

植物根际促生菌修复镉污染土壤研究进展

王一帆*, 孙 盈, 于 辉#

湖南科技大学生科院, 经济作物遗传改良与综合利用湖南省重点实验室, 重金属污染土壤生态修复与安全利用湖南省高校重点实验室, 湖南 湘潭

Email: #lgyh@163.com

收稿日期: 2021年3月25日; 录用日期: 2021年4月19日; 发布日期: 2021年4月26日

摘 要

随着工农业技术的快速发展, 土壤Cd等重金属污染问题日趋严重, 对重金属污染土壤的修复亦成为全球所关注的热点之一。植物修复因成本低以及无二次污染等优点, 成为治理重金属污染的主要手段之一。植物根际促生菌(Plant Growth Promoting Rhizobacteria, PGPR)是一类生长在植物根系影响土壤范围内的微生物, 在植物修复重金属污染土壤中发挥着重要的作用。本文简述了我国Cd土壤污染的现状及危害, 土壤污染修复方法及各自的优缺点, 重点阐述了PGPR影响植物修复重金属Cd污染土壤的机制, 并对其研究前景进行了展望。

关键词

植物根际促生菌, 修复, 镉

Research Progress on Remediation of Cadmium Contaminated Soil by Plant Rhizosphere Growth-Promoting Bacteria

Yifan Wang*, Ying Sun, Hui Yu#

College of Life Science, Key Laboratory of Economic Crops Genetic Improvement and Integrated Utilization, Key Laboratory of Ecological Remediation and Safe Utilization of Heavy Metal-Polluted Soils, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan

Email: #lgyh@163.com

Received: Mar. 25th, 2021; accepted: Apr. 19th, 2021; published: Apr. 26th, 2021

*第一作者。

#通讯作者。

Abstract

With the rapid development of industrial and agricultural technology, the pollution of Cd and other heavy metals in soil is becoming more and more serious. The remediation of heavy metal contaminated soil has become one of the research hotspots at home and abroad. Phytoremediation has become one of the main methods to control heavy metal pollution because of its low cost and no secondary pollution. Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR) is a kind of microorganism growing in soil affected by plant roots, which plays an important role in phytoremediation of heavy metal contaminated soil. In this paper, the status and harm of Cd soil pollution in China, soil pollution remediation methods and their advantages and disadvantages were summarized. The mechanism of PGPR affecting the phytoremediation of Cd contaminated soil was emphasized, and the research prospect of PGPR was also prospected.

Keywords

Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR), Remediation, Cadmium

Copyright © 2021 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

土壤是人类赖以生存的重要资源。当土壤中有害物质过多,超过土壤的自净能力,就会引起土壤的结构、组成和功能发生变化,抑制土壤中微生物的生长繁殖等活动,使土壤的营养成分流失,植物难以生长。更重要的是,土壤中的有害物质可能会随着“土壤-植物-人体”或者“土壤-水-人体”关系被人体吸收,危害人体健康,这就是土壤污染。而随着工业的发展,重金属污染成为土壤污染的一大主要部分[1],其中,以Cd污染最为突出,成为解决土壤污染的一大难题。

土壤污染植物修复技术是相对而言优势最高的一种方法。植物修复技术通过吸收、富集、分解土壤中的重金属污染物[2],达到减少土壤污染物的目的,是一种较为廉价、可持续性好、操作较为简便的方法。植物根际促生菌(Plant Growth Promoting Rhizobacteria, PGPR)是一类能促进植物生长、诱导植物产生系统抗性、提高植物产量的有益微生物[3][4]。PGPR通过控制植物激素与植物细胞形态,促使植物吸收转化土壤中的有害物质。本文分析了PGPR在土壤Cd污染修复中的作用,并探讨了其在治理Cd污染土壤这一研究领域未来的发展方向。

2. 我国土壤Cd污染概述

2.1. Cd污染现状

据统计,人类每年将释放近3万吨金属Cd进入环境中,几乎87%会进入土壤造成污染[5]。有资料显示我国20%的土地受到重金属污染,Cd污染面积最为广泛,污染地区覆盖11个省25个地区[6]。根据2014年生态环境部和自然资源部的调查显示,全国土壤污染超标率已超过16.1%。在无机型土壤污染中,Cd污染的点位超标率最高,为7.0%[7]。Cd污染主要分布于我国南方,如长江三角洲和珠江三角洲等地,北方主要分布于东北老工业基地等地区。

