

# 微生物去除 Cr(VI) 机理以及技术应用现状

李媛媛, 张 杰

(东北林业大学, 黑龙江 哈尔滨 150040)

**摘要:** 铬(Cr)是一种对生物细胞具有高毒性的重金属。微生物法作为一种高效、低成本、绿色的处理重金属铬 Cr(VI)的方法有广阔的应用前景。总结微生物与 Cr(VI)的相互作用,包括 Cr(VI)转运、生物累积, Cr(VI)还原成 Cr(III)和铬酸盐外排,以及相关技术应用研究现状,展望微生物处理重金属铬的前景与方向。

**关键词:** 铬污染;微生物;生物修复;技术应用

**中图分类号:** X505;Q93 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-2767(2017)09-0124-04 DOI:10.11942/j.issn1002-2767.2017.09.0124

含铬化合物由于其广泛应用于各行业而成为地下水、土壤和工业废水中的污染物<sup>[1]</sup>。在环境中铬主要以 Cr(III)和 Cr(VI)形式存在,在水溶液中,铬价态与溶液中 pH、氧化还原电位有关。相比 Cr(VI),Cr(III)衍生物稳定性较好,在环境中主要与有机和无机配体形成稳定的络合物,在中性 pH 的水溶液中,Cr(III)倾向与 OH<sup>-</sup> 缔合形成沉淀<sup>[2]</sup>。铬对生物的影响与其氧化价态以及在细胞中的定位有关<sup>[3]</sup>。Cr(VI)的化合物会对生物体造成严重伤害,包括过敏反应和呼吸道疾病等,然而 Cr(III)又是葡萄糖、脂质和蛋白质组学中必不可少的元素。Cr(VI)毒性主要是由于其还原为 Cr(III),然后 Cr(III)被氧化成 Cr(VI)的过程,在这个过程中,会产生自由基和活性氧(ROS)<sup>[4]</sup>。ROS 产生会导致 DNA、蛋白质和脂质的氧化损伤,并通过与羧基和硫醇基反应来改变细胞内酶的结构和活性<sup>[5]</sup>。在原核微生物中,有关 Cr(VI)还原、外排、摄取机制的相关基因已有较好地研究。目前有报道表明,恶臭假单胞菌分泌的可溶性黄素蛋白 ChrR 是一种铬酸还原酶<sup>[6]</sup>。在需氧条件下,NADH 和 NADPH 作为电子供体将 Cr(VI)还原,通过 ChrR 与 Cr(VI)的结合形成 Cr(V)。ChrR 同时将三个电子转移到铬酸盐以产生 Cr(III)。在厌氧条件下,一些硫酸盐和铁还原细菌的代谢产物如 H<sub>2</sub>S 和 Fe(II)是有效的 Cr(VI)还原剂<sup>[6]</sup>。此外,鉴定出多种 ChrA

同源物。大多数对真菌的研究表明,真菌主要通过吸附或还原机制去除被污染水中的 Cr(VI)。负电荷的铬酸根离子通过静电效应与真菌生物质的带正电荷的基团结合<sup>[6]</sup>。

各种微生物与 Cr(VI)的相互作用机制不同,因为微生物具有多种性质可以影响 Cr 价态、毒性和迁移率。微生物解毒 Cr(VI)的机制可以作为开发新技术以从污染环境中去除 Cr(VI)。在本文中,通过总结近期文献,了解不同微生物与 Cr(VI)的相互作用机制,试图将理论过程与生物技术应用相结合。微生物与 Cr(VI)的相互作用机制涉及主动或被动过程,这些过程包括生物转运,生物积累,生物吸附以及酶促和非酶促介导的 Cr(VI)还原。

