

# 嗜盐菌对高盐废水处理的研究进展

魏莉荣<sup>1,2</sup>, 王纪晗<sup>1</sup>, 徐毓东<sup>1</sup>, 耿合定<sup>1</sup>, 赵 辉<sup>1,3\*</sup>, 闫华晓<sup>1,3\*</sup>, 韩作振<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup>山东科技大学化学与生物工程学院生物工程系, 山东 青岛

<sup>2</sup>山东科技大学安全与环境工程学院环境工程系, 山东 青岛

<sup>3</sup>山东省非粮乙醇生物炼制技术创新中心(筹), 山东 青岛

<sup>4</sup>山东科技大学地球科学与工程学院地质学系, 山东 青岛

收稿日期: 2021年11月6日; 录用日期: 2021年11月25日; 发布日期: 2021年12月8日

## 摘 要

许多工业生产活动都会产生废水, 有些废水含高盐度、高有机质和其他可危害环境的污染物。目前, 含盐废水的处理已成为许多国家关注的重要问题之一。本文介绍了高盐废水的来源、特点, 以及传统处理高盐废水的方法和存在的缺陷。嗜盐菌因为其生长环境特殊, 利用其具有的独特功能来处理高盐废水, 是一种经济节约、环境友好的好方法。嗜盐菌在高盐废水处理中有巨大应用潜力。本文阐述了嗜盐菌的分类及嗜盐机理, 同时对去除高盐废水中的石油烃类、重金属以及氮磷等的研究进展进行了综述, 最后, 展望了嗜盐菌在处理废水中的应用前景和面临的挑战, 为后续的嗜盐菌处理高盐废水等研究提供参考。

## 关键词

嗜盐菌, 高盐废水, 废水处理, 经济节约, 环境友好

# Research Progress on the Treatment of Hypersaline Wastewater by Halophilic Bacteria

Lirong Wei<sup>1,2</sup>, Jihan Wang<sup>1</sup>, Yudong Xu<sup>1</sup>, Hedeng Geng<sup>1</sup>, Hui Zhao<sup>1,3\*</sup>, Huaxiao Yan<sup>1,3\*</sup>, Zuozhen Han<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Bioengineering, College of Chemical and Biological Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao Shandong

<sup>2</sup>Department of Environmental Engineering, College of Safety and Environmental Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao Shandong

<sup>3</sup>Shandong Technology Innovation Center of Non-Grain Ethanol Biorefinery, Qingdao Shandong

<sup>4</sup>Department of Geology, School of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao Shandong

\*通讯作者。

文章引用: 魏莉荣, 王纪晗, 徐毓东, 耿合定, 赵辉, 闫华晓, 韩作振. 嗜盐菌对高盐废水处理的研究进展[J]. 微生物前沿, 2021, 10(4): 182-188. DOI: 10.12677/amb.2021.104023

## Abstract

Many industries produce wastewater, some of which contain high salinity, high contents of organic matters and other pollutants that can harm the environment. Now the treatment of hypersaline wastewater has become one of the main concerns in many countries. This article introduces the source and characteristics of hypersaline wastewater, as well as traditional treatment methods and limitations. Because of the special growth environment of halophilic bacteria, it is an economical and environmentally friendly method to use its unique function to treat hypersaline wastewater. Halophilic bacteria have great potential in the treatment of hypersaline wastewater. In this paper, the classification and mechanism of halophilic bacteria are described, and the research progress on the removal of petroleum hydrocarbons, heavy metals and nitrogen and phosphorus in hypersaline wastewater is reviewed. Finally, the application and challenges of halophilic bacteria in wastewater treatment are prospected, providing reference for the subsequent research on the treatment of hypersaline wastewater by halophilic bacteria.

