

研究报告

一株红假单胞菌的分离及对 Cu^{2+} 的去除

张晓倩 杨阔 王宁 赵敏 汪春蕾*

东北林业大学生命科学学院 东北盐碱植被恢复与重建教育部重点实验室 黑龙江 哈尔滨 150040

摘要:【背景】重金属污染对环境和人类的健康构成了重大威胁,因此,重金属污染的治理迫在眉睫。生物治理因成本低、处理效果好和无二次污染等优点,在处理重金属污染时被优先选择。【目的】从辽河入海口深 13 m 的水体中,利用紫色非硫细菌富集培养基筛选产色素能力强并对高浓度 Cu^{2+} 有高效去除能力的菌株。【方法】采用形态学、生理生化特性和分子生物学方法鉴定菌种;采用二乙基二硫代氨基甲酸分光光度法测定 Cu^{2+} 的含量。【结果】鉴定菌株为红假单胞菌属,将其命名为 *Rhodopseudomonas* sp. gh32。菌株 gh32 的最适生长温度和最适 pH 分别为 30 °C 和 7.0,其在 pH 5.0–10.0 范围内可正常生长,在 3 mmol/L 的 CuSO_4 溶液中能够正常生长,能利用葡萄糖、甘露糖和果糖等单糖和硫化氢。菌株 gh32 在 24 h 内对 Cu^{2+} 的去除率均在 99% 以上,处理能力为 1 331 g/g 干菌重或 167.6 g/g 湿菌重。【结论】菌株 gh32 对 Cu^{2+} 具有较强的耐受性和很好的去除效果,是治理含 Cu^{2+} 废水的潜力菌株。本研究为生物治理重金属废水提供了支持。

关键词: 菌种鉴定, 红假单胞菌, Cu^{2+} 去除

Isolation and identification of a copper-removal *Rhodopseudomonas* strain

ZHANG Xiao-Qian YANG Kuo WANG Ning ZHAO Min WANG Chun-Lei*

Key Laboratory of Saline-alkali Vegetation Ecology Restoration, Ministry of Education; College of Life Sciences, Northeast Forestry University, Harbin, Heilongjiang 150040, China

Abstract: [Background] The treatment of heavy metal pollution is imminent because heavy metal poses a major threat to the environment and human health. Biological treatment methods are preferred because of the advantages of low cost, good treatment effect and no secondary pollution. [Objective] From the 13 m deep water body of the Liaohe estuary, a strain possessing strong pigment-producing ability and high-concentration Cu^{2+} removal ability was screened by the purple non-sulfur bacteria enrichment medium. [Methods] Morphological, physiological and biochemical characteristics and molecular biological methods were used to identify the strain. The content of Cu^{2+} was determined by spectrophotometry with sodium diethyldithiocarbamate. [Results] The strain was identified as *Rhodopseudomonas* and named as *Rhodopseudomonas* sp. gh32. The optimal growth temperature and growth pH of strain gh32 were 30 °C and 7.0, respectively. The strain gh32 grew normally in the range of pH 5.0–10.0. The strain gh32 could grow normally in 3 mmol/L CuSO_4 solution. The strain gh32 could utilize hydrogen sulfide and

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (51678120)

*Corresponding author: E-mail: wcls-1972@163.com

Received: 12-10-2019; Accepted: 17-02-2020; Published online: 18-03-2020

基金项目: 国家自然科学基金(51678120)

*通信作者: E-mail: wcls-1972@163.com

收稿日期: 2019-10-12; 接受日期: 2020-02-17; 网络首发日期: 2020-03-18

monosaccharides, such as glucose and mannose. The removal rate of Cu^{2+} was over 99% in strain gh32 within 24 h. The ability to treat Cu^{2+} was 1 331 g/g dry bacterial weight or 167.6 g/g wet bacterial weight. **[Conclusion]** The strain gh32 was highly resistant to Cu^{2+} and there was a high removal rate of Cu^{2+} by strain gh32. It will be a potential strain of treatment wastewater containing Cu^{2+} . This study provided support for biological treatment of heavy metal wastewater.

