

· 综 述 ·

# 土壤中铬的迁移转化研究进展

容 群<sup>1</sup>, 罗栋源<sup>2</sup>, 边鹏洋<sup>1</sup>, 高何凤<sup>2</sup>, 陈何潇<sup>2</sup>, 狄 瑜<sup>2</sup>, 金晓丹<sup>2</sup>

(1. 广西大学, 南宁 530004; 2. 广西壮族自治区环境保护科学研究院, 南宁 530022)

**摘要:** 随着工业的发展, 土壤铬污染问题日益突出, 对人体和环境产生巨大危害。了解铬在土壤环境中的迁移转化行为对于预测其变化趋势和控制环境污染具有重要意义。对土壤中铬的来源、价态、危害及其在土壤中的迁移转化作用进行了综述, 并重点指出影响铬迁移转化的土壤 pH 值、有机质、氧化还原电位、土壤类型和微生物作用等因素的研究现状, 以及就进一步研究土壤中铬迁移转化的方向进行了展望。

**关键词:** 土壤; 铬; 迁移; 转化

中图分类号: X53

文献标识码: A

文章编号: 1001-3644(2018)02-0156-05

DOI:10.14034/j.cnki.schj.2018.02.027

## The Research Progress on Migration and Transformation of Chromium in Soil

RONG Qun<sup>1</sup>, LUO Dong-yuan<sup>2</sup>, BIAN Peng-yang<sup>1</sup>, GAO He-feng<sup>2</sup>, CHEN He-xiao<sup>2</sup>, DI Yu<sup>2</sup>, JIN Xiao-dan<sup>2</sup>

(1. Guangxi University, Nanning 530004, China; 2. Scientific Research Academy of Guangxi Environmental Protection, Nanning 530022, China)

**Abstract:** With the development of industry, the problem of Cr-pollution in soil has become serious. It is harmful to human body and environment. It is very important to understand the transformation behavior of Cr in soil for predicting its change tendency and control environmental pollution. This paper reviewed the source, valence, harmfulness and migration and transformation of chromium in soil. Research status on the factors such as the soil pH, organic matter, redox, soil type, and microbial action were pointed out. Finally, this study further proposed the further research direction for migration and transformation of chromium in soil.

**Keywords:** Soil; chromium; migration; transformation

铬是 VIB 族元素, 它在地壳中分布广泛, 且平均含量为 0.010% 左右<sup>[1]</sup>。近年来, 随着工业的发展, 特别是印染、冶炼和电镀等行业的迅速发展, 使得重金属铬的土壤污染越来越严重, 土壤铬污染的事件逐渐增多, 对农业造成的危害也逐渐加大, 土壤铬污染已成为人们普遍关注的环境污染问题之一<sup>[2]</sup>。由于重金属在环境中难以降解, 一旦进入土壤或水体, 随着污染物的迁移转化, 会在食物链中进行生物富集和积累, 破坏生物体正常生理代谢活动, 危害人体健康。

本文以重金属铬为例, 对近年国内外研究进展

进行分析, 综述了铬在土壤中迁移转化作用机理及其主要影响因素, 并指出目前存在的问题及今后研究方向, 为以后的研究工作提供参考。

## 1 土壤中铬的来源

铬是农业土壤中最主要的重金属污染物, 其来源广泛, 对人体和环境危害极大。铬主要来源于毛皮与制革污染、电镀污染、铬盐、纺织印染污染以及铬矿冶炼污染等<sup>[3]</sup>。具体来源有: (1) 铬渣堆积的铬污染: 目前国内主要采用钙焙烧的方法生产铬盐, 在生产过程中会产生大量铬渣, 铬渣堆积会

收稿日期: 2017-12-29

基金项目: 广西自然科学基金项目(2015GXNSFEA139001); 广西科学研究与技术开发计划项目(2015BC14018)。

作者简介: 容 群(1992-), 男, 广西柳州人, 广西大学资源环境与材料学院环境科学与工程专业, 硕士, 主要研究方向为土壤环境治理与修复。

通讯作者: 罗栋源 ivanldy@163.com。

导致周边土壤的污染; (2) 大气沉降的铬污染: 主要来源于能源、运输、冶金和建筑材料生产产生的气体和粉尘, 经干湿沉降进入土壤; (3) 含铬废水排放及灌溉引起的铬污染: 制革、印染、电镀等行业会产生大量含铬废水, 处理不当外排时会造成土壤和水体严重的污染; (4) 农业生产过程中产生的铬污染: 在农业生产中, 化学肥料以及施入农田的污泥、煤泥、土壤改良剂等通常含有铬, 长期施用会导致土壤中铬的积累。(5) 含铬生活垃圾随意堆放造成的铬污染: 含铬的生活垃圾经过雨水淋洗冲刷后, 所产生的渗滤液直接进入土壤, 导致土壤中铬的污染。