## Keywords

Halophilic Bacteria, Hypersaline Wastewater, Wastewater Treatment, Economy, Environmentally Friendly

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着生活污水及工业废水排放量日益增多，高盐废水的处理已越来越受到重视。盐度较高的水环境中组成成分比较复杂，通常会存在大量的无机离子，以及含有有机污染物质等[1]。若直接排放或者经过稀释后排放，一方面会浪费水资源，另一方面，废水中的盐分会对水生生物造成危害，抑制植物的萌发与生长。由于物种多样性的减少，这一过程将对生态系统造成干扰。此外，利用含盐废水进行灌溉也会导致土壤次生盐渍化，因为水分蒸发会使土壤盐分残留。在某些情况下，根据排放源的不同，在含盐废水中可能会检测到重金属。众所周知，某些重金属具有致癌和有毒的特性，它们也是不可降解的，可以通过食物链在生物体内积累。含有重金属的高盐废水如果在排放前没有适当处理，对环境的危害更大。在以往的处理方法中，都会存在一系列的问题，比如费用昂贵或者不方便运行等。嗜盐菌因为其生存环境恶劣，适应环境能力较强，用它们处理高盐废水成了国内外研究者的研究重点[2]，而且也在实验室内取得了较好的实验结果，但若广泛应用的话还需做更多的研究。

## 2. 高盐废水的来源及传统处理方法

### 2.1. 高盐废水来源

当总含盐量质量分数高于 1% 时，称为高盐废水，其来源比较多，大致有以下几个方面[3] [4] [5]：

1) 工业部门。在食品工业中，盐和盐水在海鲜产品、腌菜、肉类罐头和乳制品相关的食品加工工厂的应用导致盐废水的产生。纺织工业也因印染和洗涤活动造成含盐废水的排放。纺织废水的典型成分包括染料、悬浮固体(SS) (如纤维)、酚和无机污染物，无机污染物包括氯、氮、重金属和硫酸盐。在制革工业

中,制革过程会产生大量含盐废水,因为它的废水含有多种污染物,包括铬等重金属,因此,它被认为是污染最严重的行业。在石油钻井过程中,石油和天然气工业也会产生含盐废水。

2) 直接排放被利用的海水。在水资源极其贫乏的今天,有些工业直接利用海水生产,我国大多数的城市居民生活用水,如厕所冲刷、路面洗涤和消防用水,也会用到海水。这一系列不当行为均会导致水体和土壤的污染。

3) 其他含盐废水。循环水在使用过程中,循环利用率得到了提升,但是含盐量却在不断积累,水质逐渐转变为高盐废水。在大型的舰船上,产生的生活污水也是高盐废水。垃圾渗滤液除含上述工业废水外,还含有无机盐、氨、生物有机物、外来生物、重金属、有机污染物。一些污染的地表水、沿海地区的渗透水等都属于含盐废水。

在上述废水中,会同时含有许多的 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ ,在利用工业污水进行回用的浓水中也含有大量的更难降解的有机污染物,处理过程更难也更为复杂。在含盐量较高的废水中,一般N、P等营养物质含量也会较高,若直接排放,会加重水体的富营养化。

## 2.2. 传统高盐废水的处理方法

主要有电解法、膜分离法、焚烧法和离子交换法[6]。这类方法有一定的局限性,处理时产生的费用昂贵,有二次污染物,在大规模推广过程中会有一定的难度[7]。

1) 电解法。通过采用电解技术,有害物质在阴阳极作用下被转化为无毒物质,从而净化废水。这种方法具有一定优点,表现为对化学药品使用少,使用低压直流电源即可,占地面积小。由于在实际生产生活中,污水量大,对电能和导体等电极的消耗也会随之增加。用电解法去除废水中1 Kg TKN(总凯氏氮)和1 Kg COD(化学需氧量)的能耗分别为22.45 kWh和0.80 kWh,运行费用高,无法大规模应用[8]。

2) 膜分离法。使用膜选择性渗透废水中的某些成分,该法所用设备占地小,可以广泛使用,处理效率高。但是膜的价格较贵,盐浓度较高时膜会被破坏,膜容易堵塞,更换费用高[9]。

