

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

2000~2018年我国大气重金属沉降通量时空变化特征

陈其永, 郜允兵, 倪润祥, 潘瑜春, 阎跃观, 杨晶, 刘孝阳, 顾晓鹤



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年9月

第43卷 第9期

Vol.43 No.9

目次

2000~2018年我国大气重金属沉降通量时空变化特征 ..... 陈其永, 郇允兵, 倪润祥, 潘瑜春, 阎跃观, 杨晶, 刘孝阳, 顾晓鹤(4413)

面向二/三维城市形态指标的PM<sub>2.5</sub>浓度调控模拟 ..... 李莎, 邹滨, 刘宁, 冯徽徽, 陈军, 张鸿辉(4425)

减排背景下成都大气PM<sub>2.5</sub>碳质组分特征 ..... 陈璐瑶, 于阳春, 黄小娟, 董贵明, 张军科(4438)

青岛秋冬季PM<sub>1</sub>中金属元素污染特征及健康风险评估 ..... 刘子杨, 张宜升, 张厚勇, 马子轸, 陶文鑫, 王娇, 薛莲, 彭倩倩, 杜金花, 赵娇娇, 彭亮, 孙英杰(4448)

港口地区大气PM<sub>2.5</sub>中多环芳烃污染特征及来源分析 ..... 王鹏程, 杨凌霄, 别淑君, 黄琦, 齐安安, 虞雄, 王滢铭, 徐鹏, 张天琪, 王文兴(4458)

天津市冬季道路颗粒物粒径分布及来源解析 ..... 张国涛, 殷宝辉, 白雯宇, 郭丽瑶, 王智宇, 张楠, 郑镇森, 张利文, 杨文, 韩斌, 白志鹏(4467)

北京市生物源一次气溶胶浓度变化特征及影响因素 ..... 梁林林, 刘畅, 刘旭艳, 徐婉筠, 张根, 程红兵, 刘雨思(4475)

北京市城区夏季VOCs变化特征分析与来源解析 ..... 孟祥来, 孙扬, 廖婷婷, 张琛, 张成影(4484)

东莞工业集中区夏季臭氧污染与非污染期间VOCs组分特征及其来源 ..... 周振, 肖林海, 费蕾蕾, 余纬, 林满, 黄筠钧, 张智胜, 陶俊(4497)

生活垃圾填埋场恶臭污染的时空变化与膜阻隔效果 ..... 何晶晶, 李健晨, 吕凡, 章骅, 邵立明(4506)

不同年份太湖水域全氟化合物健康风险源解析对比 ..... 武婷, 孙善伟, 樊境朴, 鲁富蕾, 郭昌胜, 徐建(4513)

沱江流域典型及新兴全氟/多氟化合物的污染特征及来源解析 ..... 宋娇娇, 汪艺梅, 孙静, 方淑红(4522)

白洋淀不同类型水体表层沉积物重金属的赋存形态及风险 ..... 许梦雅, 张超, 单保庆, 刘操(4532)

喹诺酮类抗生素在城市典型水环境中的分配系数及其主要环境影响因子 ..... 剧泽佳, 付雨, 赵鑫宇, 陈慧, 宋圆梦, 赵波, 张纪媛, 卢梦洪, 崔建升, 张璐璐(4543)

石家庄地下水中喹诺酮类抗生素生态风险及其与环境因子的相关性 ..... 陈慧, 剧泽佳, 赵鑫宇, 付雨, 崔建升, 张璐璐(4556)

不同淹水环境下湖泊沉积物DOM的特征与来源 ..... 陈佳, 李忠武, 金昌盛, 文佳骏, 聂小东, 王磊(4566)

晋城市沁河流域秋季浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系 ..... 高梦蝶, 李艳粉, 李艳利, 孙昂, 田爽, 张春晖, 耿亚平, 李林霞(4576)

不同配置绿色屋顶径流水质特征及综合评价 ..... 章孙逊, 张守红, 闫婧, 王任重远, 杨航(4587)

紫外活化过硫酸盐降解磷酸氯喹 ..... 李阳, 许玻琀, 邓琳, 罗伟(4597)

微气泡臭氧氧化预处理实际制药废水去除SS和有机性能 ..... 刘春, 陈蕊, 张静, 杨旭, 陈晓轩, 郭延凯, 武明泽, 庞勃(4608)

废水排放对近海环境中抗生素抗性基因和微生物群落的影响 ..... 陈嘉瑜, 苏志国, 姚鹏城, 黄备, 张永明, 温东辉(4616)

生物炭和秸秆还田对微咸水滴灌棉田土壤真菌群落结构多样性的影响 ..... 郭晓雯, 陈静, 鲁晓宇, 李远, 陶一凡, 闵伟(4625)

有机物料投入对喀斯特地区土壤磷素赋存形态与含 $phoD$ 基因细菌群落的影响 ..... 夏鑫, 乔航, 孙琪, 刘坤平, 陈香碧, 何寻阳, 胡亚军, 苏以荣(4636)

煤矿矿区复垦植被类型对土壤微生物功能基因和酶活的影响 ..... 宁岳伟, 刘勇, 张红, 李君剑(4647)

生物炭施用对黄壤土壤养分及酶活性的影响 ..... 袁访, 李开钰, 杨慧, 邓承佳, 梁红, 宋理洪(4655)

黄河源区斑块化退化高寒草甸土壤细菌群落多样性变化 ..... 孙华方, 李希来, 金立群, 赵玉蓉, 李成一, 张静, 宋梓涵, 苏晓雪, 刘凯(4662)

模拟氮沉降对三江平原小叶章湿地土壤微生物碳源利用能力的影响 ..... 翁晓虹, 隋心, 李梦莎, 刘赢男, 张荣涛, 杨立宾(4674)

石家庄市土壤中喹诺酮类抗生素空间分布特征及其与微生物群落相关性 ..... 赵鑫宇, 剧泽佳, 陈慧, 付雨, 宋圆梦, 赵波, 张纪媛, 卢梦洪, 崔建升, 张璐璐(4684)

典型氧化还原环境中微塑料表面的微生物群落组成特征与构建机制 ..... 龚志伟, 马杰, 苏趋, 林亚楠, 董鑫磊, 周立昌, 王宗平, 郭刚(4697)

作物秸秆材料处理养殖废水中氮的周年去除效果及其对氮循环微生物丰度的影响 ..... 刘铭羽, 夏梦华, 蒋磊, 彭健, 陈坤, 赵聪芳, 李希, 孟岑, 曾睿, 王栋, 李裕元, 吴金水(4706)

不同外碳源对尾水极限脱氮性能及微生物群落结构的影响 ..... 王伟, 赵中原, 张鑫, 由志鹏, 黄子晋, 彭永臻(4717)

总氮提标改造工程的微生物群落结构分析 ..... 李海松, 王柯丹, 陈晓蕾, 阎登科, 许子聪, 胡培杰(4727)

IFAS工艺处理南方低碳源污水的泥膜微生物互作规律分析 ..... 赫俊国, 江伟勋, 何卓义, 刘新平, 吴世华, 储昭瑞, 冯杰(4736)

黄土高原土地利用方式对微塑料丰度和形态分布的影响 ..... 郝永丽, 胡亚鲜, 白晓雄, 郭胜利(4748)

南方丘陵区土壤重金属含量、来源及潜在生态风险评价 ..... 王玉, 辛存林, 于爽, 薛红蕾, 曾鹏, 孙平安, 刘凡(4756)

兰州市耕地“五毒”重金属的风险评价与归因分析 ..... 张利瑞, 彭鑫波, 马延龙, 康乐, 张妍娥, 王泉灵, 张松林(4767)

石家庄市栾城区农田土壤重金属分布特征及作物风险评价 ..... 孟晓飞, 郭俊梅, 杨俊兴, 郑国砥, 陈同斌, 刘杰(4779)

典型城市土壤中重金属锑(Sb)的含量分布特征及风险评价 ..... 沈城, 叶文娟, 钱诗颖, 吴健, 朱旭东, 王敏(4791)

有色金属矿业城市典型村镇土壤重金属污染评价及来源解析 ..... 汪峰, 黄言欢, 李如忠, 吴鸿飞(4800)

柠檬酸及刈割强化象草修复镉污染土壤的效应 ..... 唐棋, 伍港繁, 辜娇峰, 周航, 曾鹏, 廖柏寒(4810)

稻田落干过程甲基化效率变化与关键影响因素分析 ..... 张玥, 李令仪, 文炯, 曾希柏, 苏世鸣(4820)

外源茉莉酸对水稻幼苗根系伸积及抗逆应答效应 ..... 李颜, 黄益宗, 保琼莉, 黄永春, 张盛楠(4831)

秸秆还田配施化肥对土壤养分及冬小麦产量的影响 ..... 宋佳杰, 徐郗阳, 白金泽, 于琦, 程伯豪, 冯永忠, 任广鑫(4839)

冬季绿肥对黄土高原旱作春玉米农田土壤温室气体排放的影响 ..... 张少宏, 王俊, 方震文, 付鑫(4848)

庞泉沟自然保护区土壤呼吸空间分异性影响因素探测 ..... 李晓敏, 严俊霞, 杜自强, 王琰(4858)

小型养殖塘水体中CH<sub>4</sub>、CO<sub>2</sub>和N<sub>2</sub>O浓度的时空变化特征及影响因素 ..... 石婕, 张弥, 邱吉丽, 万梓文, 赵若男, 谢燕红, 陈明健, 赵佳玉, 肖薇, 刘寿东(4867)

丁基黄药对选矿区土壤吸附铅镉的影响 ..... 胡志浩, 郭朝晖, 冉洪珍, 肖细元, 彭驰, 李钰滢(4878)

秸秆生物炭吸附对乙酰氨基酚的机制及其位能分布特征 ..... 商岑尧, 顾若婷, 张强, 谢慧芳, 王冰玉(4888)

黄土高原地区生态脆弱性时空变化及其驱动因子分析 ..... 张良侠, 樊江文, 张海燕, 周德成(4902)

植物促生菌在重金属生物修复中的作用机制及应用 ..... 马莹, 王玥, 石孝均, 陈新平, 李振轮(4911)

《环境科学》征订启事(4512) 《环境科学》征稿简则(4735) 信息(4696, 4790, 4887)

# 植物促生菌在重金属生物修复中的作用机制及应用

马莹, 王玥, 石孝均, 陈新平, 李振轮

(西南大学资源环境学院, 重庆 400716)

**摘要:** 重金属污染是导致生态和环境退化的主要因素之一。土壤重金属污染会降低土壤质量、农作物产量和品质,甚至威胁人类健康。因此,优化土壤重金属污染治理措施,对于农业高产优质可持续具有重要意义。诸多国内外学者在重金属污染植物修复方面开展了大量研究,但由于受土壤和气候环境条件的影响,其修复效率受到制约。微生物与植物的协同修复被认为是环境胁迫条件下提高重金属污染修复效率的一种有效手段。耐重金属的植物促生细菌(PGPB)不仅可以促进植物生长,提高对生物胁迫(如病原菌)和非生物胁迫(如干旱、高盐、极端温度和重金属等)的抗性,还可以改变土壤中重金属的生物利用度和毒性,从而提高植物对重金属的修复效率。系统地梳理了耐重金属的PGPB在促进植物生长,增强植物抗逆性和影响重金属生物利用度方面的作用机制,并进一步综述了近年来国内外关于PGPB在生态修复中的应用和研究进展。

**关键词:** 植物促生菌(PGPB); 重金属生物利用度; 促生机制; 生物修复; 非生物胁迫

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)09-4911-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.202112007

## Mechanism and Application of Plant Growth-Promoting Bacteria in Heavy Metal Bioremediation

MA Ying, WANG Yue, SHI Xiao-jun, CHEN Xin-ping, LI Zhen-lun

(College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China)

**Abstract:** Heavy metal contamination is one of the main factors causing ecological and environmental degradation. Soil contamination by heavy metals decreases soil quality, reduces agricultural productivity and quality, and even threatens human health. Therefore, optimizing remediation strategies for soils polluted with heavy metals is of great significance for high-yield, good-quality, and sustainable agriculture. Numerous domestic and foreign scholars have carried out a large number of studies on the phytoremediation of heavy metal contaminated soils. However, the remediation efficiency may be restricted by soil and climatic/environmental conditions. The synergistic remediation of microorganisms and plants is considered an effective means to improve metal remediation efficiency under environmental stresses. Metal-resistant plant growth-promoting bacteria (PGPB) not only promote plant growth and its resistance to biotic (e.g., phytopathogens, etc.) and abiotic (e.g., drought, salinity, extreme temperatures, heavy metals, etc.) stresses but also alter metal bioavailability in soils and metal toxicity in plants, thereby improving phytoremediation efficiency. In this paper, the mechanisms involved in promoting plant growth and its stress tolerance, and affecting metal bioavailability by metal-resistant PGPB, were systematically summarized. Furthermore, research progress on the application of PGPB in ecological restoration in recent years was extensively reviewed.

