芽孢杆菌在重金属污染土壤修复中的研究进展＊

杨文玲】 杜志敏】 孙召华2周伏忠】 安明理】 雷 高】 魏传军】 巩 涛屏

(1.河南省科学院生物研究所有限责任公司，河南 郑州450008；.河南省地震局，河南 郑州450016)

摘要芽抱杆菌*(Bacillus)*因生长快、表面积大、抗逆性强等优点在重金属污染土壤修复方面表现出了广阔的应用前景。对 近年来报道的具有重金属污染土壤修复功能的芽孢杆菌种类进行了总结，梳理了其作用机制，并对其处理重金属污染的分子生物学 机理进行了分析归纳，结果显示，已有20种以上芽抱杆菌表现出了重金属污染土壤修复功能，主要修复机制有生物溶解与沉淀、生 物吸附与富集以及生物转化作用3种。最后对芽抱杆菌修复重金属污染土壤的前景进行了展望，以期为后续研究提供思路与参考。

关键词 芽抱杆菌 铅镉污染 修复 抗 性基因 基 因组学

D0l：10.15985/j.cnki.1001-3865.2021.06.017

**Research progress of** *Bacillus* **in remediation of heavy metal contaminated soil** *YANG Wenling1 ,DU Zhimin' , SUN Zhaohua2 ^ZHOU Fuzhong1 ,AN Mingli1 , LEI Gao1 , WEI Chuanjun1 , GONG Tao1.* **(1.** *Institute of Biology Co.***,** *Ltd., Henan Academy of Sciencss , Zhengzhou Henan ,* 450008 ； 2. *Henan Earthquake Agency , Zhengzhou Henan ,* 450016)

**Abstract**: *Bacillus* has broad application prospects in remediation of heavy metal contaminated soil due to its

fast growth,large surface area and strong stress resistance. In this paper, the species of *Bacillus* with function of heavy metal contaminated soil remediation in recent years were summarized, and the mechanisms were summarized. The molecular mechanism of heavy metal contaminated soil remediation was also analyzed and summarized. Results showedthatmorethan20speciesof*Bacilus* showedfunctionofheavy metalcontaminatedsoilremediation andthe main remediation mechanisms were biological dissolution and precipitation，biosorption and enrichment and biotransformation. Finally,the prospect of heavy metal contaminated soil remediation by *Bacillus* was provided,so as toprovidenewstudyideaforthefurtherstudyofheavy metalcontaminatedsoilremediation．

**Keywords**: *Bacillus* ； lead and cadmium pollution； remediation； resistance gene； genomics

近年来 ，随着我国经济及工业化的快速发展，工 矿企业、农业及生活等方面排放的重金属污染物逐 渐增加，土壤重金属污染已经成为制约我国工农业 可持续发展的重要因素［1］。2014年《全国土壤污染 状况调查公报》显示，Cd、Ni、As、Cu、Pb、Hg、Cr、Zn 点位超标率合计达到了21.7％［2］。

土壤中重金属的累积会影响营养元素的存在状 态， 导致土壤质量及生产力下降， 重金属被植物 吸收 后， 对植物的形态结构、生 理代谢、信 号传导 及遗传 等方面都会产生毒害作用， 严重影响 植物的 生长发 育。重金属污染最终的后果是影响人类健康， 食用、 吸入或者暴露于重金属污染环境， 都 将对人 体的健 康造成直接或间接影响［3］。对重金属污染环境进行 有效治理， 对于提高土 壤生产 力， 改善生态环境， 保 护食品 安 全， 保 障 人 体 健 康， 具有重要的现实意 义［4］。微生物修复技术与传统的理化修复技术相 比 ， 具有经济有效、环境友好、绿色生态等优点， 受到 了国内外学者的 广泛 关 注， 已 成 为 重 金 属 污 染 土 壤 修复领域的热点。

