

BIOSORPTION
OF HEAVY METALS

重金属生物吸附

王建龙 陈 灿◎著



科学出版社

重金属生物吸附

Biosorption of Heavy Metals

王建龙 陈 灿 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是一部关于重金属生物吸附基础及应用的研究成果专著,是作者十多年研究工作的系统总结与提升,引用了作者指导的硕士研究生、博士研究生的学位论文及博士后的出站报告。本书全面、深入地论述了重金属与生物材料之间的相互作用特性及机理,以及生物吸附在重金属废水处理中的应用。全书共8章,主要内容包括重金属及其污染、生物吸附基础、生物吸附剂及其改性及再生、生物吸附影响因素、生物吸附机理、生物吸附过程模拟以及重金属废水的生物处理等。本书理论与应用并重,内容丰富、新颖,实用性强。

本书可供高等院校环境科学与工程专业的高年级本科生、研究生以及相关专业的师生和研究人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

重金属生物吸附 / 王建龙, 陈炯著. — 北京: 科学出版社, 2015. 6

ISBN 978-7-03-044691-6

I. ①重… II. ①王建龙②陈炯 III. ①重金属废水-微生物-修复 IV. ①X703

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 124227 号

责任编辑: 杨 震 刘 冉 刘志巧 / 责任校对: 张小霞

责任印制: 赵 博 / 封面设计: 铭轩堂

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

三河市骏杰印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 6 月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2015 年 6 月第一次印刷 印张: 36 1/4

字数: 707 000

定价: 160.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

重金属是对生态环境危害极大的一类污染物。我国重金属污染十分严重,采矿、冶炼、金属加工等行业向环境排放了种类繁多的重金属,它们在传统的废水处理工艺中难以被有效去除,甚至严重影响废水处理系统的正常运行。利用生物方法去除废水中重金属离子,是当今环境科学与工程领域中的研究热点和难点。

随着我国工业的快速发展,重金属的开采及应用越来越广泛。一方面,重金属资源出现了相对缺乏的局面;另一方面,重金属污染的区域越来越广,程度越来越严重,直接影响了我国生态环境,特别是农作物的安全。重金属污染成为我国当前面临的重要环境污染问题之一。20 世纪中叶出现的震惊世界的“水俣病”和“骨痛病”事件,就是由重金属汞和镉污染引起的。

重金属进入环境后不能被生物降解,它们会参与食物链循环,并最终在生物体内积累,破坏生物体正常生理代谢活动,危害生态环境和人体健康。因此,如何有效地处理重金属废水、回收重金属,已成为当今环境保护领域中的难题。

利用环境生物技术治理重金属污染近年来得到广泛关注,具有较大的应用潜力。生物吸附技术是环境生物技术中一种较为新颖的方法,它利用细菌、真菌、藻类等生物体和/或其组分吸附溶于水中的重金属离子,再经固液分离达到水体净化目的。该法适宜处理大体积、低浓度重金属废水,出水重金属离子浓度可以降低到 $\mu\text{g/L}$ 级水平,自 20 世纪 80 年代以来在国内外受到广泛关注和研究。

重金属生物吸附技术研究已有几十年,目前还处于实验室研究阶段,实用化困难重重。深入研究重金属生物吸附机理,寻找便宜、吸附性能好的生物材料,降低吸附剂生产成本和再生成本,优化工艺过程并与其他工艺相结合,有助于解决上述问题。

重金属生物吸附中一个核心问题是生物体细胞与重金属离子的相互作用机制,目前的研究还十分有限,极大地限制了生物吸附技术的发展和應用。研究重金属与微生物的相互作用特性及机理,对有效应用生物技术处理重金属废水以及修复受重金属污染的水体和土壤等,具有重要的理论意义和实用价值。