Keywords: Strain identification, *Rhodopseudomonas*, Cu^{2+} removal

紫色非硫细菌属于光合细菌, 不仅能在厌氧光照的条件下进行光能异养生长, 而且能在好氧黑暗条件下进行好氧异养生长, 这种随着生存环境而灵活地改变代谢类型的特性, 使其较其他微生物具有优越性^[1]。其中, 沼泽红假单胞菌 (*Rhodopseudomonas palustris*) 广泛存在于水田、湖泊、江河、海洋、活性污泥和土壤中, 具有生命力极强、营养要求低、生长繁殖快等优点^[2]。沼泽红假单胞菌的用途很多, 可用于水质净化^[3]和污水处理^[4], 还能够作为饲料级微生物添加剂^[5]等。

目前重金属污染较严重, 对环境和人类的健康构成了重大威胁^[6]。其中, Cu^{2+} 的污染较为常见, Cu^{2+} 污染会损害人的中枢神经系统、骨骼造血功能, 使组织代谢发生障碍, 诱发恶性肿瘤等。王亚雄等^[7]研究了类产碱假单胞菌和藤黄微球菌对 Cu^{2+} 和 Pb^{2+} 的吸附特性; 张艳平等^[8]研究了铜绿假单胞菌吸附剂对水中非-铜复合污染的吸附; 刘春媛^[9]研究了红假单胞菌属的细菌对 Cu^{2+} 及亚甲基蓝的吸附; Silva 等^[10]研究了铜绿假单胞菌对石油污染地区铬、铜、锰、锌的生物吸附, 这些微生物对 Cu^{2+} 的处理虽然已经取得较大的进展, 但是对 Cu^{2+} 的处理能力还有待提高, 国内外关于沼泽红假单胞菌处理 Cu^{2+} 的报道很少。本研究以筛选的一株高效去除 Cu^{2+} 的红假单胞菌作为生物处理剂, 研究其对 Cu^{2+} 的去除作用, 为该菌用于治理含 Cu^{2+} 废水提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

泥水样采自辽宁营口辽河入海口深 13 m 的水体中。

细菌基因组 DNA 提取试剂盒, 北京 Tiangen 公司; 胶回收试剂盒、Premix TaqTM、DL2000 DNA Marker、大肠杆菌 DH5 α 、pMD18-T 载体, TaKaRa 公司; 16S rRNA 基因通用引物 27F 和 1492R 由华大基因公司合成。恒温振荡培养箱, 上海一恒科技有限公司; 扫描电子显微镜, JEOL 公司; 真空冷冻干燥机, SIM 公司; 紫外分光光度计, 上海光谱仪器有限公司。

营养肉汤培养基(g/L): 蛋白胨 10.0, 牛肉浸出粉 3.0, 氯化钠 5.0。

1.2 方法

1.2.1 菌种的筛选与纯化

利用紫色非硫细菌富集培养基进行富集, 矿物盐-丁二酸钠分离培养基进行分离纯化^[11]。选取一株产红色色素力强、长势较好的菌株 gh32 进行后续研究。

1.2.2 菌株 gh32 的鉴定

对菌株 gh32 进行扫描电镜和能谱分析, 扫描电镜方法参见文献[12]。革兰氏染色方法及生理生化特性测定方法参见文献[13]。

菌株总 DNA 的提取采用细菌基因组 DNA 提取试剂盒。以菌株的总 DNA 为模板, 利用细菌 16S rRNA 基因的通用引物^[14]进行 PCR。PCR 反应体系(20 μL): ddH₂O 2.6 μL , Premix TaqTM 10 μL , 引物 27F 和 1492R (2.5 $\mu\text{mol/L}$) 各 3.2 μL , DNA 模板 1 μL 。PCR 反应条件参考文献[15]。

采用胶回收试剂盒回收 16S rRNA 基因目的片段, 与 pMD18-T 载体连接后将其转化到大肠杆菌 DH5 α 感受态细胞中, 利用终浓度为 50 $\mu\text{g/mL}$ 的氨苄青霉素筛选阳性转化子, 经菌液 PCR 检测出的阳性转化子送华大基因公司进行测序。在 NCBI

上将测序结果进行 BLAST 同源比对分析, 选取一些序列经 ClustalX 比对后, 采用最大简约法, 用 Phylip 软件构建系统进化树。

1.2.3 菌株 gh32 的生长特性研究

以温度 30 °C、pH 7.0、NaCl 质量分数 0.5% 和 0 mmol/L Cu²⁺作为基本生长条件, 研究不同温度(10–60 °C)、pH 值(3.0–14.0)、NaCl (质量分数为 1%–11%)和 Cu²⁺ (0–4.0 mmol/L)对菌株生长的影响。将菌株活化后按 3%的接种量分别接种于不同条件的营养肉汤培养基中, 150 r/min 培养 12 h, 测定 OD₆₀₀, 重复测定 3 次。