## 1 微生物与 Cr(VI)相互作用

### 1.1 Cr 转运

Cr(VI)与 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 阴离子具有相似的结构,它可以通过细菌和真菌中的活性硫酸盐转运蛋白在生物膜上运输<sup>[1]</sup>。另一种铬酸盐转运机制由 ChrA 蛋白质介导,ChrA 属于铬酸盐离子转运蛋白(CHR)超家族中一员,其中包括数百个同系物,ChrA 蛋白由两个序列组成:短链单结构域和长链家族<sup>[5,7]</sup>。细菌对 Cr(VI)的抗性机制主要是 ChrA 蛋白介导铬酸盐的流出,利用质子泵从细胞质中排出铬酸盐<sup>[7]</sup>。真菌中的 ChrA 同系物与细菌中作用相似,在丝状真菌中,CHR-1 蛋白是 CHR 超家族的一个成员,其作为铬酸盐的转运体,使细胞中阴离子积累,对铬酸盐敏感性增加<sup>[8]</sup>。除了经典的铬酸盐输送系统之外,在酿酒酵母中还描述了另一种铬酸盐输送系统,即肌动蛋白介导的内吞作用,该系统未涉及硫酸盐转运蛋白,而是提到一种依赖泛素的转运蛋白<sup>[9]</sup>。相

收稿日期:2017-07-15

项目基金:东北林业大学创新资助项目(201710225301);国家基础科学人才培养基金资助项目(J1210053)

第一作者简介:李媛媛(1994-),女,黑龙江省兰西县人,在读硕士,从事环境微生物研究。E-mail:1069595418@qq.com。

通讯作者:张杰(1972-),女,黑龙江省哈尔滨市人,博士,副教授,从事环境微生物研究。E-mail:zhangjie1972@nefu.edu.cn。

比之下,在微生物细胞中,Cr(III)由于倾向于形成不溶性化合物而以低效率穿越细胞膜。在细胞内 Cr(VI)可以通过酶促或非酶促还原成Cr(III),但迄今尚未发现将 Cr(III)摄入微生物细胞的转运蛋白<sup>[3]</sup>。

1.2 生物累积

微生物能够通过生物吸附和生物吸收两个过程将金属掺入细胞,前一个过程是被动的、非活性生物材料或非代谢依赖性对重金属的积累,而后一个过程是在活细胞中发生的活性摄取,需要代谢和能量支持将金属运输到细胞膜进入细胞。这种主动和被动吸收重金属模式的称为“生物累积”<sup>[10]</sup>。生物吸附依赖于微生物的细胞壁。通过

不同的分析技术,包括傅立叶变换红外光谱(FT-IR)、透射电子显微镜(SEM-EDX)、X 射线衍射分析(XRD),X 射线吸收光谱(XAS)和 X 射线光电子能谱(XPS)<sup>[10]</sup>,发现在细菌细胞壁中与 Cr(VI)结合的官能团(见表 1),包括酰胺、羟基和羧基;真菌黑曲霉细胞壁与 Cr(VI)结合的官能团是羟基、羧基、氨基和羰基。另有研究表明,细菌中蓝细菌<sup>[10]</sup>、固氮菌<sup>[11]</sup>、节杆菌<sup>[12]</sup>、芽孢杆菌<sup>[13]</sup>以及真菌中木霉属<sup>[12]</sup>、施瓦氏酵母可以产生异氰酸酯(EPS)吸附耦合 Cr(VI)。蜡状芽孢杆菌菌株 XMCr-6 生物吸附 Cr(VI)过程可以合成氧化铬纳米颗粒<sup>[14]</sup>。

表 1 微生物细胞壁与 Cr(VI)结合有关的官能团和分析技术

Table 1 Functional groups and analytical techniques related to the binding of microbial cell walls to Cr (VI)

微生物 Microorganism	官能团 Functional group	分析方法 Analysis method	参考文献 Reference
解脂耶氏酵母 <i>Yarrowia lipolytica</i>	羧基,羟基,酰胺	FTIR	[15]
黑曲霉 <i>Aspergillus niger</i>	羟基,羧基,氨基,羰基	FTIR	[16]
丝状芽孢杆菌 <i>Termitomyces clypeatus</i>	羧基,磷酸盐,脂质,巯基,胺基	SEM-EDX,FTIR	[5]
膜醭假丝酵母 <i>Cyberlindnera fabianii</i>	羟基,酰胺,磷酸盐	SEM-EDX,FTIR	[17]
间孢囊菌属 <i>Intrasporangium</i>	羰基,酰胺	EDX,XPS,FTIR	[18]
蜡样芽孢杆菌 ITS105 <i>Bacillus cereus</i> ITS105	羟基,酰胺	TEM,SEM-EDX,FTIR	[14]
不动杆菌 <i>Acinetobacter</i>	酰胺,羟基,羧基,磷酸酯	FTIR	[19]
节杆菌 ps-5 <i>Arthrobacter</i> ps-5	羟基,羰基,醚	FTIR	[5]
链霉菌 <i>Treptomyces werraensis</i>	羟基,羧基	FTIR	[20]