3) 焚烧法。旨在通过高温来处理废水中的污染物。主要处理化工厂排放的高浓度有机废水,处理前还需要进行化学处理,会产生二次污染物等[10]。

4) 离子交换法。主要是用合成的离子交换剂作为吸附物,将溶液中需要去除的离子吸附去除。优点是合成物一般无毒且可以反复利用,成本低,操作也简单。但是对有机物的去除效果差,离子交换树脂容易被堵塞,在处理时就会造成处理水质不达标,具有局限性[11]。

## 3. 嗜盐菌的种类及其耐盐机制

### 3.1. 嗜盐菌的分类

副溶血性弧菌又称为嗜盐菌,它们是长期居住于盐度较高的环境中的细菌,为革兰氏阴性菌。一旦在食盐腌制品区,如腌制海蟹、海鱼、海贝、咸菜、腌鱼等地方有嗜盐菌,就会迅速大量繁殖。盐湖、盐场等浓缩海水中分布比较多。由于对盐的耐受程度不同,将其分为下列四类[12],如表1所示:

Table 1. Strain classification

表 1. 菌株分类

分类	NaCl 含量%	代表微生物
非嗜盐菌	<1.17	多数的真菌、细菌和淡水微生物
弱嗜盐菌	1.17~2.93	多数的海洋生物
中度嗜盐菌	2.93~14.63	解木糖赖氨酸芽孢杆菌、盐单胞菌
极端嗜盐菌	14.63~30.4	哈氏弧菌

大部分的嗜盐菌都属于好气化能异养菌，它们可以利用环境中的大部分碳源，有一些嗜盐菌还可以进行厌氧呼吸，生活在碱性环境中(pH 9~10)，繁殖速率比较快。由于细胞内含有类胡萝卜素，所以肉眼观察到的菌落一般都会呈现紫红色或者红色，一般来说，它们进行鞭毛运动。对含盐量高的有机化学品和工业废水而言，可采用中度和极端嗜盐菌处理。

### 3.2. 嗜盐菌的耐盐机制

嗜盐菌在极端环境下，细胞如何维持渗透压的稳定，如何正常生长和繁殖呢？经研究发现：

1) 在极端环境下，对于细胞来说， $\text{Na}^+$ 起着至关重要的作用。它会影响菌内氨基酸、糖的运输，发生特别作用导致膜的机械强度增加，阻止嗜盐菌的融合。 $\text{Na}^+$ 在产生能量的呼吸反应中也具有重要作用。嗜盐菌的细胞壁具有更强的适应能力，原因在于肽聚糖被糖蛋白替换了，能够促进蛋白在高盐环境中的稳定。

2) 嗜盐菌内含有嗜盐酶，它只能在高浓度的盐溶液中才具有活性。当外界的盐浓度变化时，胞内的极性小分子物质会累积到一起，自动调节细胞质的离子浓度、细胞的渗透压等，使细胞内外达到一个动态平衡过程，有利于细胞的存活。

3) 大多数嗜盐菌能够在盐溶液中合成氨基酸以及糖类等小分子，让渗透压保持平衡，让生命活动得以继续。

4) 部分嗜盐菌可以进行光合作用，主要因为它细胞膜表面有光介导紫膜，是由多个六面的紫色格子所构成的斑块。全膜 50%的区域是紫膜膜片，紫膜主要由脂类(25%)和蛋白质(75%)组成，研究者将它们称为菌视紫素，位于菌视紫素中的发色团会发生顺式 - 反式结构的变化，形成质膜上的  $\text{H}^+$  质子梯度差，产生电化势，在 ATP 酶催化下进行 ATP 的合成，为嗜盐菌菌体提供生命活动所需的能量[13]。

## 4. 嗜盐菌在高盐废水中的应用

### 4.1. 嗜盐菌在石油烃类废水中的应用

早在很多年前，采用生物法治理采油废水已被广泛研究。1995 年时，Rhykerd 等人已经确认了嗜盐菌能够降解石油中的烃类。我国的科研人员也做了大量的研究，证实了嗜盐微生物确实在石油废水处理等方面有显著的效果。