芽抱杆菌*(Bacillus)*是一类广泛存在于耕地、林 地、草地等生态环境的微生物，他们对外界有害因子 抵抗力强，能够与陆生植物根系形成共生关系， 是一 种重要的农业促生菌［5］。目前关于芽抱杆菌在重金 属污染治理方面的应用越来越多， 其在重金属污染 土壤修复中的作用也越来越得到认可［6］。本研究对 重金属污染土壤芽抱杆菌修复技术进行了分析与总 结，并尝试从基因水平探讨芽抱杆菌对重金属的作 用机制， 再对重金属污染土壤修复技术进行 了展望， 以期让芽抱杆菌在我国重金属污染土壤修复中发挥 更大的作用。

第一作者：杨文玲，女，1983年生，博士，副研究员，主要从事重金属污染土壤修复研究」通讯作者。

\*国家自然科学基金资助项目(N。.31800361)；河南省科学院科研项目(No. 18JK16012、N。.210405009、N。.210605007”河南省科技攻关 项 目 ( N o .212102310227 、 N o .212102310541)。

环境污染与防治第**43**卷第**6**期**2021**年**6**月

菌种

Cr、Cd、Zn

Pb、Cd、Cr、Ag

Pb.Cr

Cd、Cr、Pb、Ag

IIg、Cu、Zn、Cd

Pb

壁芽 抱杆 菌 *(Bacilus muralis*

Hg

1具有重金属污染土壤修复功能的芽抱杆菌种类

芽抱杆菌因生长快、表面积大、对环境要求低、 抗逆性强等优势，已在重金属污染治理中得到了广 泛的应用。表1罗列了近年来对重金属污染土壤具 有修复能力的芽抱杆菌卩灯，研究较多的有枯草芽 抱杆菌、蜡样芽抱杆菌、地衣芽抱杆菌、巨大芽抱 杆菌。

表1具有重金属污染土壤修复能力的芽抱杆菌

Table 1 *Bacillus* capable of heavy metal  
contaminated soil remediation

重金属

枯草芽抱杆菌*(Bacillus sub Lilis')*

巨大芽抱杆菌*(Bacillus megaLerium')*沙福芽抱杆菌*(Bacillus safensis)*蜡样芽抱杆菌*(Bacillus cereus)*地衣芽抱杆菌*(Bacillus Ucheniformis)*凝结芽抱杆菌*(Bacillus coagulans')*