2.2. Cd 污染危害

Cd 在土壤中很难消除, 在土壤中积累到一定程度后, 会危害土壤 - 植物生态系统, 产生农产品质量及产量下降, 土壤质量变差等问题, 而且 Cd 会随着食物链最终进入人体[8], 在肝脏和肾脏组织积累, 从而导致人体健康受损。有报道, 受 Cd 污染影响, 湖南省市场中稻谷、大米中 Cd 含量超标率高达 36% [9]。由此可见, 通过技术手段修复 Cd 污染土壤, 减少 Cd 对农作物的危害, 保障食品安全已经迫在眉睫。

3. Cd 污染土壤修复方法及优缺点

Cd 污染土壤的治理方法主要分为三种, 分别是物理修复、化学修复和生物修复。

3.1. 物理修复法

物理修复是指利用一定的技术手段, 将土壤中的金属污染物分离去除, 这些技术有换土法、热脱附法、土壤蒸汽浸提修复法等, 优点是不会二次污染土壤, 但是任务量大, 耗费人力, 效率低。

3.2. 化学修复法

向土壤中加入化学物质, 再利用这些物质, 与土壤中的 Cd 发生氧化还原反应、螯合或者沉淀, 从而使 Cd 与土壤分离。方法有土壤淋洗法、氧化还原法等, 优点是修复效率高, 缺点是化学物质易造成二次污染, 且成本高。

3.3. 生物修复法

生物修复是指利用生物对有害物质的分解或者富集能力, 使土壤中的有害金属得到有效的清除, 该方法主要包括微生物修复、植物修复、动物修复和生物联合修复。生物修复的优点是成本低, 经济适用, 同时不会破坏土壤原有结构, 缺点是修复周期长, 同时修复效果不明显。

有研究发现, PGPR 在植物修复 Cd 污染土壤中发挥着重要作用。土壤中的重金属通过植物的富集作用与 PGPR 及分泌物的促生作用, 被转移、转化、容纳到植物体内, 使污染物减少或稳定, 降低有毒物质浓度, 从而达到修复污染土壤的目的[10]。

4. 植物根际促生菌

PGPR 是一种对植物生长及对矿质元素吸收有促进作用, 自由生活在土壤或附生于植物根系的微生物。同时, PGPR 还能抑制有害微生物, 并广泛存在于多种植物根围[11]。PGPR 菌株有许多种类, 现已鉴定出的主要种类包括芽孢杆菌属(*Bacillus*)和假单胞菌属(*Pseudomonas*); 其荧光假单胞菌(*Pseudomonas fluorescens*)在许多植物的根围都占据绝对优势, 可达 60%~93%; 另外, 还包括黄杆菌属(*Flavobacteria*)、固氮菌属(*Azotobacter*)、固氮螺菌属(*Azospirillum*)、肠杆菌属(*Enterobacter*)、欧文氏菌属(*Erwinia*)、哈夫尼菌属(*Hafnia*)、沙雷氏菌属(*Serratia*)、产碱菌属(*Alcaligenes*)、节杆菌属(*Arthrobacter*)、黄单胞菌属(*Xanthomonas*)、克雷伯氏菌属(*Klebsiella*)和慢生型根瘤菌属(*Bradyrhizobium*)等[12]。

大多数 PGPR 能分泌植物生长所需的营养成分, 与植物为互利合作的关系。PGPR 能分泌维生素, 生长激素吲哚-3-乙酸等, 促进植物地上部分生物量的积累和根的伸长, 这是从土壤筛选 PGPR 的必要方式[13]。另外, PGPR 还可以通过其他途径提供植物生长所需营养元素, 如合成铁载体、溶磷、生物固氮等[14]。除此之外, 一些对重金属有抗性的 PGPR 还可以通过释放螯合剂、生物表面活性剂、改变氧化还原电位等方式, 促进植物对重金属的提取, 改善土壤污染状况[15]。