## 2 土壤中铬的价态

就铬的化学价态来讲, 铬常见的化合价有 0, +2, +3, +6 价, 土壤中的铬主要包含 Cr(III) 和 Cr(VI), 二者之间相互转化<sup>[4]</sup>, 土壤中的 Cr(III) 和 Cr(VI) 具有相反的化学和物理特性。在土壤中 Cr(III) 主要以  $\text{Cr}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$ 、 $\text{Cr}(\text{OH})_2^+$  等形式存在, 活性较低, 极易被土壤胶体吸附而形成沉淀<sup>[5]</sup>, 对生物的毒害作用相对较轻; 而 Cr(VI) 主要以  $\text{CrO}_4^{2-}$  和  $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$  形式存在, Cr(VI) 在所有 pH 范围内都是水溶性的, 活性高, 不易被土壤胶体吸附, 迁移能力强, 对动植物的毒性比 Cr(III) 大 100 倍<sup>[6]</sup>。

## 3 土壤铬污染的危害

### 3.1 铬对人体健康的危害

土壤中的铬很容易通过饮用水、食物链和大气对人类和其他生物造成不良影响。经过口、吸入等方式吸收的 Cr(VI), 会与胃内的某些内源性物质发生反应, 引起消化道腹泻等消化道症状<sup>[7]</sup>; 诱发支气管哮喘等呼吸道疾病; 长期接触皮肤, 引起红斑、湿疹等皮肤性疾病; Cr(VI) 进入体内后会被还原为 Cr(III), Cr(III) 继续反应产生高价铬的同时, 会产生许多自由基与 DNA 分子结合导致遗传密码的改写, 极易引起癌变等<sup>[8]</sup>。另外, 人群调查实验表明, 长期暴露于含铬的环境中, 特别是生产铬酸盐的工人的肿瘤发病率比常人高。

### 3.2 铬对植物的危害

大量的试验研究表明, 微量元素铬是植物所必需的, 土壤中少量的 Cr 对植物生长是有利的。通常, 低浓度 Cr 对数种农作物的生长有刺激作用<sup>[9]</sup>。

如  $0.5 \text{ mg/LCr}^{3+}$  浓度的培养液能刺激玉米生长; 而当铬浓度为  $1 \sim 100 \text{ mg/L}$  时会延缓植物的生长甚至毒害植物, 造成死亡<sup>[10]</sup>。石贵玉<sup>[11]</sup>的研究结果也显示, 低浓度 ( $50 \mu\text{mol/L}$ ) 铬对烟草组培苗生长有促进作用, 株高、鲜质量、叶绿素含量、蛋白质含量、SOD 活性呈现上升趋势; 但是, 土壤环境中铬的含量过高时, 就会对植物及其他生物造成危害。因此, 植物缺少铬就会影响植物的正常发育, 但是植物体内累积过量又会引起毒害作用, 而直接或间接地给人类健康带来危害<sup>[12]</sup>。

### 3.3 铬对微生物的危害

铬除了以上危害之外, 还对土壤微生物具有毒害作用。土壤是许多细菌、真菌等微生物聚居的地方, 而这些微生物的重要任务是生态系统物质循环与养分转化。这些微生物的生存都有一定的条件限制, 当土壤中的铬达到一定浓度后, 引起土壤微生物生物量碳、氮的下降, 提高土壤代谢熵 (即单位重量微生物生物量碳的呼吸量值), 土壤中的有效铬与微生物熵 (即土壤微生物生物量碳和总有机碳的比值) 呈明显负相关, 而且对土壤脲酶和过氧化氢酶活性也有不同程度的抑制作用<sup>[13]</sup>。而微生物的生长代谢受到抑制, 甚至被杀死。此外, 在生物体内积累的铬和金属硫蛋白、类金属硫蛋白和小分子量的配体如牛磺酸、甘氨酸等结合, 进而对微生物产生毒害<sup>[14]</sup>。

