

洛克沙肿的微生物降解总结与展望

王 祯¹, 姜爱华², 王 飞³, 谭 波³, 江 燕¹, 刘广伟³, 冯晓梅³, 钟传青¹, 陈淑芬^{1*}

¹山东建筑大学市政与环境工程学院, 山东 济南

²济南市城乡水务局, 山东 济南

³平阴县水务局, 山东 济南

收稿日期: 2022年11月10日; 录用日期: 2022年12月19日; 发布日期: 2022年12月29日

摘 要

洛克沙肿是目前最经济的有机砷制剂, 其作为饲料添加剂在养殖业中大量使用, 但是由于畜禽对其吸收和转化效率低, 导致大量洛克沙肿随排泄物流入到外界环境中。简单的堆肥及常规污水处理都不能完全去除, 而排入水体和土壤, 导致砷化合物污染。并且环境中的微生物或光照会把洛克沙肿降解转化为会对环境和人体造成严重危害的多种砷化合物, 如4-羟基-3-氨基苯砷酸(HAPA)。目前除了物理、化学方法, 微生物法也具有很好的降解洛克沙肿的效果。本文综述了对洛克沙肿及其相关产物的非生物降解转化和生物降解转化的研究进展, 主要结论: 非生物降解转化洛克沙肿受环境因素影响极大, 极易产生毒性更大的污染物; 生物降解转化: 微生物不可替代的作用主要体现在: (1) 微生物吸附和蓄积作用, 包括可逆与不可逆过程; (2) 细菌对洛克沙肿的降解; (3) 真菌对洛克沙肿的降解; (4) 酵母对洛克沙肿的降解。最后对微生物法应用于洛克沙肿污染修复的前景进行了讨论。

关键词

洛克沙肿, 微生物, 生物修复

Summary and Prospect of Microbial Degradation of Roxarsone

Zhen Wang¹, Aihua Jiang², Fei Wang³, Bo Tan³, Yan Jiang¹, Guangwei Liu³, Xiaomei Feng³, Chuanqing Zhong¹, Shufen Chen^{1*}

¹School of Municipal and Environmental Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan Shandong

²Jinan Urban and Rural Water Affairs Bureau, Jinan Shandong

³Pingyin County Water Bureau, Jinan Shandong

Received: Nov. 10th, 2022; accepted: Dec. 19th, 2022; published: Dec. 29th, 2022

*通讯作者。

文章引用: 王祯, 姜爱华, 王飞, 谭波, 江燕, 刘广伟, 冯晓梅, 钟传青, 陈淑芬. 洛克沙肿的微生物降解总结与展望[J]. 微生物前沿, 2022, 11(4): 223-231. DOI: 10.12677/amb.2022.114028

Abstract

Present, Roxarsone is the most economical organic arsenarsonic preparation, which is widely used in the breeding industry as a feed additive. However, due to the low absorption and conversion efficiency of Roxarsone in livestock and poultry, a large amount of Roxarsone flows into the external environment along with excrement. Simple composting and conventional sewage treatment can't be completely removed, but discharged into water and soil, resulting in arsenic compound pollution. In addition, microorganisms or light in the environment can degrade Roxarsone into a variety of arsenic compounds, such as 4-hydroxy-3-aminobenzene arsenic acid (HAPA), which can cause serious harm to the environment and human body. At present, in addition to physical and chemical methods, microbial method also has a good degradation effect of Roxarsone. This paper reviewed the research progress on the non-biodegradation and biodegradation transformation of Roxarsone and its related products. The main conclusions are: the non-biodegradation and biodegradation transformation of Roxarsone is greatly affected by environmental factors, and it is easy to produce more toxic pollutants. Biodegradation and transformation: the irreplaceable role of microorganisms is mainly reflected in: (1) Microbial adsorption and accumulation, including reversible and irreversible processes; (2) Bacterial degradation of Roxarsone; (3) Degradation of Roxarsone by fungi; (4) Degradation of Roxarsone by yeast. Finally, the prospect of applying microbial method to Roxarsone pollution remediation was discussed.