5. PGPR 在植物修复 Cd 污染土壤中的作用机制

植物修复 Cd 污染土壤的主要原理是利用植物的富集作用将土壤中的 Cd 转移到植物体内,使土壤中的 Cd 污染物减少。PGPR 通过固氮、溶磷,产生 1-氨基-1-羧基环丙烷脱氨酶(ACCD)来控制植物体乙烯含量、植物生长素、铁载体等物质促进植物根系生长增加其生物量[16],提高植物对 Cd 等重金属的吸收量。有资料表明,PGPR 可分泌一些生物表面活性剂和有机酸等来活化土壤中 Cd 等重金属的生物有效性[17],同样也可以达到提高植物提取 Cd 等重金属的目的。PGPR 具有增强重金属抗性系统,以及降低土壤中 Cd 等金属离子迁移率和毒性的功能,因此间接的增强植物在 Cd 污染土壤中的金属抗性。

5.1. PGPR 促生作用提高 Cd 吸收量

在 Cd 等重金属污染土壤中,由于胁迫作用,植物体发生应激过程产生大量的乙烯。过量的乙烯抑制了植物根系生长,从而使植物吸收土壤中 Cd 等重金属能力下降。1-氨基环丙烷羧酸(ACC)作为植物合成乙烯的前体物质,能够被 PGPR 产生的 ACCD 水解,抑制乙烯的合成[18],减轻胁迫作用对植物生长的影响。Dell'Amico 等[19]从受重金属胁迫的禾本科牧草分离出能够产生 ACC 脱氨酶的 PGPR,将其接种到受 Cd 胁迫的欧洲菠菜上,研究结果表明,欧洲菠菜植物量大大提高且植物体内 Cd 总积累量也有显著提高。

植物生长素,如赤霉素(GA)、吲哚乙酸(IAA)和细胞分裂素(CTK)等,能够促进植物细胞进行分裂、种子萌发及根系生长。在 Cd 等重金属污染土壤中,大量的植物生长素可以促进植物根系的生长,扩大根系面积,提高 Cd 等重金属的吸收积累量。如潘凤山等[20]从植物根际筛选出的 4 株产 IAA 的 Cd 耐性菌株可以促进植物生长。Agami 等[21]以受 Cd 胁迫的小麦为材料,对其作外源 IAA 处理,发现小麦的抗氧化酶活性增强,而且 Cd 胁迫对小麦的不良影响也有所缓解。

PGPR 通过固氮作用、溶磷作用、解钾作用、供铁作用四个方面的作用将土壤中被固定的养分提供给植物,提高植株对营养元素的吸收,从而提高生物量促进重金属吸收。一些固氮菌将分布在空气中的氮转换为可以被植物利用的液态氮,溶磷,解钾作用也是如此,不易被植物利用的磷钾被转化为可以被直接吸收利用的磷钾元素[22]。有学者研究发现[23],从牧草根际分离出的四株 PGPR 菌株,具有较强的溶磷作用,能将有机磷和无机磷溶解,提供给植物吸收利用,具有显著的促生作用。PGPR 可以产生抗生素,其中含有多酮及一些化合物能够促进植物生长[24],同时,PGPR 通过产生抗生素、降低致病因子的毒性、抑制病原菌的生长等使植物抵御病原菌的攻击[25]。

5.2. PGPR 影响重金属生物有效性改变植物 Cd 吸收能力

PGPR 可以通过分泌多种物质活化土壤重金属,使重金属由不利于植物吸收的固定态转变为植物易于吸收的可吸收态,提高 Cd 等重金属在土壤中的生物有效性,从而使植物吸收积累重金属的能力得以加强[26] [27] [28]。

1) PGPR 通过分泌铁载体,与土壤中 Cd 等金属发生螯合形成稳定的复合物,提高土壤中重金属迁移能力,提高植物对 Cd 的吸收率,与此同时大大减少了一些对植物有害的细菌所必需的铁,降低了有害病菌的繁殖能力[29]。因此 PGPR 分泌的铁载体,在植物吸收摄取重金属污染物时,具有重要的作用。Sheng 等[30]的实验表明,土壤中 PGPR 分泌的铁载体提高溶解态 Cd 含量后,植物对 Cd 吸收大大提高,同时植物量也有增加。