苏云金芽抱杆菌*(Bacillus Lhuringiensis')* As、Mn、Cd

蕈状芽抱杆菌*(Bacillus mycoides')* Ag

维德曼芽抱杆菌*(Bacillus wiedmannii)* Pb、Cd

溶蛋白酶芽抱杆菌*(Bacillus proLeolyicus')* Pb、Cd

黄海芽抱杆菌*(Bacillus marisfavi)* Cd、Mn、U

西姆芽抱杆菌(Bacillus siamensis') U

弯曲芽抱杆菌(Bacillus fiexus') Cr

球形芽抱杆菌(Bacillus sphaericus') Cr、Cu、Zn

坚强芽抱杆菌(Bacillus firmus') Cr

鲑鱼芽抱杆菌(Bacillus salmalaya ) Zn、As、Cu

花域芽抱杆菌(Bacillus vallismorLis') Zn

越南芽抱杆菌(Bacillus vietnamensis') As、Cd

栗褐芽抱杆菌(.Bacillus badius) Pb

解淀粉芽抱杆菌(Bacillus amyloliquefaciens') Cu

2 芽抱杆菌修复重金属污染土壤的机理

2.1生物溶解与沉淀 在重金属胁迫的条件下*，*芽抱杆菌可以产生大 量的胞外分泌物*，*如有机酸*、*蛋白质*、*多肽*、*脂类等*，* 这些分泌物可以提供大量的阴离子基团与重金属通 过络合*、*螯合等多种方式结合形成沉淀物*，*降低重金 属的生物毒性陵曲。SARANYA等购将枯草芽抱 杆菌与蜡样芽抱杆菌分泌的脂蛋白类生物表面活性 剂用于含铬废水的处理*，*结果显示在阳离子生物表 面活性剂浓度最佳时*，*通过配位键合作用*，*水溶液中 Cr(皿)的最大去除率达到了 98%。HAN等〔幻从 Cd和Pb污染农田白菜根际土壤中分离到重金属固 定化细菌——巨大芽抱杆菌N3,N3可以产生尿素 酶、脱落酸和吲哚-3-乙酸，通过胞外吸附和生物沉 • 760 •

淀以及提高土壤溶液pH来降低Cd和Pb的毒性, 其对白菜叶片Cd和Pb的去除率可分别达到79.7% 与83.5%。KHAN等〔27〕发现枯草芽抱杆菌可以利 用铁载体的金属螯合特性来降低环境中Cd(H)的 含量，在铁载体存在下，其对Cd(H)的胞内积累提 高了 5.22倍。BELOGOLOVA等〔28〕在研究根际细 菌作用下，含铅化合物在植物体内的迁移转化及其 在植物体内的积累时发现，在接种固氮菌和根际芽 抱杆菌的土壤中，P b的迁移增加；根及根际土壤中 的Pb与铁氢化物螯合，使植物地上部分对Pb的吸 收减少。

1. 生物吸附与富集

生物吸附与富集通过细胞表面的官能团、聚合 物等对重金属吸附后，由细胞的转运系统将重金属 运送入细胞，被细胞代谢物吸附、固定形成重金属累 积效应。 芽抱杆菌胞外聚合物中含有大量的氨基、 巯基、羟基、羧基、磷酸基和酰胺基等活性基团，这些 基团与重金属离子结合，从而使环境中的重金属离 子被吸附［29］。 CHEN 等［30］研究蜡样芽抱杆菌12-2 对Pb(H )吸附时发现，静电吸附是主要驱动力，而细 菌的羧基、酰胺基和磷酸基为固定Pb(H )提供了结 合位点。 通过静电吸附、离子交换和功能基团螯合 作用的协同作用，Pb( H)快速吸附在蜡样芽抱杆 菌12-2上。SUN等利用地衣芽抱杆菌研究了 生物吸附剂对Ag( I )的吸附作用，在优化条件 下，Ag( I )的生物吸附量和吸附率分别达到73.6 mg/g和73.6%，傅立叶变换红外光谱(FTIR )结 果表明，在地衣芽抱杆菌中，酰胺基和羧基是与 Ag( I )结合的主要活性基团。OVES等［32］以苏 云金芽抱杆菌为研究对象，研究了 Cd、Cr、Cu、 Pb、Ni等重金属的生物吸附，菌株对Ni、Cu、Cd 都表现出了较好的吸附效果( 吸 附 率 分 别 为 94.0% .91.8% 和 87.0%) ； FTIR 分析显示氨基、 羧基、羟基和羰基参与了重金属的生物吸附。 NAIK等［33］利用蜡样芽抱杆菌对电镀废水中的 Cr(巾)进行了脱毒研究，电感耦合等离子体原子 发射光谱和原子吸收光谱测定结果显示，该菌对 75%以上的Cr(巾)有去除作用；用尸丁氏研究了该 菌细胞表面官能团的构象变化，发现羧基、磷酸 基、酰胺基等官能团是Cr(巾)的吸收和解毒过程 中的重要组成部分 。