1.3 生物还原

在细菌中,依赖于酶途径 Cr(VI)还原体系主要为可溶性细胞溶质蛋白和细胞膜上不溶性酶<sup>[9]</sup>,许多细菌(包括假单胞菌属,芽孢杆菌属和节杆菌属)都是通过依赖酶还原途径<sup>[5,8]</sup>来去除 Cr(VI)(见表 2)。在假单胞菌属中,与 Cr(VI)还原有关的基因位于质粒中,而在芽孢杆菌中,这些基因位于染色体 DNA 上<sup>[8]</sup>。目前已经分离鉴定了一些细菌铬酸盐还原酶如 ChrR、YieF、NemA 和 LpDH,位于细胞质可溶性成分或细胞膜上;这些酶可以在有氧或无氧的条件下起作用。在真菌青霉菌属曲霉属中对铬酸盐还原酶活性也有相关研究<sup>[21]</sup>。

铬酸盐还原酶主要位于细胞的可溶性部分。在黄曲霉中,铬酸盐还原酶还原 Cr(VI)过程中伴随着生物吸附,说明生物对 Cr(VI)具有复杂的修

复机制,即多种机制共同起作用<sup>[21]</sup>。黑曲霉细胞中葡萄糖氧化酶可以将 Cr(VI)还原成 Cr(III),实现 Cr(VI)的间接还原<sup>[22]</sup>。Rath 等人<sup>[23]</sup>研究微生物培养上清液中的铬酸盐还原酶的还原能力。在有氧条件下,培养上清液,细胞溶质部分以及细胞碎片中都可检测到铬酸盐还原酶活性。

微生物细胞内或者细胞外的代谢产物也可以与 Cr(VI)发生还原反应,这些代谢物包括氨基酸、核苷酸、糖类、维生素、有机酸和谷胱甘肽<sup>[20]</sup>,抗坏血酸也可还原 Cr(VI),核黄素衍生物 FAD 和 FMN 是用于降低铬酸盐的必需辅酶<sup>[1]</sup>。此外,硫酸盐还原菌产生的 H2S 可以独自还原 Cr(VI)<sup>[20]</sup>。在细菌中,代谢产生硫代羧酸可以直接还原 Cr(VI)<sup>[3]</sup>。真菌代谢产物中如有机酸、柠檬酸盐<sup>[24]</sup>和草酸盐<sup>[11]</sup>也可以实现 Cr(VI)的还原。

表 2 用于去除 Cr(VI) 生物技术机理  
Table 2 Biotechnology mechanisms for removal of Cr(VI)

微生物 Microorganism	去除率/% The removal rate	去除机理 Removal mechanism	参考文献 Reference
细菌 Bacteria			
蓝藻 Cyanobacteria	90	生物还原	[25]
变形杆菌 Proteobacteria			
拟杆菌 Bacteroidetes			
芽孢杆菌 <i>Bacillus</i> sp.	100	生物还原	[22]
溶血弧菌 <i>Haemolyticus</i>	90	生物还原	[26]
不动杆菌 <i>Acinetobacter</i>	100	生物还原	[26]
大肠杆菌、枯草芽孢杆菌 <i>E. coli</i> , & <i>subtilis</i>	24	生物吸附	[27]
细菌菌群 Bacterial consortium			
	80	生物还原	[27]
真菌 Fungus			
黑曲霉 <i>Aspergillus niger</i>	90	生物吸附	[22]
复合菌群 Complex fungus	99.9	生物吸附	[28]
塔宾曲霉 <i>Aspergillus tubingensis</i>	100	生物还原	[28]

