*)、曲霉菌属(*Aspergillus*)、镰刀菌属(*Fusarium*)以及AM菌根属(*Arbuscular mycorrhiza*)等,应用报道较多的是解磷能力强的曲霉和青霉。解磷放线菌主要有链霉菌属(*Streptomyces*)和小单胞菌属(*Micromonospora*)等[7] [9]。此外,相关研究发现[10],有的蓝细菌也具有解磷功能,如繁育拟惠氏蓝细

菌(*Westiellopsisprolififica*)和鱼腥藻(*Anabaena*)等。虽然解磷真菌在数量和种类上较解磷细菌少,但是其解磷能力更强、更持久、更稳定,究其原因是许多解磷细菌在进一步纯化培养后,其解磷能力逐渐减弱且不再恢复,而解磷真菌的解磷能力较为稳定[10]。

同时,解磷菌也能促进植物对 Ca、N、Fe、K、Mg、Zn 等营养元素的吸收,但由于土壤含磷量本底值的不同,这种促进作用会有所差异;除此之外,解磷菌还具有促进植物生长和抑制土壤病原菌等功能。Sarkar 等研究发现,PSB 与 TSP (三重磷酸盐)混合使用,能增加水稻株高、单株分蘖数以及植株矿质营养含量[11]。Singh 等研究表明,土壤解磷细菌具有促进植物生长的作用[12]。彭静静等表明葡糖醋杆菌 qzr14 应用于黄瓜苗,具有抵抗病原的功能[1]。总结前人研究可得,解磷菌在提高营养元素利用率、恢复土壤结构、改良土壤理化性状及维持生态环境稳态等过程中发挥着重要作用[8] [13]。Srivastwa P.等的盆栽试验结果表明[14],微生物菌株添加到盐土中能够改善土壤 pH、电导率、速效磷、速效氮等理化性质,增产提质,从而达到“减肥增效”的目的。因此,如何充分地利用解磷菌的功能来提高土壤中磷的有效性以及改良土壤已经成为研究焦点以及亟待解决的问题。

3. 关于解磷菌的解磷机理研究

目前,一般认为解磷菌解磷是一个动态的过程,且解磷的机理较为复杂。研究者通常从生理生化和分子生物学角度,解析解磷菌的解磷机理。

从生理生化角度看,解磷菌之所以能够解难溶性无机磷,主要是加入解磷菌后产生了各种类型的小分子有机酸,主要包括葡萄糖酸、酮葡萄糖酸、苹果酸、草酸、酒石酸、乙酸、丙酮酸等酸性物质。这些有机酸可以与难溶性磷酸盐中的钙、铁、铝等阳离子发生螯合作用或者通过降低环境的 PH,从而溶解并释放出磷酸根。在碱性土壤中,解磷菌释放的有机酸在一定程度上减轻了根际土壤的碱性胁迫,进一步提高了土壤和植物对磷的利用率。有研究表明[15],解磷菌呼吸作用释放的 CO_2 能够间接的提高磷的利用率;解磷菌合成的胞外多糖通过结合其培养基中游离的磷间接参与了无机磷的溶解过程;解磷菌在代谢过程中释放的质子能够降低植物根际环境的 PH,可促进土壤和植物对磷的吸收。但通过释放 CO_2 、质子以及合成胞外多糖来溶解难溶性磷酸盐,远不如释放小分子有机酸的作用大。所以,目前普遍认为解磷菌溶解无机磷的主要机制是释放各类小分子有机酸。需要提出的是,土壤类型、作物类型等不同,有机酸在种类和数量上会有所差异[1] [16]。

关于解磷菌能解难溶性有机磷的机理,从生理生化角度看,主要是解磷菌可利用合成磷酸酶(磷酸单酯酶、磷酸二酯酶和磷酸三酯酶)、水解磷酸酯来溶解有机磷[15]。磷酸酶可分为酸性磷酸酶和碱性磷酸酶,它们能够将难溶性有机磷降解为可溶性的小分子以供植物和土壤之需。此外,同一解磷菌株可以兼具解无机磷和解有机磷的功能[15]。

