

解糖假苍白杆菌还原六价铬的特性及条件优化

王利沙¹, 贺治国^{2*}, 赵洪侠¹, 孙杰¹, 仲诚¹, 张艳玲¹

(1. 潍坊护理职业学院, 山东 潍坊 261000; 2. 中南大学资源加工与生物工程学院, 湖南 长沙 410085)

摘要:从湖南省长沙市废弃铬盐厂的土壤中成功分离出一株具有高 Cr(VI) 抗性和去除率的菌株 W1。通过 16S rDNA 基因序列和 DNA G+C mol% 含量测定, 该菌株被鉴定为假苍白杆菌属 (*Pseudochrobactrum*) 革兰氏阴性杆菌。研究探讨了不同初始温度 (25~40℃)、pH (7.5~11.0) 和 Cr(VI) (0~3 000 mg/L) 浓度下对菌株生长及 Cr(VI) 去除效果的影响, 并分析了胞外多聚物 (EPS) 与去除效率的关联。结果表明, 从铬渣中分离出的菌株 W1 的最适生长及 Cr(VI) 去除条件为温度 35℃、pH=9.5; 其对 Cr(VI) 的最低抑菌浓度约为 2 500 mg/L, 在 1 000 mg/L Cr(VI) 处理下 56 h 内去除率高达 71.54%, 且此时 EPS 产量最高 (357.14 mg/g), 其中蛋白质为主要组分, 与 Cr(VI) 去除呈正相关。该菌株在高浓度 Cr(VI) 污染场地的微生物修复中具有良好应用前景。

关键词:六价铬 [Cr(VI)]; 假苍白杆菌; 分离; 鉴定; 抗性

中图分类号: X53

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2026)07-0140-06

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.07.025

Characteristics and condition optimization of hexavalent chromium reduction by *pseudochrobactrum saccharolyticum*

WANG Li-sha¹, HE Zhi-guo^{2*}, ZHAO Hong-xia¹, SUN Jie¹, ZHONG Cheng¹, ZHANG Yan-ling¹

(1. Weifang Nursing Vocational College, Weifang 261000, China;

2. School of Minerals Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha 410085, China)

Abstract: A strain W1 with high Cr(VI) resistance and removal rate was successfully isolated from chromium-contaminated soil from an abandoned chromium salt factory in Changsha, Hunan Province. Through 16S rDNA gene sequence and DNA G+C mol% content determination, the strain was identified as a Gram-negative bacterium of the genus *Pseudochrobactrum*. The study investigated the effects of different initial temperatures (25~40℃), pH (7.5~11.0), and Cr(VI) concentrations (0~3 000 mg/L) on bacterial growth and Cr(VI) removal efficiency, and analyzed the correlation between extracellular polymeric substances (EPS) and removal efficiency. The results showed that the optimal growth and Cr(VI) removal conditions for strain W1 isolated from chromium slag were temperature of 35℃ and pH 9.5; Its minimum inhibitory concentration for Cr(VI) is about 2 500 mg/L, and the removal rate reaches 71.54% within 56 hours under 1 000 mg/L Cr(VI) treatment. At this time, EPS production is the highest (357.14 mg/g), with protein as the main component, positively correlated with Cr(VI) removal. This strain has good application prospects in microbial remediation of high concentration Cr(VI) contaminated sites.

Key words: hexavalent chromium [Cr(VI)]; *pseudochrobactrum*; isolation; identification; resistance

在重金属污染物中, 六价铬 [Cr(VI)] 因其高毒性被世界各国列为优先控制的环境污染防治对象。自工业革命以来, 铬 (Cr) 被广泛应用于皮革鞣制、纺织染色、电镀、制药、钢铁冶炼等行业^[1-3], 导致其在环境中大量累积。铬在水和土壤中主要以 Cr(III) 和 Cr(VI) 两种氧化态存在, 其中 Cr(VI) 的毒性约为 Cr(III) 的 100 倍^[4], 且具有极强的水溶

性、高毒性、强氧化性、致畸性和致癌性等, 严重危害了环境安全和人类健康^[5-6]。因此, Cr(VI) 污染土壤的治理已然成为当前亟需解决的环境问题。

国内外传统的 Cr(VI) 污染修复技术 (如离子交换法、生物吸附法、电化学修复法等) 普遍存在成本高昂、操作复杂、易产生大量的有毒物质导致二次污染等局限, 难以实现大规模推广应用^[3,7]。1997 年,