## 4 铬在土壤中的迁移转化作用

Cr 在土壤环境中存在三价铬和六价铬两种价态, 由于 Cr(VI) 易与土壤中组分 (如有机质、 $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{S}^{2-}$ ) 发生还原反应<sup>[15-16]</sup>, 因此, 在土壤环境中主要以 Cr(III) 的形式存在。土壤环境中铬的生物有效性、迁移性与铬的价态密切相关, 通常 Cr(III) 易水解从而被土壤中的胶体粒子吸附而共沉淀, 而毒性较高的 Cr(VI) 大部分以游离态的形式存在于土壤溶液中, 因而具有较高的迁移性和生物有效性。

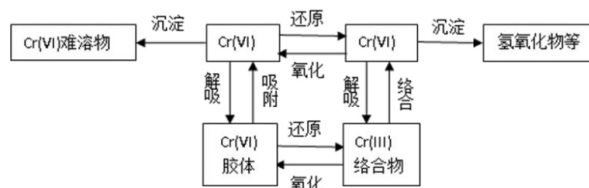


图 铬在土壤中的迁移转化

Fig. Migration and transformation of chromium in soil

土壤溶液中铬的迁移转化主要由三个重要反应进行控制: 氧化-还原作用、吸附-解吸作用和沉淀-溶解作用。迁移转化关系见上图。

#### 4.1 氧化-还原作用

氧化还原过程在铬的形态转化中起了重要作用, 而 Cr(III) 和 Cr(VI) 的相互转化能够影响其生物有效性及毒性<sup>[17]</sup>。在一定 pH 和 Eh 范围内 Cr(III) 和 Cr(VI) 之间会发生氧化还原反应而相互转化<sup>[18-19]</sup>。当土壤 pH 约为 4 时, 土壤中存在的 Cr(III) 易与土壤中的胶体发生吸附作用; 当 pH 在 4~6 之间, Cr(III) 会与土壤中胶体和氢氧化物发生吸附与共沉淀作用; 而 pH > 6 则形成稳定沉淀, 说明在酸性条件下容易形成 Cr(III)。有研究表明, 在土壤处于淹水状态下 (即还原状态) 时, 会促进土壤溶液中 Cr(VI) 向 Cr(III) 的转化<sup>[18]</sup>。促进 Cr 的机结合态铬的形成, 并且残渣态铬向有机结合态铬转化的趋势<sup>[20]</sup>, 说明在一定的还原状态下土壤中的铬生物有效性会提高。张蕊<sup>[3]</sup>探讨了 Cr(VI) 在土壤中的迁移转化规律, 结果表明 Cr(VI) 进入土壤后, 通常以水溶态和交换态的形式存在, 其余的 Cr(VI) 被土壤有机质等还原为 Cr(III)。

#### 4.2 吸附-解吸作用

Cr(VI) 进入土壤后仅有少部分被土壤胶体吸附, 大部分游离在土壤溶液中, 而 Cr(III) 在土壤中主要以  $Cr^{3+}$  形式存在, 进入土壤后绝大部分被土壤胶体吸附固定。张效苇<sup>[21]</sup>研究了 Cr(VI) 在碱性土壤中的吸附解吸规律, 结果表明, 在低流速条件下, 污染也与土壤接触时间更加充分, Cr(VI) 与土壤的接触时间更长, 则被土壤吸附固定的越多, 而在高流速作用下效果不同, 但无显著差异。崔明阳<sup>[22]</sup>利用黄壤和石灰性土壤对 Cr 吸附固持的作用表明, 随这土壤中碳酸钙含量的增加, 吸附能力和吸附量都有所增强, 解析能力却未有明显变化。

#### 4.3 沉淀-溶解作用

土壤中 Cr(III) 主要以  $Cr^{3+}$  存在,  $Cr^{3+}$  能迅速而有效的被土壤中的胶体吸附固定, 形成铁的氢氧化物沉淀或者铁-铬氢氧化物混合沉淀<sup>[23]</sup>; 而六价铬络合物在酸性或者碱性土壤环境中都不稳定, 易发生迁移转化<sup>[3]</sup>。而 Cr(III) 在中性和碱性溶液中, 可能生成沉淀  $Cr(OH)_3$ 。张蕊<sup>[2]</sup>利用动态土柱模拟铬在土壤中的迁移转化, 研究发现土壤中的 Cr(III) 大多数以沉淀态, 铁锰氧化物结合态, 交换态等形式存在, 很难迁移出土柱。