1. 生物转 化作用

生物转化作用是指细胞通过氧化还原、甲基化 和去甲基化以及生物矿化等作用改变重金属离子的

溶解性、迁移性以及毒性，将高毒态转化为无毒态或 低毒态，从而实现对重金属解毒的过程。重金属价 态是决定其毒性的重要因素，芽抱杆菌对重金属元 素的氧化还原是其重要的解毒机制之一，如蜡样芽 抱杆菌、枯草芽抱杆菌以及巨大芽抱杆菌可以通过 自身分泌的酶改变重金属存在的价态，使高毒性的 Cr(巾)还原为低毒性的Cr(皿)，从而降低Cr的毒 性［34］。芽抱杆菌对重金属的生物矿化作用可降低 其生物有效性和迁移能力，如芽抱杆菌KK1能将高 毒性的Pb(N03)转化为溶解性较差的PbS以及在 常态下无毒的PbC03或PbSi03,将Pb的有效性降 低 36%［35］。ABDEL M0NEM 等［36］研究了 枯草芽 抱杆菌117S对Ni的去除作用，该菌株对Ni的最大 吸收量为351.6 gg/mL,进行细胞羧基酯化、细胞氨 基甲基化、丙酮抽提菌体脂类或苯抽提菌体脂类处 理后，该菌株对 Ni 的生物去除能力显著降低了 22.0%〜64.9%*。*

3芽抱杆菌修复重金属污染土壤的分子生物学研 究进展

3.1 重金属抗性相关基因

细菌对重金属的抗性是一个复杂的过程，其作 用机制主要是由许多基因在遗传水平上决定的。 随 着基因组学和相关分子生物学的发展，近年来许多 与重金属抗性相关的基因也得以鉴定与分离，比如， 抗 汞 基 因 *merA*、*merE*，抗铜基因 *pcoA*、*pcoR*、 *cusABC*，抗铬基因*chrA*、*chrB*，抗铅基因*pbrA*、 *pbrD*，抗镍基因*nikA*、*ncrA*等。这些基因从作用 机理角度又可分为分别参与Zn/Co/Cr、Zn/Co/Cd、 Mn、 Ni、 Hg 和 Cu 转 运 的 基 因 *czcABC*、 *mdrL*、 *mncA、niR/ncA、meE* 和 *cop AB / cusABC/pcoR ,* 分别参与Cd、Cu、Ni和Pb生物吸附的基因*cadBD、 cusF、niA*和*pbrD ,*分别参与Hg、As和Cu氧化 还原的基因 *merA* 、*arsB* 和*coA*等［37-39］。这些基 因的分离与鉴定极大地加速了重金属抗性菌株的 筛选与基因工程菌的构建。比如，HUANG等⑷ 研究使用 *rhd* 和 *chrA*作为PAHs降解和Cr(巾)抗 性的基因标记,从10284 株菌株中筛选到1195 株能够同时降解有机污染物和抵抗重金属污染的 细菌,其中芽抱杆菌是主要的微生物菌群。 AMIN 等［41］将抗汞基因*merE*克隆到pHLV载体中*,*构 建表达重组质粒pHLMerE,转化大肠杆菌*(Esche­richia ci* C43 (DE3 )细胞进行过表达，获得了 MerE 蛋白。

3.2 基因组学在芽孢杆菌修复重金属 污 染 土 壤 研 究中的应用 近年来,随着现代分子生物学和生物信息学的

迅猛发展,对微生物修复的研究也从微生物生理适 应现象的宏观层面发展到内在机制的微观分子层 面。 尤其是高通量测序技术的飞速发展,大量芽抱 杆菌基因组测序完成,到目前为止,在 Genenbank (h**t**ps：//www.ncbi.nlm.nih.gov/genome/？term =Bacillus)公布基因组的芽抱杆菌已达260株以 上,可获得的组装数据达9900 条以上,这些海量的 基因组数据提供了大量芽抱杆菌遗传信息资源,为 发掘重金属抗性新基因及探究抗性机理提供了许多 线索和启示。 CABALLER0 等［42］对蜡样芽抱杆菌 CITVM-11.1 进行了全基因组测序并进行了基因功 能的预测,在该基因组中发现了3 个抗砷基因,2 个 抗铜基因,3 个钴-锌-镉抗性基因,1 个抗汞基因,1 个抗铝基因，4个抗碲基因。LI等际〕应用基因组序 列分析和比较基因组分析方法，研究了芽抱杆菌S3 的抗性机制和进化关系,通过分析发现了30 种以上 重金属抗性相关基因，利用基因 *aioB* 、*arsB* 和 *arsC* 为探针，探讨了芽抱杆菌S3中抗锑基因的起源和进 化，揭示了芽抱杆菌属之间的进化关系和水平基因 转移(HGT)事件。嗜热芽抱杆菌*(Bacillus stearo*- *thermophilus* )SK3-4 是一株耐铝嗜热细菌， LIM