收稿日期: 2025-09-17; 修回日期: 2026-04-24

基金项目: 国家自然科学基金 (31370053)

作者简介: 王利沙 (1984-), 女, 博士, 讲师, 研究方向为微生物学方向 (细菌方面的分离筛选、鉴定及其与疾病相关性的研究进展; 嗜热浸矿菌在矿物筛选中的应用) 和教育管理学, riyuexing12345@163.com; 贺治国 (1978-), 男, 博士, 博士生导师, 教授, 研究方向为矿产资源综合利用及生物冶金、微生物宏基因组学、环境微生物技术、矿冶废水的处理技术及尾矿资源的开发利用等, 通讯联系人, 382695213@qq.com。

Romanenko 等^[8]首次报道脱色杆菌可在厌氧条件下将 Cr(VI) 还原为低毒性的 Cr(III), 为生物修复技术提供了新思路。此后, 众多学者也开始研究 Cr(VI) 还原菌, 依次筛选出芽孢杆菌^[9-10]、土壤杆菌属^[11]、假单胞菌^[12]等, 为 Cr(VI) 污染生物修复技术的实践应用提供了丰富的菌种资源, 也证实微生物修复具有高效、低成本、环境友好等优势^[13-14]。

微生物胞外多聚物(EPS)作为细菌表面的重要分泌物, 在重金属吸附和胁迫抗性中发挥着关键作用^[15]。Kiran 等^[16]的研究表明, EPS 可通过表面官能团与重金属结合, 增强菌株对铬的耐受性和去除能力。然而, 针对关停铬盐厂的铬渣堆场等重度污染场地, 高铬耐受性、高去除率菌株的筛选及 EPS 作用机制的研究仍较为匮乏。基于此, 本研究从湖南省长沙市废弃铬盐厂的污染土样中, 选取了贺治国老师团队前期筛选出的 5 株抗铬细菌, 聚焦其中一株(菌株 W1) 进一步开展优化培养工作。通过 16S rDNA 测序和生理生化特性分析明确其分类地位, 系统探究温度、pH、Cr(VI) 浓度对其生长及 Cr(VI) 去除效果的影响, 并揭示 EPS 在 Cr(VI) 去除中的作用。研究旨在为高浓度 Cr(VI) 污染场地的微生物修复提供优质菌种资源和理论依据, 推动低成本高效修复技术的开发与应用。

1 材料与方法

1.1 实验材料

1.1.1 样品采集

实验研究土样来自于湖南省长沙市某铬盐厂的铬渣污染土壤。

1.1.2 LB 培养基

利用改良的 LB 培养基, 培养基成分为: 蛋白胨 10.0 g/L, 氯化钠 5.0 g/L, 磷酸氢二钾 0.05 g/L, 七水硫酸镁 0.2 g/L, 酵母提取物 5.0 g/L, 用 10 mol/L 氢氧化钠调节 pH 为 9.0 左右, 高温高压灭菌 20 min, 冷却后备用, 于 160~180 r/min、30℃ 条件下进行振荡培养, 其中菌株的分离筛选和纯培养采用 LB 固体培养基(上述成分中加入琼脂 12 g/L)。液体和固体培养基中均添加 350 mg/L 的 Cr(VI) 作为筛选菌株的条件。

1.1.3 筛选培养基

在改良的 LB 培养基的基础上, 加入重铬酸钾($K_2Cr_2O_7$), 配制成 Cr(VI) 的质量浓度分别为 375、500、1 000、1 500、2 000、2 500、3 000 mg/L 的储备液。

1.2 实验方法

1.2.1 菌株的分子生物学鉴定

(1) 16S rDNA 测序

取一定量的培养基, 离心后收集菌体, 采用北京天根细菌 DNA 提取试剂盒进行基因组总 DNA 的提取, 其 16S rDNA 基因扩增采用通用引物 1492R(5'-GGTTACCTTGTTACGA CTT-3') 和 27F(5'-AGAGTTTGATCCTGGCTCAG-3'), 聚合酶链式反应(PCR)产物送至上海生工生物公司进行测序, 测序所得序列在 NCBI 数据库中进行相似性分析, 采用 MEGA 3.1 和 Clustal W 软件进行系统发育树的构建, 找到相似度最高的序列。