Keywords

Roxarsone, Microorganism, Bioremediation

Copyright © 2022 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

洛克沙肿(Roxarsone, 3-硝基-4-羟基苯胂酸)是一种应用广泛的有机砷类饲料添加剂,自从1911年被Benda等人合成后被广泛应用到畜禽养殖饲料中[1]。洛克沙肿可以提高饲料利用率,促进畜禽生长的同时还能防治虫害,因而一度成为不可缺少的饲料添加剂[2]。1958年美国农业部批准洛克沙肿作为饲料添加剂使用,2011年由于对鸡肉中无机砷含量超标的担忧美国自愿停用,虽然中国农业部也于2018年宣布逐步实现洛克沙肿的禁用,但是其已经在养殖业环境中广泛存在。研究表明饲料中的洛克沙肿只有10%左右可以被畜禽肠道吸收,大多数随动物尿液粪便排入环境中[3],而洛克沙肿的羟基等官能团很容易被土壤胶体吸附从而在环境中累积;另外一部分粪便作为有机肥料被投加在作物种植区,有研究表明长期使用含有洛克沙肿有机肥的土壤中砷的浓度可以达到12 mg/kg~15 mg/kg [4]。洛克沙肿在环境中广泛存在除了对人体健康造成直接危害外还会影响动植物与微生物的正常生理活动,甚至连微生物的污水处理都会受到影响,因此,洛克沙肿的污染问题已经成为新型有机污染物领域的重要课题之一。

近年来关于环境中洛克沙肿去除的研究层出不穷。除了基础的物理方法和化学方法,微生物修复洛克沙肿的方法也逐渐被重视。微生物去除洛克沙肿成本低、污染小并且去除效果好。本文对近年来应用于洛克沙肿去除的微生物种类及微生物去除方式进行综述,并对微生物进行洛克沙肿降解提出建议,为今后洛克沙肿的微生物去除提供参考。

2. 洛克沙肿的来源及污染现状

2.1. 洛克沙肿的来源

由于洛克沙肿具备使动物肉质鲜美、少生病等功能，其在畜禽养殖业中被大量使用，据统计，2010年美国消费的90亿肉鸡中有88%食用了含有洛克沙肿添加剂的饲料[5]。在中国仅2003年动物生产行业就用了1200吨洛克沙肿[6]，如图1所示，畜禽通过饲料摄入洛克沙肿，其自身对洛克沙肿的利用率仅仅10%左右[3]，大多数都随着粪便排出体外，这些粪便有一些进入污水处理厂，还有一些作为农家肥施加入农田，最终导致地下水和土壤中洛克沙肿含量超标。例如2006年猪粪中的洛克沙肿含量达到89.3 mg/kg [7]，而据统计中国每年可以产生 1.3×10^8 吨家禽粪便和 2.1×10^8 吨猪粪[8]，这些畜禽粪便不论堆肥或者进行简单污水处理都会将有机砷带入环境中，进而造成土壤和地下水的砷污染。因此环境中的洛克沙肿几乎全部来自畜禽养殖业。

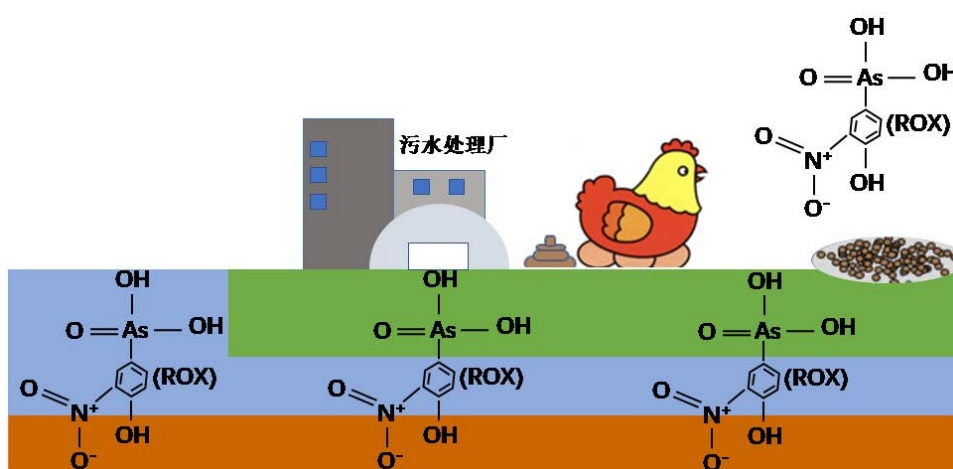


Figure 1. The transfer route of roxarsone
图1. 洛克沙肿的转移途径

2.2. 洛克沙肿的污染现状

研究表明长期投加畜禽粪便的土壤洛克沙肿的含量可以达到12 mg/kg~15 mg/kg [4]。洛克沙肿降解后可以生成无机砷和其他产物，因而使用含有有机砷饲料的养猪场周围水土环境中有机砷和无机砷的含量都严重超标，李芳柏等人研究发现有一些未被处理的养猪场废水甚至直接排入鱼塘进而导致水体中砷化合物严重超标[9] [10]。