一些研究者借助分子生物技术和基因克隆等手段,从分子生物学角度研究解磷菌溶解难溶性磷的作用机理,目前主要是通过研究菌株产酸及其分泌水解酶的相关基因的手段了解其分子学机理。Hilda Rodríguez 等认为[17],克隆与矿物磷酸盐增溶有关的基因,例如那些影响有机酸合成的基因以及磷酸酶编码基因,将是这种基因操作程序的第一步;López-Bucio 等指出[18],细菌柠檬酸合成酶基因在烟草根系表达时增加了有机酸的分泌以及植物磷的有效性。Rossolini 等从洋葱伯克霍尔德菌中分离出了一个促进磷酸酶活性的基因[19],指出该基因编码一种外膜蛋白,在培养基中不含可溶性磷酸盐的情况下促进合成,并可能参与 P 向细胞的转运。Rodríguez 等认为,在自然根际细菌中引入或过量表达土壤磷溶(有机和无机)相关基因是提高微生物接种能力的一个非常有效的途径[20]。Jun Lü 等认为[21],在大肠杆菌中表达的草酸 P.oxalicumC2-mMDH 基因可增加有机酸分泌,从而增强磷素溶解。赵为容的试验表明[22],在低磷环境中磷缺陷指示基因表达明显增强,解磷菌株可下调相关基因减弱其表达,对植物有促生作用的

基因则可上调其表达。

4. 解磷菌在农业中的应用

在科学研究和生产实践的基础上,人们发现微生物肥料肥效期长,能产生各种活性物质,有助于培肥地力、为植物提供了生长所需的营养元素[23]。微生物的代谢活动能够增加土壤有机质含量、改良土壤性质、固定土壤中的重金属含量、减轻水体污染,使得土壤环境更加适用于植物的生长发育。因此,利用微生物肥料部分替代化肥日益得到重视。早在20世纪初,研究者们就从植物根际中发现了解磷菌,20世纪60年代后人们便逐渐开始将微生物肥料应用于农业生产[10]。很多微生物菌肥产品,如苹果专用生物有机菌肥、地之宝、菌状元、土壤多菌宝等的使用效果说明,解磷菌不仅有解磷功能,有的还能够固氮、释钾,产生植物激素、铁载体,分泌抗生素等多种功能。目前,在微生物肥料生产应用中,解磷微生物肥料仅次于固氮微生物肥料。

将解磷能力强的解磷菌经过发酵制成微生物肥料,施入土壤后可以促进植物根际对磷的吸收利用,增加植物对N、K、Ca、Fe、Mg、Zn等营养元素的吸收,抑制土壤病原菌的生长,保证植物生命活动正常进行[1][8]。在生产实践中,解磷菌可制成的颗粒微生物肥料与种肥混合作为种肥使用,与其他肥料混合使用作基肥,解磷菌肥还可用于对水稻秧苗进行蘸根处理,将固体解磷菌肥料加水稀释后拌种。与同等条件下没有使用解磷微生物肥料相比,使用解磷微生物肥料后玉米、花生、油菜、水稻、蔬菜的产量都有不同程度增加,且解磷微生物肥料的肥效比其他肥料持续时间要长[24]。

在柑橘园内,将微生物菌剂与有机肥混合施用替代部分化肥,相较于其它处理组优势明显,能够提高柑桔产量和品质[24][25]。有研究表明[26],解磷菌剂与生物炭配施能够提高土壤有机质、碱解氮、有效P、速效K的含量。对于生菜地土壤,解磷菌剂与化肥配合施用可以显著地改善根际土壤微生物结构和酶活性[27]。对于油菜田,将微生物功能菌剂与土壤调理剂配施,可显著改良土壤的理化性状、油菜的生物学性状以及增加产量[28]。

除以上应用外,解磷菌还应用于土壤修复和农业面源污染控制。为了提高作物产量,人们在农业生产中大量使用化肥,破坏了农业生态环境的稳态,造成土壤的酸化、盐碱化、板结、重金属超标以及水体的富营养化等。研究表明[1],解磷菌不仅能够降低重金属的毒性,而且还可以固定土壤中的重金属,使其形成稳定的化合物。Biswas等从蚯蚓肠道分离出一种解磷菌株,具有生物修复、抗金属腐蚀、促生和溶解磷酸盐的能力[29]。Yi-Fu等通过研究认为,微生物可以钝化Cd,这一研究结果为解决重金属超标土壤的修复问题提供了一种新途径[30]。