**Key words:** plant growth-promoting bacteria (PGPB); heavy metal bioavailability; growth promoting mechanism; bioremediation; abiotic stress

随着工业化和城市化的迅速发展以及自然生态系统的干扰,大量重金属进入环境中,造成了土壤质量恶化,严重威胁着农业生产和人类健康<sup>[1]</sup>。重金属主要来源于采矿、冶炼、化肥、农药、燃煤、医疗废物、含铅汽油的燃烧和电池<sup>[2]</sup>。其中,大部分重金属都是对人体危害严重的有毒物质,如汞(hydrargyrum, Hg)、铅(lead, Pb)、镉(cadmium, Cd)、铜(copper, Cu)、铬(chromium, Cr)、锰(manganese, Mn)、锌(zinc, Zn)和铝(aluminum, Al)等,它们不能被生物降解却具有生物累积性,可通过作物吸收进入食物链,危害人类健康<sup>[3]</sup>。传统的物化修复方法虽然修复效率较高、速度较快,但容易破坏土壤结构,易造成二次污染<sup>[2]</sup>。植物修复因其经济和环保等特点,成为治理重金属污染土壤的重要技术。众所周知,修复植物的生物量和土壤中重金属的生物利用度是影响植物修复效率的关键因素。然而,全球气候变化导致的高温、干旱和盐渍化等非生物胁迫因素的严重程度和频率不断增加,限制

了植物生长和其生物量积累。此外,气候胁迫因素会直接或间接地影响土壤中重金属生物利用度,从而降低植物修复效率<sup>[4]</sup>。有研究发现,植物和有益微生物特别是植物促生菌(plant growth-promoting bacteria, PGPB)的相互作用不仅可以提高宿主植物对各种胁迫环境的抗逆性,还会影响彼此对重金属的耐受性,及其对土壤中重金属的活化/稳定、迁移和转化等过程<sup>[5]</sup>。因此,微生物和植物的协同作用被认为是在盐渍、干旱和极端温度等各种环境胁迫条件下促进重金属污染生物修复效率的一种有效手段。迄今为止,人们仍对气候变化背景下植物-PGPB协同修复重金属污染土壤的关键过程和机制尚未完全清楚。因此,探索干旱、盐度和高温诱导条件下重

收稿日期: 2021-12-01; 修订日期: 2022-01-17

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项(SWU 020010); 重庆市自然科学基金项目(cstc2021jcyj-msxmX0827); 重庆市留学人员回国创业创新支持计划(创新类重点)项目(cx2021001)

作者简介: 马莹(1979~),女,博士,教授,主要研究方向为生物修复重金属污染土壤, E-mail: cathyaying@hotmail.com

金属污染土壤中 PGPB 促进植物生长和缓解胁迫的关联机制是非常有必要的。

本文主要归纳了近几年在非生物胁迫下促生菌协同植物修复重金属污染土壤的应用研究,分析促生菌-植物协同修复重金属污染土壤的作用机制和应用前景,并且对今后的研究方向进行了展望,以期以后 PGPB 修复重金属污染土壤的研究和应用提供有力的科学依据。

## 1 植物促生菌

植物促生菌是指能够直接或间接促进植物生长、提高作物产量和防治病虫害的有益微生物。它们包括可以自由生长的根际促生细菌 (plant growth-promoting rhizobacteria, PGPR)、能够和植物形成特定共生关系的细菌 (如根瘤菌属和弗兰克氏菌属)、可以定殖于植物组织的内生菌 (plant growth-promoting endophytic bacteria, PGPE) 和部分蓝细菌<sup>[6]</sup>。常见的 PGPB 来自芽孢杆菌属 (*Bacillus*)、假单胞菌属 (*Pseudomonas*)、伯克霍尔德氏菌属 (*Burkholderia*)、克雷伯氏菌 (*Klebsiella*)、沙雷氏菌 (*Serratia*)、欧文氏菌属 (*Erwinia*)、黄杆菌属 (*Flavobacterium*)、不动杆菌属 (*Acinetobacter*) 和肠杆菌属 (*Enterobacter*)<sup>[2]</sup>。起初,PGPB 广泛地用于提高农作物产量和品质<sup>[7]</sup>,近年来 PGPB 的应用还扩展至环境治理领域。在植物-微生物协同修复系统中,PGPB 能够通过促进植物生长,降低重金属对植物的毒性,改变土壤中重金属的生物利用度,影响植物体内的重金属的吸收、积累和易位等作用机制来

帮助寄主植物适应不利的土壤和气候条件,进而提高植物修复效率<sup>[8]</sup>。有研究发现,一些 PGPB,如肠杆菌、克雷伯氏菌、沙雷氏菌和窄养单胞菌等,能够通过成膜作用和分泌多糖、胞外多聚物、铁载体 (siderophores) 和酶等途径,赋予植物对重金属和其他环境因素 (如高盐、干旱和极端温度等) 的双重胁迫抗性<sup>[9,10]</sup>。例如,PGPR 蜡状芽孢杆菌 (*Bacillus cereus*) 具有耐铬和高温胁迫的潜力。在大气温度升高条件下,它能够通过产生植物有益代谢物 (如吡啶-3-乙酸和铁载体) 改善 Cr 污染土壤中的高粱 (*Sorghum bicolor*) 生长和其修复效率<sup>[11]</sup>。较之根际促生菌,内生菌因生存环境稳定且和宿主植物联系更加紧密,以换取营养素的持续供应,在实际应用中具有更大价值<sup>[12]</sup>。Kumar 等<sup>[13]</sup>研究了绿脓杆菌 (*Pseudomonas lurida*) 对 Cu 的吸收富集作用和对干旱的耐性机制。结果表明,在不同的  $\rho(\text{Cu})$  ( $0 \sim 100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 和 pH 值 ( $5.0 \sim 8.0$ ) 下,接种绿脓杆菌菌株可显著提高向日葵 (*Helianthus annuus*) 的根长和茎长,增加植物生物量的同时 Cu 吸收量也增加了 2.6 倍,远高于以往报道的 Cu 积累植株。

## 2 非生物胁迫下植物促生菌修复重金属污染土壤的机制

在非生物胁迫条件下,植物促生菌可以通过多种作用机制促进植物的生长 (包括提高养分吸收、增强植物抗逆性和抵御植物病原体),并影响重金属的抗性、活化/稳定、吸收、转运和积累。图 1 描述了植物促生菌协同植物修复重金属污染土壤的作

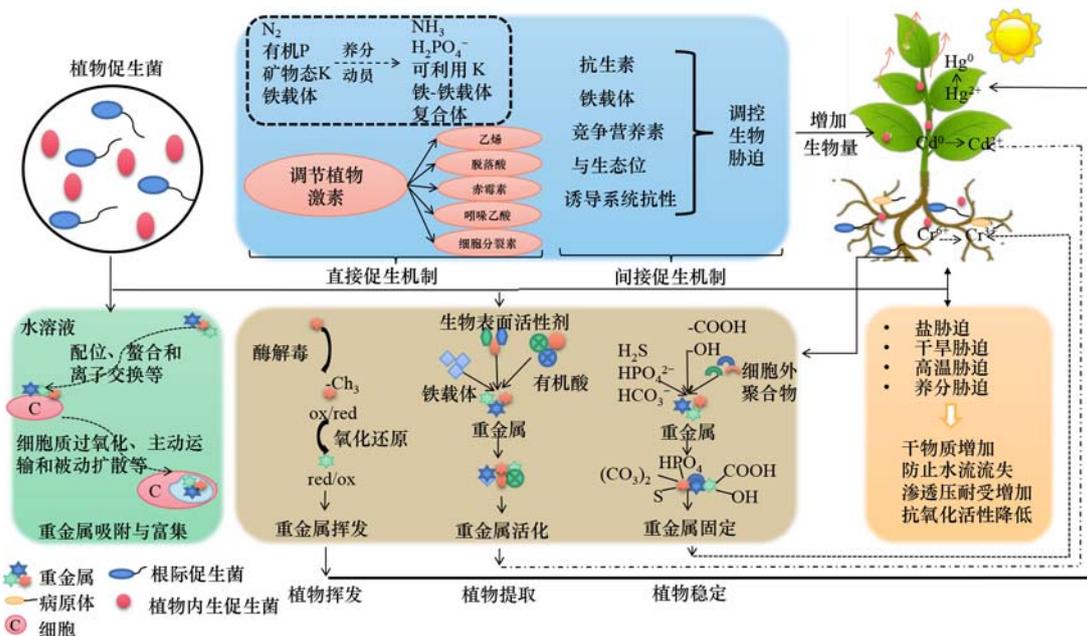


图 1 植物促生菌协同植物修复重金属污染土壤的作用机制

Fig. 1 Mechanism of plant growth-promoting bacteria in synergistic phytoremediation of heavy metal contaminated soil

用机制.

## 2.1 植物促生菌的促生机制

PGPB 在促进植物的生长、发育和提高其对环境的适应性方面发挥着重要的作用,可通过直接或间接机制,相应地提高修复植物的生物量.

### 2.1.1 直接促生机制

直接促生机制是指 PGPB 通过合成某些能够影响植物生长发育的物质(如植物激素)或增加土壤中营养元素的生物利用度(如 N、P 和 K)来改善植物营养和增强其对胁迫环境的抗逆能力.

植物激素(phytohormone)是植物细胞接收特定环境信号诱导产生的痕量活性有机物,在较低的浓度下就能调控植物生长、代谢和环境应答功能.通常,植物激素主要包括生长素、赤霉素、细胞分裂素、乙烯和脱落酸.作为植物最重要的生长素,吲哚乙酸(indoleacetic acid, IAA)能够促进植物细胞的分裂、伸长和分化,利于营养器官和生殖器官的伸长、成熟和衰老,诱导组织培养中愈伤组织和根的形成<sup>[14]</sup>.有研究表明,不同的细菌、真菌和藻类均能够产生生理活性量的 IAA<sup>[15]</sup>,随后通过植物主动调节内源激素的水平来缓解重金属胁迫.细菌合成的 IAA 能够通过使植物细胞壁松弛来增加根分泌物的数量,以此增加更多的营养用来支持根际微生物的生存<sup>[16]</sup>.80%的 PGPR 都具有通过不同的途径将色氨酸合成 IAA 的能力.此外,产 IAA 的 PGPR 还可以增加植物对养分和水分的获取,并通过改变植物根系构型(roots system architecture, RSA),如增加根尖数量和根表面积来减轻植物对盐分和干旱的胁迫效应<sup>[17]</sup>.范美玉等<sup>[18]</sup>在大田试验中研究了阿氏芽孢杆菌(*Bacillus aryabhattai*)缓解水稻 Cd 胁迫.结果表明阿氏芽孢杆菌能够定殖于水稻根系,且通过产生 IAA 和铁载体等来促进根的生长,并降低水稻茎叶中丙二醛含量和抗氧化酶(超氧化物歧化酶、过氧化物酶和过氧化氢酶)活性,使水稻籽粒 Cd 含量下降了 13.5% 和 11.2%.从枣椰树根际分离的荧光假单胞菌(*Pseudomonas fluorescens*)可通过产生 IAA 来促进根细胞分裂、扩大和根伸长的启动,从而改善暴露于盐和 Al 胁迫下玉米的根生长并促进根形成<sup>[19]</sup>.

细胞分裂素(cytokinins, CTK)是继生长素 IAA 后的主要植物激素,在细胞生长和分化、芽萌发、提高对高温或低温的抗性和调节根系分生组织的活性等方面起着重要的作用<sup>[20]</sup>.有研究发现,CTK 能够增加向日葵的蒸腾作用,并且促进重金属 Zn 和 Pb 的吸收和转移.此外,CTK 还可以激发植物的解毒机制,通过增加谷胱甘肽的水平来改变金属硫蛋

白的表达,最终提高植物对重金属的抗逆性<sup>[21]</sup>.据报道,许多 PGPB,如节杆菌(*Arthrobacter*)、固氮螺菌(*Azospirillum*)、慢生菌(*Bradyrhizobium*)、芽孢杆菌(*Bacillus*)、假单胞菌和类芽孢杆菌(*Paenibacillus*)等<sup>[22]</sup>,能够通过合成 CTK 来调节植物生长和重金属的吸收.