近十几年来,作者在重金属生物吸附领域里进行了努力探索,取得了以下创新性成果。

(1) 揭示了酿酒酵母、黑曲霉等微生物细胞吸附重金属离子的动力学、热力学及等温吸附特征,发现了酿酒酵母在吸附重金属离子过程中释放细胞自身阳离子

的特性及体系 pH 的变化规律,证明了离子交换机制在生物吸附重金属离子中的作用。研究发现酿酒酵母在吸附重金属离子时对其细胞表面进行官能团修饰可有效提高吸附容量。研究成果为利用微生物处理重金属废水提供了理论依据。

(2) 揭示了重金属离子性质与生物吸附容量之间的内在联系,建立了金属离子的共价指数(X_m^2r)与生物吸附量之间的定量关系,发现金属离子的共价指数越高,金属离子与细胞的共价结合程度越高,生物吸附量越大。这一成果可用于预测重金属离子的生物吸附容量、解释不同金属离子间的竞争吸附现象,为研究重金属离子与微生物间相互作用机制提供了新的思路和方法。

(3) 揭示了重金属离子与酿酒酵母间相互作用的特性与机理。综合利用 X 射线吸收精细结构谱、原子力显微镜、电子显微镜等多种现代分析手段,揭示了废水中金属离子在生物材料中的分布、赋存形态及迁移转化规律,获取了酿酒酵母细胞中被吸附的重金属离子局域结构的量子信息,提供了废水中重金属离子生物吸附的多种微观作用机制的证据,丰富和完善了重金属生物吸附机理研究手段。

作者在重金属生物吸附领域发表论文 60 多篇(SCI 收录 40 多篇),多篇论文成为 Web of Sciences 的高引用论文、中国精品科技期刊顶尖论文以及中国百篇最具影响国际学术论文,研究成果得到国内外同行的高度认可。

本书结合作者多年的研究成果及国内外研究进展,全面系统地阐述了重金属生物吸附的基础及应用,包括重金属污染及治理、生物吸附剂、生物吸附的影响因素、重金属生物吸附的特性及机理、生物吸附过程模拟等,并对重金属生物吸附的未来研究方向进行了展望。

本书共 8 章。第 1 章介绍重金属的基本概念和性质、污染状况以及当前的治理方法。第 2 章介绍生物吸附的基础知识。第 3 章和第 4 章以生物吸附剂为主题,阐述了与生物吸附现象和机理有关的生物学基础知识、生物吸附剂评级标准以及吸附性能、生物吸附剂的制备与改造、再生等。第 5 章从重金属离子的特性、生物吸附剂的性质及环境条件三个方面,介绍了生物吸附的影响因素。第 6 章介绍重金属生物吸附机理以及机理研究中的常用的现代分析检测技术。第 7 章介绍生物吸附过程模型,包括重金属离子生物吸附的动力学、热力学及等温吸附特性。第 8 章介绍重金属污染的生物治理。

本书的撰写基于多位作者指导的硕士研究生、博士研究生的学位论文以及博士后出站报告,包括刘恒(清华大学硕士学位论文:酿酒酵母和黑曲霉吸附重金属离子的研究,2002 年)、潘响亮(清华大学博士后出站报告:重金属和核素污染的环境生物修复技术,2005 年)、陈灿(清华大学博士学位论文:重金属与酿酒酵母相互作用特性及机理研究,2007 年)、陈玉伟(清华大学博士学位论文:改性磁性壳聚糖的制备表征及对金属离子的吸附特性研究,2011 年)、祝叶华(清华大学博士学位

论文:壳聚糖复合材料的制备及其对重金属和核素的吸附特性研究,2013年),董婧(清华大学博士学位论文:甜高粱秸秆及改性材料对重金属的吸附特性和机理研究,2014年)。本书是他们研究成果的积累、总结和提升。相关研究工作得到了国家自然科学基金(重点项目、面上项目和青年基金)、北京市自然科学基金、清华大学基础研究基金、中国博士后科学基金(特别资助项目和面上项目)、环境模拟与污染控制国家重点联合实验室专项基金的资助,在此一并表示衷心的感谢。

本书力求反映重金属生物吸附基础及应用方面的现状和发展趋势。限于著者的知识和经验,书中难免存在缺点和不足,恳请各位专家和广大读者批评指正。

王建龙

2014年10月于清华园

本书的研究成果得到以下基金项目的资助,特此致谢!