2 生物技术应用

利用微生物生物吸附和生物还原作用去除环境中的 Cr(VI), 是一种具开发前景的生物技术。目前已经推广应用了几种不同系统的反应器, 用于微生物去除 Cr(VI), 可以使用细菌、真菌的单一培养物, 或不同细菌、真菌的菌群作为微生物吸附剂。在一些生物反应器系统中微生物菌群的投入原则是微生物菌群复合性能好、适用于现场原位处理<sup>[7]</sup>。在厌氧污泥床生物反应器中进行的 SRB 的天然复合菌群对 Cr(VI) 生物修复的非原位研究结果显示, 还原 50 mg·L<sup>-1</sup> Cr(VI) 去除效率达到 90%<sup>[25]</sup>。与间歇性生物反应器相比, 连续填充床柱反应器中培养的细菌菌群(大肠杆菌, 枯草芽孢杆菌), 提高了 Cr(VI) 的还原能力。含有 100 mg·L<sup>-1</sup> Cr(VI) 的水质中, 菌群可吸附 55%~65% 的 Cr(VI)<sup>[27]</sup>。

另一种生物技术方法是利用聚羟基链烷酸酯颗粒、海藻酸钙、藻酸盐珠粒和聚乙烯醇藻酸盐等固定微生物细胞或细胞分泌的还原酶, 也可有效去除 Cr(VI)。初始浓度为 30~60 mg·L<sup>-1</sup> Cr(VI) 连续填充床柱反应器可去除 90% 的 Cr(VI), Ishak 等<sup>[25]</sup>通过海藻酸盐固定铬酸盐还原酶可还原残留的 Cr(VI)。Morales 等<sup>[29]</sup>通过比较丝状真菌绿色木霉在搅拌式生物反应器和同

心管空气提升式生物反应器去除 Cr(VI) 的效率, 发现空气提升式生物反应器是一个比较有潜力的方案; Bahafid<sup>[10]</sup>模拟 Cr(VI) 污染水环境测试了热带假丝酵母去除 Cr(VI) 的能力, 结果显示空气提升式生物反应器可去除 72.2% 初始浓度为 40 mg·L<sup>-1</sup> 的 Cr(VI); Sepehr<sup>[30]</sup>利用空气提升反应器黑曲霉菌株可吸附 88% 的初始浓度为 1 300 mg·L<sup>-1</sup> 的 Cr, 这些结果比同等条件下使用搅拌釜反应器获得的结果更好。

固定化细胞在 Cr(VI) 污染生物修复中的应用是广泛有效的。随着纳米技术的发展, 这一进程也倍受青睐。Pang 等<sup>[31]</sup>利用碳纳米管固定铜绿假单胞菌细胞可以显著提高了酶的稳定性和 Cr(VI) 还原过程, 细菌可在纳米尺度下固定金属离子。关于细胞固定化过程, Robins 等<sup>[32]</sup>应用遗传工程技术开发了一种固定化铬酸盐还原酶的 Cr(VI) 修复系统, 将 HannemA 基因和聚羟基链烷酸酯的融合物转入大肠杆菌, 表明可以通过生物合成稳定且活性较高的 NemA 铬酸盐还原酶, Barak 等人<sup>[33]</sup>获得了可以产生 ChrR6 突变酶的大肠杆菌重组菌株, 具有良好的应用前景。

3 结语

微生物抵抗和去除 Cr(VI) 的机制是不同的。耐受 Cr(VI) 的机制也不同, 包括 Cr(VI) 转运, Cr(VI) 生物积累以及将 Cr(VI) 还原为 Cr(III)。微生物去除 Cr(VI) 通常包括三个阶段, Cr(VI) 与细胞表面的结合, Cr(VI) 转移到细胞中还原成 Cr(III); 微生物还原 Cr(VI) 可以直接通过铬酸盐还原酶在细胞表面、细胞外或细胞内进行, 或间接通过代谢物对 Cr(VI) 进行还原。Cr(VI) 的摄取分两个过程, 主要过程为非代谢依赖性的生物吸附, 进而发生生物累积, 依赖于细胞代谢活性; 同时为 Cr(VI) 选择合适的生物修复策略是非常重要的, 了解微生物抵抗和去除 Cr(VI) 的关键机制, 有助于开发更加经济、环保的潜在生物修复技术。

参考文献:

[1] Madhavi V, Reddy A V B, Reddy K G, et al. An overview on research trends in remediation of chromium [J]. ISCA, 2013, 2(1): 71-83.