洛克沙肿虽然已经逐步停止生产但是一些废旧养殖场周围仍旧存在砷超标的问题。其作为饲料添加剂本身对动物影响不大，但是其进入环境中会进行一系列的化学反应，甚至演变成三价砷和五价砷具有致癌作用。洛克沙肿本身对环境微生物也具有较大影响，例如微量的洛克沙肿会抑制产甲烷细菌的产甲烷功能，当洛克沙肿浓度达到0.23 mM时产甲烷功能被完全抑制[11]。洛克沙肿对微生物的脱氮功能影响也极其严重，研究发现添加0.29 mM洛克沙肿微生物的硝化作用和反硝化作用就会降低50%以上[12] [13]。总而言之，流入环境中的洛克沙肿除了其转化产物对人体有害以外，它自身也会对微生物的各种环境治理功能产生抑制作用。

3. 洛克沙肿的转化

洛克沙肿的环境危害逐渐被人们认知，研究发现洛克沙肿的降解转化主要分为非生物降解转化和生

物降解转化。

3.1. 洛克沙肿的非生物转化

Bednar 等人通过光解实验对肉鸡粪便中的洛克沙肿进行了研究, 洛克沙肿的光降解产物除了毒性更大的无机砷化合物大多以 2,4-二硝基苯酚为主的芳香族化合物存在, Garbarion 等人也利用 HPLC-ICP-MS 分析推测得出洛克沙肿的光降解途径, 如图 2 所示, 通过光照裂解 As-C 键来降解洛克沙肿[14][15][16]。洛克沙肿的光解与环境也有密切的关系, 例如洛克沙肿的光解速率与有机质成反比, 与硝酸盐浓度成正比。pH 也在洛克沙肿的光解中发挥了重要作用, 当 pH 为 4 时, 50%的洛克沙肿被光降解为亚砷酸盐, 在此基础上降解率也会随着 pH 值的升高而升高, 最终氧化成砷酸盐, 这个过程可以将洛克沙肿转化产物的毒性大大降低, 并且砷酸盐的流动性远低于亚砷酸盐[17]。但是洛克沙肿的非生物转化受环境因素影响极大, 极易产生毒性更大的污染物。

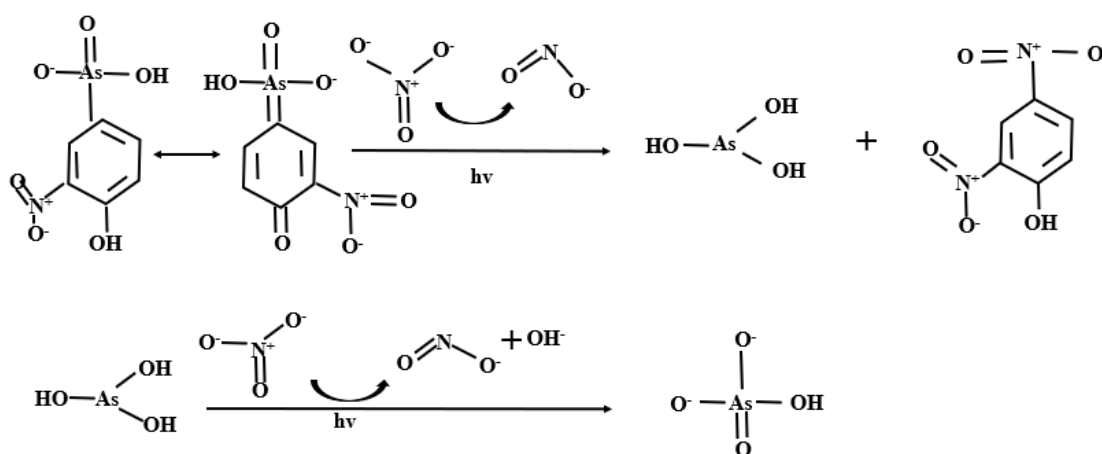


Figure 2. Photolysis of roxarsone

图 2. 洛克沙肿的光解反应

3.2. 洛克沙肿的生物转化

Stolz 等人在厌氧条件下对鸡粪提取液中洛克沙肿的降解实验发现洛克沙肿的厌氧降解产物主要是 3-氨基-4-羟基-苯砷酸(HAPA)和无机砷化合物, 通过分析在该实验中分离出的梭菌属菌株的基因发现其具有砷还原功能, 可以将洛克沙肿作为电子受体并将其还原[7], 具体方程式如下 $2 \text{ roxarsone} + 3 \text{ lactate} \rightarrow 2 \text{ 3-amino-4-hydroxy-benzenearsonic acid} + 3 \text{ acetate} + 3 \text{ CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ [18]。Cortinas 等人则发现在长期厌氧环境中, 洛克沙肿可以迅速被还原为 HAPA, 并最终被硫酸盐还原菌和产甲烷菌等微生物降解[19]。而在灭活微生物条件下洛克沙肿几乎没有被降解, 可见微生物在洛克沙肿的转化过程中发挥了不可替代的作用。