(2) DNA G+C mol% 含量测定

细菌 DNA 中 G+C mol% 含量的不同是一个重要的遗传特性, 其测定也已成为细菌分类和菌种鉴定的重要依据之一^[17]。本研究中采用灵敏度和准确度高的高效液相色谱法, 主要参考潘星时等^[18]方法进行提取与测定。

1.2.2 菌株的生长曲线

取对数生长期的菌液, 接种浓度为 5×10^7 cells/mL, 将其加入到 LB 培养基中[含 350 mg/L Cr(VI)], 用 $K_2Cr_2O_7$ 溶液作为 Cr(VI) 源, 设置温度为 35℃, 调 pH 为 9.5, 进行振荡培养, 定时取样, 用显微镜计数并确定溶液中细菌的数量, 所有实验均重复 3 次。

1.2.3 菌株的耐铬能力

将菌株进行驯化培养, 提高对 Cr(VI) 的耐受性。在最佳培养条件下, 细菌的接种浓度为 5×10^7 cells/mL, 分别接种到含有 Cr(VI): 0、500、1 000、1 500、2 000、2 500、3 000 mg/L 的高温灭菌的 LB 培养基中振荡培养, 间隔不同时间取样, 用显微镜计数并确定溶液中细菌的数量, 所有实验均重复 3 次。

1.2.4 菌株除 Cr(VI) 能力的影响因素

(1) 温度对菌株 W1 除铬能力的影响

取对数生长期的菌液加入到 LB 培养基中[含 1 000 mg/L Cr(VI)], 细菌的接种浓度为 5×10^7 cells/mL, $K_2Cr_2O_7$ 溶液作为 Cr(VI) 源, 分别设置温度为 25、30、35℃ 和 40℃, 调 pH 为 9.5 左右, 160~180 r/min 振荡培养 50 h 后进行离心, 收集上清液, 采用分光光度法测定菌株对 Cr(VI) 去除率。所有实验均重复 3 次。

(2) pH 对菌株 W1 除铬能力的影响

取对数生长期的菌液加入到 LB 培养基中[含 1 000 mg/L Cr(VI)], 细菌的接种浓度为 5×10^7

cells/mL, $K_2Cr_2O_7$ 溶液作为 $Cr(VI)$ 源], 用 10 mol/L 氢氧化钠分别调节溶液的初始 pH 为 7.5、8.0、8.5、9.0、9.5、10.0、10.5 和 11.0, 调节温度为 35℃, 160~180 r/min 振荡培养 50 h 后进行离心, 收集上清液, 采用分光光度法测量菌株对 $Cr(VI)$ 去除率。所有实验均重复 3 次。

(3) $Cr(VI)$ 浓度对菌株 W1 除铬能力的影响

将菌株 W1 接种于分别含有 $Cr(VI)$: 0、500、1 000、1 500、2 000、2 500 mg/L 的 100 mL 液体 LB 培养基中, 设置温度 35℃、pH 为 9.5、细菌的接种浓度为 5×10^7 cells/mL, 在 160~180 r/min 下培养 50 h 后进行离心, 收集上清液, 采用分光光度法测量菌株对 $Cr(VI)$ 去除率。所有实验均重复 3 次。

1.2.5 $Cr(VI)$ 去除率的检测方法

采用分光光度法, 以二苯碳酰二肼 (DAPI) 作为显色剂^[19], 取上清液 50 μ L, 在 540 nm 下测定其吸光度值并计算出上清液中剩余的 $Cr(VI)$ 浓度, 用初始 $Cr(VI)$ 浓度与上清液中 $Cr(VI)$ 浓度的差值, 即为菌株对 $Cr(VI)$ 去除率。

1.2.6 EPS 的提取与测定

将菌株 W1 接种于分别含有 $Cr(VI)$: 0、500、1 000、1 500、2 000、2 500 mg/L 的 100 mL 液体 LB 培养基中, 分别设置生长的最适宜温度 35℃ 和 pH = 9.5, 160~180 r/min 下培养 40 h, 10 000 r/min 离心

15 min 收集菌液, 且采用乙二胺四乙酸 (EDTA) 提取法^[20]从菌液中收集胞外多聚物 (EPS) 并测定其含量。其中菌液进行真空冷冻干燥至恒重, 测得菌体的干重。

EPS 产量用蛋白质、多糖、核酸之和表示, 单位为 mg/g (以 VVS 计), 3 组分测定方法分别为考马斯亮蓝法、蒽酮比色法和二苯胺法, 所有实验均重复 3 次, 实验结果取 3 次实验结果的平均值。