[2] Barrera-Diaz C E, Lugo-Lugo V, Bilyeu B. A review of chemical, electrochemical and biological methods for aqueous Cr(VI) reduction [J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, 223-224(2): 1.

[3] Gutiérrez-Corona J F, Romo-Rodríguez P, Santos-Escobar F, et al. Microbial interactions with chromium: basic biological processes and applications in environmental biotechnology [J]. World Journal of Microbiology & Biotechnology, 2016, 32(12): 191.

- [4] Sobol Z, Schiestl R H. Intracellular and extracellular factors influencing Cr(VI) and Cr(III) genotoxicity[J]. Environmental & Molecular Mutagenesis, 2012, 53(2): 94-100.
- [5] Viti C, Marchi E, Decorosi F, et al. Molecular mechanisms of Cr(VI) resistance in bacteria and fungi[J]. Fems Microbiology Reviews, 2014, 38(4): 633.
- [6] Ramirez-Diaz M I, Diaz-Perez C, Vargas E, et al. Mechanisms of bacterial resistance to chromium compounds[J]. Biometals, 2008, 21: 321-332.
- [7] Cheung K H, Gu J D. Mechanism of hexavalent chromium detoxification by microorganisms and bioremediation application potential: A review[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2007, 59(1): 8-15.
- [8] Thatoi H, Das S, Mishra J, et al. Bacterial chromate reductase, a potential enzyme for bioremediation of hexavalent chromium: A review[J]. Journal of Environmental Management, 2014, 146: 383-399.
- [9] Diaz-Pérez C, Cervantes C, Campos-García J, et al. Phylogenetic analysis of the chromate ion transporter (CHR) superfamily[J]. Febs Journal, 2007, 274(23): 6215-6227.
- [10] Floresalvarez L J, Corralesescobosa A R, Cortésenagos C, et al. The *Neurospora crassa*, chr-1 gene is up-regulated by chromate and its encoded CHR-1 protein causes chromate sensitivity and chromium accumulation. [J]. Current Genetics, 2012, 58(5-6): 281.
- [11] Mohan D, Jr C U P. Activated carbons and low cost adsorbents for remediation of tri- and hexavalent chromium from water [J]. Journal of Hazardous Materials, 2006, 137(2): 762.
- [12] Ozturk S, Aslim B. Relationship between chromium(VI) resistance and extracellular polymeric substances (EPS) concentration by some cyanobacterial isolates. [J]. Environmental Science & Pollution Research, 2008, 15(6): 478-480.
- [13] Shuhong Y, Meiping Z, Hong Y, et al. Biosorption of  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$  and  $\text{Cr}^{6+}$  by a novel exopolysaccharide from *Arthrobacter* ps-5. [J]. Carbohydrate Polymers, 2014, 101(1): 50.
- [14] Chang F, Tian C, Liu S, et al. Discrepant hexavalent chromium tolerance and detoxification by two strains of *Trichoderma asperellum*, with high homology[J]. Chemical Engineering Journal, 2016, 298: 75-81.
- [15] Bankar A V, Kumar A R, Zinjarde S S. Removal of chromium (VI) ions from aqueous solution by adsorption onto two marine isolates of *Yarrowia lipolytica*[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 170(1): 487-494.
- [16] Bahafid W, Tahri J N, Sayel H, et al. Bioaugmentation of chromium-polluted soil microcosms with *Candida tropicalis* diminishes phytoavailable chromium. [J]. Journal of Applied Microbiology, 2013, 115(3): 727-734.
- [17] Liu H, Huang J, Zhang S, et al. Chromate interaction with the chromate reducing actinobacterial intrasporangium chromatireducens Q5-1 [J]. Geomicrobiology Journal, 2015, 32(7): 616-623.