1.2.4 菌株 gh32 去除 Cu²⁺的研究

将菌液接种至营养肉汤培养基中, 30 °C、150 r/min 培养 12 h。将菌液以 5%的接菌量分别接种到 Cu²⁺质量分别为 10–600 mg 的 5 mL 体系中, 30 °C、150 r/min 处理 24 h, 采用二乙基二硫代氨基甲酸钠分光光度法测定 Cu²⁺的质量, 测定方法见参考文献[16], 根据以下公式计算 Cu²⁺的去除率:

$$\text{Cu}^{2+}\text{的去除率}(\%) = (m_1 - m_2) / m_1 \times 100$$

式中, m₁: 处理前 Cu²⁺的质量, mg; m₂: 处理后 Cu²⁺的质量, mg。

菌株 gh32 处理 Cu²⁺后进行扫描电镜及能谱分析, 与正常生长菌体的能谱进行比较。

2 结果与分析

2.1 菌种的筛选及菌株 gh32 的鉴定结果

在泥水样品中筛选并纯化 8 株菌株。选取一株编号为 gh32 显深红色的菌株进行研究。

菌株 gh32 革兰氏染色显红色, 为革兰氏阴性菌。该菌株的扫描电镜结果如图 1 所示, 该菌株为杆状, 大小约为(0.52–0.87) μm×(1.83–3.43) μm。菌株 gh32 在不含铜的培养基上生长的能谱结果如图 2 所示, 菌体中含有 C、N、O、Na、P 和 S 元素。

菌株 gh32 的生理生化结果如表 1 所示, 该菌株能够利用葡萄糖、甘露糖和果糖等单糖, 以及蔗糖和麦芽糖等二糖, 菌株 gh32 具有丙酮酸脱羧酶

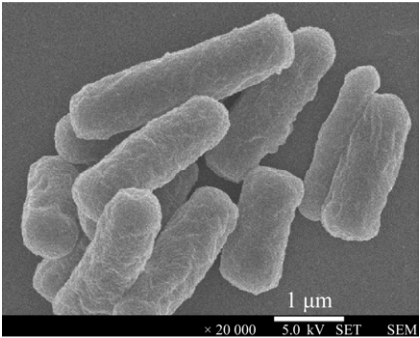


图 1 菌株 gh32 的扫描电镜结果
Figure 1 Scanning electron microscopy results of strain gh32

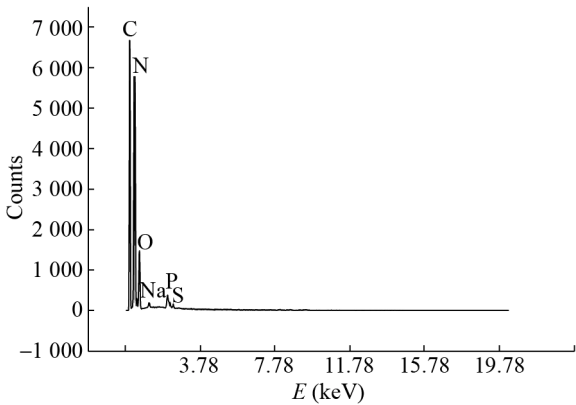


图 2 菌株 gh32 在不含铜的培养基上生长的能谱结果
Figure 2 Energy spectrum results of strain gh32 growing on copper-free medium

表 1 菌株 gh32 的生理生化反应结果
Table 1 Physiological and biochemical reaction results of strain gh32

项目	结果	项目	结果
Items	Result	Items	Result
Glucose	+	Mannitol	–
Sucrose	+	Inositol	–
Fructose	+	Sorbitol	–
Maltose	+	Nitrate (reduction)	+
Mannose	+	Simon’s Citrate	–
Melibiose	–	Peptone water	+
Sorbose	–	V-P	+
Rhamnose	–	Arginine double hydrolase	+
Lactose	–	Hydrogen sulfide	+
Arabic candy	–	Gelatin	+
Galactose	–	Urea	+
Raffinose	–	Starch broth	+
Xylose	–	Glucose oxidative fermentation	Fermented
Xylitol	–		

注: +: 阳性反应; –: 阴性反应。

Note: +: Positive reaction; –: Negative reaction.