国家自然科学基金重点项目:有色重金属冶炼废水处理新技术及其机理研究
(2009—2012,批准号:50830302)

国家自然科学基金面上项目:利用现代生物技术治理重金属和放射性核素污染
(2003—2005,批准号:50278045)

国家自然科学基金青年基金:重金属离子与酿酒酵母相互作用机制研究(2009—
2011,批准号:50808111)

清华大学自主科研计划国际合作基础研究:生物技术处理重金属和放射性废水的
基础问题(2010—2012,批准号:2010THZ-002-2)

北京市自然科学基金面上项目:利用生物技术治理重金属污染的基础性问题研究
(2010—2011,批准号:8102023)

中国博士后科学基金特别资助项目:磁性生物材料去除重金属和放射性核素特性
及机理(2009—2011,批准号:200902091)

中国博士后科学基金面上资助项目:酿酒酵母吸附 Zn、Pb、Ag 等离子特性及其相
互作用(2008—2010,批准号:20080430350)

环境模拟与污染控制国家重点联合实验室专项基金:生物吸附剂与重金属离子相
互作用的仪器分析(2008—2009,批准号:08K05ESPCT)

同时,感谢教育部长江学者和创新团队发展计划(2014—2016,批准号:IRT13026)
的支持!

目 录

前言

第 1 章 重金属及其污染	1
1.1 重金属及相关基础知识	1
1.1.1 引言	1
1.1.2 元素及元素周期表	1
1.1.3 周期表中元素分类	2
1.1.4 地壳中元素的组成、分布及主要存在形式	3
1.1.5 金属元素及其分类	5
1.1.6 重金属	8
1.2 重金属的特性及环境领域中关注的重金属	9
1.2.1 重金属的存在形态	9
1.2.2 重金属的毒理毒性特点	9
1.2.3 重金属对微生物的毒性机制	9
1.2.4 我国水体中优先控制污染物黑名单	10
1.2.5 环境领域中关注的重金属	11
1.3 我国重金属污染特征分析	16
1.3.1 引言	16
1.3.2 主要污染的重金属种类	16
1.3.3 主要污染行业	17
1.3.4 重金属废水的特征	20
1.4 重金属废水处理技术	22
1.4.1 重金属废水处理技术分类	22
1.4.2 重金属废水处理中需要考虑的关键问题	27
1.5 重金属废水处理浓缩物中重金属的回收/无害化处理	33
1.5.1 引言	33
1.5.2 重金属回收	34
1.5.3 无害化处理	40
1.6 关于重金属废水处理的几点建议	40
1.7 重金属污染生物修复的重要性	41
参考文献	42