李艳红、史利荣等人，在采油废水的装置中筛选得到了两株石油降解菌，经过实验发现，将处于生长状态最佳时的菌株投入到含油的污水中，108 h 后，对污水中石油类的污染物去除效率分别达到了 62.1% 和 61.4%。陈梅梅等[14]利用大港油田土壤中筛选得到的原油降解菌处理原油，原油浓度为 1000 mg/L，其降解率达到了 72.6%。

I.K. Kapdan [15]等人从阿拉伯海湾的高盐海域分离到两株极端嗜盐菌。实验结果证实，在培养 3 周后，这些极端嗜盐菌可以很好地进行原油(13%~47%)，正十八烷(28%~67%)和菲(13%~30%)的生物降解。随着 NaCl 浓度的增加，各菌株的降解速率均有所提高。最适浓度为 3 mol/L NaCl，但即使在 4 mol/L NaCl 下，烃类被生物降解速率也会高于浓度为 2 mol/L 的 NaCl。因此，这些极端嗜盐菌对石油污染的高盐环境具有一定的自清洁和生物修复作用。

温洪宇[16]等人用分离纯化得到的芽孢杆菌处理炼油厂的含油污水，实验表明，细菌能高效去除有机污染物归因于它的热稳定性好。在温度为 90℃时，菌液接种量为 10%处理石油水时，絮凝率可达 81%。

S.M.M. Dastgheib [17]等研究了从盐渍土壤样品中获得的嗜盐菌群对菲的降解，得到了一种多环芳烃 (PAH)降解培养物 qpheo-subiv，该培养物包含一株可培养的 *Halomonas* 属菌株和一株不可培养的 *Marinobacter* 属菌株。Qpheo-subiv 在 NaCl 浓度为 15% (w/v)的菲上生长，在 NaCl 浓度为 5% (w/v)的最佳

条件下,可在6 d内降解90%以上的菲。

B.M.Peyton 等[18]利用嗜盐菌除去高盐废水中的酚类,对不同地方的样品进行嗜盐菌的分离筛选,样品在含10% (w/v) NaCl、pH 7.0、以苯酚为底物的培养基中富集获得嗜盐菌。在30℃时,初始苯酚浓度为50 mg/L,在投入嗜盐菌后,苯酚的浓度有所降低。对于其中一种嗜盐菌培养物,在苯酚浓度高达320 mg/L时,也对苯酚的降解率进行了研究。在此条件下,生长速率为0.09~0.22 1/h,随初始苯酚浓度的增加而降低。

Woolard [19]等人从大盐湖中分离出嗜盐菌菌种后,并将其投入到实验室反应器中,模拟处理含酚油田废水。经过一段时间的反应,出水时的浓度远低于实验开始时水中酚的浓度,COD以及悬浮物的含量都有所降低。

#### 4.2. 嗜盐菌在重金属离子去除方面的应用

虽然重金属如Cd、Zn、Pb、Fe、Cu、Hg、Ni、Mn、Co等通常以微量存在,但它们被认为是废水中毒性最大和分布最广的成分,能够引起特别严重的环境问题,因此对水中重金属的处理也是大家研究的热点。

酸性矿山(AMD)废水通常含有高浓度的硫酸盐和重金属,MARTINS M [20]等人筛选得到的硫酸盐还原菌(SRB),通常致死浓度Fe (400 mg/L)、Zn (150 mg/L)和Cu (80 mg/L),但是对该样品中的硫酸盐还原菌无毒性。因此,在硫酸盐还原和金属去除方面获得了较高效率。通过研究表明,铜是第一个被去除的元素,其次是锌,然后是铁。

Macaskie [21]等发现,*Citrobacter* 菌株会通过细胞结合重金属磷酸盐的形式积累重金属。酸性磷酸酶为活性生物分子,该酶释放无机磷酸盐离子,然后呈递给细胞吸附的重金属离子,从而形成沉淀。产生的酸性磷酸酶可以对Cd和Zn积累,从而达到从水中去除重金属离子的效果。