2 结果与讨论

2.1 菌株的分子生物学鉴定

2.1.1 16S rDNA 基因测序和系统发育分析

测序结果显示, 该菌株的基因序列长度为 1 388 bp, 将其序列进行同源性和相似性对比分析并绘制系统发育树, 结果如图 1 所示。由图 1 可知, 菌株 W1 (FJ983141) 与解糖假苍白杆菌 (*P. saccharolyticum*) 同属一个分支, 且与 *P. saccharolyticum* strain GIMCC 1.0015 同源性最高。同时, 高压液相色谱测定结果表明, 该菌株的 DNA G+C mol% 含量为 52.85, 与已知的解糖假苍白杆菌 (*P. asaccharolyticum* CCUG 46016T) DNA G+C mol% 含量 (50.9) 相近。综合以上分析, 进一步判定菌株 W1 与假苍白杆菌属 (*Pseudochrobactrum*) 的遗传距离最近, 因此初步将菌株 W1 鉴定为假苍白杆菌属 (*Pseudochrobactrum*) 的一种。

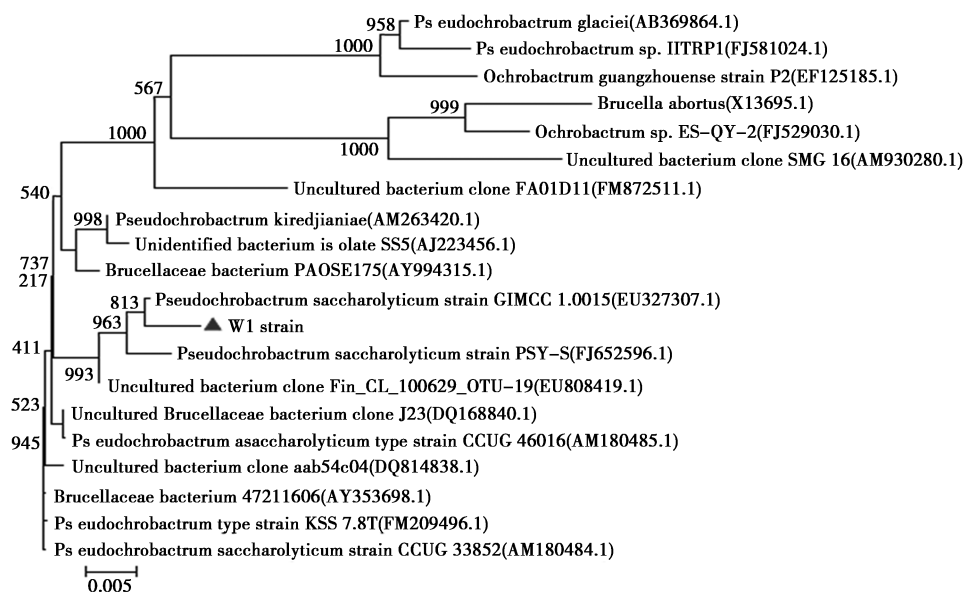


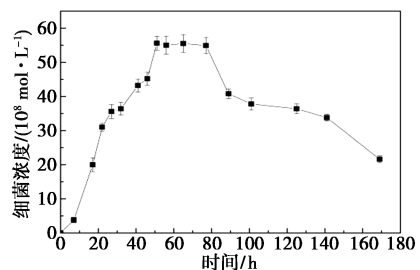
图 1 基于菌株 W1 16S rDNA 基因测序的系统发育树

2.1.2 菌株的生长曲线

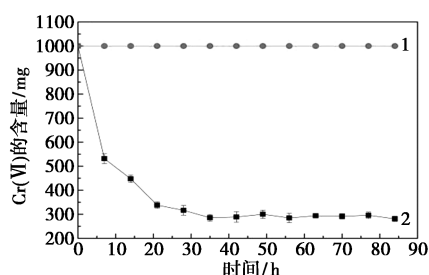
在特定环境条件下, 菌株生长繁殖的基本规律可通过其生长曲线体现^[11]。本课题组的前期研究

已明确, 筛选出的菌株 W1 最适生长繁殖条件为: 温度为 35℃, pH 为 9.5, 经过铬驯化, 在 1 000 mg/L $Cr(VI)$ 处理下, 菌株 W1 的生长曲线和铬的去除效