2) 分泌生物表面活性剂。黄文[31]从重金属污染矿区分离出来的能够产生表面活性剂的 Cd 抗性菌株 LKS06,该菌株作用于龙葵,龙葵的 Cd 的富集能力大大加强,由此可见,接种具有能够产生表面活性剂的菌株 LKS06 能够提高龙葵对 Cd 的吸收能力,使土壤修复效率大大加强。一般情况下,表面活性剂达

到临界胶束浓度以上时,会在溶液中形成胶束,重金属与胶束结合,提高了土壤重金属溶解性和流动性。在植物修复的作用过程中,PGPR通过向土壤中分泌生物表面活性剂,进而与土壤中Cd以及其他一些不溶性重金属形成可以溶解的络合物,植物的修复效率由此得到大大提高。

此外,PGPR能够产生有机酸降低土壤pH值或分泌胞外磷酸酶等方式溶解土壤中难溶性的无机盐。当磷被释放的同时伴随着Cd等重金属的活化,有实验表明[32],接种巨大芽孢杆菌使植物根际土壤可交换态Cd含量显著增加,印度芥菜和苘麻茎干中Cd累积量提高了39%和68%。

5.3. PGPR影响重金属转运改变植物Cd转移能力

根部是植物吸收土壤中重金属的主要器官,因此在长期的Cd污染土壤修复过程中,大部分被吸收的Cd金属离子积累在根部,根部的金属无法快速到达植物上部,植物地上部分重金属含量低于地下根部[33]。由此发现存在着一个重金属向上部运输效率的限制,导致植物修复土壤的周期十分缓慢[34]。

有研究发现,重金属是以一种有机物复合形态存在于植物体内,并以此形态进行转移[35]。研究发现,PGPR会合成分泌一种特殊的有机多配体,这种配位体与植物体内的Cd等重金属发生结合作用,形成细胞区间分布的分布形态,这种改变提高了重金属在植物体内被转移到植物上部的能力[35]。Sheng等[36]从金属土壤中筛选分离出一个能够分泌表面活性剂的菌株*Bacillus*, J119.,此菌株具有Cd重金属抗性,将其接种到油菜、玉米、苏丹草等植物中后,发现植物转移Cd的能力得到了大大提高,经研究分析,植物地上部分的Cd浓度比对照组增加39%~70%。这虽然也很可能是菌株分泌的生物表面活性剂降低土壤的pH值,使Cd的可利用浓度得到提高而引起的。但是总体而言,PGPR接种到植株上,不仅改变了重金属在土壤中的有效性,也可以提高重金属从植物根部转移到地上部的能力,提高重金属在植物上部的植物器官的积累。

6. 展望

修复Cd污染土壤的方法有很多,利用植物PGPR进行修复,成本低,且对环境危害小,是目前最寄予期望的方法之一。尽管其优点有很多,但同时也还存在诸多问题,比如其面对的金属种类单一,修复时间长,生物产量低,植物修复技术还不成熟等,都还待解决。另外,在植物PGPR修复过程中是否会活化其他金属元素,造成二次污染也是应该考虑的问题。

现阶段,植物修复技术在我国仍处于发展阶段,要不断探索可持续发展的植物修复技术,实现Cd污染土壤修复过程中无二次污染、修复效果好、修复周期短等目的。同时,也可以考虑植物PGPR与其他环境修复技术相结合,为Cd污染土壤的修复提供更为理想的技术与理论支持。

基金项目

湖南省教育厅项目(18K063);湖南省重点实验室开放基金项目(E22007);湖南省大学生创新创业训练项目(S143528)。

参考文献

- [1] Xue, S.G., Chen, Y.X., Reeves, R.D., *et al.* (2004) Manganese Uptake and Accumulation by the Hyperaccumulator Plant *Phytolacca acinosa* Roxb. (Phytolaccaceae). *Environmental Pollution*, **131**, 393-399. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2004.03.011>
- [2] 徐金玉, 王伟伟, 王惠, 等. 铜污染土壤的生物修复研究进展[J]. 生物工程学报, 2020, 36(3): 471-480.
- [3] 黄晓东, 綦伶, Bernard G., 等. 滑铁卢大学植物促生菌技术的研究与开发[J]. 现代化农业, 2002(10): 19-21.
- [4] 李琬, 刘淼, 张必弦, 等. 植物根际促生菌的研究进展及应用现状[J]. 中国农学通报, 2014, 30(24): 1-5.