第2章 生物吸附基础	50
2.1 生物吸附的提出和发展	50
2.1.1 生物吸附概念的形成	50
2.1.2 生物吸附研究的历史	51
2.1.3 生物吸附的研究现状	57
2.1.4 生物吸附的发展方向	58
2.2 活细胞和死细胞、生物吸附和生物积累	59
2.3 生物吸附的含义	61
2.4 生物吸附处理重金属/放射性废水的实现形式	67
2.4.1 生物吸附处理重金属的典型工艺流程	67
2.4.2 生物吸附过程的多种实现形式	68
2.5 吸附质种类	69
2.6 生物吸附剂种类	70
2.7 生物吸附的主要研究内容	72
2.8 生物吸附的技术特点	72
2.9 生物吸附发展中存在的问题及分析	73
2.10 生物吸附应用探索	76
2.10.1 生物吸附的商业化尝试	77
2.10.2 生物吸附实际应用的可行性分析	81
2.11 生物吸附发展方向	82
2.11.1 重新认识生物吸附的研究意义	82
2.11.2 生物吸附成本核算与比较	84
2.11.3 深入探讨生物吸附的本质及特性	84
2.11.4 探索生物吸附与其他技术的综合利用	85
2.11.5 开发出类似于离子交换树脂的商业化生物吸附剂	85
2.11.6 加强生物吸附机理研究	86
2.11.7 扩大生物吸附的应用领域	86
参考文献	87
第3章 生物吸附剂	91
3.1 生物吸附剂及其类型	91
3.1.1 生物吸附剂的定义	91
3.1.2 生物吸附剂来源及其分类	94
3.1.3 生物吸附剂的发展	98
3.2 生物吸附的生物学基础	98
3.2.1 概述	98

3.2.2	细菌	104
3.2.3	丝状真菌	117
3.2.4	酵母菌	121
3.2.5	藻类	125
3.2.6	海藻、细菌、真菌细胞壁结构比较	131
3.2.7	壳聚糖、纤维素、木质素、淀粉等天然有机生物大分子	132
3.2.8	农林废弃物	140
3.2.9	生物材料中与重金属生物吸附有关的官能团	141
3.3	生物吸附剂评价标准	144
3.3.1	评价及筛选标准	144
3.3.2	生物吸附剂评价中需要注意的问题	145
3.4	生物吸附实验	148
3.4.1	引言	148
3.4.2	生物吸附剂干重、生物吸附量、去除率的计算方法	148
3.4.3	生物吸附动力学实验:确定生物吸附平衡时间 t_e	149
3.4.4	生物吸附平衡实验:确定平衡吸附量 q_e	150
3.4.5	热力学实验:温度的影响	151
3.4.6	举例 酿酒酵母生物吸附性能研究:材料与方法	152
3.5	生物吸附剂的吸附性能总结	154
3.5.1	引言	154
3.5.2	部分微生物对金属的吸附容量	154
3.5.3	微生物吸附重金属的种类	155
3.5.4	潜在的生物吸附剂种类	157
3.6	细菌作为生物吸附剂	158
3.7	真菌(丝状真菌)作为生物吸附剂	164
3.7.1	简介	164
3.7.2	青霉菌作为生物吸附剂	165
3.7.3	曲霉菌作为生物吸附剂	169
3.7.4	其他丝状真菌作为生物吸附材料	171
3.7.5	真菌吸附重金属的选择性及比较	172
3.8	酵母作为生物吸附剂	173
3.8.1	酿酒酵母(<i>S. cerevisiae</i>)作为生物吸附剂的优势	173
3.8.2	生物吸附研究中酿酒酵母的各种利用形式	174
3.8.3	酿酒酵母生物吸附性能	176
3.8.4	酿酒酵母对不同金属离子吸附的比较	179

3.8.5 酿酒酵母与其他吸附剂吸附性能的比较	180
3.9 海藻作为生物吸附剂	181
3.10 壳聚糖基生物吸附剂	188
3.10.1 引言	188
3.10.2 壳聚糖基生物吸附剂的性能	190
3.11 廉价生物吸附剂	194
3.11.1 引言	194
3.11.2 农林废弃物吸附重金属研究进展	196
3.11.3 甜高粱秸秆及其改性研究	198
3.12 新型生物吸附剂	201
参考文献	203
第4章 生物吸附剂的改性及再生	225
4.1 概述	225
4.2 预处理方法	227
4.2.1 引言	227
4.2.2 物理方法	228
4.2.3 化学方法	228
4.2.4 生物方法	229
4.2.5 各种预处理方法的研究进展	229
4.3 生物吸附剂的固定化	231
4.3.1 引言	231
4.3.2 生物固定化方法	232
4.3.3 生物固定化载体	234
4.3.4 固定化生物吸附剂的研究进展	235
4.4 生物吸附剂物理化学改性方法及表征:以壳聚糖基生物吸附剂 为例	236
4.4.1 引言	236
4.4.2 用于重金属去除目的的壳聚糖改性方法	237
4.4.3 物理改性	238
4.4.4 化学改性	242
4.4.5 壳聚糖复合材料	249
4.5 吸附剂的解吸及重复利用	250
4.6 废弃生物吸附剂的最终处置	253
4.7 壳聚糖基生物吸附剂的制备及表征	253
4.7.1 材料	253