果如图 2 所示。由图 2 可知,菌株 W1 在铬存在的条件下生长状况良好,且在 56 h 内对 Cr(VI) 的去除率高达 70%。



(a) 生长曲线



1—总 Cr(VI) 量;2—上清液中 Cr(VI) 的含量

(b) Cr(VI) 去除效果

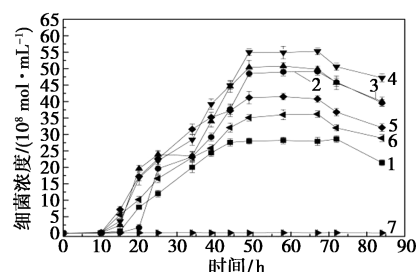
图 2 菌株 W1 的生长曲线和 Cr(VI) 去除效果

由图 2(a) 可以看出,菌株 W1 生长态势良好,其迟缓期时间较长,7 h 后进入生长对数期,在 7~51 h 内均处于对数生长期。随着培养时间延长,菌株于 51 h 后逐渐进入稳定期,生长繁殖速度逐步减缓,78 h 后则进入衰退期。菌株在 51 h 后进入稳定期,可能是铬持续被菌株摄取、转化的同时,培养基内营养物质不断消耗且代谢废物逐渐积累,多重因素共同作用导致生长速度受影响^[21]。结果表明在改良 LB 培养基中,菌株的适宜培养时间约为 51 h。

由图 2(b) 可以看出,随着时间的延长,在 56 h 内上清液中 Cr(VI) 的质量浓度从 1 000 mg/L 下降到了 284.6 mg/L,其去除率高达 71.54%。已有研究表明,经铬驯化的菌株可通过自身酶促反应,将毒性较强的 Cr(VI) 还原为毒性较低的水溶性有机 Cr(III),而这些还原产物无法渗透进入细胞内部,从而有效降低环境中 Cr(VI) 的浓度^[10,22]。菌株 W1 经铬驯化后能在含 Cr(VI) 环境中生长良好,很可能就是通过高效的生物还原作用实现对 Cr(VI) 的去除;同时,该菌株较长的对数生长期(7~51 h)为持续合成还原酶提供了充足的菌体基础和代谢保障,这也是其能维持高去除效率的重要原因。

2.1.3 菌株耐铬特性

驯化培养后,W1 对 Cr(VI) 的耐受程度从 1 225 mg/L 升高到了 2 500 mg/L,得到对 Cr(VI) 具有高抗性的菌株,结果如图 3 所示。由图 3 可见,当培养基中不含 Cr(VI) 时,菌株也能生长;在 Cr(VI) 浓度为 0~1 500 mg/L 的培养过程中,Cr(VI) 浓度越高,越有利于菌株的生长;但在 Cr(VI) 浓度为 1 500~3 000 mg/L 的培养过程中,菌株的生长呈下降趋势,到 3 000 mg/L 时菌株基本不生长,这说明高浓度的 Cr(VI) 抑制了菌株的生长繁殖,加剧了对其的毒害作用^[11]。因此,菌株 W1 在 Cr(VI) 浓度为 1 500 mg/L 时生长达到顶峰,且 Cr(VI) 对 W1 的最低抑菌浓度约为 2 500 mg/L。



1—0 mg/L;2—500 mg/L;3—1 000 mg/L;4—1 500 mg/L;
5—2 000 mg/L;6—2 500 mg/L;7—3 000 mg/L

图 3 不同初始 Cr(VI) 浓度条件下菌株 W1 的生长曲线

2.2 影响菌株 W1 去除 Cr(VI) 的能力因素分析

2.2.1 温度对菌株 W1 去除 Cr(VI) 能力的影响

温度对菌株 W1 去除 Cr(VI) 能力的影响如图 4 所示。由图 4 可知,在温度 25~35℃ 时,菌株 W1 对 Cr(VI) 去除率随着温度的升高逐渐增加,在 35℃ 时,去除率高达 69.89%;而温度为 40℃ 时,Cr(VI) 的去除效果最差。结果表明菌株最适宜温度为 35℃,此时对铬的去除率最高。