- [5] 方琳娜, 方正, 钟豫, 等. 土壤重金属镉污染状况及其防治措施[J]. 现代农业科技, 2016(7): 212-213.
- [6] 应兴华, 金连登, 徐霞, 朱智伟, 等. 我国稻米质量安全现状及发展对策研究[J]. 农产品质量与安全, 2010(6): 40-43.
- [7] 环境保护部, 国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[J]. 中国环保产业, 2014(5): 10-11.
- [8] 陈佳, 陈蓉. 我国土壤镉污染现状及防治技术研究[J]. 安徽农学通报, 2020, 26(24): 135-136.
- [9] 雷鸣, 曾敏, 王利红, 等. 湖南市场和污染区稻米中 As、Pb、Cd 污染及其健康风险评价[J]. 环境科学学报, 2010, 30(11): 2314-2320.
- [10] 孙楠, 张胜爽, 张凌云, 等. 植物与微生物协同修复土壤铅污染修复效应[J]. 有色金属(冶炼部分), 2021(3): 122-128.
- [11] 邓振山, 李军, 苏永杰. 植物根际促生菌作用机理的研究进展[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(10): 5844-5846.
- [12] Taghavi, S., Barac, T., Greenberg, B., *et al.* (2005) Horizontal Gene Transfer to Endogenous Endophytic Bacteria from Poplar Improves Phytoremediation of Toluene. *Applied and Environmental Microbiology*, **71**, 8500-8505. <https://doi.org/10.1128/AEM.71.12.8500-8505.2005>
- [13] Ma, Y., Prasad, M.N.V., Rajkumar, M., *et al.* (2011) Plant Growth Promoting Rhizobacteria and Endophytes Accelerate Phytoremediation of Metalliferous Soils. *Biotechnology Advances*, **29**, 248-258. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2010.12.001>
- [14] Ma, Y., Rajkumar, M., Vicente, J.A.F., *et al.* (2010) Inoculation of Ni-Resistant Plant Growth Promoting Bacterium *Psychrobacter* sp. Strain SRS8 for the Improvement of Nickel Phytoextraction by Energy Crops. *International Journal of Phytoremediation*, **13**, 126-139. <https://doi.org/10.1080/15226511003671403>
- [15] Carrillo, G., Munoz, J.J., Peralta, J.R., *et al.* (2002) Plant Growth-Promoting Bacteria Promote Copper and Iron Translocation from Root to Shoot in Alfalfa Seedlings. *Journal of Plant Nutrition*, **26**, 1801-1814. <https://doi.org/10.1081/PLN-120023284>
- [16] Kamnev, A.A. and Lelie, D.V.D. (2000) Chemical and Biological Parameters as Tools to Evaluate and Improve Heavy Metal Phytoremediation. *Bioscience Reports*, **20**, 239-258. <https://doi.org/10.1023/A:1026436806319>
- [17] 王海鸥, 徐海洋, 钟广蓉, 等. 根际微生物对植物修复重金属污染土壤作用的研究进展[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(30): 14832-14834, 14903.
- [18] 赵会会, 方志刚, 马睿, 等. 耐镉根际促生菌的筛选及其对一年生黑麦草镉吸收积累的影响[J]. 草地学报, 2017, 25(3): 554-560.
- [19] Dell'Amico, E., Cavalca, L. and Andreoni, V. (2007) Improvement of Brassicanapus Growth under Cadmium Stress by Cadmium-Resistant Rhizobacteria. *Soil Biology and Biochemistry*, **40**, 74-84. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2007.06.024>
- [20] 潘风山, 陈宝, 马晓晓, 等. 一株镉超积累植物东南景天特异内生细菌的筛选及鉴定[J]. 环境科学学报, 2014, 34(2): 449-456.
- [21] Agami, R.A. and Mohamed, G.F. (2013) Exogenous Treatment with Indole-3-Acetic Acid and Salicylic Acid Alleviates Cadmium Toxicity in Wheat Seedlings. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **94**, 164-171. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2013.04.013>
- [22] 张利亚, 李嫚. PGPR 作用机制及其在农业上的应用研究进展[J]. 现代农业科技, 2019(24): 142-146.
- [23] 吴红全. 云新早实丰产桃园土壤管理技术[C]//云南省科学技术协会. 第五届云南省科协学术年会暨乌蒙山片区发展论坛论文集. 昭通: 云南省机械工程学会, 2015: 1-4.
- [24] Mazhar, R. (2016) Plant Growth Promoting Rhizobacteria: Biocontrol Potential for Pathogens. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, **5**, 1288-1295. <https://doi.org/10.19045/bspab.2016.50154>
- [25] Fernando, W.G.D., Nakkeeran, S. and Zhang, Y. (2005) Biosynthesis of Antibiotics by PGPR and Its Relation in Biocontrol of Plant Diseases. In: Siddiqui, Z.K., Ed., *PGPR: Biocontrol and Biofertilization*, Springer, Berlin, 67-109. https://doi.org/10.1007/1-4020-4152-7_3
- [26] Zaida, A., Khan, M.S. and Amil, M.D. (2003) Interactive Effect of Rhizo Trophic Microorganisms on Yield and Nutrient Uptake of Chickpea (*Cicer arietinum* L.). *European Journal of Agronomy*, **19**, 15-21. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00015-1](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00015-1)
- [27] Rajkumar, M., Ma, Y. and Freitas, H. (2008) Characterization of Metal-Resistant Plant-Growth Promoting *Bacillus* *Weihenstephanensis* Isolated from Serpentine Soil in Portugal. *Journal of Basic Microbiology*, **48**, 1-9. <https://doi.org/10.1002/jobm.200800073>
- [28] Wu, S.C., Cheung, K.C., Luo, Y.M., *et al.* (2006) Effects of Inoculation of Plant Growth-Promoting Rhizobacteria on Metal Uptake by *Brassica juncea*. *Environmental Pollution*, **140**, 124-135.