(V-P 反应), 水解精氨酸、色氨酸(蛋白胨水反应)、明胶和尿素的酶, 还具有还原硝酸盐的酶, 能在西蒙氏枸橼酸盐和淀粉肉汤培养基中生长, 能够利用硫化氢, 利用葡萄糖的类型为发酵型。

菌株 gh32 的 16S rRNA 基因序列全长为 1 411 bp, 在 NCBI 上经 BLAST 同源性分析的结果表明, 该菌株与沼泽红假单胞菌的相似性达到 99%, 结合 16S rRNA 基因序列分析以及该菌株的形态学和生理生化特性, 将其鉴定为红假单胞菌属, 命名为 *Rhodopseudomonas* sp. gh32。基于 16S rRNA 基因序列构建的该菌株的系统进化树如图 3 所示。

2.2 菌株 gh32 的生长特性研究结果

菌株 gh32 的生长特性结果如图 4 所示, 其最适生长温度为 30 °C (图 4A); 在 pH 5.0–10.0 的范围内均生长良好, 说明该菌株生长 pH 范围较广泛, 对环境的适应能力更强(图 4B); 在质量分数为 1%–6% 的 NaCl 溶液中可正常生长(图 4C); 在含 0–3 mmol/L CuSO_4 的培养基中均能生长正常, 说明该菌株对 CuSO_4 的抗性比较强(图 4D)。

2.3 菌株 gh32 去除 Cu^{2+} 的效果

菌株 gh32 去除 Cu^{2+} 的效果如图 5 所示, 菌株 gh32 在 24 h 内对 600 mg Cu^{2+} 的去除率达 99.46%, 处理能力为 1 331 g/g 干菌重或 167.6 g/g 湿菌重, 说明该菌株对 Cu^{2+} 的去除能力强。

菌株 gh32 处理 600 mg Cu^{2+} 24 h 后的扫描电镜能谱结果如图 6 所示, 其与处理前菌体能谱相比, Cu 元素增加了, 可见 Cu^{2+} 吸附到菌体上。

3 讨论与结论

红假单胞菌属的营养代谢类型多样, 在厌氧光照条件下进行光能自养生长, 产色素; 在微好氧至好氧条件下进行化能异养生长, 因氧气抑制色素的形成, 所以在有氧黑暗条件下菌体无色。菌株 gh32 在厌氧光照条件下具有较强的产红色色素的能力, 这一特性使得该菌株容易被筛选出来。由《伯杰细菌鉴定手册》^[17]可知该菌属的模式生物沼泽红假单胞菌不能利用单糖类和硫化物, 而菌株 gh32 可以利用葡萄糖、甘露糖和果糖等单糖和硫化氢, 林燕玲等^[18]和黄小春等^[19]研究的沼泽红假单胞菌同

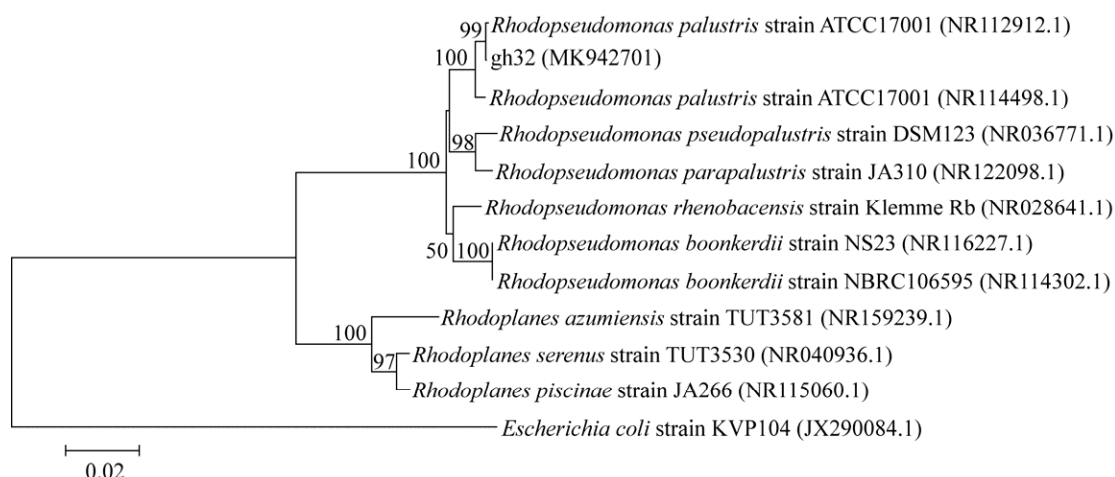


图 3 基于 16S rRNA 基因序列的菌株 gh32 系统进化树

Figure 3 Phylogenetic tree based on 16S rRNA gene sequence of strain gh32

注: 括号中序号: 菌株登录号; 分支点上的数字: Bootstrap 支持率; 标尺刻度 0.02: 序列差异的分支长度。

Note: Numbers in parentheses: The sequence accession number; Numbers in each branch points: The percentages supported by bootstrap; Bar=0.02: Nucleotide divergence.