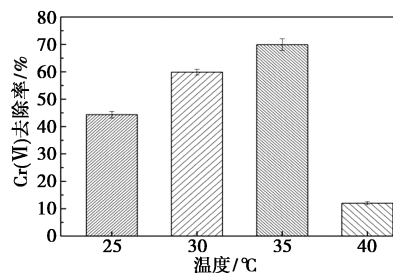


图 4 温度对菌株 W1 去除 Cr(VI) 效果的影响

温度是微生物修复污染过程中的重要因素,对菌株的生长繁殖状况、生物膜上相关蛋白酶的催化活性等都有较大影响^[9,12]。当温度较高时,细菌的

生长会受到明显抑制,菌株细胞内的蛋白质发生变性,细胞膜结构也会随之改变;当温度较低时,细菌菌株细胞膜的流动性会减弱,这会阻碍细胞的物质运输功能,使得营养物质难以快速进入细胞内部,不利于其生长繁殖,进而影响其对铬的去除^[23]。但在一定范围内,适当升高温度,有利于提升菌株对重金属离子的去除效果。

2.2.2 pH 对菌株 W1 去除效果的影响

pH 对菌株 W1 去除 Cr(VI) 能力的影响如图 5 所示。由图 5 可知,菌株 W1 对 Cr(VI) 的去除率随着培养基中 pH 的增加出现先升高后下降的趋势。在初始 pH 为 7.5 时,菌株对 Cr(VI) 的去除效果不理想,去除率仅为 1.8%;在 pH=7.5~9.5 时,随着 pH 的升高,去除率明显升高。这表明菌株生长的最适 pH 为 9.5,在此条件下其去除率最高,高达 70.5%。故菌株在 pH=9.0~10.0 为最佳除 Cr(VI) 的酸碱度。

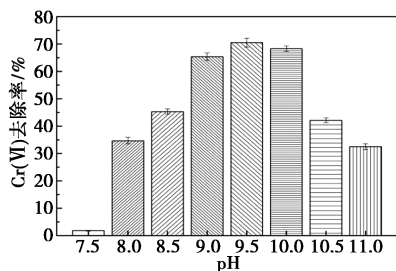


图 5 pH 对菌株 W1 去除 Cr(VI) 效果的影响

溶液 pH 对菌株去除 Cr(VI) 影响较大,pH 过高或者过低都会改变细胞膜的通透性、物质的溶解性或者是膜结构的稳定性等,影响菌株对营养物质的吸收利用,不利于菌株的生长繁殖^[23-25],进而影响对 Cr(VI) 的去除效果。但在一定范围内,适当升高 pH 有利于菌株对重金属离子的去除,这是因为菌株 W1 分离自碱性环境,因此在碱性条件下可以更好地发挥去除 Cr(VI) 的作用^[23]。

2.2.3 Cr(VI) 浓度对菌株 W1 还原效果的影响

不同浓度 Cr(VI) 对 Cr(VI) 去除率影响如图 6 所示。由图 6 可知,Cr(VI) 浓度为 500~2 500 mg/L 的培养基中,菌株 W1 对 Cr(VI) 去除率都在 44% 以上,其中在 1 000 mg/L 时,去除率最大,达到 68.78%。随着 Cr(VI) 浓度的升高,在一定程度上有利于 Cr(VI) 的去除,但过高的 Cr(VI) 浓度会抑制微生物的生长,甚至会产生毒性和致畸性,导致 W1 的生长代谢变缓甚至死亡,进而影响其对溶液中 Cr(VI) 的去除^[23,26],不过具体菌株去除 Cr(VI)

的机制还需进一步的研究。

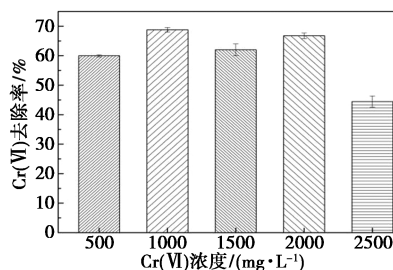


图 6 不同初始 Cr(VI) 浓度条件下菌株 W1 对 Cr(VI) 的去除率

2.3 EPS 与 Cr 含量分析

胞外聚合物(EPS)对重金属离子具有很好的吸附性能,在不同初始 Cr(VI) 浓度条件下,菌株 W1 产生的 EPS 量如图 7 所示。由图 7 可知,当 Cr(VI) 浓度为 500 mg/L 和 1 000 mg/L 时,EPS 的产生量较高分别为 227.27 mg/g 和 357.14 mg/g,随着铬初始浓度的升高,菌体 W1 产生的 EPS 量呈现减少的趋势,该结果与图 5 中 Cr(VI) 的去除率变化趋势相似。此外,当 Cr(VI) 浓度为 1 000 mg/L 时,对产生的 EPS 化学组分进行了进一步分析,结果如表 1 所示。由表 1 可知,菌株表面合成的 EPS 中蛋白质含量最高,其次是多糖。研究表明,EPS 中的蛋白质含量和多糖含量与重金属吸附量存在一定相关性,尤其是蛋白质在重金属吸附中比多糖发挥了更为重要的作用^[27];不仅如此,EPS 表面可能含有的负电荷会与重金属发生静电吸附,因此 EPS 在 Cr(VI) 的去除过程中发挥着一定的作用^[15]。