王晓梦[22]等人利用氧化亚铁亚铁菌和多体亚铁亚铁菌在独立模块中,成功构建了细菌驱动的循环生物矿化体系。结果表明,该生物膜具有稳定高效的Fe转化活性:Fe<sup>2+</sup>-oxidation, Fe-precipitation, and Fe<sup>3+</sup>-reduction 分别保持在98%, 32%和87%。不断通过滴水曝气补充溶解氧(4.2~7.2 mg/L),添加的有机碳主要是由铁还原菌代谢。经过五个生物矿化循环,约89% Fe和60% SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>沉淀为黄钾铁矾矿物。Fe是通过形成次生矿物沉淀物去除的,而SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>在最初的三个生物矿化循环中共沉淀为矿物,主要用Ca<sup>2+</sup>沉淀。五个循环的生物矿化大大减少了分别需要石灰和中和污泥的75%和77%。

Kulkarni 等[23]向*Deinococcus radiodurans*和*Escherichia coli*这2种菌属添加PhoK和PhoN,发现这些菌属在缺乏碳酸盐的中性环境(GC1)或碳酸盐充足的碱性环境(GC2)下,都具有降解β-甘油磷酸盐的能力,与铀生成磷酸铀酰沉淀。

#### 4.3. 嗜盐菌在去除氮磷等方面的应用

George B [24]等人采用间隙曝气生物过滤器,用海洋嗜盐菌将废水中的营养物质去除。在盐度为6%左右时,接种上一定剂量的嗜盐菌,与过去的工艺相比较,反应器内的生物膜的活性提高,对P、N的去除率相应也增加了。Bertrand J C [25]等人研究发现,在盐浓度较高时,生物可以降解水中的碳氢化合物。通过实验数据可以证实嗜盐菌对COD的去除率在70%以上。

王照[26]等人同时分离出反硝化和矿化细菌*Pseudomonas* sp. WZ39,以去除氟化物(F)、硝酸盐(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)和钙(Ca<sup>2+</sup>)。通过生物矿化过程降低了可溶性F、Ca<sup>2+</sup>和NO<sub>3</sub><sup>-</sup>的含量。在低C/N(2.5)条件下,F、Ca<sup>2+</sup>和NO<sub>3</sub><sup>-</sup>的去除率分别达到81.44%、100%和59.27%。

王照[27]等人通过假单胞菌(*Pseudomonas* sp. HXF1)微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)制备生物合成晶体

(BC)去除地下水中的氟化物(F)。实验结果表明,该方法对氟的最大吸附量为 5.10 mg/L,脱氟效率为 98.24%,研究表明氟可被吸附和产生  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}$  和 F 的共沉淀,通过共沉淀,不仅降低了氟化物浓度同时也降低了磷浓度。

鸟粪石生物矿化法处理富营养化水体的研究已有多,其成本远低于物理化学法。韩作振[28]等人采用游离和固定化蜡样芽孢杆菌 MRR2 菌,采用生物工艺沉淀法将磷酸盐、镁离子和铵离子矿化成鸟粪石。结果表明,细菌释放的碱性磷酸酶和氨的高碱性提高了过饱和度有利于鸟粪石的成核。采用响应面法确定蜡样芽孢杆菌 MRR2 的最佳固定化条件,固定化菌对磷酸盐、镁、铵离子 15 d 的去除率分别达到 90.1%、95.6% 和 95.7%,远高于游离菌对磷酸盐、镁、铵离子的去除率 73.3%、83.8% 和 89.1%。固定化蜡样芽孢杆菌 MRR2 的应用将为同时去除磷酸盐、镁离子和铵离子以及鸟粪石的连续回收提供一种简单、环保、经济的方法,可为富营养化水体的处理提供参考。