4. 洛克沙肿的微生物降解

微生物除了对洛克沙肿有吸附和蓄积作用以外还有一定的降解作用, 不同微生物对洛克沙肿及其还原产物的降解途径也是不一样的。

4.1. 微生物吸附和蓄积作用

微生物吸附这个过程主要是通过洛克沙肿与微生物的表面细胞壁作用, 是一个缓慢并且可逆的过程[20]。微生物本身对洛克沙肿吸附能力较弱, 但是对其还原后的产物具有吸附能力, Teclu 等人发现硫酸

盐还原菌具有很强的生物吸附功能,其细胞团可以吸附含砷污水中 6.6%的亚砷酸盐和 10.5%的砷酸盐[21]。Tariq 等人研究发现铜绿假单胞菌对这些砷酸盐的吸附能力可以达到 98% [22]。虽然关于洛克沙肿的生物吸附研究较少但是微生物吸附仍然是一种理想的去除有机砷污染的方法,应用价值极高。

微生物蓄积和微生物吸附的区别主要是微生物蓄积不可逆,微生物蓄积主要是离子与革兰氏阳性菌和革兰氏阴性菌的细胞壁表面结合,在转运蛋白的作用下进入细胞并且在细胞中累积,由于需要进行转运在运输过程中会耗费微生物的 ATP,这一点也是和微生物吸附不同的,微生物吸附不需要耗费能量。微生物蓄积作用进行缓慢,这个过程参与细胞的新陈代谢,当洛克沙肿在微生物体内蓄积过多时则会产生毒性作用,重则造成微生物细胞的死亡,因此微生物蓄积是一个微生物自身抗性与洛克沙肿毒性缓慢平衡的过程。Satyapal 等人研究发现谷氨酸棒杆菌可以在细胞内蓄积砷,称其为砷的生物容器[23]。

4.2. 细菌对洛克沙肿的降解

利用细菌对洛克沙肿进行降解是微生物降解洛克沙肿的主要途径之一,目前已经分离出多种耐砷和可以降解洛克沙肿的细菌[24] [25] [26]。大多数被污染场地多存在养分低、污染物浓度大等问题,耐受洛克沙肿的细菌多数适应能力强,可以在极端环境中大量繁殖并且与有机砷实现共存[27],研究表明在含有洛克沙肿的土壤中外源微生物量是一般土壤中的 1.4 倍[28] [29],目前常用于洛克沙肿降解的细菌主要有粪产碱杆菌、假单胞菌、微杆菌、根瘤农杆菌等等[30] [31] [32] [33]。当洛克沙肿进入环境,首先与其反应的就是厌氧菌,在产甲烷和硫酸盐作用下洛克沙肿会被厌氧菌转化为 4-羟基-3-氨基苯砷酸(HAPA) [34] [35],一般条件下 HAPA 很难被降解,但是在微生物作用下降解后容易变成砷酸盐和无机砷[36],早在 2005 年,胡平等人已经开发出模式微生物用于砷污染治理[7]。细菌对砷的还原主要通过其基因编码的砷还原蛋白(ars operon)和砷呼吸蛋白(arr operon) [29] [37],这些蛋白可以将 As (III)转变成 As (V)大大降低其流动性,减少其环境污染[38] [39]。但是目前就细菌对洛克沙肿生物还原的直接产物研究仍略有缺乏,明确细菌对洛克沙肿的生物降解途径仍旧是目前研究重点[40]。

4.3. 真菌对洛克沙肿的降解

真菌也是去除洛克沙肿的有效途径之一,真菌多用于去除饮用水和废水中洛克沙肿的还原产物砷,如多变根毛霉可以将 As (III)转变成 As (V),其还可以参与亚砷酸盐甲基化和亚砷酸盐氧化,将砷进行毒性减弱[41] [42]。常见的抗砷真菌有曲霉属和木霉属,除此之外研究发现低浓度砷可以促进担子菌门、接合菌门、镰刀菌属、假霉样真菌属和隐球菌属等生长,这些真菌具有砷耐受性和还原性,这些真菌除了具有还原砷的能力之外还有蓄积其他重金属的能力[43]。洛克沙肿及无机砷等进行吸附和价态转化主要通过磷酸基团、C-H、N-H、C-O-C 等基团进行[44]。另有研究表明一些真菌如丛枝真菌可以和植物根系协同促进植物对有机砷的吸收[45],杨金红研究发现将木霉属 KT-3 真菌与芦苇联合使用砷的去除效率可以提高 40%以上[46]。目前研究关注点在真菌与植物联合应用以去除洛克沙肿污染。