4.7.2	纳米磁性壳聚糖的制备	254
4.7.3	磁性壳聚糖的制备	254
4.7.4	二乙烯三胺改性磁性壳聚糖的制备	254
4.7.5	二硫化碳改性磁性壳聚糖的制备	254
4.7.6	磁性壳聚糖/PVA 复合颗粒制备方法	254
4.7.7	磁性壳聚糖固定化酿酒酵母的制备方法	255
4.7.8	纳米磁性壳聚糖表征	255
4.7.9	二乙烯三胺改性磁性壳聚糖的表征	259
4.7.10	二硫化碳改性磁性壳聚糖的表征	260
4.7.11	磁性壳聚糖/PVA 复合颗粒的表征	264
4.7.12	磁性壳聚糖固定化酿酒酵母(壳聚糖生物固定化颗粒)的表征	266
4.7.13	小结	269
4.8	木质纤维素材料的改性以及表征	270
4.8.1	木质纤维素材料改性方法	270
4.8.2	甜高粱秸秆乙醇发酵残渣及性能表征	272
4.8.3	秸秆辐照接枝丙烯酸制备与表征方法	278
4.8.4	辐照接枝条件的优化	281
4.8.5	材料的表征:羧基含量、SEM、FTIR、XRD	283
4.8.6	羧基功能化改性秸秆材料制备及表征	287
	参考文献	291
第5章	生物吸附影响因素	300
5.1	金属离子性质的影响	300
5.1.1	引言	300
5.1.2	实验及参数选择	303
5.1.3	QSAR 模型建立方法	305
5.1.4	X_m^0/r 的影响	317
5.1.5	$Z^2/r, \log K_{OH} , IP$ 的影响	318
5.1.6	极化力各种参数的影响	318
5.1.7	其他离子性质的影响	319
5.1.8	离子性质影响的小结	320
5.2	反应条件对生物吸附的影响	321
5.2.1	引言	321
5.2.2	吸附时间	321
5.2.3	重金属离子初始浓度/生物量浓度	323
5.2.4	温度的影响	323

5.2.5	pH 的影响	324
5.2.6	金属离子初始浓度与生物吸附剂浓度的影响	326
5.2.7	竞争离子/共存离子/其他共存物的影响	326
5.2.8	离子强度的影响	327
5.3	二元/三元重金属离子体系的生物吸附特征	337
5.3.1	磁性壳聚糖对 Pb(Ⅱ)、Cu(Ⅱ)、Zn(Ⅱ) 的竞争吸附	338
5.3.2	二硫化碳改性磁性壳聚糖对 Pb(Ⅱ)、Cu(Ⅱ)、Zn(Ⅱ) 的竞争吸附	341
5.3.3	二乙烯三胺改性磁性壳聚糖对 Cu(Ⅱ)、Ni(Ⅱ) 的竞争吸附	344
5.3.4	秸秆及其改性材料对多元体系中金属离子的等温吸附特性	346
5.4	生物细胞性质及培养条件对生物吸附的影响	353
5.4.1	生物细胞种类	353
5.4.2	微生物菌龄	355
5.4.3	微生物培养的碳源	355
5.4.4	其他成分对生物吸附的影响	357
5.5	生物体材料对重金属的选择性或亲和性	357
5.5.1	引言	357
5.5.2	金属离子的选择性或亲和性研究	358
5.5.3	利用配位理论分析吸附性能及吸附选择性	365
5.6	需要考虑的几个问题	367
	参考文献	368
第 6 章	生物吸附机理	376
6.1	引言	376
6.1.1	生物吸附机理主要研究内容	376
6.1.2	生物吸附机理研究中需要考虑的问题	377
6.1.3	生物吸附机理研究的方法学	379
6.1.4	生物吸附机理研究思路及技术路线	379
6.2	生物吸附过程	379
6.2.1	引言	379
6.2.2	被动吸附	381
6.2.3	主动吸收	381
6.2.4	重金属生物吸附过程分析	381
6.3	生物吸附机理	382
6.3.1	引言	382
6.3.2	细胞外富集/沉淀/转化	382
6.3.3	细胞表面吸附/沉淀/转化	383