- [18] Yahya S K, Zakaria Z A, Samin J, et al. Isotherm kinetics of Cr(III) removal by non-viable cells of *Acinetobacter haemolyticus* [J]. Colloids & Surfaces B Biointerfaces, 2012, 94(94): 362-368.
- [19] Latha S, Vinothini G, Dhanasekaran D. Chromium[Cr(VI)] biosorption property of the newly isolated actinobacterial probiont *Streptomyces werraensis* LD22 [J]. Biotech, 2015, 5(4): 423-432.
- [20] Gu Y, Xu W, Liu Y, et al. Mechanism of Cr(VI) reduction by *Aspergillus niger*: enzymatic characteristic, oxidative stress response, and reduction product[J]. Environmental Science & Pollution Research, 2015, 22(8): 6271-6279.
- [21] Romo-Rodríguez P, Acevedo-Aguilar F J, Lopez-Torres A, et al. Cr(VI) reduction by gluconolactone and hydrogen peroxide, the reaction products of fungal glucose oxidase: Cooperative interaction with organic acids in the biotransformation of Cr(VI) [J]. Chemosphere, 2015, 134: 563-570.
- [22] Dhal B, Thatoi H N, Das N N, et al. Chemical and microbial remediation of hexavalent chromium from contaminated soil and mining/metallurgical solid waste: a review[J]. Journal of Hazardous Materials, 2013, 250-251, 272-291.
- [23] Rath B P, Das S, Mohapatra P K D, et al. Optimization of extracellular chromate reductase production by *Bacillus amyloliquefaciens*, (CSB 9) isolated from chromite mine environment[J]. Biocatalysis & Agricultural Biotechnology, 2014, 3(3): 35-41.
- [24] Qian J, Wei L, Liu R, et al. An exploratory study on the pathways of Cr(VI) reduction in sulfate-reducing up-flow anaerobic sludge bed (UASB) Reactor: [J]. Scientific Reports, 2016, 6: 23694.
- [25] Ishak A F, Karim N A, Wan A A, et al. Chromate detoxification using combination of ChromeBac™ system and immobilized chromate reductase beads[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2016, 113: 238-243.
- [26] Samuel J, Pulimi M, Paul M L, et al. Batch and continuous flow studies of adsorptive removal of Cr(VI) by adapted bacterial consortia immobilized in alginate beads[J]. Bioresource Technology, 2013, 128(128C): 423-430.
- [27] Gola D, Dey P, Bhattacharya A, et al. Multiple heavy metal removal using an entomopathogenic fungi *Beauveria bassiana* [J]. Bioresource Technology, 2016, 218: 388-396.
- [28] Sharma S, Malaviya P. Bioremediation of tannery wastewater by chromium resistant novel fungal consortium[J]. Ecological Engineering, 2016, 91: 419-425.
- [29] Morales-Barrera L, Cristiani-Urbina E. Removal of hexavalent chromium by *Trichoderma viride*, in an airlift bioreactor [J]. Enzyme & Microbial Technology, 2006, 40(1): 107-113.
- [30] Sepehr M N, Nasser S, Zarrabi M, et al. Removal of Cr(III) from tanning effluent by *Aspergillus niger*, in airlift bioreactor[J]. Separation & Purification Technology, 2012, 96(33): 256-262.
- [31] Pang Y, Zeng G M, Tang L, et al. Cr(VI) reduction by *Pseudomonas aeruginosa* immobilized in a polyvinyl alcohol/sodium alginate matrix containing multi-walled carbon nanotubes[J]. Bioresource Technology, 2011, 102(22): 10733-10736.
- [32] Robins K J, Hooks D O, Rehm B H A, et al. *Escherichia coli* NemA is an efficient chromate reductase that can be biologically immobilized to provide a cell free system for remediation of hexavalent chromium[J]. Plos One, 2013, 8(3): e59200.
- [33] Barak Y, Ackerley D F, Dodge C J, et al. Analysis of novel soluble chromate and uranyl reductases and generation of an improved enzyme by directed evolution. [J]. Applied & Environmental Microbiology, 2006, 72(11): 7074-7082.