5. 解磷菌研究及其微生物菌肥研发展望

在科学研究和生产实践的基础上,人们发现微生物肥料肥效期长,能产生各种活性物质,能够减少化肥用量、提高作物抵御病虫害的能力,有助于培肥地力、增加作物产量和提质增效,可减少温室气体排放。更重要的是,所研究应用的微生物都是在土壤内部筛选出来的,然后应用于实践,几乎不会污染土壤环境,有利农业环保。因此,利用微生物肥料部分替代化肥将日益得到重视,研究和开发适当的解磷菌肥是农业生产的客观需要。

磷在土壤中易被土壤固定,转化效率较低,如何提高磷的有效性是农业生产中必须要解决的问题,而解磷微生物在这方面发挥着重要作用。解磷微生物肥料在我国已应用多年,但还不够普遍,原因是多方面的,主要是解磷微生物种类多,解磷机理复杂且不尽相同,研究工作还有待深入。目前,解磷类微生物施入土壤后的活动和消长动态及解磷作用发挥的条件尚不十分明确。加之菌剂质量不能保证,使得其从实验室转型到田间大规模生产应用上受到了很大限制。只要克服以上难题,解磷微生物肥料的发展

前景将十分广阔。

关于解磷菌相关研究,目前国内外还处于初级阶段,分离鉴定的解磷菌种类还不多,适用于大田生产的比较有限。根据解磷菌研究和生产实践状况,今后需要做好以下几方面工作:1)探究解磷菌株和土壤、植物、环境的生态关系,分离纯化解磷菌株,筛选高效菌株进行培育,提高菌株的解磷能力;2)从分子生物学的角度深究解磷菌株的解磷机理、相关基因及其表达调控机制,利用现代分子生物技术对解磷菌进一步进行改良,以筛选出更高效的解磷菌株;3)研究解磷菌株与其它微生物菌株的交互作用,研制高效复合菌剂,提高微生物菌肥的利用率;4)进一步研究微生物肥料与有机肥、无机肥适量配施对土壤和植物的影响,为植物生产和改良土壤提供技术;5)完善微生物肥料登记管理制度,基于科学研究和生产检验制订相关产品标准,科学指导农民和新型农业经营主体进行田间施肥。

基金项目

湿地生态与农业利用教育部工程研究中心开放基金(KFT201904);中化农业重点研发项目(072018017F)。

参考文献

- [1] 彭静静,高辉远.解磷菌的研究进展及展望[J].泰山学院学报,2016,38(6):95-99.
- [2] Ram, H., Malik, S.S., Dhaliwal, S.S., et al. (2015) Growth and Productivity of Wheat Affected by Phosphorus Solubilizing Fungi and Phosphorus Levels. *Plant Soil & Environment*, **61**, 122-126. <https://doi.org/10.17221/982/2014-PSE>
- [3] 张云霞,雷鹏,许宗奇,等.一株高效解磷菌 *Bacillus subtilis* JT-1 的筛选及其对土壤微生物生态和小麦生长的影响[J].江苏农业学报,2016,32(5):1073-1080.
- [4] 孟祥坤,于新,朱超,等.解磷微生物研究与应用进展[J].华北农学报,2018,33(S1):208-214.
- [5] 韩雪娇,曾庆伟,赵玉萍.杨树根际解无机磷细菌 Mp1-Ha4 的鉴定及其解磷机理[J].生物技术通报,2020,36(4):8-14.
- [6] 何玉龙,周青平.解磷微生物研究进展[J].青海畜牧兽医杂志,2012,42(2):36-38.
- [7] 秦利均,杨永柱,杨星勇.土壤溶磷微生物溶磷、解磷机制研究进展[J].生命科学研究,2019,23(1):59-64,86.
- [8] 冯月红,姚拓,龙瑞军.土壤解磷菌研究进展[J].草原与草坪,2003(1):3-7.
- [9] 张进良,张霁.解磷微生物在农业应用中的研究进展[J].商丘师范学院学报,2014,30(12):70-73.
- [10] 林英,司春灿,韩文华,等.解磷微生物研究进展[J].江西农业学报,2017,29(2):99-103.
- [11] Sarkar, A., Islam, T., Biswas, G.C., et al. (2012) Screening for Phosphate Solubilizing Bacteria Inhabiting the Rhizosphere of Rice Grown in Acidic Soil in Bangladesh. *Acta Microbiologica et Immunologica Hungarica*, **59**, 199-213. <https://doi.org/10.1556/AMicr.59.2012.2.5>
- [12] Singh, M. and Tejo Prakash, N. (2012) Characterisation of Phosphate Solubilising Bacteria in Sandy Loam Soil under Chickpea Cropping System. *Indian Journal of Microbiology*, **52**, 167-173. <https://doi.org/10.1007/s12088-011-0209-z>
- [13] 林燕青,吴承祯,洪伟,等.解磷菌的研究进展[J].武夷科学,2015,31(1):161-169.
- [14] Srivastwa, P. and Verma, K. (2015) Effect of Azospirillum and Phospho-Solubilizing Bacterial Isolates on Yield and Nutrient Uptake of Rice in Salt Affected Soil. *International Journal of Forestry & Crop Improvement*, **5**, 48-53. <https://doi.org/10.15740/HAS/IJFCI/5.2/48-53>
- [15] Maheshwari, D.K. (2011) *Bacteria in Agrobiolgy: Plant Nutrient Management*. Springer, Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-21061-7>
- [16] 盛荣,肖和艾,谭周进,等.土壤解磷微生物及其磷素有效性转化机理研究进展[J].土壤通报,2010,41(6):1505-1510.
- [17] Rodríguez, H. and Fraga, R. (1999) Phosphate Solubilizing Bacteria and Their Role in Plant Growth Promotion. *Biotechnology Advances*, **17**, 319-339. [https://doi.org/10.1016/S0734-9750\(99\)00014-2](https://doi.org/10.1016/S0734-9750(99)00014-2)
- [18] López-Bucio, J., Vega, O.M.D.L., Guevara-García, A., et al. (2000) Enhanced Phosphorus Uptake in Tobacco Transgenic Plants That Overproduce Citrate. *Nature Biotechnology*, **18**, 450-453. <https://doi.org/10.1038/74531>