## 5. 结论和展望

随着经济的快速发展,我国的用水量也在逐年上升,对污水的处理任务也不断加重,特别是对高盐废水的处理。文章介绍了食品、化工、制革等行业中产生高盐废水的来源及特性,总结了传统高盐废水的处理方法以及存在的局限。简单介绍了嗜盐菌的分类和耐盐的机制。国内外的研究表明,嗜盐菌不管是在处理含油烃类污染废水、重金属类废水,还是处理含氮磷类废水等方面,都取得了比较好的实验效果。嗜盐菌处理成本低,效率高,为今后处理高盐废水提供了一定的理论基础。随着社会的进步,经济的发展,技术的不断完善和成熟,将嗜盐菌处理废水投入到实际生产方面有很远阔的发展前景。

## 基金项目

国家自然科学基金项目(41772095, 42072136, 41972108),山东省自然科学基金面上项目(ZR2019MD027),山东省重大科技创新工程项目(2019JZZY020808),海藻活性物质国家重点实验室开放基金项目(SKL-BASS1722)。

## 参考文献

- [1] Belkin, S., Brenner, A. and Abeliovich, A. (1993) Biological Treatment of a High Salinity Chemical Industry Wastewater. *Water Science & Technology*, **31**, 61-72.
- [2] Yan, H., Han, Z., Zhao, H., Pan, J., Zhao, Y., Tucker, M.E., Zhou, J., Yan, X., Yang, H. and Fan, D. (2020) The Bio-Precipitation of Calcium and Magnesium Ions by Free and Immobilized *Lysinibacillus fusiformis* DB1-3 in the Wastewater. *Journal of Cleaner Production*, **252**, Article ID: 119826. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119826>
- [3] 尤作亮, 蒋展鹏, 祝万鹏. 海水直接利用及其环境问题分析[J]. 给水排水, 1984, 24(3): 64-67.
- [4] 刘洪斌. 我国海水淡化私海水直接利用事业前景的分析[J]. 海洋技术, 1995, 14(4): 76-78.
- [5] 文湘华, 占新民, 王建龙等. 含盐废水的生物处理研究进展[J]. 环境科学, 1999, 20(3): 104-106.
- [6] 廖柳琳. 高盐废水处理工艺研究进展探[J]. 环境与发展, 2019, 31(10): 67-69.
- [7] Kargi, F. and Dincer, A.R. (2000) Use of Halophilic Bacteria in Treatment of Saline. *Water Environment Research*, **72**, 170-174. <https://doi.org/10.2175/106143000X137248>
- [8] Sundarapandiyam, S.C., Ramanaiah, B., et al. (2010) Electrochemical Oxidation and Reuse of Tannery Saline Wastewater. *Journal of Hazardous Materials*, **180**, 197-203. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.04.013>
- [9] 刘德新. 油田污水处理[M]. 北京: 石油大学出版社, 2015.
- [10] 王伟, 刘俊杰, 张桂凤. 焚烧法处理高浓度有机、含盐废水的研究分析[J]. 黑龙江环境通报, 2008(3): 70-71.
- [11] 林成先. 工业含盐有机废水处理技术研究[J]. 科技视界, 2014(10): 262-327.
- [12] Ku, D.J. (1978) Life in High Salt and Solute Concentrations. In: *Microbial Life in Extreme Environments*, Academic Press, London, 317-368.