## 5 影响铬在土壤中迁移转化的因素

土壤中铬的环境效应受到 (迁移转化等) 受到土壤本身理化等多因素的影响。主要的环境因素包括: 土壤类型、pH 值、有机质含量、氧化还原电位以及微生物等<sup>[6]</sup>。

### 5.1 pH 值

pH 值与土壤中铬的形态密切相关, 主要体现在通过影响着土壤溶液中的各种离子在固相上的吸附程度以及氧化还原反应的发生, 进而影响铬的迁移率和生物有效性<sup>[24]</sup>。土壤处于弱碱性或碱性条件下 (高 pH 值) 有利于氧化反应的发生; 而酸性环境下 (低 pH 值) 有利于还原反应的发生<sup>[25]</sup>。陈桂葵、李志鹏等<sup>[26]</sup>通过模拟酸雨对空心菜-土壤系统来探究六价铬迁移转化的规律, 研究结果发现当土壤接收酸雨时, 随着土壤的 pH 值下降, 三价铬的溶解度提高, 土壤对其相应吸附减弱, 更多的 Cr 被酸雨淋溶出来, 导致植物对铬的吸收量增加。王成文<sup>[24]</sup>的研究表明, 酸性条件下的土壤对铬具有良好的吸附性, 在氧化条件下迁移性最强, 还原条件下 Cr(VI) 转化为 Cr(III) 的量最多。温俊国研究了三种修复剂对镉污染土壤的修复效果, 结果表明土壤 pH 值越低, 淋洗液中 Cr(III) 浓度越高。

### 5.2 土壤有机质

土壤有机质作为腐殖质的重要主要部分, 在 Cr(VI) 还原为 Cr(III) 的过程中可提供大量的电子受体, 使 Cr(VI) 急剧减少的同时, 其形态如氧化物结合态、有机结合态增加, 极大的降低了铬的毒性和生物有效性。张蕊<sup>[3]</sup>通过动态土柱模拟方法研究六价铬迁移转化的影响因素, 研究发现土壤中有机的含量越高, 淋溶液 Cr(VI) 的浓度越低, 但是随着有机质含量的继续增加, Cr(VI) 的减小趋势不明显, 说明有机质对 Cr(VI) 还原为 Cr(III) 有机质有一定的作用贡献值。

### 5.3 氧化还原电位

研究发现, 铬在土壤中的迁移转化同时还受到氧化还原电位的制约。肖文丹<sup>[7]</sup>研究铬污染稻田淹水和干湿交替条件下铬迁移转化规律时, 发现干湿交替条件下六价铬浓度随着氧化还原电位的波动而上下波动, 土壤中有效态铬的浓度和重金属铬的迁移能力显著高于淹水处理。王成文<sup>[3]</sup>通过模拟土柱研究不同条件下 (氧化、还原条件) 淋溶液中 Cr(VI) 的含量, 结果为: 氧化条件下的土 > 原

土 > 还原条件下的土, 这可能是氧化条件下的土壤中共存的  $\text{Fe}^{3+}$  离子竞争吸附能力比  $\text{Cr}^{6+}$  离子更强, 更多地占据土壤的吸附点位, 减小了土壤对  $\text{Cr}(\text{VI})$  的吸附, 促进了  $\text{Cr}(\text{VI})$  迁移。

#### 5.4 土壤类型

土壤类型对铬的影响主要表现在土壤的吸附与截留作用不同, 表现在土壤孔隙结构与渗流量等因素。肖文丹<sup>[27]</sup> 探究铬在六种土壤中的迁移转化及其污染诊断指标, 结果表明供试土壤中总铬的污染诊断指标依次为红壤 (90.6 mg/kg) > 青紫泥 (81.1 mg/kg) > 石灰性紫色土 (80.8 mg/kg) > 黑土 (78.2 mg/kg) > 黄壤 (56.6 mg/kg) > 潮土 (51.8 mg/kg)。张蕊<sup>[3]</sup> 研究了高岭土和膨润土中铬的迁移转化影响因素, 研究发现对六价铬的吸附高岭土强于膨润土, 对三价铬的吸附作用则相反, 而且在膨润土中, 六价铬的迁移性能好, 分配系数最小, 再释放风险最大。