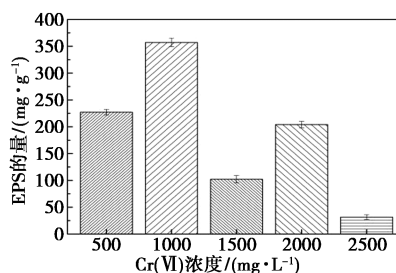


图 7 不同初始 Cr(VI) 浓度条件下菌株 W1 的 EPS 含量

表 1 菌株 EPS 组分含量

EPS 组分	蛋白质	多糖	DNA
所占比例/%	69.97	11.10	8.50

3 结论

(1) 本研究筛选分离出一株对铬具有高耐受性

的菌株,经过 16S rDNA 测序和 DNA G+C mol% 含量测定,可确定菌株 W1 为假苍白杆菌属。

(2) 菌株 W1 在温度 35℃、pH=9.5 的条件下生长状况良好,经铬驯化后,在 1 000 mg/L Cr(VI) 处理下,56 h 内对 Cr(VI) 的去除率高达 71.54%,其生长曲线呈现出较长的迟缓期,7 h 后进入对数生长期,51 h 后进入稳定期,故在改良 LB 培养基中的适宜培养时间为 51 h。

(3) 驯化后的菌株 W1 对 Cr(VI) 具有较高抗性,在 Cr(VI) 浓度为 1 500 mg/L 时生长达到顶峰,最低抑菌浓度约为 2 500 mg/L,高浓度 Cr(VI) (1 500 mg/L 以上) 会抑制其生长繁殖。

(4) 温度、pH 和 Cr(VI) 浓度均会影响菌株 W1 对 Cr(VI) 的去除效果,其最适去除条件为温度 35℃、pH 为 9.0~10.0,且在 Cr(VI) 初始浓度为 1 000 mg/L 时,去除率达到最高水平。

(5) 在不同浓度 Cr(VI) 的条件下,菌株 W1 产生的 EPS 含量越高,其对 Cr(VI) 的去除率也会越高,这可能与 EPS 中蛋白质、多糖或者表面负电荷有关。

本研究现阶段仍局限于实验室可控条件下的探索,尚未在实际铬污染场地验证菌株的适应能力与去除效果,也未明确 EPS 影响 Cr(VI) 去除的具体作用方式。后续将结合实际待修复场地的生物与环境条件,进一步开展菌株在真实铬污染环境中的去除效果和 EPS 机制研究,为修复 Cr(VI) 污染环境提供更多可用的菌种资源。