# 文冠果繁殖技术研究进展

胡颖慧,王立柱,冯锡君,孟祥海

(黑龙江省农业科学院 牡丹江分院,黑龙江 牡丹江 157041)

**摘要:**文冠果作为生物质能源树种,在工业、食用、药用、绿化及防风固沙等方面具有综合利用价值,近年来受到广泛关注。从有性繁殖和无性繁殖两个方面对文冠果繁殖关键技术的研究进展进行综述,并分析文冠果繁殖技术存在的问题,为今后的研究工作提出参考。

**关键词:**文冠果;有性繁殖;无性繁殖;进展

**中图分类号:**S565.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-2767(2017)09-0128-05 **DOI:**10.11942/j.issn1002-2767.2017.09.0128

文冠果(*Xanthoceras sorbifolia* Bunge.),又名木瓜、崖木瓜、文官果、文灯果、僧灯毛道,属于无患子科,属落叶小乔木或灌木,是我国北方地区特有的木本油料树种,种子含油量为35%~40%,素有“北方油茶”之称<sup>[1]</sup>。文冠果籽油的成分是非常适合开发生物质能源的原料,近年来又陆续在食用、药用、园林绿化、水土保持等领域也得以开发利用,作为经济树种日益受到广泛关注。为了适应文冠果发展的需要,本文综述了近年来文冠果有性及无性繁殖技术方面的研究进展,旨在为促进文冠果科研、生产的发展提供理论依据。

## 1 文冠果的有性繁殖

### 1.1 种子催芽

1.1.1 催芽方法 文冠果种子不易吸水萌发,自然发芽率仅为6%<sup>[2]</sup>。目前主要有沙藏、雪藏、快速催芽、生长调节剂浸种方法促进种子萌发。(1)

沙藏处理<sup>[3-4]</sup>:沙藏应在土壤结冻前进行,在地面挖取平底坑,种子分别经水浸泡48 h,以及3%的高锰酸钾溶液消毒后,与湿沙混合(种子:湿沙混合比例为1:3)堆放在坑底,堆放厚度约30 cm,其上再覆盖厚30 cm湿沙。(2)雪藏处理<sup>[5]</sup>:处理方法与沙藏基本相同,不同的是用雪替代了湿沙与文冠果种子混合,雪藏的温度为-18℃,属于冷冻性质。其它步骤均与沙藏处理相同。(3)快速催芽法:适用于未经沙藏的种子。播种前10~15 d,将种子用80℃热水浸泡10 min,捞出后冷水浸泡72 h,期间每天换水1次。然后捞出后混入湿沙,置于恒温培养箱内催芽,温度控制在25~30℃,湿度在80%以上,待种子露白即可播种<sup>[6]</sup>。(4)生长调节剂浸种:种子的萌发过程由多种植物激素参与调节,近年来也有研究发现采用植物生长调节剂处理能够调节种子内的激素平衡,打破种子萌发抑制物,促进细胞分裂,从而促进种子萌发。

1.1.2 催芽方法对文冠果发芽情况的影响 汪智军等研究了不同处理方式对文冠果发芽及出苗

收稿日期:2017-06-05  
第一作者简介:胡颖慧(1985-),女,黑龙江省嫩江县人,硕士,研究实习员,从事园林植物与观赏园艺方向研究。E-mail:mdjhyh@126.com。

# Microbial Removal of Cr(VI) Mechanism and Application

LI Yuan-yuan,ZHANG Jie

(Northeast Forestry University,Harbin,Heilongjiang 150040)

**Abstract:**Chromium (Cr) is a highly toxic heavy metal that is toxic to living cells. As an efficient, low-cost and green method for the treatment of heavy metal chromium, microbial method has a wide application prospect. The interaction of microorganisms with Cr (VI) was summarized, including Cr (VI) transport, bioaccumulation, reduction of Cr (VI) to Cr (III) chromate efflux, related technology applications, the prospect and direction of microbial treatment of heavy metal chromium, the prospect and direction of microbial treatment of heavy metal chromium were prospected.

**Keywords:**chromium pollution; microbes; bioremediation; technical applications