等［44］对其转录组进行测序发现，诱导条件下，有708 个基因差异表达(倍数变化＞2.00),其中316个基 因被上调，而347个基因被下调，为该菌耐铝分子机 制阐述提供了重要的研究数据。

4展望

重金属污染土壤修复技术在实际应用上还存在 很多局限，要达到经济与效率的统一也需要长久努 力。 今后的发展可以从以下几个方面入手：

1. 针对重金属污染的特点，继续开展生长迅 速、起效快、耐受性强的高效菌株的筛选与驯化，持 续扩展高效菌株的来源，不断挖掘可协同修复的细 菌、真菌进行优化组合，提高重金属污染土壤修复 效率。
2. 继续探索适合与芽抱杆菌联合修复的其他 生物类群，尤其是生长迅速、生物量大、耐受性强的 重金属富集植物。 芽抱杆菌-植物联合修复技术集 合了芽抱杆菌修复与植物修复两者的优点。 一方 面，植物在生长过程中会向土壤分泌有机物，土壤根 际微生物获得来自植物的营养，种类更加丰富，代谢

环境污染与防治 第**43** 卷 第**6** 期 **2021** 年**6** 月

更加旺盛。另一方面，芽抱杆菌作为一种重要的促 生菌，分解这类分泌物可产生有益的代谢产物，改变 重金属存在状态，降低重金属的植物毒性，促进植物 对营养元素的吸收，从而增强植物宿主对重金属的 耐受性，促进植物的生长。

（3 ）结合现代分子生物学与大数据分析技术， 从分子领域深度研究芽抱杆菌修复机理，为实际工 程应用提供理论支持。近年来高通量测序技术与基 因组学兴起，越来越多的芽抱杆菌全基因组测序完 成，各种重金属胁迫下基因表达组图谱信息公布，都 为微观分子水平研究芽抱杆菌修复重金属污染土壤 提供了许多信息，科研人员应从各种组学的海量数 据中发掘、整理和获得有效信息，为基因工程菌株的 构建或利用基因工程、合成生物学技术培育优良菌 株提供理论支持。此外，基因组学等为重金属污染 土壤修复研究提供了大量信息资源，为筛选重金属 抗性菌株提供了大量的选择标记，研究人员应该以 此为契机，探索开发高效率、高通量的抗性菌株筛选 新技术。

参考文献：

「叮 LI F,ZHANG J,LIU W,et al.An exploration of an integrated stochastic-fuzzy pollution assessment for heavy metals in urban topsoilbasedon metalenrichmentandbioaccessibility[J].Sci- enceoftheTotalEnvironment,2018,644（12）：649-660.

「2]环境保护部，国土资源部.全国土壤污染状况调查公报[EB/

OL]. http：//www. mee. gov. cn/gkml/sthjbgw/qt/201404/ t20140417\_270670.htm.

SILVA DA ARAlJO C F,LOPES M V, VAZ RIBEIRO M R, et al Cadmium and lead in seafood from the Aratu Bay,Brazil and the human health risk assessment]**〕].**Environmental Moni- toringandAssessment,2016,188：259．

「] WUANA R A,OKIEIMEN F E.Heavy metals in contaminated soils：areview ofsources,chemistry,risksand bestavailable strategiesfor remediation 「J] ISRN Ecology, 2011,2011： 402647．

「5] 张艺灿,刘凤之,王海波．根际溶磷微生物促生机制研究进展

「J] 中国土壤与肥料,2020（2）：1-9．

「6]杨文玲，刘丽，巩涛，等.蜡样芽抱杆菌CP-1对Cr（Vi）还原效果

研究「]•生态科学,019,8（1）:123-129.