- [19] Rodríguez, H., Rossolini, G.M., Gonzalez, T., *et al.* (2000) Isolation of a Gene from Burkholderiacepacia IS-16 Encoding a Protein That Facilitates Phosphatase Activity. *Current Microbiology*, **40**, 362-366. <https://doi.org/10.1007/s002840010071>
- [20] Rodríguez, H., Fraga, R., Gonzalez, T., *et al.* (2006) Genetics of Phosphate Solubilization and Its Potential Applications for Improving Plant Growth-Promoting Bacteria. *Plant and Soil*, **287**, 15-21. <https://doi.org/10.1007/s11104-006-9056-9>
- [21] Lü, J., Gao, X., Dong, Z., *et al.* (2012) Expression of Mitochondrial Malate Dehydrogenase in *Escherichia coli* Improves Phosphate Solubilization. *Annals of Microbiology*, **62**, 607-614. <https://doi.org/10.1007/s13213-011-0297-3>
- [22] 赵为容. 小麦亲和性根际解磷菌解磷机理及促生效果研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 安徽农业大学, 2018.
- [23] 马臻, 邓琳玲, 张言状. 微生物菌肥对秦巴山区核桃品质及土壤微生物的影响[J]. 现代园艺, 2019(24): 4-6.
- [24] <https://baike.baidu.com/item/解磷微生物肥料/839223?fr=aladdin>
- [25] 朱峰, 汪成军, 黄方俊, 等. 有机肥与微生物菌剂配施对柑桔化肥减量效果的影响[J]. 现代园艺, 2020, 43(1): 3-4.
- [26] 赵毅珺, 孟会生, 洪坚平. 生物炭与解磷菌剂配施对石灰性土壤生物化学性状及苜蓿产量的影响[J]. 山西农业科学, 2019, 47(11): 1955-1959.
- [27] 杜雷, 陈钢, 王素萍, 等. 解磷菌剂对生菜根际土壤微生物数量和酶活性的影响[J]. 湖北农业科学, 2019, 58(11): 70-74.
- [28] 李智强, 李慧文, 陆瑶, 等. 微生物菌剂及施地佳土壤调理剂防治油菜根肿病试验[J]. 农村科技, 2019(6): 35-37.
- [29] Biswas, J.K., Banerjee, A., Rai, M., *et al.* (2018) Potential Application of Selected Metal Resistant Phosphate Solubilizing Bacteria Isolated from the Gut of Earthworm (*Metaphire posthuma*) in Plant Growth Promotion. *Geoderma*, **330**, 117-124. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.05.034>
- [30] An, Y.F., Du, L. and Zhu, X.L. (2017) Optimizing Combined Application of SRB and PSB to Deactive Cd Pollution by Response Surface Methodology. *Chemical Engineering (China)*, **45**, 1-6.