4.4. 酵母对洛克沙肿的降解

酵母不能直接降解洛克沙肿,但是研究表明酵母细胞中具有砷修复相关基因[47]。吴丽华等人通过基因敲除发现酵母细胞中 SOD1 和 SOD2 基因可以增强酵母细胞对亚砷酸盐的耐受性[48]。Bobrowicz 等人研究发现拥有 ACR1、ACR2、ACR3 三个连续基因的酵母对洛克沙肿等有机砷和其他砷化合物具有抗性[49] [50]。除此之外酵母的砷 ATPase 外排泵中具有 ArsA 和 ArsB 蛋白可以和具有还原酶活性的 ArsC 蛋白联合将砷酸盐转化为亚砷酸盐再泵出细胞,如图 3 所示,从而进行自身的砷解毒[50]。目前还有研究将基因工程酵母和水稻共培养后水稻的砷耐受性增加,表明酵母中既有砷的相关抗性基因并且其基因也可以转移[51] [52]。目前酵母细胞作为模型生物多用于表达植物基因来研究洛克沙肿和无机砷的去除[53] [54] [55]。

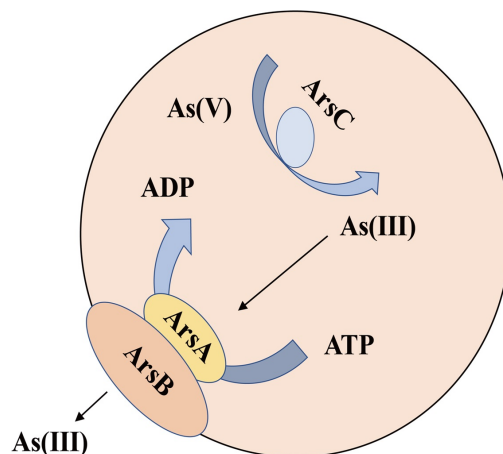


Figure 3. Mechanism of arsenic detoxification in yeast cells
图 3. 酵母细胞砷解毒机制

5. 结论

尽管已有大量研究表明微生物对洛克沙肿具有降解作用，但是目前微生物对洛克沙肿的降解机制研究尚不完善，仍然需要进行下一步研究。究其原因，首先微生物细胞有一些基因所表达蛋白功能尚不明确，如洛克沙肿进入细胞内转化为 HAPA 所介导的蛋白质尚不明确。其次洛克沙肿还原产物较多且毒性大，微生物对其完全降解去除的研究较少。再次，微生物进行洛克沙肿降解后的资源化处理也是一个待研究的问题。只有将这些问题研究透彻才能让微生物降解洛克沙肿成为一种清洁、安全可持续的降解方法。

基金项目

山东省自然科学基金项目(ZR2021 MD025)、济南市水利科技计划项目(JNSW KJ202102)、山东省环境科学学会项目(202011)资助。

参考文献

- [1] 肖雅玲, 童川, 施华升, 等. 水砂质量比对洛克沙肿转化及微生物群的影响[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2019, 42(8): 1125-1130.
- [2] 安娅丽. 洛克沙肿在土壤中的降解转化及对土壤中酶活性的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 贵阳: 贵州民族大学, 2020.
- [3] Kretzschmar, J., Brendler, E., Wagler, J., *et al.* (2014) Kinetics and Activation Parameters of the Reaction of Organoarsenic(V) Compounds with Glutathione. *Journal of Hazardous Materials*, **280**, 734-740. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.08.036>
- [4] Church, C.D., Kleinman, P., Bryant, R.B., *et al.* (2010) Occurrence of Arsenic and Phosphorus in Ditch Flow from Litter-Amended Soils and Barn Areas. *Journal of Environmental Quality*, **39**, 2080-2088. <https://doi.org/10.2134/jeq2009.0210>
- [5] Keeve, E., *et al.* (2013) Roxarsone, Inorganic Arsenic, and Other Arsenic Species in Chicken: A U.S.-Based Market Basket Sample. *Environmental Health Perspectives*, **121**, 818-824. <https://doi.org/10.1289/ehp.1206245>
- [6] 朱永官. 农业环境中的砷及其对人体的健康风险[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [7] Stolz, J.F., Perera, E., Kilonzo, B., *et al.* (2007) Biotransformation of 3-nitro-4-hydroxybenzene Arsonic Acid (Roxarsone) and Release of Inorganic Arsenic by Clostridium Species. *Environmental Science & Technology*, **41**, 818-823. <https://doi.org/10.1021/es061802i>
- [8] Fei, J., Wang, T., Zhou, Y., *et al.* (2018) Aromatic Organoarsenic Compounds (AOCs) Occurrence and Remediation Methods. *Chemosphere*, **207**, 665-675. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.05.145>
- [9] 杜衍红, 王向琴, 刘传平, 等. 铁改性木本泥炭对镉砷复合污染稻田的修复效果研究[J]. 农业现代化研究, 2021,