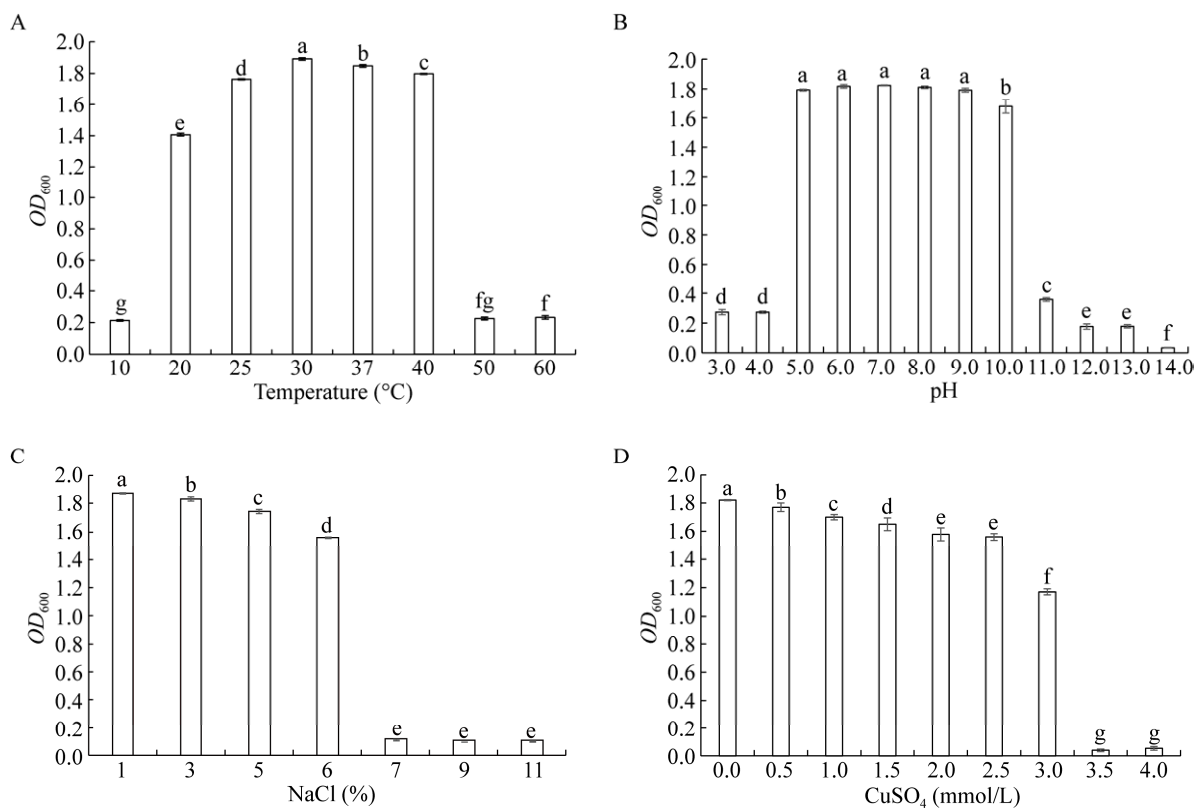
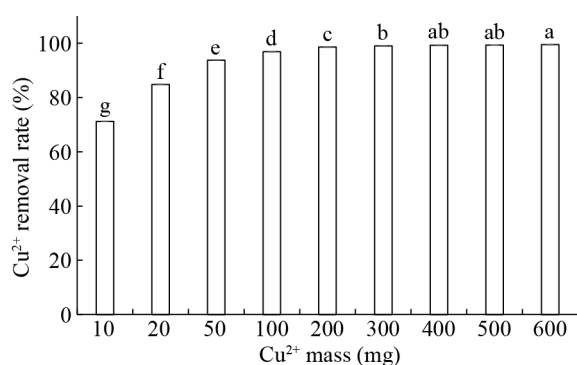


图4 菌株 gh32 的生长特性

Figure 4 Growth characteristics of strain gh32

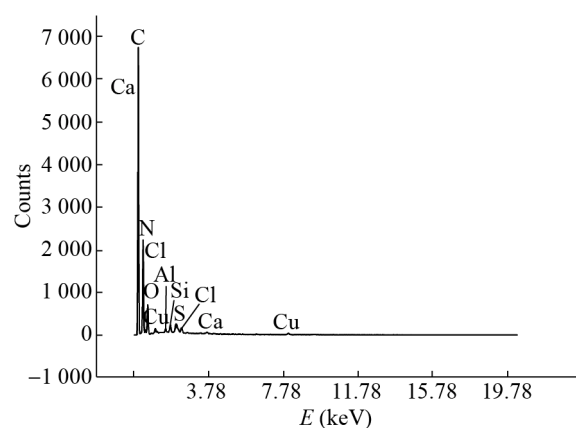
注: A: 温度; B: pH; C: NaCl 含量; D: CuSO₄ 浓度. 不同小写字母表示在 $P < 0.05$ 水平差异显著.