「7] SHAH T, MUNSIF F,D'AMATO R,etalLeadtoxicityin- ducedphytotoxicimpactsonrapeseedandclovercanbelow- ered by biofilm forming lead tolerant bacteria 「J] Chemo- sphere,2020,246（5）：125766．

「8] AZADS,FARJANA M,MAZUMDERB,etalMoleculariden- tificationofa*Baci****l****us cereus* strainfrom Murrahbu**f**alo milk showedin vitro bioremediation propertieson selective heavy metals「J] Journalof Advanced Veterinary and Animal Re- search,2020,7（1）：62-68．

「9] XING S C,MI J D,CHEN J Y,et al.Metabolic activity of *Ba-*

*ci****l****us coagulans* R11andthehealth benefitsofandpotential pathogeninhibitionbythisspeciesintheintestinesoflaying hensunderlead exposure「J] Science ofthe Total Environ- ment,2020,709（3）：134507．

「10] ALTOWAYTIW H,DAHAWIA A,SHAHIRSSignificance ofbio-treatmentbyacid washingforenlargementofarsenic desorptioninindigenousarsenic-resistantbacteriafrom gold mine「J] MalaysianJournalofFundamentaland AppliedSci- ences ,2020 ,16 （2 ）：190-195．

「1 叮 HUANG II,ZHAO Y,XU Z,et al.A high Mn（ **H** ）-tolerance strain,*Baci****l****us Lhuringiensis* HM7,isolatedfrom manganese oreanditsbiosorptioncharacteristics「J] PeerJ,2020,8（1/2/ 3/4）：e8589．

「12] MARIANO C,MELLOIS,BARROSB M,etalMercuryal- terstherhizobacterialcommunityinBrazilianwetlandsandit canbebioremediatedbytheplant-bacteriaassociation「J] En- vironmentalScienceand Po**l**ution Research,2020,27（12）： 13550-13564．

「13] SARAN A,IMPERATO V,FERNANDEZ L,et al Phytosta- bilizationofpo**l**uted militarysoilsupportedbybioaugmenta- tion with PGP-traceelementtolerantbacteriaisolatedfrom helianthuspetiolaris「J] Agronomy,2020,10（2）：204．

「14] YU X,DING Z,JIY,etalAnoperonconsistingofaP-type ATPasegeneandatranscriptionalregulatorgeneresponsible forcadmium resistancesin *Baci****l****us vieLamensis* 151-6 and *Baci****l****us marisflavi* 151-25「J] BMC Microbiology,2020,20 （1）：18．

「15] ZHOU L, DONG F Q, ZHANG W,et al. Removal behavior and mechanism ofuranium by *Baci****l****us siamensis* based on spectroscopicanalysis：theroleofbiologicalphosphorus「J]． SpectroscopyandSpectralAnalysis,2020,40（1）：22-28．

「16] TAWILAZ M,ISMAILS,AMR S A,etalA novele**f**icient bioflocculantQZ-7fortheremovalofheavy metalsfromin- dustrialwastewater「J] RSC Advances,2019,48（9）：27825- 27834．

「17] DINGP,SONG W,YANGZ,etalInfluenceofZn（**H** ）stress- inductiononcomponentvariationandsorptionperformanceof extrace**l**ularpolymericsubstances （EPS） from *Baci****l****us val*- *lismorLis*「J] BioprocessandBiosystemsEngineering,2018,41 （6）：781-791．