赤霉素(gibberellins acid, GA)是一类非常重要的植物激素,通过参与种子发芽、幼苗出苗和茎叶生长等植物生理过程,来促进茎和侧芽的生长,并延缓衰老<sup>[23]</sup>.已知许多 PGPB 包括木糖氧化无色杆菌(*Achromobacter xylosoxidans*)、血清草螺旋菌(*Herbaspirillum seropedicae*)和葡萄糖酸杆菌(*Gluconobacter diazotrophicus*)等均能产生 GA<sup>[22]</sup>.其中,短小芽孢杆菌(*Bacillus pumilus*)和地衣芽孢杆菌(*Bacillus licheniformis*)会合成 4 种类型的 GA,当接种这些产 GA 的菌株时,能有效逆转多效唑诱导的幼苗矮化<sup>[24]</sup>.极少数能够产生 GA 的 PGPB 还可以用来增强重金属的生物利用度和积累,从而提高植物对重金属污染土壤的修复效率<sup>[16]</sup>.此外,GA 还可以通过增加受胁迫植物的水分供应来减轻盐胁迫对作物的一些有害影响<sup>[25]</sup>.

乙烯(ethylene)也是重要的内源性植物激素,它不仅可以调节植物生长发育和生理过程(如根部萌芽、植物开花、果实成熟、叶片衰老、细胞伸长和根表皮细胞程序性死亡),还可调节生物和非生物胁迫的反应<sup>[12]</sup>.生物和非生物胁迫通常导致植物中应激乙烯产量的增加,从而抑制根的伸长、侧根的发育和根毛的形成.在此过程中,1-氨基环丙烷-1-羧酸(ACC)脱氨酶起着关键的作用,它能将 ACC 转化为  $\alpha$ -酮丁酸和  $\text{NH}_3$ (用作植物的碳和氮源),降低植物在逆境条件下产生胁迫乙烯的水平<sup>[16]</sup>.Borges 等<sup>[26]</sup>的研究从废弃锌铅矿中生长的植物中分离出具有 ACC 脱氨酶活性的假单胞菌,可通过降低植物中乙烯的水平来促进羊茅(*Festuca rubra*)的生长,并且提高其对 Cd 和 Zn 的耐受性.巨大芽孢杆菌(*Bacillus megaterium*)CAM12 和成团泛菌(*Pantoea agglomerans*)CAH6 即使在干旱和铝的双重胁迫下也能合成 ACC 脱氨酶,从而减轻乙烯对豇豆(*Vigna radiata*)生长的抑制作用<sup>[27]</sup>.

脱落酸(abscisic acid, ABA)是涉及种子发芽、休眠和气孔的关闭等影响植物生长发育过程的主要植物激素之一<sup>[28]</sup>.在应对各种环境胁迫(如重金属、干旱、高温或低温、高盐和辐射)中同样起着至关重要的作用<sup>[29]</sup>.新鞘氨醇杆菌(*Novosphingobium* sp.)、奇异变形杆菌(*Proteus mirabilis*)、葡萄球菌(*Staphylococcus*)、争论贪噬菌(*Variovorax*

*paradoxus*)、木糖氧化无色杆菌、鞘氨醇单胞菌 (*Sphingomonas* sp.) 和红球菌 (*Rhodococcus* sp.) 等 PGPB 已被证明能在受控条件下产生 ABA<sup>[25]</sup>. Deng 等<sup>[30]</sup>的研究发现 ABA 可通过减少细胞死亡、根系过氧化氢和丙二醛的含量来减轻 Cd 对平邑甜茶 (*Malus hupehensis*) 根系的损害. 此外, PGPB 还能够在盐胁迫条件下产生 ABA, 并通过调节胁迫植物的 ABA 水平来促进盐渍化植物的生长<sup>[31]</sup>.

氮、磷和钾等矿质元素是植物生长所必需的营养物质, 地球上三分之二的氮素都是以生物固氮的形式存在. 土壤中虽含有大量磷和钾元素, 但大多以无效态形式存在, 因此不能被植物有效地吸收利用. 而 PGPB 具有固氮、解磷和释钾等作用, 接种 PGPB 后可使土壤中无效营养有效化, 进一步促进植物对营养物质的有效吸收和利用.

一般来讲, 植物不能直接利用大气中的氮 (nitrogen, N), 但是部分根际细菌可以借助复杂的固氮酶系统, 将大气中的氮转化为氨或硝酸盐<sup>[32]</sup>. 在 PGPB 中, 固氮菌属 (*Azotobacter* sp.) 被认为是一种固氮剂, 可以独立于植物有氧生长, 但也可以和植物共生. Sobariu 等<sup>[33]</sup>的研究发现固氮菌属可以通过固定大气中的氮, 溶解土壤中难溶的磷酸盐, 并改善生长介质中铁的溶解和螯合, 从而为独行菜 (*Lepidium sativum*) 提供丰富的酶促环境, 而且即使在高浓度的重金属离子环境下也能提高对 Cr (VI) 和 Cd (II) 的耐受性. 在盐 (1% 氯化钠) 和重金属 (Zn、Al 和 Pb) 的双重胁迫下, 将芽孢杆菌和盐芽孢杆菌 (*Halobacillus*) 接种花生 (*Arachis hypogaea*) 幼苗后显著促进了植物的生长, 这些分离菌株还能够从 0.13 ~ 21.47 mmol·mL<sup>-1</sup> 的蛋白胨中产生大量氨, 且菌株均能在无 N<sub>2</sub> 的阿什比甘露醇琼脂中生长<sup>[34]</sup>.

土壤中还含有大量的难溶性磷酸盐, 植物通常无法直接吸收利用. 但是某些 PGPB 可以通过分泌酶和有机酸将磷转化为可溶的形式, 从而发挥磷增溶的作用<sup>[20]</sup>. 克雷伯氏菌、假单胞菌、泛菌 (*Pantoea*)、甲基杆菌 (*Methylobacterium*)、不动杆菌、微球菌 (*Micrococcus*) 和伯克霍尔德氏菌等均被报道为磷酸盐增溶剂<sup>[35]</sup>. 有研究表明, 甘蔗根内的芽孢杆菌具有产生铁载体、磷酸盐增溶和抗真菌活性等特性, 能够促进甘蔗的生长和养分吸收<sup>[36]</sup>. 此外, 巨大芽孢杆菌 CAM12 和成团泛菌 CAH6 在 0 ~ 8 mmol·L<sup>-1</sup> Al 和 0% ~ 15% 聚乙二醇 (polyethylene glycol, PEG)-6000 存在下也具有溶解磷酸三钙的能力, 表明这两种菌株即使在非生物胁迫下也能够使用磷酸三钙作为唯一的磷酸盐来源<sup>[27]</sup>.

钾 (potassium, K) 作为植物生长发育和抵抗疾病的三大主要营养元素之一, 参与了蛋白质、维生素、淀粉和纤维素的合成. 具有 K 增溶作用的微生物可以将矿物 K 转化为生物可利用的 K, 从而在土壤-植物系统中促进植物对养分的吸收并维持土壤的肥力<sup>[37]</sup>. 解钾细菌 (potassium-solubilizing bacteria, KSB) 通过产生荚膜多糖、羟基阴离子、铁载体和细胞外酶, 合成有机酸和无机酸等, 在根际矿物表面形成生物膜, 来溶解土壤中的含 K 矿物并有效释放 K<sup>[17]</sup>. Saha 等<sup>[38]</sup>的研究发现分离自水稻根际土壤的地衣芽孢杆菌和偶氮假单胞菌 (*Pseudomonas azotoformans*) 均具有较高的解 K 能力. 近年来, 一些 PGPB 如假单胞菌、芽孢杆菌、克雷伯氏菌和泛菌被发现均可以通过分泌有机酸等多种机制从云母和伊利石等不溶性矿物质中释放 K<sup>[39]</sup>.

虽然铁 (iron, Fe) 在地壳中含量丰富, 但生物利用度却非常低. 为了保证植物能在这种缺 Fe 环境中生存, PGPB 能够分泌具有高度铁亲和性和专一性的铁载体, 使其和铁螯合形成铁-铁载体复合体后被植物吸收并参与细胞代谢活动<sup>[12]</sup>. 大部分 PGPB 和植物都具备产生铁载体或利用铁-铁载体复合体的功能. 和植物相比, PGPB 产生的铁载体具有更强的铁亲和性, 能够在 Fe 有效性极低时富集土壤中微量的游离态铁元素并供植物生长需要<sup>[40]</sup>. 巨大芽孢杆菌 CAM12 和成团泛菌 CAH6 也能产生铁载体, 该羟肟酸盐型铁载体对重金属离子具有螯合吸附作用, 而且对有机物起到增溶作用. 因此, 当这两种联合体菌株用作生物接种剂时, 可有效改善具有 Al 和干旱胁迫条件的土壤中豇豆的生长<sup>[27]</sup>.

### 2.1.2 间接促生机制

间接促生机制是指 PGPB 通过产生抗生素、分泌铁载体和诱导系统抗性等方式抑制或减轻病原微生物和虫害对植物生长的不良影响, 从而调节植物对生物胁迫环境的适应.

在过去的 20 年里, 人们对抗生素 (antibiotics) 作为 PGPB 生物防治机制有了更好的认识, 也鉴定出了两栖类固醇、2,4-二乙酰基间苯三酚 (2,4-diacetylphloroglucinol, DAPG)、氰化氢 (hydrogen cyanide)、卵霉素 A (oomycin A)、吩嗪 (phenazine)、绿脓菌素 (pyoluteorin)、吡咯菌素 (pyrrolnitrin)、张力素 (tensin)、肌钙蛋白 (tropolone) 和假单胞菌产生的环脂肽 (cyclic lipopeptides produced) 等多种抗生素<sup>[41]</sup>. 以上抗生素可以通过溶解病原菌细胞壁, 造成原生质泄漏而使孢子和菌丝畸形, 从而形成抵抗各种病原体的防御机制<sup>[20]</sup>. 例如, 荧光假单胞菌通过合成绿脓菌素

和 2,4-二乙酰氟葡萄糖醇(2,4-diacetylfloroglucinol)来抑制由担子菌(*Thielaviopsis basicola*)引起的烟草根腐病<sup>[42]</sup>。

铁是所有生物必不可缺的生长元素,土壤栖息地和植物表面生物可利用铁的稀缺引发了激烈的竞争。在铁胁迫的条件下,PGPB 合成的铁载体以竞争性地获取三价铁离子,以此给植物提供铁营养素,从而抑制病菌在根际的产生和繁殖<sup>[17]</sup>。Agarwal 等<sup>[43]</sup>的研究发现从买麻藤(*Gnetum gnemon*)中分离的沃氏葡萄球菌(*Staphylococcus warneri*)和贝莱斯芽孢杆菌(*Bacillus velezensis*)均能够分泌各种对  $Fe^{3+}$  具有较高亲和力的铁载体,有效阻止了青枯病病原体(*Ralstonia solanacearum*)在番茄根际的繁殖。此外,PGPB 还能够分泌一些挥发性化合物,如氰化氢(hydrogen cyanide, HCN)、一氧化氮和硫化氢。其中,作为主要挥发性化合物的 HCN 能够通过抑制线粒体中的细胞色素氧化酶来干扰细胞呼吸。这反过来又会阻止腺嘌呤核苷三磷酸(adenosine triphosphate, ATP)的产生,ATP 是在细胞中传递能量的分子。细胞因被剥夺了能量,其生长从而受到抑制<sup>[44]</sup>。如产 HCN 的荧光假单胞菌 CHAO 具有抑制烟草黑根腐病的能力,而野生型 CHAO 菌株的 HCN 突变体则失去了抑制能力,这种菌株在抑制番茄根结线虫(*Meloidogyne javanica*)中也有很大的作用。同样地,Rijavec 等<sup>[45]</sup>的研究发现,假单胞菌产生的 HCN 通过降低 ATP 介导的细胞色素氧化酶的合成来抑制镰刀菌(*Fusarium moniliforme*)和禾谷镰孢菌(*Fusarium graminearum*)的菌丝体生长。同时,通过释放和胁迫相关的挥发性化合物,能够在干旱胁迫下增加植物生物量、产量和存活率<sup>[25]</sup>。