#### 5.5 微生物

土壤微生物是土壤中的活性胶体, 具有比表面积大、带电荷和代谢活动旺盛等特性, 对土壤重金属元素的化学形态影响很大<sup>[28]</sup>。土壤中的一些土著微生物以及还原菌能把  $\text{Cr}(\text{VI})$  转化为  $\text{Cr}(\text{III})$ 。已知的还原菌包括 *Bacillus cereus*<sup>[29]</sup>、革兰氏阳性杆菌<sup>[30]</sup>、蜡样芽孢杆菌<sup>[31]</sup>、*Cellulosimicrobium cellilans*<sup>[32]</sup>、*Microtacterium*<sup>[5]</sup> 等。目前报道的一些  $\text{Cr}(\text{VI})$  的还原菌主要应用在水处理方面较多, 在土壤的铬污染治理方面应用相对较少, 但已有一定的研究。肖文丹<sup>[27]</sup> 研究不同菌种下土壤中铬的迁移转化规律时, 发现铬对微生物群落的影响主要表现为在铬的选择作用下, 铬耐性菌成为土壤中的优势菌群, 且有利于土壤中六价铬的还原作用。

## 6 结 论

6.1 铬在土壤中的存在形式主要为  $\text{Cr}(\text{III})$  和  $\text{Cr}(\text{VI})$ 。其中,  $\text{Cr}(\text{III})$  易于被土壤吸附固定, 形成  $\text{Cr}(\text{OH})_3$  沉淀, 难以进行迁移; 而  $\text{Cr}(\text{VI})$  活性高, 不易被土壤胶体吸附, 迁移能力强。

6.2 影响铬在土壤中迁移转化的因素主要有 pH、土壤有机质、氧化还原电位、土壤类型、微生物等。pH 值越低, 有机质还原性越强, 越有利于  $\text{Cr}(\text{VI})$  的迁移转化。

6.3 土壤中铬的迁移转化主要由氧化 - 还原作用、吸附 - 解吸作用和沉淀 - 溶解作用来控制。

## 7 展 望

7.1 通过对国内外相关文献进行分析时发现, 对于土壤中铬的迁移转化影响因素的研究都局限于单一影响因素, 而多种因素交互作用下的迁移转化规律尚未清楚。

7.2 目前大多数六价铬还原菌的应用主要在水处理方面, 在土壤方面的分离六价铬耐性菌, 以及纯培养条件下测定该菌还原六价铬的能力都还未作大量和深入的研究。其次, 对已知的六价铬还原菌的作用机理尚未清楚, 且缺少对迁移转化规律模型的建立与研究。

7.3 植物作为重金属毒害的直接受体, 研究植物作用 (如根系分泌物) 对土壤环境 (土壤 pH 值、有机质、微生物群落结构等) 以及重金属的迁移转化 (植物累积作用等) 有着十分重要的影响。目前的研究主要集中在重金属与土壤环境两者之间交互作用的影响, 而未从重金属 - 土壤 - 植物三者关系上进行考虑和研究。因此, 今后的研究工作应重点考虑植物作用对土壤中铬的迁移转化的影响。

## 参考文献:

- [1] 杨 靖. 铬污染土壤的微生物修复技术研究进展 [J]. 资源节约与环保, 2013, (7): 241-242.
- [2] 李圣发. 土壤砷污染及其植物修复的研究进展与展望 [J]. 地球与环境, 2011, 39(3): 429-434.
- [3] 张 蕊. 六价铬在土壤中迁移转化影响因素研究及风险评价 [D]. 吉林大学, 2013.
- [4] 徐 非, 谢 争. 污染土壤中六价铬的测定 [J]. 环境监测管理与技术, 2008, 20(5): 42-43.
- [5] Sarangi A, Krishnan C. Comparison of in Vitro  $\text{Cr}(\text{VI})$  reduction by CFEs of chromate resistant bacteria isolated from chromate contaminated soil [J]. Bioresource Technology, 2008, 99(10): 4130-4137.
- [6] 骆传婷. 不同土壤质地对铬迁移转化及修复的研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
- [7] 唐清霞, 盛 杰. 六价铬的危害性评价及其检测探究 [J]. 资源节约与环保, 2015, (7): 49.
- [8] 陈志蓉, 张庆生. 六价铬的危害性评价及其检测回顾 [J]. 中国药事, 2012, 26(7): 683-688.
- [9] 吴泽鑫, 邢文昕, 高青环. 土壤重金属 Cr 污染及其治理研究进展 [J]. 河南化工, 2011, (13): 33-36.
- [10] 艾天成. 铬污染危害 [J]. 园艺与种苗, 2014, (8): 3.
- [11] 石贵玉, 秦丽凤, 陈耕云. 铬对烟草组培苗生长和某些生理指标的影响 [J]. 广西植物, 2007, 27(6): 899-902.
- [12] 李 倩. 三峡水库蓄水后水体中有毒重金属砷、铅、铬研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2006.
- [13] 徐成斌, 孟雪莲, 马溪平. 铬污染对土壤环境质量生物特征指标的影响研究 [J]. 环境科学与管理, 2012, 37(8): 1-3.