- [13] 陶卫平. 嗜盐菌的嗜盐机制[J]. 生物学通报, 1996, 31(1): 23-24.
- [14] 陈梅梅, 邓皓, 宋佳宇, 等. 嗜盐菌的筛选及原油降解性能[J]. 环境工程学报, 2014, 8(1): 372-377.
- [15] Kapdan, I.K. and Erten, B. (2007) Anaerobic Treatment of Saline Wastewater by *Halanaerobium lacusrosei*. *Process Biochemistry*, **42**, 449-453. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2006.09.001>
- [16] 温洪宇, 廖银章. 二株细菌处理石油废水的比较研究[J]. 淮北煤炭师范学院学报, 2004, 25(4): 58-61.
- [17] Dastgheib, S.M.M., Amoozegar, M.A., Khajeh, K., Shavandi, M. and Ventosa, A. (2012) Biodegradation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons by a Halophilic Microbial Consortium. *Applied Microbiology and Biotechnology*, **95**, 789-798. <https://doi.org/10.1007/s00253-011-3706-4>
- [18] Peyton, B.M., Wilson, T. and Yonge, D.R. (2002) Kinetics of Phenol Biodegradation in High Salt Solutions. *Water Research*, **36**, 4811-4820. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(02\)00200-2](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(02)00200-2)
- [19] Woolard, C.R. and Ircine, R.L. (1995) Treatment of Hypersaline Wastewater in the Sequencing Batch Reactor. *Water Research*, **29**, 1159-1168. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(94\)00239-4](https://doi.org/10.1016/0043-1354(94)00239-4)
- [20] Martins, M., Faleiro, M.L., Barrosr, J., et al. (2009) Characterization and Activity Studies of Highly Heavy Metal Resistant Sulphate Reducing Bacteria to Be Used in Acid Mine Drainage Decontamination. *Journal of Hazardous Materials*, **166**, 706-713. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.11.088>
- [21] Macaskie, L.E., Empson, R.M., Cheetham, A.K., Grey, C.P. and Skarnulis, A.J. (1992) Uranium Bioaccumulation by a *Citrobacter* sp. as a Result of Enzymically Mediated Growth of Polycrystalline  $\text{HUO}_2\text{PO}_4$ . *Science*, **257**, 782-784. <https://doi.org/10.1126/science.1496397>
- [22] Wang, X., Jiang, H., Zheng, G., Liang, J. and Zhou, L. (2021) Recovering Iron and Sulfate in the Form of Mineral from Acid Mine Drainage by a Bacteria-Driven Cyclic Biomineralization System. *Chemosphere*, **262**, Article ID: 127567. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127567>
- [23] Kulkarni, S., Misra, C.S., Gupta, A., Ballal, A. and Apte, S.K. (2016) Interaction of Uranium with Bacterial Cell Surfaces: Inferences from Phosphatase-Mediated Uranium Precipitation. *Applied and Environmental Microbiology*, **82**, 4965-4974. <https://doi.org/10.1128/AEM.00728-16>
- [24] George, B. (2012) Ammonia Biofiltration and Nitrous Oxide Generation during the Start-Up of Gas-Phase Compost Biofilters. *Atmospheric Environment*, **46**, 659-664. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.10.019>
- [25] Bertrand, J.C., Amallah, M., Acquaviva, M., et al. (1990) Biodegradation of Hydrocarbons by an Extremely Halophilic Archaeobacterium. *Letters in Applied Microbiology*, **11**, 260-263. <https://doi.org/10.1111/j.1472-765X.1990.tb00176.x>
- [26] Wang, Z., Su, J., Ali, A., Zhang, R., Yang, W., Xu, L. and Zhao, T. (2021) Microbially Induced Calcium Precipitation Based Simultaneous Removal of Fluoride, Nitrate, and Calcium by *Pseudomonas* sp. WZ39: Mechanisms and Nucleation Pathways. *Journal of Hazardous Materials*, **416**, Article ID: 125914. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125914>
- [27] Wang, Z., Su, J.F., Hu, X.F., Ali, A. and Wu, Z.Z. (2021) Isolation of Biosynthetic Crystals by Microbially Induced Calcium Carbonate Precipitation and Their Utilization for Fluoride Removal from Groundwater. *Journal of Hazardous Materials*, **406**, Article ID: 124748. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124748>
- [28] Han, Z.Z., Guo, N., Yan, H.X., Xu, Y.D., Wang, J.H., Zhao, Y.Y., et al. (2021) Recovery of Phosphate, Magnesium and Ammonium from Eutrophic Water by Struvite Biomineralization through Free and Immobilized *Bacillus cereus* MRR2. *Journal of Cleaner Production*, **320**, Article ID: 128796. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128796>