其次,根表面和周围的根际是重要的碳汇,该区域的光合作用分配可高达 40%。因此,沿着根表面有各种合适的营养丰富的生态位,吸引着各种各样的微生物,包括植物病原体<sup>[41]</sup>。对这些养分和生态位的竞争是 PGPB 保护植物免受植物病原体侵害的重要机制<sup>[46]</sup>。假单胞菌属作为种群数量较多和最具有应用前景的 PGPB 菌株,由于具有生长快、侵入性强(掠夺营养)和定殖效率高等特点,非常适合于土壤接种,它们能在根际迅速繁殖并通过强有力的竞争优势发挥生防作用<sup>[1]</sup>。

此外,内生或根际细菌还可以通过诱导系统抗性(induced systematic resistance, ISR)来减轻植物的各种非生物胁迫。PGPB 诱发的 ISR 机制主要通过增强植物根系细胞壁强度和在应对病原菌时调整生理生化反应,合成一些防御病原菌的化合物来完成<sup>[47]</sup>。有报道证实,当遇到病原菌侵害时,PGPB 可

以诱导植物细胞壁结构发生改变。例如,用内生荧光假单胞菌 WCS417r 接种番茄后,第一层皮质细胞壁径向侧的外切线和最外部分增厚,表明在病原真菌菌丝侵染的地方(如细胞壁)可以快速形成防御障碍,有助于延缓受害过程,为宿主植物建立防御体系赢得充足时间<sup>[41]</sup>。此外,由 PGPB 诱发的 ISR 常常伴随植物病程相关蛋白(patho-genesis-related proteins, PRs)、植保素和其他次生代谢产物积累<sup>[47]</sup>。比如在水稻植株中,接种解淀粉芽孢杆菌(*Bacillus amyloliquefaciens*)SN13 可通过调节各种生理、代谢和分子功能增强对立枯病菌(*Rhizoctonia solani*)的免疫反应<sup>[22]</sup>。PGPB 通过 ISR 进行免疫的一个优势是在没有病原体的情况下防御相关基因的表达会降低,因此不需要投入大量资源,而仅在病原体侵袭时就能被激活。一般来讲,激活 ISR 的 PGPB 大多是通过涉及茉莉酸(jasmonic acid, JA)或乙烯信号的独立途径而实现的。抗生素、铁载体、鞭毛、水杨酸(salicylic acid, SA)、茉莉酸、N-酰基高丝氨酸内酯、挥发性化合物和脂多糖(lipopolysaccharides, LPS)均是 PGPB 诱发 ISR 的细菌成分<sup>[35]</sup>。

## 2.2 植物促生菌对重金属的作用机制

除促进植物生长外,PGPB 还可以通过分泌螯合剂、酸化和氧化还原反应等来影响重金属的生物利用度<sup>[48]</sup>,并通过调节各种重金属转运蛋白(如 ZRT-IRT 样蛋白、重金属转运 ATPase 和天然抗性巨噬细胞相关蛋白)和重金属螯合剂(如有机酸、铁载体和生物表面活性剂等)的表达来巩固重金属的耐受性及其吸收和富集。

### 2.2.1 活化机制

重金属在土壤环境中通常以可生物利用和不可生物利用的形式存在。有研究表明,不同的 PGPB 通过产有机酸(organic acid, 如草酸、乙酸、葡萄糖酸、琥珀酸和柠檬酸)来活化土壤中的重金属和溶解难溶的营养元素,从而促进植物对重金属的吸收。一些低分子量的有机酸,可以和毒性较低的游离重金属(如 Zn、Pb 和 Cu)形成复合物并导致其失活,从而降低重金属对植物的毒性<sup>[24]</sup>。S,S-乙二胺二琥珀酸(S,S-ethylenediamine disuccinic acid, EDDS)由于其可生物降解的特性和对微生物群落的微弱影响被认为是一种很有前途的螯合剂。假单胞菌 DGS6 和 EDDS 的联合体使得玉米枝中 Cu 和 Zn 的浓度和总吸收量达到最高。此外,EDDS 还能够溶解土壤中的 Cu 以提高植物组织中的重金属浓度,增加土壤可溶性有机碳(dissolved organic carbon, DOC)的同时也能促进土壤多氯联苯的溶解<sup>[49]</sup>。此外,接种布丘氏

菌属 (*Buttiauxella* sp.) SaSR13 增强了东南景天 (*Sedum alfredii*) 根系分泌物 (尤其是苹果酸和草酸) 的含量, 从而显著提高了 Cd 的生物利用度和植物对其的吸收能力<sup>[50]</sup>.

PGPB 还能够通过合成生物表面活性剂 (biological surfactant) 来降低液体表面和界面张力, 用于解毒或去除有毒重金属. 当表面活性剂浓度达到或超过临界胶束浓度时, 就会在溶液内形成胶束, 而重金属会与土壤液相中的胶束结合<sup>[16]</sup>. 此外, PGPB 分泌的生物表面活性剂能在根际土壤颗粒的界面上与不同的不溶性重金属相互作用并形成复合物, 然后诱导重金属从土壤基质中解吸, 通过增加重金属在土壤环境中的溶解度来改变重金属迁移率和生物利用度<sup>[51]</sup>. 有研究发现, 铜绿假单胞菌 (*Pseudomonas aeruginosa*)、伯克霍尔德氏菌、弗氏柠檬酸杆菌 (*Citrobacter freundii*) 和热带念珠菌 (*Candida tropicalis*) 等 PGPB 均能够合成生物表面活性剂, 并显示出巨大的重金属去除能力<sup>[52]</sup>. 芽孢杆菌属 MS154 产生的一种热稳定生物表面活性剂 (脂肽), 具有很高的去除重金属的潜力. 由于其阴离子性质, 这种生物表面活性剂表现出高乳化活性和降低表面张力的特性, 并且当其浓度增加到临界胶束浓度 (critical micelle concentration, CMC)  $\times 2.0$  时, 在  $1\ 000\ \text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$  的相应重金属溶液中去除了 75.5% 的 Hg、89.5% 的 Mn、97.73% 的 Pb 和 99.93% 的 Cd<sup>[53]</sup>. Chen 等<sup>[54]</sup> 的研究发现, 产生生物表面活性剂的内生假单胞菌株可提高 Cd 的生物可利用性, 并显著增加 14% 的龙葵干重和 46.6% 的植物体内 Cd 含量.

有 PGPB 产生的铁载体具有特异性结合基因 (如儿茶酚酸酯、酚酸酯或异羟肟酸酯). 由于以上特定基因的存在, 铁载体络合物的形成性能增加, 与有毒金属形成各种络合物, 从而提高了生物利用度<sup>[55]</sup>. Ahsan 等<sup>[56]</sup> 的研究发现当肠杆菌 HU38、微小杆菌 (*Microbacterium arborescens*) HU33 和斯氏泛菌 (*Pantoea stewartii*) ASI11 组合或单独接种紫茎泽兰 (*Leptochloa fusca*) 后显示出产生铁载体的潜力, 增加了叶绿素的生物合成, 并且通过络合反应增强了和 Cr 的结合能力, 从而提高了根际中 Cr 的生物利用度.

PGPB 用来提高重金属生物利用度的另一个机制是生物甲基化 (methylation). 其中许多细菌会参与 Hg 和 Pb 等重金属的甲基化过程, 并通过挥发作用释放重金属, 这些生成的甲基化化合物表现出不同程度的溶解度、挥发性和毒性<sup>[2]</sup>. 甲基汞可以被不同的细菌甲基化而形成挥发性的二甲汞, 苯基汞和甲基汞可以被还原成挥发性 Hg(0), 这种还原

是由某些细菌酶驱动而成的<sup>[57]</sup>. 而鳃假单胞菌 (*Pseudomonas anguilliseptica*) 中的细菌硫代嘌呤甲基转移酶 (bacterial thiopurine methyltransferase, bTPMT) 可以在天然淡水硒甲基化过程中发挥作用, 成功用于含硒天然水的原位生物修复, 从而将硒浓度降低到可接受的水平<sup>[58]</sup>.

### 2.2.2 稳定机制

一般而言, 重金属和细胞外物质 (如阴离子官能团和细胞外聚合物) 的结合可以降低土壤中重金属的生物利用度, 从而减少植物对土壤中重金属的吸收或向植物地上部分的迁移. 例如, 许多重金属和细胞表面的阴离子官能团 (如巯基、羧基、羟基、磺酸根、胺基和酰胺基等) 结合, 可以有效固定土壤中的重金属<sup>[59]</sup>. 以上物质仅通过形成复合物或形成围绕细胞的有效屏障就能降低重金属的毒性<sup>[60]</sup>. 有微生物还可通过沉淀、碱化和络合过程降低土壤中重金属的生物利用度. 还有一些 PGPB 可通过氧化还原过程促进放射性核素 (如 U 和 Tc) 和有毒金属 (如 Cr 和 Se) 的酶催化沉淀的能力; PGPB 分泌的无机酸 (如硫化氢、碳酸氢盐和磷酸盐) 也可以和某些溶解的重金属 (如 Cu、Fe、Zn 和 Pb) 快速反应, 形成不溶性沉淀物<sup>[1]</sup>.

细胞外聚合物 (extracellular polymeric substance, EPS) 是在一定环境条件下由微生物分泌于体外的有机高分子聚合物<sup>[17]</sup>. EPS 主要由多糖、蛋白质和脂质组成, 它们以胶囊或黏液的形式附着在细菌的细胞表面, 表现出强大的结合重金属的能力. PGPB 产生的 EPS 被证明可以和潜在的有毒微量元素牢固结合, 并截留沉淀的重金属硫化物和氧化物形成有机重金属络合物, 从而增加了对有毒微量元素的抗性<sup>[20]</sup>. Xia 等<sup>[61]</sup> 的研究发现变栖克雷伯氏菌 (*Klebsiella variicola*) 能够产生 EPS-K 和 EPS-B, 其中, EPS-B 中有芳香族和色氨酸样蛋白, 而 EPS-K 中有色氨酸类蛋白和腐殖质, 这些均在 Hg 的络合中起重要作用. 同样, Silambarasan 等<sup>[62]</sup> 的研究发现, 红酵母菌 (*Rhodotorula* sp.) CAH2 能够耐受高达  $6\ \text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  的 Al, 即使在 Al、盐和干旱的多重胁迫条件下也能产生由葡萄糖、甘露糖和半乳糖组成的 EPS, 且产量随着这 3 个应力水平的增加而增加. 因此, EPS 的合成有效地降低了土壤中重金属的迁移率和对植物的生物可利用性.

微生物产生的磷酸盐也可以使重金属沉淀, 这是因为细菌中重金属或放射性核素的积累是由磷酸酶介导的, 该磷酸酶可从供应的有机磷酸盐供体分子 (如 2-磷酸甘油酯) 中释放无机磷酸盐, 而后重金属或放射性核素阳离子以磷酸盐的形式沉淀在生物

质上<sup>[63]</sup>. 硫酸盐还原菌 (sulfate-reducing bacteria, SRB) 能够在有机底物或  $H_2$  作为电子供体存在的厌氧条件下产生硫化氢 ( $H_2S$ ), 同时通过矿物质的分解和酸的不稳定吸附形式的释放从被污染的土壤中浸出重金属<sup>[64]</sup>. 此外, 微生物诱导的碳酸盐沉淀 (microbiologically induced carbonates precipitation, MICP) 也已被提议为一种固定重金属污染物的潜在生物修复方法. 在 MICP 中, 碳酸盐可以和细胞表面上的重金属 (如  $Pb^{2+}$ ) 结合, 之后这些元素从可溶性重金属变为不溶性形式, 从而降低其毒性<sup>[65]</sup>. 由巴氏杆菌 (*Bacillus pasteurii*) ATCC 11859 引起的 MICP 在维持微生物生长的同时通过降低土壤中有效态 Pb 的含量, 使得重金属可交换态含量降低, 而碳酸盐结合态含量增加, 从而导致 Pb 的提取量和土壤中有效态 Pb 的含量分别降低了 76.34% 和 41.65%. 此外, MICP 的修复不仅能增强土壤团聚体的水稳定性, 还能增加土壤的总孔隙度, 使得孔隙结构更加复杂<sup>[66]</sup>.