- [14] 何宝燕,尹 华,彭 辉. 酵母菌吸附重金属铬的生理代谢机理及细胞形貌分析 [J]. 环境科学,2007,28(1): 194-198.
- [15] 陈英旭,朱荫湄,袁可能. 土壤中铬的化学行为研究 II. 土壤对 Cr(VI) 吸附和还原动力学 [J]. 环境科学学报,1989,9(2): 137-143.
- [16] 陈英旭,何增耀,吴建平. 外源铬在土壤中的形态转化 [J]. 农业环境科学学报,1995,(3): 105-110.
- [17] 贡晓飞,鄂尔丁夫,王 琪. 不同价态铬在不同水分条件下的生物有效性及其对水稻的毒性 [J]. 生态毒理学报,2015,10(4): 170-176.
- [18] 陈英旭,骆永明,朱永官. 土壤中铬的化学行为研究 V. 土壤对 Cr(III) 吸附和沉淀作用的影响因素 [J]. 土壤学报,1994,(1): 77-85.
- [19] Papassiopi N, Kontoyianni A, Vaxevanidou k, et al. Assessment of chromium biostabilization in contaminated soils using standard leaching and sequential extraction techniques [J]. Science of the Total Environment,2009,407(2): 925-936.
- [20] 陈英旭,何增耀. 土壤中铬的形态及其转化 [J]. 环境科学,1994,(3): 53-56.
- [21] 张效菁,董菊秀,魏文硕. Cr(VI) 在碱性土壤中的吸附解吸规律的研究 [J]. 中国农村水利水电,2016,(9): 181-186.
- [22] 崔明阳,柳晓兰,何腾兵. 贵州典型土壤对重金属的蓄积特性 [J]. 信阳师范学院学报(自然科学版),2017,30(4): 567-572.
- [23] 白利平,王业耀. 铬在土壤及地下水中迁移转化研究综述 [J]. 地质与资源,2009,18(2): 144-148.
- [24] 王成文,许 模,张俊杰. 土壤 pH 和 Eh 对重金属铬(VI) 纵向迁移及转化的影响 [J]. 环境工程学报,2016,10(10): 6035-6041.
- [25] 温俊国,朱宇恩,时伟宇. 三种修复剂对铬污染土壤的修复效果 [J]. 环境工程,2017,(9): 181-185,144.
- [26] 陈桂葵,李志鹏,陈 恋. 模拟酸雨对空心菜-土壤系统中六价铬迁移转化的影响 [J]. 农业环境科学学报,2013,(3): 498-502.
- [27] 肖文丹. 典型土壤中铬迁移转化规律和污染诊断指标 [D]. 杭州: 浙江大学,2014.
- [28] 王凤花,罗小三,林爱军. 土壤铬(VI) 污染及微生物修复研究进展 [J]. 生态毒理学报,2010,5(2): 153-161.
- [29] 肖 伟. 六价铬还原细菌的筛选鉴定、还原特性及酶学机理研究 [D]. 上海: 复旦大学,2007.
- [30] 陈建春,林玉满,陈祖亮. 六价铬还原菌的筛选及其还原特性研究 [J]. 福建师大学报(自然科学版),2010,26(2): 78-82.
- [31] 朱培蕾,焦仕林,姜 朴. 六价铬还原菌的鉴定和还原影响因素的优化 [J]. 卫生研究,2015,44(2): 201-205,210.
- [32] 牛永艳,陈正军,赵 帅. 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.