42(2): 311-320.

- [10] 杨国义, 陈俊坚, 何嘉文, 李芳柏, 万洪富. 广东省畜禽粪便污染及综合防治对策[J]. 土壤肥料, 2005(2): 46-48.
- [11] Tang, R., Yuan, S., Chen, F., *et al.* (2019) Effects of Roxarsone and Sulfadiazine on Biogas Production and Their Degradation during Anaerobic Digestion. *International Biodeterioration & Biodegradation*, **140**, 113-118. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2019.04.001>
- [12] Chen, G., *et al.* (2018) Roxarsone Exposure Jeopardizes Nitrogen Removal and Regulates Bacterial Community in Biological Sequential Batch Reactors. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **159**, 232-239. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.05.012>
- [13] Chen, K., Ji, F., Yuan, S., *et al.* (2017) The Performance of Activated Sludge Exposed to Arsanilic Acid and Amprolium Hydrochloride in Sequencing Batch Reactors. *International Biodeterioration & Biodegradation*, **116**, 260-265. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2016.10.040>
- [14] Barnhartslaughter, A. (2003) Biotransformation of Roxarsone, an Organoarsenic Feed Additive. Geological Society of America, Boulder.
- [15] Garbarino, J.R., Bednar, A.J., Rutherford, D.W., *et al.* (2003) Environmental Fate of Roxarsone in Poultry Litter. I. Degradation of Roxarsone during Composting. *Environmental Science & Technology*, **37**, 1509-1514. <https://doi.org/10.1021/es026219q>
- [16] Chen, L., Li, H. and Qian, J. (2020) Degradation of Roxarsone in UV-Based Advanced Oxidation Processes: A Comparative Study. *Journal of Hazardous Materials*, **410**, Article ID: 124558. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124558>
- [17] Bednar, A.J., Garbarino, J.R., Ferrer, I., *et al.* (2003) Photodegradation of Roxarsone in Poultry Litter Leachates. *Science of the Total Environment*, **302**, 237-245. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(02\)00322-4](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(02)00322-4)
- [18] 冯翰林. 洛克沙肿在土壤中的环境行为研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中农业大学, 2011.
- [19] Cortinas, I., Field, J.A., Kopplin, M., *et al.* (2006) Anaerobic Biotransformation of Roxarsone and Related N-Substituted Phenylarsonic Acids. *Environmental Science & Technology*, **40**, 2951-2957. <https://doi.org/10.1021/es051981o>
- [20] Volesky, B. and Holan, Z.R. (1995) Biosorption of Heavy Metals. *Biotechnology Progress*, **11**, 235-250. <https://doi.org/10.1021/bp00033a001>
- [21] Teclu, D., Tivchev, G., Laing, M., *et al.* (2008) Bioremoval of Arsenic Species from Contaminated Waters by Sulfate-Reducing Bacteria. *Water Research*, **42**, 4885-4893. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2008.09.010>
- [22] Aamira, T., Ubaid, U., Maleeha, A., *et al.* (2019) Biosorption of Arsenic through Bacteria Isolated from Pakistan. *International Microbiology*, **22**, 59-68. <https://doi.org/10.1007/s10123-018-0028-8>
- [23] Satyapal, G.K. and Rani, S. (2016) Potential Role of Arsenic Resistant Bacteria in Bioremediation: Current Status and Future Prospects. *Journal of Microbial & Biochemical Technology*, **8**, 256-258. <https://doi.org/10.4172/1948-5948.1000294>
- [24] Elahi, A., Ajaz, M., Rehman, A., *et al.* (2019) Isolation, Characterization, and Multiple Heavy Metal-Resistant and Hexavalent Chromium-Reducing *Microbacterium testaceum* B-HS2 from Tannery Effluent. *Journal of King Saud University—Science*, **10**, 1437-1444. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2019.02.007>
- [25] Khan, Z., *et al.* (2015) Cadmium Resistance Mechanism in *Escherichia coli* P4 and Its Potential Use to Bioremediate Environmental Cadmium. *Applied Microbiology & Biotechnology*, **99**, 10745-10757. <https://doi.org/10.1007/s00253-015-6901-x>
- [26] Naureen, A. and Rehman, A. (2016) Arsenite Oxidizing Multiple Metal Resistant Bacteria Isolated from Industrial Effluent: Their Potential Use in Wastewater Treatment. *World Journal of Microbiology & Biotechnology*, **32**, 133. <https://doi.org/10.1007/s11274-016-2079-3>
- [27] Hu, P., Brodie, E.L., Suzuki, Y., *et al.* (2005) Whole-Genome Transcriptional Analysis of Heavy Metal Stresses in *Caulobacter crescentus*. *Journal of Bacteriology*, **187**, 8437-8449. <https://doi.org/10.1128/JB.187.24.8437-8449.2005>
- [28] Guzmán-Fierro, V.G., Moraga, R., León, C.G., *et al.* (2015) Isolation and Characterization of an Aerobic Bacterial Consortium Able to Degrade Roxarsone. *International Journal of Environmental Science & Technology*, **12**, 1353-1362. <https://doi.org/10.1007/s13762-014-0512-4>
- [29] Chen, G., Ke, Z., Liang, T., *et al.* (2016) *Shewanella oneidensis* MR-1-Induced Fe(III) Reduction Facilitates Roxarsone Transformation. *PLOS ONE*, **11**, e154017. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0154017>
- [30] Phillips, S.E. and Taylor, M.L. (1976) Oxidation of Arsenite to Arsenate by *Alcaligenes faecalis*. *Applied and Environmental Microbiology*, **32**, 392-399. <https://doi.org/10.1128/aem.32.3.392-399.1976>
- [31] Matlakowska, R., Drewniak, L. and Sklodowska, A. (2008) Arsenic-Hypertolerant Pseudomonads Isolated from An-