### 2.2.3 转化机制

重金属元素的价态决定其毒性, 微生物对重金属元素的氧化还原过程导致重金属污染物产生多种化学转化, 从而改变了形态和在土壤中的迁移率, 这被认为是重要的解毒机制之一<sup>[1]</sup>. PGPB 能够通过细胞代谢来调节重金属离子的氧化还原反应, 将重金属污染物转化为根际中的非生物利用态来降低重金属对植物的毒害作用<sup>[67]</sup>. 例如, 解淀粉芽孢杆菌可在有氧条件下利用葡萄糖还原  $Cr(VI)$ , 从而降低 Cr 的毒性<sup>[68]</sup>. 微生物通过酶介导将有毒重金属物质还原为破坏性较小的形式, 也是减轻重金属毒性的最常见策略之一, 这在很大程度上有助于增强微生物对重金属离子的抗性<sup>[69]</sup>. 这些酶裂解键, 消耗生化反应产生的能量, 可以帮助电子从还原的有机化合物中转移到另一种化合物中. 通过这些反应, 将有害的污染物被氧化为无害的化合物. 此外, 这些酶也有助于土壤环境中木质素分解产生的各种酚类化合物的腐殖化, 它们也能通过化学反应解毒各种异生物质, 如苯胺或酚类化合物<sup>[59]</sup>. Mathew 等<sup>[70]</sup> 的研究从芦苇中分离得到了耐盐光杆菌 (*Photobacterium halotolerans*) MELD1, 并确定了 *merA* 基因的存在和汞还原酶活性, 以及对 Cd 和 Pb 等有毒化合物的抗性. Giovanella 等<sup>[71]</sup> 从培养基中分离的假单胞菌 B50A 同样具有 *merA* 基因和汞还原酶活性, 使其即使在汞的污染下也能存活, 并且有效地将  $Hg(II)$  还原  $Hg(0)$ .

### 2.2.4 解毒机制

细菌也可以通过自身对重金属的吸收来减少植物对重金属的吸收. 因为它们无处不在, 体积大, 并

且对广泛的环境条件具有一定的适应能力, 因此被广泛用作生物吸附剂<sup>[72]</sup>. 通常, 细菌吸收重金属的过程分为吸附和富集两个阶段. 而这两个机制和其他促生功能均能缓解重金属对植物的毒害, 在促进植物生长和生物量的同时, 提高了植物对重金属的修复效率. 生物吸附是通过和活的或死的生物物质 (biological matter) 相互作用而被动隔离重金属的过程, 离子交换、吸附、微沉淀、静电和疏水相互作用均可以促进生物吸附, 而细胞对重金属的吸附可以在所有微生物和重金属的相互作用中起关键作用 (如生物转化和生物矿化)<sup>[73]</sup>. 根据重金属吸收或累积的位置, 生物吸收可分为细胞外沉淀、细胞表面吸收和细胞内累积<sup>[74]</sup>. 微生物的细胞结构可以捕获重金属离子, 然后将其吸收到细胞壁的结合位点上, 该过程和代谢周期无关<sup>[72]</sup>. 而生物富集指活细胞通过依赖于较慢活性代谢的重金属向细菌细胞的转运来吸收重金属 (转运到细胞中, 通过细胞代谢循环跨细胞膜在细胞内积累) 的过程. 在富集过程中, 细菌可以将重金属和热稳定蛋白结合, 将其转化为低毒或无毒的络合物并在细胞中积累<sup>[5]</sup>. Xu 等<sup>[75]</sup> 的研究发现, 从重金属污染的土壤中分离出来的假单胞菌 375 对  $Cd^{2+}$  有显著的吸收能力. 因为生物吸附过程受酸碱度、初始重金属浓度和接触时间的强烈影响. 所以当 pH 值增加到 7 时, 菌株 375 的生物吸附能力急剧增加至最大值  $52.90 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 而当 pH 值为 8 时, 吸附值又迅速降低, 这可能是受碱性条件下重金属氢氧化物的沉淀所影响, 导致了  $Cd^{2+}$  的生物吸附降低. SEM-EDX 分析还表明,  $Cd^{2+}$  能够和细胞壁结合, 而 FTIR 光谱分析表明  $-CH_2$ 、 $-OH$ 、 $-SO_3$ 、 $C=O$ 、 $N-H$  和  $C-N$ , 磷酸盐或硫酸盐官能团均是  $Cd^{2+}$  离子结合的主要功能部位.

## 3 非生物胁迫下植物促生菌在植物修复重金属污染土壤中的应用

有研究表明, PGPB 能够促进胁迫环境下植物的生长, 减轻重金属对植物的毒性, 改变重金属的形态和生物利用度, 从而提高重金属污染土壤的植物修复效率.

植物吸收污染物进入根部并将其转运到地上部分的能力被称为植物提取<sup>[76]</sup>. PGPB 能够通过降低土壤 pH 值, 合成螯合剂来改变重金属的生物利用度, 从而提高植物对重金属的提取效率<sup>[16]</sup>. 笔者前期试验筛选了耐旱的 PGPB, 并评估其对尖叶芸苔 (*Brassica oxyrrhina*) 生长和重金属吸收的影响. 研究发现, 利班假单胞菌 (*Pseudomonas libanensis*) TR1 和反应假单胞菌 (*Pseudomonas reactans*) Ph3R3 都具有

优良的植物促生特性,可以产生 IAA、铁载体和 ACC 脱氨酶,其接种显著增加了芸苔的生物量、叶片相对含水量和色素含量.此外,这两种菌株对各种重金属(Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn)、抗生素(氨基西林、氯霉素、青霉素、链霉素)、盐度(8% 和 5%)和极端温度(38 和 30℃)均表现出高度抗性.且无论土壤水分条件如何,TR1 和 Ph3R3 都大大提高了 Cu 和 Zn 的金属浓度、易位和生物富集因子.这是由于产生的 IAA 通过增加根表面积和长度为植物提供了更多获取土壤养分和重金属的途径.此外,TR1 和 Ph3R3 还在赋予植物重金属和干旱的双重胁迫耐受性方面发挥着关键作用<sup>[77]</sup>. Bruno 等<sup>[78]</sup>的研究评估了蜡状芽孢杆菌 TCU11 的作用和在大气温度升高(increased atmospheric temperature, IAT)的胁迫条件下对多重金属(multiple heavy metals, MM)污染土壤中玉米(*Zea mays*)生长、胁迫耐受性和植物修复的潜力.盆栽试验表明,在复合胁迫条件下,用 TCU11 接种玉米后可通过产生铁载体和 IAA 来促进植物生长,并通过调节脯氨酸、超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)和过氧化氢酶(catalase, CAT)等抗氧化酶,来降低由 MM 和 IAT 引起的玉米脂质过氧化.此外,在 IAT 胁迫下接种 TCU11 增加了植物组织中 Pb、Zn、Ni、Cu 和 Cd 的积累,并增加了除 Ni 以外的重金属从根向地上部的易位.土壤重金属活化的结果也进一步表明, IAT 增加了 TCU11 的重金属活化性能,从而增加了土壤中生物可利用重金属的浓度.因此,TCU11 可用作接种物以提高 IAT 条件下 MM 污染土壤的植物提取效率.在温室条件下, Silambarasan 等<sup>[79]</sup>研究了从甜菜根际土壤(pH = 5.56)中分离出的耐铝和耐旱的草本草杆菌(*Curtobacterium herbarum*) CAH5 对 Al 的生物累积的影响,其发现,配制的菌剂 CAH5 通过减少植物部位的氧化应激、脂质过氧化和 Al 积累,显著改善了 Al 和干旱胁迫下苜蓿(*Lactuca sativa*)的生长.此外,在以 2~6 mmol·L<sup>-1</sup>为初始 Al 浓度的试验中,在干旱条件下培养 72 h 后,菌株 CAH5 对 Al 的去除率可达 78%~91%.以上特征表明,即使在干旱条件下,在具有高植物毒性 Al 含量的土壤中,对于 Al 的生物修复和可持续的农艺生产中,菌株 CAH5 仍然是一种实用的选择.

和植物提取相比,有 PGPB 可以通过生物吸附、生物蓄积、生物转化、沉淀、络合和碱化等特定的机制来减少重金属在土壤中的迁移和积累.细菌细胞表面阴离子官能团、EPS 和细胞外胶囊也在重金属的固定过程中起着重要的作用<sup>[60]</sup>. 笔者前期研究了偶氮假单胞菌 ASS1 对干旱胁迫下生长在多重金

属(Cu、Zn 和 Ni)污染土壤上的三叶草(*Trifolium arvense*)的植物修复作用<sup>[80]</sup>. 盆栽试验表明,将菌株 ASS1 接种于三叶草后极大地抵消了非生物胁迫对植物生物量、叶片相对含水量和叶绿素含量的消极影响.且无论有没有水分胁迫,ASS1 都能显著提高 Cu、Zn 和 Ni 等重金属的积累、总去除率和生物富集系数,并降低了 Cu 的易位因子.这表明内生菌 ASS1 可用于三叶草对重金属(Cu、Zn 和 Ni)污染土壤的稳定修复.但当植物遭受干旱胁迫时,会显著降低植物中 Cu 和 Ni 的积累.这可能是由于非生物胁迫抑制了根系生长,改变了根系构型从而限制了植物对重金属的吸收.同样地,为了研究选定的高效菌株在盐渍条件下对植物生长促进和重金属吸收的影响, Silambarasan 等<sup>[81]</sup>将香茅假单胞菌(*Pseudomonas citronellolis*) SLP6 用于生物修复盐胁迫下 Cu 污染的土壤.试验表明,SLP6 菌株在根际中表现出强大的定殖潜力,而不受各种非生物胁迫(Cu、盐和 Cu + 盐胁迫)的影响.在 Cu 和 NaCl 胁迫条件下,菌株 SLP6 表现出 ACC 脱氨酶活性,能够合成 IAA、铁载体和溶解磷酸盐.用 SLP6 菌株接种向日葵可显著促进 Cu 和高盐胁迫下植物生长,提高叶绿素含量、抗氧化酶产量和 Cu 累积潜力,并减少脂质过氧化.此外,接种 SLP6 菌株使植物中的易位因子 Cu(TF < 1)在 Cu 和 Cu + 盐的双重胁迫下也分别降低了 12% 和 5%,这将有利于提高 Cu 污染土壤的植物稳定效率.

植物挥发是指从土壤或水体中去除污染物并释放到大气中.在此过程中,微生物发挥着重要的作用.微生物可以转化汞化合物,并在全球汞循环中发挥重要作用,PGPB 对 Hg 的抗性机制是通过 *mer* 操纵子(由一组相连的基因组成,这些基因编码的蛋白质具有参与汞化合物的调节、运输、分解和还原相关的功能)将 Hg(II)酶促还原为其金属形式 Hg(0),Hg(0)的高蒸气压和极低的水溶性导致其从细菌细胞质挥发到外部大气环境中<sup>[67,82]</sup>. Matsui 等<sup>[82]</sup>的研究发现耐 Hg 的芽孢杆菌能够产生由 *MerB* 基因编码的有机 Hg 裂解酶,从而将有机汞裂解为 Hg 离子.可见,这些 PGPB 大大降低了 Hg 的毒性,并提高了植物的挥发效率.此外,有研究将以上微生物基因转移到植物系统中,并进一步分析了其对植物挥发效率的影响作用.同样地, Amin 等<sup>[83]</sup>的研究筛选出携带和已知 *merA* 相似序列基因的耐 Hg 芽孢杆菌 AZ-1,由于 *merA* 基因可编码汞还原酶,因此可以将 Hg 的水溶性离子形式还原为毒性较小的挥发性形式,从而去除工业废水中的 Hg.

此外,有 PGPB 还可以协同植物将土壤中的有害

物质吸收,再通过植物的根部和其他器官,将有害物质通过代谢的方式,转化为毒性较小的形态. Lin 等<sup>[84]</sup>的研究讨论了人工湿地中蜡状芽孢杆菌 GG 对 Cr(VI)的净化贡献,其发现该菌在中性和碱性条件下有较高的生物活性和细胞代谢,且在 48 h 后,对 Cr(VI)的最大去除率接近 100%. 同时在较低 pH 值下,会形成更多的水合离子,从而使细菌细胞上的负位质子化,最终减少了细菌对 Cr(VI)的吸附量. 当接种时间少于 36 h, Cr(VI)的去除率会随接种量的增加而增加,这归结于蜡状芽孢杆菌细胞密度的增加.