「18] MALLICKI,BHATTACHARYYA C,MUKHERJIS,etal． E**f**ectiverhizoinoculationandbiofilmformationbyarsenicim- mobilizing halophilic plant growth promoting bacteria （PGPB）isolatedfrom mangroverhizosphere：asteptowards arsenicrhizoremediation 「J] Science ofthe Total Environ- ment,2018,610/611：1239-1250．

「19] SAFITRIA,MAHARDINIP,PRASETYAWANS,etalBio- sorptionofCr（**V** ）inaqueoussolutionusing microorganisms： comparison of the use of *Rhizopus oryzae* , *Bacillus firmus* , and *Trichoderma viride* O]. Materials Science and Engineer- ing2018，299：012023．

「20] VISHAN I，SIVAPRAKASAM S，KALAMDHAD A．Bio- sorptionofleadusing*Baci****l****us badius* AKstrainisolatedfrom compostofgreen waste （waterhyacinth）「J] Environmental Technology2017，38（13/14）：1812-1822．

「21] ZHAO G，JIS L，SUN T，etalProductionofbioflocculants preparedfrom wastewatersupernatantofanaerobicco-diges- tionofcornstraw and molasses「J] Wastewater Treatment Bioresources2017 12（1）：1991-2003．

1. URQUIZA C C,HERNANDEZ I A,MEDINA**〕**,t al.Identi- ficationby MALDI-T0F massspectrometry of mercury-re- sistantbacteriaassociatedwiththerhizosphereofanappleor- chard[J].GeomicrobiologyJournal，2017，34(2)：176-182.
2. JE0NGS，M00N H S，NAM K，etal.Applicationofphos- phate-solubilizingbacteria forenhancingbioavailabilityand phytoextraction of cadmium (Cd) from polluted soil [J]. Chemosphere，2012，88(2)：204-210.
3. F0SS0 KANKEU E，MULABA BAFUBIANDIA F，MAM- BABB，et al.Prediction of metal-adsorptionbehaviour in the remediationofwatercontaminationusingindigenousmicroor- ganisms[ ].ournalofEnvironmental Management，2011，92 (10)：2786-2793.
4. SARANYA P,BHAVANI P,SWARNALATHA S,t al.Bio- sequestration of chromium (川)in an aqueous solution using cationic and anionicbiosurfactants produced from two di**f**er- ent*Baci****l****us* sp.-acomparativestudy[ ].RSC Advances， 2015，98(5)：80596-80611.
5. HAN II, CAI II, WANG X,et al. Heavy metal-immobilizing bacteriaincreasethebiomassandreducetheCdandPbuptake bypakchoi (*Bra****s****ica chinensis* L．)inheavymetal-contamina- tedsoil[J] Ecotoxicology and EnvironmentalSafety,2020, 195 ：110375．
6. KHAN A,GUPTA A,SINGH P,etalSiderophore-assisted cadmium hyperaccumulation in *Baci****l*** *us subtilis*[J]Interna- tionalMicrobiology,2020,23(2)：277-286．
7. BEL0G0L0VA G,G0RDEEVA 0,S0K0L0VA M,etal． Transformationofleadcompoundsinthesoil-plantsystem undertheinfluenceof*Baci****l****us* and*Azotobacter rhizobacteria* [J] ChemistryandEcology,2020,36：220-235．
8. CHAKRAVARTY R,BANERJEEPC．Mechanism of cadmi­um bindingonthece**l** wa**l**ofanacidophilicbacterium[J]． BioresourceTechnology,2012,108(1)：176-183．

[0] CHEN Z,PAN X,CHEN H,t al.Biomineralization of Pb( **U** ) intoPb-hydroxyapatiteinducedby*Baci****l****us cereus* 12-2isola- tedfromlead-zincminetailings[J]JournalofHazardous Ma­terials ,2016 ,301 (1 )：531-537．