- cient Gold and Copper-Bearing Black Shale Deposits. *Geomicrobiology Journal*, **25**, 357-362. <https://doi.org/10.1080/01490450802402810>
- [32] Achour-Rokbani, A., Cordi, A., Poupin, P., *et al.* (2010) Characterization of the ars Gene Cluster from Extremely Arsenic-Resistant Microbacterium sp. Strain A33. *Applied and Environmental Microbiology*, **76**, 948-955. <https://doi.org/10.1128/AEM.01738-09>
- [33] Liao, H.C., Chu, Y.J., Su, Y.C., *et al.* (2011) Arsenite-Oxidizing and Arsenate-Reducing Bacteria Associated with Arsenic-Rich Groundwater in Taiwan. *Journal of Contaminant Hydrology*, **123**, 20-29. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2010.12.003>
- [34] 傅山岗, 李宗义. 厌氧颗粒污泥的超微结构分析[J]. 生物技术, 2004(4): 69-71.
- [35] 章菲菲, 司想, 周宇鹏. 三价铁离子对厌氧颗粒污泥降解溶液中洛克沙肿的影响分析[J]. 兰州工业学院学报, 2019, 26(5): 69-73.
- [36] Chen, N., Wan, Y., Ai, Z., *et al.* (2019) Fast Transformation of Roxarsone into Toxic Arsenic Species with Ferrous Iron and Tetrapolyphosphate. *Environmental Chemistry Letters*, **17**, 1077-1084. <https://doi.org/10.1007/s10311-018-00831-3>
- [37] Dang, Y., Walker, D., Vautour, K.E., *et al.* (2016) Arsenic Detoxification by Geobacter Species. *Applied & Environmental Microbiology*, **83**, 2616-2689. <https://doi.org/10.1128/AEM.02689-16>
- [38] Giloteaux, L., Holmes, D.E., Williams, K.H., *et al.* (2013) Characterization and Transcription of Arsenic Respiration and Resistance Genes during *in Situ* Uranium Bioremediation. *ISME Journal*, **7**, 370-383. <https://doi.org/10.1038/ismej.2012.109>
- [39] Ohtsuka, T., Yamaguchi, N., Makino, T., *et al.* (2013) Arsenic Dissolution from Japanese Paddy Soil by a Dissimilatory Arsenate-Reducing Bacterium Geobacter sp. OR-1. *Environmental Science & Technology*, **47**, 6263-6271. <https://doi.org/10.1021/es400231x>
- [40] Han, J.C., Zhang, F., Cheng, L., *et al.* (2017) Rapid Release of Arsenite from Roxarsone Bioreduction by Exoelectrogenic Bacteria. *Environmental Science & Technology Letters*, **4**, 350-355. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.7b00227>
- [41] 解攀, 王开, 王雪梅, 等. 一株抗砷镉真菌的分离生长及其修复作用的研究[C]//中国环境科学学会. 2019年科学技术年会——环境工程技术创新与应用分论坛. 2019: 613-617.
- [42] Lin, X.Y., *et al.* (2016) Characterization of Cadmium-Resistant Bacteria and Their Potential for Reducing Accumulation of Cadmium in Rice Grains. *Science of the Total Environment*, **569-570**, 97-104. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.06.121>
- [43] Srivastava, P.K., Vaish, A., Dwivedi, S., *et al.* (2011) Biological Removal of Arsenic Pollution by Soil Fungi. *Science of the Total Environment*, **409**, 2430-2442. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.03.002>
- [44] 王小垒, 李凤姿, 何家乐, 等. 环境微生物抗生素与重金属抗性研究进展[J]. 环境科技, 2019, 32(1): 59-62.