Note: A: Temperature; B: pH; C: NaCl content; D: CuSO₄ concentration. Different lowercase letters indicate a significant difference at the level of $P < 0.05$.

图5 菌株 gh32 对 Cu²⁺ 的去除率Figure 5 The removal rate of Cu²⁺ by strain gh32

注: 图中不同小写字母表示在 $P < 0.05$ 水平差异显著.

Note: Different lowercase letters in the figure indicate a significant difference at the $P < 0.05$ level.

图6 菌株 gh32 在处理 Cu²⁺ 后的能谱结果Figure 6 Energy spectrum results of strain gh32 after Cu²⁺ treatment

样也能利用硫化氢。硫化氢是一种有毒气体, 工业上产生的硫化氢都要经过处理, 而菌株 gh32 能利用硫化氢, 这为其处理硫化氢提供了较好的基础。

菌株 gh32 对 Cu^{2+} 的抗性较强, 在 3 mmol/L Cu^{2+} 的培养基中仍能正常生长。然而有研究报道^[20-22] 沼泽红假单胞菌在 Cu^{2+} 浓度分别为 8 $\mu\text{mol/L}$ 、 1×10^{-5} mol/L 和 0.8 $\mu\text{mol/L}$ 时生长均受到抑制, 说明该菌株 gh32 对 Cu^{2+} 的耐受性较强。

菌株 gh32 在处理 100–600 mg Cu^{2+} 时, 去除率均在 99% 以上, 在处理 600 mg 的 Cu^{2+} 时, 去除率达到最大值 99.46%, 处理能力为 1 331 g/g 干菌重或 167.6 g/g 湿菌重。与目前已有的文献^[10,23-27] 报道相比, Silva 等研究的铜绿假单胞菌对 Cu^{2+} 的去除率为 95%, 处理能力为 86.95 mg/g 生物量^[10]; 邹水林研究的假单胞菌(*Pseudomonas* sp.)对 Cu^{2+} 的吸附能力为 3.35 mg/g 湿菌重^[23]; 蔡永君等研究的固定化恶臭假单胞菌(*Pseudomonas putida*)对 Cu^{2+} 的去除率为 74.76%^[24]; 黄富荣等研究的红螺菌(*Rhodospirillum* sp.)对 Cu^{2+} 的最大吸附量为 48.23 mg/g 干菌重^[25]; Sar 等研究的铜绿假单胞菌对 Cu^{2+} 的吸附能力为 137.6 mg/g 干菌重^[26]; Ekmekyapar 等研究的地衣(*Cladonia rangiformis*)对 Cu^{2+} 的吸附能力为 7.69 mg/g 干菌重^[27], 菌株 gh32 对 Cu^{2+} 的去除能力远远强于其他菌株, 菌株 gh32 的这一优势使其在处理含 Cu^{2+} 废水中具有较大潜能。

本研究结果表明, 菌株 gh32 能利用葡萄糖、甘露糖和果糖等单糖和硫化氢, 对 Cu^{2+} 具有较强的耐受性和较好的去除效果, 是很有潜力治理含 Cu^{2+} 废水的菌株。