#### 4 微生物菌剂

将 PGPB 接种到重金属污染土壤中,其活性可能受到土著微生物、有毒重金属和其他环境因素的影响,而通过生物强化技术将微生物菌剂引入土壤,尽可能地降低了细菌被土壤微环境缓冲的风险,并促进了植物根系和 PGPB 之间多种多样的共生关系<sup>[85]</sup>. 微生物菌剂由于自身含有大量的微生物,能够在土壤中通过微生物的生物活动,改善作物的生存环境、促进植物的生长、提高作物产量/品质和土壤生态环境<sup>[86]</sup>. 载体材料(活性炭、生物炭、沸石、泥炭、甲壳素、黏土和尼龙等)为 PGPB 提供了保护性生态位和临时营养,以维持细菌活性并延长 PGPB 在接种后的存活时间,从而提高作物产量<sup>[85,87]</sup>. Tu 等<sup>[88]</sup>的研究以玉米秸秆型生物炭和绿脓杆菌(*Pseudomonas sp.*)为材料,阐明了生物炭负载微生物菌剂对 Cd 和 Cu 污染土壤的稳定化修复效果与作用机制. 此外,将不同的菌株结合起来,使得每一种菌株的修复和增产效益达到最高<sup>[89]</sup>. Wang 等<sup>[90]</sup>的研究表明肠杆菌和科马蒙纳斯(*Comamonas sp.*)的组合是高效固定 Cd 的重要效应器. 由于接种剂的应用大大减少了化学肥料和杀虫剂的使用,现在越来越多的接种剂被商业化后用于各种作物<sup>[91]</sup>.

#### 5 展望

(1)进一步筛选具有高度竞争力的 PGPB 菌种,并通过遗传构建或基因重组等分子手段进一步提高 PGPB 的重金属抗性,为高效修复菌剂的开发和应用提供理论基础与技术支持. 同时也可倾向于对一些非食用的且有一定重金属富集能力的经济或能源作物进行与功能微生物联合修复方面的研究.

(2)开发低成本的高效微生物接种剂,优化储存条件以支持细菌长期存活. 接种剂的开发侧重于生产出具有在运输、保存和使用过程中长期稳定性的微生物产品. 它们在室温下的保质期要求从 2~3

个月到 1~2 年不等. 最大化接种物中活细胞的初始数量是弥补快速恶化率的策略,且需考虑施用后每个种子的活细胞数量.

(3)通过生物修复来回收增值产品,例如在富含重金属废水的生物处理过程中回收重金属,使基于细胞的固定化处理过程具有可持续性,同时其他回收的植物材料也可用做生物质.

(4)应借助分子生物手段深入研究 PGPB 代谢产物的种类、结构变化及其和其他功能微生物间的互作关系,系统探究全球气候变化背景下 PGPB 联合植物修复土壤重金属污染的机制. 同时进一步筛选出植物和 PGPB 的最优组合,为 PGPB 在污染环境修复治理中的应用提供理论指导和技术支持.

#### 6 结论

(1)土壤环境的复杂多变性:气候变化、作物轮作、自然选择和肥料施用致使土壤生物、物理和化学特性复杂多变,这必然会使 PGPB 的生存和功能受到影响,导致田间修复效果不理想.

(2)微生物群落多样性:目前的研究结果主要来自接种单一或 2~3 种可培养微生物菌株而获得的. 而在自然条件下,微生物群落是一个动态变化的复杂群体. 在这个群体中,各类菌群之间甚至各个菌株之间都会相互影响和相互作用,从而抑制其益生功效的发挥.

(3)植物材料后续处理不规范:一些富集植物修复土壤以后会产生一定的有害生物物质,如果不能将这些干物质进行有效地处理,就会失去生物修复原本的意义.

(4)微生物菌剂的门槛相对较高:它必须经过农业部指定单位检验和正规田间试验,在证实无毒、有效和环境友好后,方能生产应用. 同时活微生物菌才有效,但微生物菌剂中很多有效活菌不耐高温、强光和强酸碱,致使其实际使用效果大大降低.

(5)推广应用受限:对于 PGPB 的作用机制研究还不够全面,在大多文献中缺少非生物胁迫条件下与 PGPB 的行为动力学和代谢组学等相关的分子生物学方面的研究,使其推广应用受限.

#### 参考文献:

- [1] Ma Y, Oliveira R S, Freitas H, et al. Biochemical and molecular mechanisms of plant-microbe-metal interactions: Relevance for phytoremediation[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2016, 7, doi: 10.3389/fpls.2016.00918.
- [2] Ullah A, Heng S, Munis M F H, et al. Phytoremediation of heavy metals assisted by plant growth promoting (PGP) bacteria: a review[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2015, 117: 28-40.
- [3] Zamora-Ledezma C, Negrete-Bolagay D, Figueroa F, et al.

- Heavy metal water pollution: a fresh look about hazards, novel and conventional remediation methods [J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2021, **22**, doi: 10.1016/j.eti.2021.101504.
- [4] Rajkumar M, Prasad M N V, Swaminathan S, *et al.* Climate change driven plant-metal-microbe interactions[J]. *Environment International*, 2013, **53**: 74-86.
- [5] 马莹, 骆永明, 滕应, 等. 根际促生菌及其在污染土壤植物修复中的应用[J]. *土壤学报*, 2013, **50**(5): 1021-1031.  
Ma Y, Luo Y M, Teng Y, *et al.* Plant growth promoting rhizobacteria and their role in phytoremediation of heavy metal contaminated soils[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, **50**(5): 1021-1031.
- [6] Glick B R. Plant growth-promoting bacteria: Mechanisms and applications[J]. *Scientifica*, 2012, **2012**, doi: 10.6064/2012/963401.
- [7] Backer R, Rokem J S, Ilangumaran G, *et al.* Plant growth-promoting rhizobacteria; context, mechanisms of action, and roadmap to commercialization of biostimulants for sustainable agriculture[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2018, **9**, doi: 10.3389/fpls.2018.01473.
- [8] Verma S, Kuila A. Bioremediation of heavy metals by microbial process[J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2019, **14**, doi: 10.1016/j.eti.2019.100369.
- [9] Hussain I, Aleti G, Naidu R, *et al.* Microbe and plant assisted-remediation of organic xenobiotics and its enhancement by genetically modified organisms and recombinant technology: a review[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **628-629**: 1582-1599.
- [10] Enebe M C, Babalola O O. The influence of plant growth-promoting rhizobacteria in plant tolerance to abiotic stress: a survival strategy[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2018, **102**(18): 7821-7835.
- [11] Bruno L B, Karthik C, Ma Y, *et al.* Amelioration of chromium and heat stresses in *Sorghum bicolor* by Cr<sup>6+</sup> reducing-thermotolerant plant growth promoting bacteria [J]. *Chemosphere*, 2020, **244**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.125521.
- [12] Afzal I, Shinwari Z K, Sikandar S, *et al.* Plant beneficial endophytic bacteria; mechanisms, diversity, host range and genetic determinants[J]. *Microbiological Research*, 2019, **221**: 36-49.
- [13] Kumar A, Tripti, Voropaeva O, *et al.* Bioaugmentation with copper tolerant endophyte *Pseudomonas lurida* strain E0026 for improved plant growth and copper phytoremediation by *Helianthus annuus* [J]. *Chemosphere*, 2021, **266**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.128983.
- [14] 张典利, 孟臻, 亢文哲, 等. 植物根际促生菌的研究与应用现状[J]. *世界农药*, 2018, **40**(6): 37-43, 50.  
Zhang D L, Meng Z, Qi W Z, *et al.* The research and application status of plant growth promoting rhizobacteria [J]. *World Pesticide*, 2018, **40**(6): 37-43, 50.
- [15] 苑博华, 廖祥儒, 郑晓洁, 等. 吡啶乙酸在植物细胞中的代谢及其作用[J]. *生物学通报*, 2005, **40**(4): 21-23.  
Yuan B H, Liao X R, Zheng X J, *et al.* Metabolism and function of IAA in plant cell[J]. *Bulletin of Biology*, 2005, **40**(4): 21-23.
- [16] Guo J K, Muhammad H, Lv X, *et al.* Prospects and applications of plant growth promoting rhizobacteria to mitigate soil metal contamination: a review[J]. *Chemosphere*, 2020, **246**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.125823.
- [17] Etesami H, Maheshwari D K. Use of plant growth promoting rhizobacteria (PGPRs) with multiple plant growth promoting traits in stress agriculture: action mechanisms and future prospects[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, **156**: 225-246.
- [18] 范美玉, 黎妮, 贾雨田, 等. 耐镉阿氏芽孢杆菌缓解水稻受镉胁迫的研究[J]. *农业环境科学学报*, 2021, **40**(2): 279-286.  
Fan M Y, Li N, Jia Y T, *et al.* Study on the mitigation of cadmium stress in rice by cadmium-resistant *Bacillus aryabhatai* [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, **40**(2): 279-286.
- [19] Zerrouk I Z, Benchabane M, Khelifi L, *et al.* A *Pseudomonas* strain isolated from date-palm rhizospheres improves root growth and promotes root formation in maize exposed to salt and aluminum stress[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2016, **191**: 111-119.
- [20] Manoj S R, Karthik C, Kadirvelu K, *et al.* Understanding the molecular mechanisms for the enhanced phytoremediation of heavy metals through plant growth promoting rhizobacteria: a review[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, **254**, doi: 10.1016/j.jenvman.2019.109779.
- [21] Rostami S, Azhdarpoor A. The application of plant growth regulators to improve phytoremediation of contaminated soils: a review[J]. *Chemosphere*, 2019, **220**: 818-827.
- [22] Grover M, Bodhankar S, Sharma A, *et al.* PGPR mediated alterations in root traits: Way toward sustainable crop production [J]. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 2021, **4**, doi: 10.3389/fsufs.2020.618230.
- [23] Vishal B, Kumar P P. Regulation of seed germination and abiotic stresses by gibberellins and abscisic acid[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2018, **9**, doi: 10.3389/fpls.2018.00838.
- [24] Asad S A, Farooq M, Afzal A, *et al.* Integrated phytobial heavy metal remediation strategies for a sustainable clean environment - A review[J]. *Chemosphere*, 2019, **217**: 925-941.
- [25] Etesami H, Glick B R. Halotolerant plant growth-promoting bacteria; Prospects for alleviating salinity stress in plants [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2020, **178**, doi: 10.1016/j.envexpbot.2020.104124.
- [26] Burges A, Epelde L, Benito G, *et al.* Enhancement of ecosystem services during endophyte-assisted aided phytostabilization of metal contaminated mine soil [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **562**: 480-492.
- [27] Silambarasan S, Logeswari P, Cornejo P, *et al.* Role of plant growth-promoting rhizobacterial consortium in improving the *Vigna radiata* growth and alleviation of aluminum and drought stresses [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, **26**(27): 27647-27659.
- [28] Tuan P A, Kumar R, Rehal P K, *et al.* Molecular mechanisms underlying abscisic acid/gibberellin balance in the control of seed dormancy and germination in cereals [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2018, **9**, doi: 10.3389/fpls.2018.00668.
- [29] Vishwakarma K, Upadhyay N, Kumar N, *et al.* Abscisic acid signaling and abiotic stress tolerance in plants: A review on current knowledge and future prospects [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2017, **8**, doi: 10.3389/fpls.2017.00161.
- [30] Deng B, Zhang W W, Yang H Q. Abscisic acid decreases cell death in *Malus hupehensis* Rehd. under Cd stress by reducing root Cd<sup>2+</sup> influx and leaf transpiration[J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2021, doi: 10.1007/s00344-021-10327-0.
- [31] Shahzad R, Khan A L, Bilal S, *et al.* Inoculation of abscisic acid-producing endophytic bacteria enhances salinity stress tolerance in *Oryza sativa* [J]. *Environmental and Experimental*