参考文献

- [1] Long D, Hasiimi M Z, Su X, et al. Cr(VI) reduction by an extracellular polymeric substance (EPS) produced from a strain of *Pseudochrobactrum saccharolyticum* [J]. *Biotech*, 2019, 9(3): 111-119.
- [2] He Z, Li S, Wang L, et al. Characterization of five chromium-removing bacteria isolated from chromium-contaminated soil [J]. *Water, Air & Soil Pollution*, 2014, 225(3): 1904-1913.
- [3] 杨宇, 高宇, 程潜, 等. 一株铬还原菌的分离鉴定及铬还原特性研究 [J]. *生态环境学报*, 2018, 27(2): 322-329.
- [4] 王文婧, 卢松霖, 刘雪, 等. 包埋法固定钩状木霉孢子还原水体中六价铬的研究 [J]. *生物技术通报*, 2019, 35(9): 70-74.
- [5] 陈少金, 刘仕柏, 梁健敏, 等. 土壤耐铬细菌的筛选及特性研究 [J]. *环境与发展*, 2019, 31(12): 97-98.
- [6] 牛永艳, 陈正军, 赵帅, 等. 铬还原菌的分离筛选及其在微生物燃料电池生物阴极中的应用 [J]. *微生物学通报*, 2017, 44(7): 1631-1638.
- [7] 朱培蕾, 焦仕林, 姜朴, 等. 六价铬还原菌 Cr4-1 的鉴定和还原影响因素的优化 [J]. *卫生研究*, 2015, 44(2): 201-205, 210.
- [8] Romanenko V I, Korenkov V N. Pure culture of bacteria using chromates and bichromates as hydrogen acceptors during development under anaerobic conditions [J]. *Mikrobiologiya*, 1977, 46(3): 414-417.
- [9] 潘俊, 董欣, 王兴作. 一株新型 *Lysinibacillus fusiformis* 菌株 G5M11b 对 Cr(VI) 的还原性能研究 [J]. *安全与环境学报*, 2024, 24(10): 4062-4070.
- [10] 姜毅, 汤鼎, 周宇诚, 等. *Bacillus* sp. T124 对六价铬的生物还原 [J]. *农业环境科学学报*, 2022, 41(5): 967-975.
- [11] 吴卿, 李倩男, 张颖, 等. 两株耐铬菌的分离鉴定及对 Cr(VI) 污染土壤的治理 [J]. *安全与环境学报*, 2024, 24(6): 2399-2408.
- [12] 王广顺, 张皓璠, 唐晨, 等. 石油烃降解菌还原六价铬的特性及条件优化研究 [J]. *现代化工*, 2023, 43(11): 99-103, 110.
- [13] 赵光辉, 常文越, 李雄勇, 等. 铬(VI) 土著还原菌筛选及初步鉴定实验研究 [J]. *环境保护科学*, 2013, 39(3): 55-58, 102.
- [14] 徐淑霞, 王晓雅, 张来星, 等. 克雷伯氏菌 (*Klebsiella*) Z3 的分离鉴定和对铬(VI) 还原特性研究 [J]. *河南农业大学学报*, 2019, 53(3): 385-392.
- [15] 吴磊, 张学洪, 李宇杰, 等. 胞外聚合物在白腐真菌去除镉过程中的作用 [J]. *桂林理工大学学报*, 2020, 40(1): 177-181.
- [16] Kiran B, Kaushik A. Chromium binding capacity of *Lyngbya putealis* exopolysaccharides [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2008, 38(1): 47-54.
- [17] 牟杨龙, 张振华, 辜丽军, 等. 幽门弯曲菌 DNA G+C mol% 含量及菌体脂肪酸组成分析 [J]. *微生物学通报*, 1991(5): 283-286.
- [18] 潘星时, 韦业成, 芦耀波, 等. 高压液相色谱在测定细菌 DNA 中 G+C 克分子百分数方面的应用 [J]. *微生物学报*, 1981, 21(3): 339-343.
- [19] 魏复盛. 水和废水监测分析方法 (第四版) [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 180-183.
- [20] Gehrke T. Importance of extracellular polymeric substances from *Thiobacillus ferrooxidans* for bioleaching [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1998, 64(7): 2743-2747.
- [21] 徐彦, 方先芝, 陈俊辉, 等. 基于文献计量的铬污染土壤修复领域研究进展与前沿分析 [J]. *中国农业大学学报*, 2023, 28(3): 165-175.
- [22] Zhao X, Tang D, Jiang Y. Effect of the reduction-mineralization synergistic mechanism of *Bacillus* on the remediation of hexavalent chromium [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 777: 146190.
- [23] 李维宏, 杨宁, 魏晓峰, 等. 一株 Cr(VI) 还原菌的筛选鉴定及其还原特性研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34(11): 2133-2139.
- [24] 胡永娟, 李学梅, 王海磊, 等. 抗铬菌株的筛选鉴定及其生物学特性和吸附特性 [J]. *环境工程学报*, 2014, 8(6): 2585-2591.
- [25] Ramesh C P, Seidu M, Michael B, et al. Molecular characterization of chromium(VI) reducing potential in Gram positive bacteria isolated from contaminated sites [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42(10): 1857-1863.
- [26] 韩剑宏, 宋玉艳, 张铁军, 等. Cr(VI) 还原菌的筛选、鉴定及其还原物质分析 [J]. *微生物学通报*, 2020, 47(10): 3206-3215.
- [27] 孙梦格, 宋卫锋, 杨佐毅, 等. Cd(II) 胁迫/诱导下铜绿假单胞菌 EPS 组分变化及其吸附性能 [J]. *环境科学学报*, 2021, 41(9): 3427-3436. ■