1. SUN D H,LI X L,ZHANG G L.Biosorption of Ag( ]\_ ) from aqueoussolutionby*Baci****l****us licheniformis* strainR08[J] Ap­plied Mechanicsand Materials,2013,295／296／297／298：129- 134．
2. 0VES M,KHAN M S,ZAIDIA．Biosorptionofheavy metals by*Baci****l****us thuringiensis* strain 0SM29originatingfromin- dustriale**f**luent contaminated North Indian soil [J] Saudi JournalofBiologicalSciences,2013,20(2)：121-129．
3. NAIK U C,SRIVASTAVA S, THAKUR I S Isolation and characterizationof*Baci****l****us cereus* IST105fromelectroplating e**f**luent for detoxification of hexavalent chromium[J] Envi- ronmentalScienceandPo**l**utionResearch,2012,19(7)：3005-

3014．

1. BANERJEES,MISRA A,CHAUDHURYS,etalA*Baci****l****us* strain TCL isolated from Jharia coalmine with remarkable stress responses,chromium reduction capability and bioreme- diationpotential[J]JournalofHazardousMaterials,2019,367 (5)：215-223．
2. G0VARTHANAN M,LEEKJ,CH0 M,etalSignificanceof autochthonous*Baci****l****us* sp．KK1onbiomineralizationoflead in minetailings[J] Chemosphere,2013,90(8)：2267-2272．
3. ABDEL M0NEM M 0,AL ZUBEIRY A H S,AL GHE- ETHI A A S. Biosorption of nickel by *Pseudomonas cepacia* 120Sand*Bacilus subtilis* 117S[J] Water Science and Tech- nology,2010,61(12)：2994-3007．
4. ADEKANMBIA 0,ADEL0W0 0 0,0K0H AI,etalMet- al-resistanceencodinggene-fingerprintsinsomebacteriaisola- tedfrom wastewatersofselectedprinteriesinIbadan,South- western Nigeria[J]JournalofTaibah UniversityforScience, 2019,13(1)：266-273．
5. CIDREI,PULID0 R P,BURG0S M,etalCopperandzinc toleranceinbacteriaisolatedfromfreshproduce[J]Journalof FoodProtection,2017,80(6)：969-975．
6. FIERR0S R0MER0 G,GmMEZ RAMrREZ M,SHARMA A,etal*c*．*zcD*genefrom *Baci****l****us megaterium* and *Microbac*­*terium liquefaciens* as a potential nickel-vanadium soil po**l** u-

tionbiomarker[J] Journalof Basic Microbiology,2020,60 (1)：22-26．

1. HUANG Y L, WANG Y L,FENG H,etalGenome-guided identificationandcharacterizationofbacteriaforsimultaneous degradation ofpolycyclicaromatic hydrocarbonsand resist­ance to hexavalent chromium[J] InternationalBiodeteriora- tionandBiodegradation,2019,138：78-86．
2. AMIN A, SARWAR A, SALEEM M,etalExpression and purificationoftransmembraneproteinMerEfrom mercury-re­sistant *Baci****l****us cereus*[J] Journalof Microbiologyand Bio­technology ,2019 ,29 (2 )：274-282．
3. CABALLER0 J ,PERALTA C, M0LLA A,etalDraftge- nomesequenceof *Baci****l****us cereus* CITVM-111,astrainex- hibitinginterestingantifungalactivities[J]JournalofMolecu- lar MicrobiologyandBiotechnology,2018,28(1)：47-51．
4. LIJ,GU T,LIL,etalCompletegenomesequencingandcom- parativegenomicanalysesof *Baci****l****us* sp．S3,anovelhyper Sb(!H [-oxidizing bacterium [J]. BMC Microbiology, 2020, 20 (1)：106．
5. LIM J C,THEVARAJ00 S,SELVARATNAM C,etal． Global transcriptomic response of *AnoxybaciUus* sp. SK 3-4 to aluminum exposure [J] Journal of Basic Microbiology, 2017,57(2)：151-161．

编辑：徐婷婷 (收稿日期：2020-08-10)