- Botany, 2017, **136**: 68-77.
- [32] Ahemad M, Kibret M. Mechanisms and applications of plant growth promoting rhizobacteria: Current perspective[J]. Journal of King Saud University - Science, 2014, **26**(1): 1-20.
- [33] Sobariu D L, Fertu D I T, Diaconu M, *et al.* Rhizobacteria and plant symbiosis in heavy metal uptake and its implications for soil bioremediation[J]. New Biotechnology, 2017, **39**: 125-134.
- [34] Banik A, Pandya P, Patel B, *et al.* Characterization of halotolerant, pigmented, plant growth promoting bacteria of groundnut rhizosphere and its *in-vitro* evaluation of plant-microbe proto-cooperation to withstand salinity and metal stress [J]. Science of the Total Environment, 2018, **630**: 231-242.
- [35] Burrage S G, Jeon J. Applications of endophytic microbes in agriculture, biotechnology, medicine, and beyond [J]. Microbiological Research, 2021, **245**, doi: 10.1016/j.micres.2020.126691.
- [36] Wang Z, Yu Z X, Solanki M K, *et al.* Diversity of sugarcane root-associated endophytic *Bacillus* and their activities in enhancing plant growth [J]. Journal of Applied Microbiology, 2020, **128**(3): 814-827.
- [37] Meena K K, Sorty A M, Bitla U M, *et al.* Abiotic stress responses and microbe-mediated mitigation in plants: The omics strategies[J]. Frontiers in Plant Science, 2017, **8**, doi: 10.3389/fpls.2017.00172.
- [38] Saha M, Maurya B R, Meena V S, *et al.* Identification and characterization of potassium solubilizing bacteria (KSB) from Indo-Gangetic Plains of India [J]. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 2016, **7**: 202-209.
- [39] Bakhshandeh E, Pirdashti H, Lendeh K S. Phosphate and potassium-solubilizing bacteria effect on the growth of rice[J]. Ecological Engineering, 2017, **103**: 164-169.
- [40] 马莹, 骆永明, 滕应, 等. 内生细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.
- Ma Y, Luo Y M, Teng Y, *et al.* Effects of endophytic bacteria enhancing phytoremediation of heavy metal contaminated soils [J]. Acta Pedologica Sinica, 2013, **50**(1): 195-202.
- [41] Compant S, Duffy B, Nowak J, *et al.* Use of plant growth-promoting bacteria for biocontrol of plant diseases: Principles, mechanisms of action, and future prospects [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2005, **71**(9): 4951-4959.
- [42] Morales-Cedeño L R, del Carmen Orozco-Mosqueda M, Loez-Lara P D, *et al.* Plant growth-promoting bacterial endophytes as biocontrol agents of pre- and post-harvest diseases: Fundamentals, methods of application and future perspectives [J]. Microbiological Research, 2021, **242**, doi: 10.1016/j.micres.2020.126612.
- [43] Agarwal H, Dowarah B, Baruah P M, *et al.* Endophytes from *Gnetum gnemon* L. can protect seedlings against the infection of phytopathogenic bacterium *Ralstonia solanacearum* as well as promote plant growth in tomato [J]. Microbiological Research, 2020, **238**, doi: 10.1016/j.micres.2020.126503.
- [44] Shaikh S S, Sayyed R Z. Role of plant growth-promoting rhizobacteria and their formulation in biocontrol of plant diseases [A]. In: Arora N K (Ed.). Plant Microbes Symbiosis: Applied Facets[M]. New Delhi: Springer, 2015.
- [45] Rijavec T, Lapanje A. Hydrogen cyanide in the rhizosphere: Not suppressing plant pathogens, but rather regulating availability of phosphate[J]. Frontiers in Microbiology, 2016, **7**, doi: 10.3389/fmicb.2016.01785.
- [46] De Silva N I, Brooks S, Lumyong S, *et al.* Use of endophytes as biocontrol agents[J]. Fungal Biology Reviews, 2019, **33**(2): 133-148.
- [47] Ramamoorthy V, Viswanathan R, Raguchander T, *et al.* Induction of systemic resistance by plant growth promoting rhizobacteria in crop plants against pests and diseases[J]. Crop Protection, 2001, **20**(1): 1-11.
- [48] Ma Y, Rajkumar M, Zhang C, *et al.* Beneficial role of bacterial endophytes in heavy metal phytoremediation [J]. Journal of Environmental Management, 2016, **174**: 14-25.
- [49] Luo C L, Wang S R, Wang Y, *et al.* Effects of EDDS and plant-growth-promoting bacteria on plant uptake of trace metals and PCBs from e-waste-contaminated soil [J]. Journal of Hazardous Materials, 2015, **286**: 379-385.
- [50] Wu K R, Luo J P, Li J X, *et al.* Endophytic bacterium *Buttiauxella* sp. SaSR13 improves plant growth and cadmium accumulation of hyperaccumulator *Sedum alfredii* [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, **25**(22): 21844-21854.
- [51] Akbari S, Abdurahman N H, Yunus R M, *et al.* Biosurfactants—a new frontier for social and environmental safety: a mini review [J]. Biotechnology Research and Innovation, 2018, **2**(1): 81-90.
- [52] Mishra S, Lin Z Q, Pang S M, *et al.* Biosurfactant is a powerful tool for the bioremediation of heavy metals from contaminated soils [J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, **418**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.126253.
- [53] Ravindran A, Sajayan A, Priyadarshini G B, *et al.* Revealing the efficacy of thermostable biosurfactant in heavy metal bioremediation and surface treatment in vegetables[J]. Frontiers in Microbiology, 2020, **11**, doi: 10.3389/fmicb.2020.00222.
- [54] Chen L, Luo S L, Li X J, *et al.* Interaction of Cd-hyperaccumulator *Solanum nigrum* L. and functional endophyte *Pseudomonas* sp. Lk9 on soil heavy metals uptake [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2014, **68**: 300-308.
- [55] Khan A, Singh P, Srivastava A. Synthesis, nature and utility of universal iron chelator - Siderophore: a review [J]. Microbiological Research, 2018, **212-213**: 103-111.
- [56] Ahsan M T, Najam-ul-haq M, Saeed A, *et al.* Augmentation with potential endophytes enhances phytostabilization of Cr in contaminated soil [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, **25**(7): 7021-7032.
- [57] Ashraf M A, Hussain I, Rasheed R, *et al.* Advances in microbe-assisted reclamation of heavy metal contaminated soils over the last decade: a review [J]. Journal of Environmental Management, 2017, **198**: 132-143.
- [58] Ranjard L, Nazaret S, Courmoyer B. Freshwater bacteria can methylate selenium through the thiopurine methyltransferase pathway [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2003, **69**(7): 3784-3790.
- [59] Jacob J M, Karthik C, Saratale R G, *et al.* Biological approaches to tackle heavy metal pollution: a survey of literature [J]. Journal of Environmental Management, 2018, **217**: 56-70.
- [60] Ahemad M. Remediation of metalliferous soils through the heavy metal resistant plant growth promoting bacteria: Paradigms and prospects[J]. Arabian Journal of Chemistry, 2019, **12**(7): 1365-1377.
- [61] Xia L, Tan J Q, Wu P Y, *et al.* Biopolymers extracted from *Klebsiella* sp. and *Bacillus* sp. in wastewater sludge as superb adsorbents for aqueous Hg(II) removal from water [J]. Chemical Physics Letters, 2020, **754**, doi: 10.1016/j.cplett.2020.137689.
- [62] Silambarasan S, Logeswari P, Comejo P, *et al.* Evaluation of the production of exopolysaccharide by plant growth promoting yeast *Rhodotorula* sp. strain CAH2 under abiotic stress conditions[J].

- International Journal of Biological Macromolecules, 2019, **121**: 55-62.
- [63] Gadd G M. Microbial influence on metal mobility and application for bioremediation[J]. Geoderma, 2004, **122**(2-4): 109-119.
- [64] Gadd G M. Bioremedial potential of microbial mechanisms of metal mobilization and immobilization[J]. Current Opinion in Biotechnology, 2000, **11**(3): 271-279.
- [65] Tamayo-Figueroa D P, Castillo E, Brandão P F B. Metal and metalloid immobilization by microbiologically induced carbonates precipitation [J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 2019, **35**(4), doi: 10.1007/s11274-019-2626-9.
- [66] Chen M J, Li Y F, Jiang X R, *et al.* Study on soil physical structure after the bioremediation of Pb pollution using microbial-induced carbonate precipitation methodology [J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, **411**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.125103.
- [67] Sharma P. Efficiency of bacteria and bacterial assisted phytoremediation of heavy metals: an update [J]. Bioresource Technology, 2021, **328**, doi: 10.1016/j.biortech.2021.124835.
- [68] Yin K, Wang Q N, Lv M, *et al.* Microorganism remediation strategies towards heavy metals [J]. Chemical Engineering Journal, 2019, **360**: 1553-1563.
- [69] Voica D M, Bartha L, Banciu H L, *et al.* Heavy metal resistance in halophilic *Bacteria* and *Archaea* [J]. FEMS Microbiology Letters, 2016, **363**(14), doi: 10.1093/femsle/fnw146.
- [70] Mathew D C, Mathew G M, Gicana R G, *et al.* Genome sequence of *Photobacterium halotolerans* MELD1, with mercury reductase (*merA*), isolated from *Phragmites australis* [J]. Microbiology Resource Announcements, 2015, **3**(3), doi: 10.1128/genomeA.00530-15.
- [71] Giovanella P, Cabral L, Bento F M, *et al.* Mercury (II) removal by resistant bacterial isolates and mercuric (II) reductase activity in a new strain of *Pseudomonas* sp. B50A [J]. New Biotechnology, 2016, **33**(1): 216-223.
- [72] Ayangbenro A S, Babalola O O. A new strategy for heavy metal polluted environments: a review of microbial biosorbents [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2017, **14**(1), doi: 10.3390/ijerph14010094.
- [73] Barkay T, Schaefer J. Metal and radionuclide bioremediation: issues, considerations and potentials [J]. Current Opinion in Microbiology, 2001, **4**(3): 318-323.
- [74] Priyadarshane M, Das S. Biosorption and removal of toxic heavy metals by metal tolerating bacteria for bioremediation of metal contamination: a comprehensive review [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2021, **9**(1), doi: 10.1016/j.jece.2020.104686.
- [75] Xu S Z, Xing Y H, Liu S, *et al.* Characterization of Cd<sup>2+</sup> biosorption by *Pseudomonas* sp. strain 375, a novel biosorbent isolated from soil polluted with heavy metals in Southern China [J]. Chemosphere, 2020, **240**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.124893.
- [76] Mahar A, Wang P, Ali A, *et al.* Challenges and opportunities in the phytoremediation of heavy metals contaminated soils: a review [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2016, **126**: 111-121.
- [77] Ma Y, Rajkumar M, Zhang C, *et al.* Inoculation of *Brassica oxyrrhina* with plant growth promoting bacteria for the improvement of heavy metal phytoremediation under drought conditions [J]. Journal of Hazardous Materials, 2016, **320**: 36-44.
- [78] Bruno L B, Anbuganesan V, Karthik C, *et al.* Enhanced phytoextraction of multi-metal contaminated soils under increased atmospheric temperature by bioaugmentation with plant growth promoting *Bacillus cereus* [J]. Journal of Environmental Management, 2021, **298**, doi: 10.1016/j.jenvman.2021.112553.
- [79] Silambarasan S, Logeswari P, Valentine A, *et al.* Role of *Curtobacterium herbarum* strain CAH5 on aluminum bioaccumulation and enhancement of *Lactuca sativa* growth under aluminum and drought stresses [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019, **183**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2019.109573.
- [80] Ma Y, Rajkumar M, Moreno A, *et al.* Serpentine endophytic bacterium *Pseudomonas azotoformans* ASS1 accelerates phytoremediation of soil metals under drought stress [J]. Chemosphere, 2017, **185**: 75-85.
- [81] Silambarasan S, Logeswari P, Valentine A, *et al.* *Pseudomonas citronellolis* strain SLP6 enhances the phytoremediation efficiency of *Helianthus annuus* in copper contaminated soils under salinity stress [J]. Plant and Soil, 2020, **457**(1-2): 241-253.
- [82] Matsui K, Endo G. Mercury bioremediation by mercury resistance transposon-mediated in situ molecular breeding [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2018, **102**(7): 3037-3048.
- [83] Amin A, Latif Z. Screening of mercury-resistant and indole-3-acetic acid producing bacterial-consortium for growth promotion of *Cicer arietinum* L. [J]. Journal of Basic Microbiology, 2017, **57**(3): 204-217.
- [84] Lin H, You S H, Liu L H. Characterization of microbial communities, identification of Cr (VI) reducing bacteria in constructed wetland and Cr (VI) removal ability of *Bacillus cereus* [J]. Scientific Reports, 2019, **9**(1), doi: 10.1038/s41598-019-49333-4.
- [85] Song Y Q, Shahir S, Abd Manan F. Bacterial inoculant-assisted phytoremediation of heavy metal-contaminated soil: Inoculant development and the inoculation effects [J]. Biologia, 2021, **76**(9): 2675-2685.
- [86] 宋晓, 陈莉, 李建芬, 等. 增施微生物菌剂对设施土壤理化性质及微生物的影响 [J]. 安徽农业科学, 2021, **49**(21): 169-171.
- Song X, Chen L, Li J F, *et al.* Effects of microbial agents on physical and chemical properties and microbial biomass of greenhouse soil [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2021, **49**(21): 169-171.
- [87] Ma Y. Seed coating with beneficial microorganisms for precision agriculture [J]. Biotechnology Advances, 2019, **37**(7), doi: 10.1016/j.biotechadv.2019.107423.
- [88] Tu C, Wei J, Guan F, *et al.* Biochar and bacteria inoculated biochar enhanced Cd and Cu immobilization and enzymatic activity in a polluted soil [J]. Environment International, 2020, **137**, doi: 10.1016/j.envint.2020.105576.
- [89] Santos M S, Nogueira M A, Hungria M. Microbial inoculants: reviewing the past, discussing the present and previewing an outstanding future for the use of beneficial bacteria in agriculture [J]. AMB Express, 2019, **9**(1), doi: 10.1186/s13568-019-0932-0.
- [90] Wang X, Hu K, Xu Q, *et al.* Immobilization of Cd using mixed *Enterobacter* and *Comamonas* bacterial reagents in pot experiments with *Brassica rapa* L. [J]. Environmental Science & Technology, 2020, **54**(24): 15731-15741.
- [91] Trabelsi D, Mhamdi R. Microbial inoculants and their impact on soil microbial communities: A review [J]. Biomed Research International, 2013, **2013**, doi: 10.1155/2013/863240.