- [45] Tanaka, S., Sakurai, K., *et al.* (2010) Arbuscular Mycorrhizal Fungus (*Glomus aggregatum*) Influences Biotransformation of Arsenic in the Rhizosphere of Sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Soil Science & Plant Nutrition*, **53**, 499-508. <https://doi.org/10.1111/j.1747-0765.2007.00143.x>
- [46] 杨金红. 耐砷真菌与芦苇联合对砷污染土壤修复作用的研究[J]. 江西农业学报, 2021, 33(1): 105-109.
- [47] Ilyas, S., *et al.* (2018) Metal Resistance and Uptake by *Trichosporon asahii* and *Pichia kudriavzevii* Isolated from Industrial Effluents. *Archives of Environmental Protection*, **44**, 77-84.
- [48] 吴丽华, 仪慧兰, 陈燕飞, 等. SOD1、SOD2 基因缺失对砷诱导酵母细胞凋亡的影响[J]. 山西大学学报(自然科学版), 2020, 43(3): 615-620.
- [49] Bobrowicz, P., Wysocki, R., Owsianik, G., *et al.* (1997) Isolation of Three Contiguous Genes, ACR1, ACR2 and ACR3, Involved in Resistance to Arsenic Compounds in the Yeast *Saccharomyces cerevisiae*. *Yeast*, **13**, 819. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0061\(199707\)13:9<819::AID-YEA142>3.0.CO;2-Y](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0061(199707)13:9<819::AID-YEA142>3.0.CO;2-Y)
- [50] Sher, S. and Rehman, A. (2019) Use of Heavy Metals Resistant Bacteria—A Strategy for Arsenic Bioremediation. *Applied Microbiology and Biotechnology*, **103**, 6007-6021. <https://doi.org/10.1007/s00253-019-09933-6>
- [51] Verma, S., Verma, P.K., Meher, A.K., *et al.* (2016) A Novel Arsenic Methyltransferase Gene of *Westerdykella aurantiaca* Isolated from Arsenic Contaminated Soil: Phylogenetic, Physiological, and Biochemical Studies and Its Role in Arsenic Bioremediation. *Metallomics*, **8**, 344-353. <https://doi.org/10.1039/C5MT00277J>
- [52] Verma, S., Verma, P.K., Meher, A.K., *et al.* (2017) A Novel Fungal Arsenic Methyltransferase, WaarsM Reduces Grain Arsenic Accumulation in Transgenic Rice (*Oryza sativa* L.). *Journal of Hazardous Materials*, **344**, 626-634. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.10.037>
- [53] Singh, S., Lee, W., Dasilva, N.A., *et al.* (2008) Enhanced Arsenic Accumulation by Engineered Yeast Cells Expressing

Arabidopsis thaliana Phytochelatin Synthase. *Biotechnology and Bioengineering*, **99**, 333-340.
<https://doi.org/10.1002/bit.21577>

- [54] Mohapatra, B., Saha, A., Chowdhury, A.N., *et al.* (2021) Geochemical, Metagenomic, and Physiological Characterization of the Multifaceted Interaction between Microbiome of an Arsenic Contaminated Groundwater and Aquifer Sediment. *Journal of Hazardous Materials*, **412**, Article ID: 125099. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125099>
- [55] Wysocki, R. and Tamás, M.J. (2011) *Saccharomyces cerevisiae* as a Model Organism for Elucidating Arsenic Tolerance Mechanisms. In: Banfalvi, G., Ed., *Cellular Effects of Heavy Metals*, Springer, Berlin, 87-112.
https://doi.org/10.1007/978-94-007-0428-2_4