REFERENCES

- [1] Jia WL, Bai HJ. Study of the adsorption properties of zinc ions in the aqueous solutions by *Rhodopseudomonas palustris*[J]. Shanxi Chemical Industry, 2012, 32(3): 1-4,13 (in Chinese)
贾万利, 白红娟. 沼泽红假单胞菌对 Zn^{2+} 的吸附性能研究[J]. 山西化工, 2012, 32(3): 1-4,13
- [2] Xiao YN, Cui YJ, Xu Q, et al. Identification of *Rhodopseudomonas palustris* and its analysis for carotenoids[J]. Science & Technology Review, 2013, 31(13): 58-62 (in Chinese)
肖亦农, 崔艺久, 徐琼, 等. 一种新沼泽红假单胞菌鉴定及其类胡萝卜素含量分析[J]. 科技导报, 2013, 31(13): 58-62
- [3] Hu N, Wang LF, Qiu YL. Study on the biodegradation effects of *Rhodopseudomonas palustris* on sewage from pig farm[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2009, 37(36): 17860-17861,17864 (in Chinese)
胡南, 王兰甫, 邱玉玲. 沼泽红假单胞菌的分离·鉴定及生物净化作用研究[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(36): 17860-17861,17864
- [4] He YJ, Bai HJ. Study on degradation of TNT wastewater by *Rhodopseudomonas palustris*[J]. Chemical Intermediate, 2012, 9(5): 19-23 (in Chinese)
贺雅静, 白红娟. 沼泽红假单胞菌降解 TNT 废水的研究[J]. 化工中间体, 2012, 9(5): 19-23
- [5] Wang M, Chen YG, Duan DX, et al. Improvement effects of *Rhodopseudomonas palustris* on the quality of loach culture water[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition), 2010, 39(2): 168-172 (in Chinese)
王妹, 陈有光, 段登选, 等. 沼泽红假单胞菌对泥鳅养殖池塘水质的改善效果[J]. 福建农林大学学报: 自然科学版, 2010, 39(2): 168-172
- [6] Odaka M, Kobayashi M. Cobalt proteins, overview[A]// Kretsinger RH, Uversky VN, Permyakov EA. Encyclopedia of Metalloproteins[M]. New York: Springer, 2013
- [7] Wang YX, Guo JL, Liu RX. Biosorption of heavy metals by bacteria isolated from activated sludge[J]. Environmental Science, 2001, 22(6): 72-75 (in Chinese)
王亚雄, 郭瑾珑, 刘瑞霞. 微生物吸附剂对重金属的吸附特性[J]. 环境科学, 2001, 22(6): 72-75
- [8] Zhang YP, Zhang D, Liu XY, et al. Biosorption of a combination of phenanthrene and copper pollutants from aqueous solutions by a *Pseudomonas aeruginosa* biosorbent[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, 38(2): 422-429 (in Chinese)
张艳平, 张栋, 刘兴元, 等. 铜绿假单胞菌吸附剂对水中菲-铜复合污染的吸附研究[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(2): 422-429
- [9] Liu CY. Study on biosorption of photosynthetic bacteria to copper ions(II) and methylene blue[D]. Anshan: Master's Thesis of University of Science and Technology Liaoning, 2015 (in Chinese)
刘春媛. 光合细菌对 Cu^{2+} 及亚甲基蓝吸附性能的研究[D]. 鞍山: 辽宁科技大学硕士学位论文, 2015
- [10] Silva RMP, Rodríguez AÁ, de Oca JMGM, et al. Biosorption of chromium, copper, manganese and zinc by *Pseudomonas aeruginosa* AT18 isolated from a site contaminated with petroleum[J]. Bioresource Technology, 2009, 100(4): 1533-1538