## CONTENTS

Temporal and Spatial Variation Characteristics of Heavy Metal in Atmospheric Deposition in China from 2000 to 2018 .....	CHEN Qi-yong, GAO Yun-bing, NI Run-xiang, <i>et al.</i>	(4413)
Simulation of PM <sub>2.5</sub> Concentration Based on Optimized Indexes of 2D/3D Urban Form .....	LI Sha, ZOU Bin, LIU Ning, <i>et al.</i>	(4425)
Characteristics of Carbonaceous Species in PM <sub>2.5</sub> in Chengdu Under the Background of Emission Reduction .....	CHEN Lu-yao, YU Yang-chun, HUANG Xiao-juan, <i>et al.</i>	(4438)
Characteristics and Health Risk Assessment of Trace Elements in Atmospheric PM <sub>1</sub> During Autumn and Winter in Qingdao .....	LIU Zi-yang, ZHANG Yi-sheng, ZHANG Hou-yong, <i>et al.</i>	(4448)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Atmospheric PM <sub>2.5</sub> -bound Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Port Area .....	WANG Peng-cheng, YANG Ling-xiao, BIE Shu-jun, <i>et al.</i>	(4458)
Size Distribution and Source Apportionment of Road Particles During Winter in Tianjin .....	ZHANG Guo-tao, YIN Bao-hui, BAI Wen-yu, <i>et al.</i>	(4467)
Characteristics and Impact Factors of Number Concentration of Primary Biological Aerosol Particles in Beijing .....	LIANG Lin-lin, LIU Chang, LIU Xu-yan, <i>et al.</i>	(4475)
Characteristic Analysis and Source Apportionment of VOCs in Urban Areas of Beijing in Summer .....	MENG Xiang-lai, SUN Yang, LIAO Ting-ting, <i>et al.</i>	(4484)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds (VOCs) in a Typical Industrial Area in Dongguan During Periods of Ozone and Non-ozone Pollution in Summer .....	ZHOU Zhen, XIAO Lin-hai, FEI Lei-lei, <i>et al.</i>	(4497)
Temporal and Spatial Variation in Odor Pollution and Membrane Barrier Effect in Municipal Solid Waste Landfill .....	HE Pin-jing, LI Jian-chen, LÜ Fan, <i>et al.</i>	(4506)
Comparison of Health Risk from Sources of Perfluoroalkyl Substances in Taihu Lake for Different Years .....	WU Ting, SUN Shan-wei, FAN Jing-pu, <i>et al.</i>	(4513)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Typical and Emerging Per- and Polyfluoroalkylated Substances in Tuojiang River Basin .....	SONG Jiao-jiao, WANG Yi-mei, SUN Jing, <i>et al.</i>	(4522)
Speciation and Risk of Heavy Metals in Surface Sediments of Different Types of Water Bodies in Baiyangdian Lake .....	XU Meng-ya, ZHANG Chao, SHAN Bao-qing, <i>et al.</i>	(4532)
Distribution Coefficient of QNs in Urban Typical Water and Its Main Environmental Influencing Factors .....	JU Ze-jia, FU Yu, ZHAO Xin-yu, <i>et al.</i>	(4543)
Ecological Risk Assessment of Quinolones Antibiotics and the Correlation Analysis Between QNs and Physical-Chemical Parameters in Groundwater, Shijiazhuang City .....	CHEN Hui, JU Ze-jia, ZHAO Xin-yu, <i>et al.</i>	(4556)
Characteristics and Sources of DOM in Lake Sediments Under Different Inundation Environments .....	CHEN Jia, LI Zhong-wu, JIN Chang-sheng, <i>et al.</i>	(4566)
Characteristics of Phytoplankton Community Structure and Their Relationships with Environmental Factors in Autumn in Qinhe River Basin of Jincheng Region .....	GAO Meng-die, LI Yan-fen, LI Yan-li, <i>et al.</i>	(4576)
Integrated Assessment of Runoff Quality from Green Roofs with Different Configurations .....	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, YAN Jing, <i>et al.</i>	(4587)
Degradation of Chloroquine Phosphate by UV-activated Persulfate .....	LI Yang, XU Bo-hui, DENG Lin, <i>et al.</i>	(4597)
Removal Performance of Suspended Solid (SS) and Organic Compounds in the Pre-treatment of Actual Pharmaceutical Wastewater by Microbubble Ozonation .....	LIU Chun, CHEN Rui, ZHANG Jing, <i>et al.</i>	(4608)
Effects of Wastewater Discharge on Antibiotic Resistance Genes and Microbial Community in a Coastal Area .....	CHEN Jia-yu, SU Zhi-guo, YAO Peng-cheng, <i>et al.</i>	(4616)
Effects of Biochar and Straw Returning on Soil Fungal Community Structure Diversity in Cotton Field with Long-term Brackish Water Irrigation .....	GUO Xiao-wen, CHEN Jing, LU Xiao-yu, <i>et al.</i>	(4625)
Effects of Organic Materials on Phosphorus Fractions and <i>phoD</i> -harboring Bacterial Community in Karst Soil .....	XIA Xin, QIAO Hang, SUN Qi, <i>et al.</i>	(4636)
Effects of Different Vegetation Types on Soil Microbial Functional Genes and Enzyme Activities in Reclaimed Coal Mine .....	NING Yue-wei, LIU Yong, ZHANG Hong, <i>et al.</i>	(4647)
Effects of Biochar Application on Yellow Soil Nutrients and Enzyme Activities .....	YUAN Fang, LI Kai-yu, YANG Hui, <i>et al.</i>	(4655)
Changes in Soil Bacterial Community Diversity in Degraded Patches of Alpine Meadow in the Source Area of the Yellow River .....	SUN Hua-fang, LI Xi-lai, JIN Li-qun, <i>et al.</i>	(4662)
Effects of Simulated Nitrogen Deposition on Soil Microbial Carbon Metabolism in <i>Calamagrostis angustifolia</i> Wetland in Sanjiang Plain .....	WENG Xiao-hong, SUI Xin, LI Meng-sha, <i>et al.</i>	(4674)
Spatial Distribution of Quinolone Antibiotics and Its Correlation Relationship with Microbial Community in Soil of Shijiazhuang City .....	ZHAO Xin-yu, JU Ze-jia, CHEN Hui, <i>et al.</i>	(4684)
Composition Characteristics and Construction Mechanism of Microbial Community on Microplastic Surface in Typical Redox Environments .....	GONG Zhi-wei, MA Jie, SU Qu, <i>et al.</i>	(4697)
Annual Nitrogen Removal Efficiency and Change in Abundance of Nitrogen Cycling Microorganisms in Swine Wastewater Treated by Crop Straw Materials .....	LIU Ming-yu, XIA Meng-hua, JIANG Lei, <i>et al.</i>	(4706)
Effects of External Carbon Sources on Ultimate Nitrogen Removal Performance and Microbial Community in Secondary Effluent Treating Process .....	WANG Wei, ZHAO Zhong-yuan, ZHANG Xin, <i>et al.</i>	(4717)
Microbial Community Structure of Activated Sludge for Total Nitrogen Upgrading Project .....	LI Hai-song, WANG Ke-dan, CHEN Xiao-lei, <i>et al.</i>	(4727)
Analysis of Microbial Interaction Law of Mud Membrane in IFAS Process for Treating Low Carbon Source Sewage in South China .....	HE Jun-guo, JIANG Wei-xun, HE Zhuo-yi, <i>et al.</i>	(4736)
Abundances and Morphology Patterns of Microplastics Under Different Land Use Types on the Loess Plateau .....	HAO Yong-li, HU Ya-xian, BAI Xiao-xiong, <i>et al.</i>	(4748)
Evaluation of Heavy Metal Content, Sources, and Potential Ecological Risks in Soils of Southern Hilly Areas .....	WANG Yu, XIN Cun-lin, YU Shi, <i>et al.</i>	(4756)
Risk Assessment and Attribution Analysis of "Five Toxic" Heavy Metals in Cultivated Land in Lanzhou .....	ZHANG Li-rui, PENG Xin-bo, MA Yan-long, <i>et al.</i>	(4767)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Farmland Soils and Crops in Luancheng, Shijiazhuang City .....	MENG Xiao-fei, GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, <i>et al.</i>	(4779)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Antimony in Typical Urban Soil .....	SHEN Cheng, YE Wen-juan, QIAN Shi-ying, <i>et al.</i>	(4791)
Contamination Assessment and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in Typical Villages and Towns in a Nonferrous Metal Mining City .....	WANG Feng, HUANG Yan-huan, LI Ru-zhong, <i>et al.</i>	(4800)
Effect of Citric Acid and Mowing on Enhancing the Remediation of Cadmium Contaminated Soil by Napier Grass ( <i>Pennisetum purpureum</i> Schum) .....	TANG Qi, WU Gang-fan, GU Jiao-feng, <i>et al.</i>	(4810)
Arsenic Methylation Efficiency Changes During Paddy Soil Drying and Its Key Influencing Factors Analysis .....	ZHANG Yue, LI Ling-yi, WEN Jiong, <i>et al.</i>	(4820)
Effects of Exogenous Jasmonic Acid on Arsenic Accumulation and Response to Stress in Roots of Rice Seedlings .....	LI Yan, HUANG Yi-zong, BAO Qiong-li, <i>et al.</i>	(4831)
Effects of Straw Returning and Fertilizer Application on Soil Nutrients and Winter Wheat Yield .....	SONG Jia-jie, XU Xi-yang, BAI Jin-ze, <i>et al.</i>	(4839)
Effect of Winter Cover Cropping on Soil Greenhouse Gas Emissions in a Dryland Spring Maize Field on the Loess Plateau of China .....	ZHANG Shao-hong, WANG Jun, FANG Zhen-wen, <i>et al.</i>	(4848)
Detection of Influencing Factors of Spatial Variability of Soil Respiration in Pangqiangou Nature Reserve .....	LI Xiao-min, YAN Jun-xia, DU Zi-qiang, <i>et al.</i>	(4858)
Temporal and Spatial Variation Characteristics of Methane, Carbon Dioxide, and Nitrous Oxide Concentrations and the Influencing Factors in Small Aquaculture Pond .....	SHI Jie, ZHANG Mi, QIU Ji-li, <i>et al.</i>	(4867)
Effect of Butyl Xanthate on Pb <sup>2+</sup> and Cd <sup>2+</sup> Adsorption by Soil Around a Dressing Plant .....	HU Zhi-hao, GUO Zhao-hui, RAN Hong-zhen, <i>et al.</i>	(4878)
Sorption Mechanism and Site Energy Distribution of Acetaminophen on Straw-derived Biochar .....	SHANG Cen-yao, GU Ruo-ting, ZHANG Qiang, <i>et al.</i>	(4888)
Spatial-temporal Variations and Their Driving Forces of the Ecological Vulnerability in the Loess Plateau .....	ZHANG Liang-xia, FAN Jiang-wen, ZHANG Hai-yan, <i>et al.</i>	(4902)
Mechanism and Application of Plant Growth-Promoting Bacteria in Heavy Metal Bioremediation .....	MA Ying, WANG Yue, SHI Xiao-jun, <i>et al.</i>	(4911)