- <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2005.06.023>
- [29] Miethke, M. and Marahiel, M.A. (2007) Siderophore-Based Iron Acquisition and Pathogen Control. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, **71**, 413-415. <https://doi.org/10.1128/MMBR.00012-07>
- [30] Sheng, X.F., Xia, J.J., Jiang, C.Y., *et al.* (2008) Characterization of Heavy Metal Resistant Endophytic Bacteria from Rape (*Brassica napus*) Roots and Their Potential in Promoting the Growth and Lead Accumulation of Rape. *Environmental Pollution*, **156**, 1164-1170. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2008.04.007>
- [31] 黄文. 产表面活性剂根际菌协同龙葵修复镉污染土壤[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(10): 48-52.
- [32] Wu, H., Chen, C., Du, J., *et al.* (2012) Co-Overexpression FIT with AtbHLH38 or AtbHLH39 in Arabidopsis Enhanced Cadmium Tolerance via Increased Cadmium Sequestration in Roots and Improved Iron Homeostasis of Shoots. *Plant Physiology*, **158**, 790-800. <https://doi.org/10.1104/pp.111.190983>
- [33] Burd, G.I., Dixon, D.G. and Glick, B.R. (2000) Plant Growth-Promoting Bacteria That Decrease Heavy Metal Toxicity in Plants. *Canadian Journal of Microbiology*, **46**, 237-245. <https://doi.org/10.1139/w99-143>
- [34] 马莹, 骆永明, 滕应, 等. 内生菌强化重金属污染土壤植物修复研究进展[J]. 土壤学报, 2013, 50(1): 195-202.
- [35] Maser, P., Thomine, S., Schroeder, J.I., *et al.* (2001) Phylogenetic Relationships within Cation Transporter Families of Arabidopsis. *Plant Physiology*, **126**, 1646-1667. <https://doi.org/10.1104/pp.126.4.1646>
- [36] Sheng, X.F., He, L.Y., Wang, Q.Y., *et al.* (2008) Effects of Inoculation of Biosurfactant-Producing *Bacillus* sp. J119 on Plant Growth and Cadmium Uptake in a Cadmium-Amended Soil. *Journal of Hazardous Materials*, **155**, 17-22. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.10.107>