- [11] Liu F. Isolation and identification on a strain of purple non-sulfur photosynthetic bacteria[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2008, 36(18): 7538-7539 (in Chinese)
刘芳. 1 株紫色非硫光合细菌的分离鉴定[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(18): 7538-7539
- [12] Sun HQ. Screening and characteristics of strains with laccase activity[D]. Harbin: Master's Thesis of Northeast Forestry University, 2018 (in Chinese)
孙海琼. 具有漆酶活性菌株的筛选及其特性的研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学硕士学位论文, 2018
- [13] Shen P, Fan XR, Li GW. Microbiology Experiment[M]. 3rd ed. Beijing: Higher Education Press, 1999 (in Chinese)
沈萍, 范秀容, 李广武. 微生物学实验[M]. 3 版. 北京: 高等教育出版社, 1999
- [14] Wang YL, Yang RH, Mao AJ, et al. Phylogenetic diversity analyse of Rumen Bacteria using culture independent method[J]. Acta Microbiologica Sinica, 2005, 45(6): 915-919 (in Chinese)
王远亮, 杨瑞红, 毛爱军, 等. 采用未培养技术对荷斯坦奶牛瘤胃细菌多样性进行初步分析[J]. 微生物学报, 2005, 45(6): 915-919
- [15] Li FS, Liu HY, Dai SJ, et al. Screening of strain *Bacillus* sp. CLb highly producing-laccase and research on dye decolorization effect[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2014, 42(6): 1614-1616, 1654 (in Chinese)
李凡姝, 刘海洋, 戴绍军, 等. 高产漆酶菌株 *Bacillus* sp. CLb 的筛选及其对染料脱色效果的研究[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(6): 1614-1616, 1654
- [16] Yin YW. A simple and rapid method for the determination of copper by spectrophotometry with sodium diethyldithiocarbamate[J]. Environment, 2011(S2): 49, 52 (in Chinese)
殷亦文. 二乙基二硫代氨基甲酸钠分光光度法测定铜的简便快速方法的探讨[J]. 环境, 2011(S2): 49, 52
- [17] Buchanan RE, Gibbons NE. Bergey's Manual of Determinative Bacteriology[M]. Translation Group of Bergey's Manual of Determinative Bacteriology, Institute of Microbiology, Chinese Academy of Sciences, trans. 8th ed. Beijing: Science Press, 1984 (in Chinese)
布坎南 RE, 吉本斯 NE. 伯杰细菌鉴定手册[M]. 中国科学院微生物研究所《伯杰细菌鉴定手册》翻译组, 译. 8 版. 北京: 科学出版社, 1984
- [18] Lin YL, Liu JF, Zhou T, et al. Isolation, identification and cultural character of a strain of purple nonsulfur photosynthetic bacteria[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2015, 43(17): 5-8 (in Chinese)
林燕玲, 刘杰凤, 周天, 等. 一株紫色非硫光合细菌的分离鉴定和培养特性研究[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(17): 5-8
- [19] Huang XC, Wang XD, Zhao P. Research on isolation, identification of *Rhodopseudomonas palustris* and its effects on the growth of *Ipomoea aquatica*[J]. Jiangxi Forestry Science and Technology, 2014, 42(5): 24-26 (in Chinese)
黄小春, 王小东, 赵攀. 沼泽红假单胞菌的分离鉴定及对蕹菜生长的影响[J]. 江西林业科技, 2014, 42(5): 24-26
- [20] Zhou MH, Zhang XJ, Zhao XW. A few biological effects of some heavy metal ions on photosynthetic bacterium *Rhodopseudomonas palustris*[J]. Microbiology China, 2003, 30(3): 64-68 (in Chinese)
周茂洪, 张学俊, 赵肖为. 几种重金属离子对沼泽红假单胞菌的生物效应[J]. 微生物学通报, 2003, 30(3): 64-68
- [21] Yu GH, Chen YH, Cheng P, et al. Influence of several metal ions on growth and nitrite removal of *Rhodopseudomonas palustris* strain 2-8[J]. South China Fisheries Science, 2011, 7(4): 30-35 (in Chinese)
喻国辉, 陈燕红, 程萍, 等. 几种金属离子对沼泽红假单胞菌 2-8 生长和亚硝酸盐消除的影响[J]. 南方水产科学, 2011, 7(4): 30-35
- [22] Zhou MH, Zhao XW, Wu XC. Inhibition effects of Cu^{2+} , Cd^{2+} and Cr(VI) on the growth of *Rhodopseudomonas palustris*[J]. Journal of Applied & Environmental Biology, 2002, 8(3): 290-293 (in Chinese)
周茂洪, 赵肖为, 吴雪昌. Cu^{2+} , Cd^{2+} 和 Cr(VI) 抑制沼泽红假单胞菌生长的毒性效应[J]. 应用与环境生物学报, 2002, 8(3): 290-293
- [23] Zou SL. Screening of copper resistant bacteria and analysis of its Cu^{2+} biosorption[D]. Guangzhou: Master's Thesis of South China University of Technology, 2014 (in Chinese)
邹水林. 重金属铜耐受菌的筛选及吸附铜的研究[D]. 广州: 华南理工大学硕士学位论文, 2014
- [24] Cai YJ, Xiao Y, Ni H. Study on condition optimization of filter medium volcanic rock immobilized *Pseudomonas putida* and adsorption of copper ions[J]. Amino Acids and Biotic Resources, 2013, 35(4): 35-38 (in Chinese)
蔡永君, 肖遥, 倪红. 火山岩滤料固定化恶臭假单胞菌条件的优化及其吸附铜离子的研究[J]. 氨基酸和生物资源, 2013, 35(4): 35-38
- [25] Huang FR, Yin H, Peng H, et al. Study of kinetics and desorption of copper biosorption by *Rhodospirillum*[J]. Ecologic Science, 2004, 23(1): 35-37, 46 (in Chinese)
黄富荣, 尹华, 彭辉, 等. 红螺菌吸附铜的动力学与脱附研究[J]. 生态科学, 2004, 23(1): 35-37, 46
- [26] Sar P, Kazy SK, Asthana RK, et al. Metal adsorption and desorption by lyophilized *Pseudomonas aeruginosa*[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 1999, 44(2/3): 101-110
- [27] Ekmekyapar F, Aslan A, Bayhan YK, et al. Biosorption of copper(II) by nonliving lichen biomass of *Cladonia rangiformis* hoffm.[J]. Journal of Hazardous Materials, 2006, 137(1): 293-298