6.3.4 胞内吸附/沉淀/转化	386
6.4 生物吸附机理的研究手段	388
6.4.1 概述	388
6.4.2 傅里叶变换红外光谱(FTIR)	391
6.4.3 扫描电子显微镜-能谱(SEM-EDX)	403
6.4.4 透射电子显微镜-能谱(TEM-EDX)	419
6.4.5 原子力显微镜(AFM)	421
6.4.6 紫外-可见光谱(UV-Vis)	425
6.4.7 X射线光电子能谱(XPS)	427
6.4.8 同步辐射光源的X射线吸收精细结构谱(XAFS)	431
6.4.9 电感耦合等离子体-质谱(ICP-MS)	442
参考文献	453
第7章 生物吸附过程模拟	459
7.1 吸附动力学模型	459
7.2 等温吸附模型	461
7.3 吸附热力学模型	465
7.4 酿酒酵母生物吸附过程分析	466
7.4.1 酿酒酵母吸附重金属离子的时间进程	466
7.4.2 酵母吸附重金属离子的动力学模型	467
7.4.3 等温吸附过程及模型拟合	468
7.4.4 重金属离子生物吸附容量的比较	469
7.4.5 温度对酿酒酵母生物吸附量的影响	471
7.5 磁性壳聚糖对重金属的吸附特性	473
7.5.1 磁性纳米壳聚糖吸附 Cu(II)的动力学	473
7.5.2 磁性壳聚糖和二硫化碳改性磁性壳聚糖吸附 Pb(II)的动力学	475
7.5.3 温度对纳米磁性壳聚糖吸附 Cu(II)的影响	476
7.5.4 磁性壳聚糖和二硫化碳改性磁性壳聚糖吸附 Pb(II)、Cu(II)、Zn(II)的 等温吸附特征	480
7.5.5 纳米磁性壳聚糖吸附 Cu(II)的热力学	484
7.5.6 小结	485
7.6 多元体系中 Pb、Cu、Zn 竞争吸附	485
7.6.1 磁性壳聚糖对多元体系中 Pb(II)、Cu(II)、Zn(II)的竞争吸附	485
7.6.2 秸秆及其改性材料对 Pb-Cu-Zn 的竞争吸附特性	490
参考文献	498

第 8 章 重金属废水的生物处理	503
8.1 生物对重金属的固定与溶解机制	503
8.1.1 引言	503
8.1.2 生物对重金属的固定机制	504
8.1.3 生物对重金属的溶解机制	505
8.2 重金属废水生物处理概况	505
8.2.1 重金属废水生物处理原理	505
8.2.2 重金属废水生物处理工艺	506
8.2.3 重金属废水生物处理案例	506
8.3 硫酸盐还原菌处理重金属废水	507
8.3.1 硫酸盐还原菌简介	507
8.3.2 SRB 处理重金属废水的原理	511
8.3.3 硫酸盐还原菌处理重金属废水的特性	512
8.3.4 硫酸盐还原菌去除重金属离子的动力学	517
8.4 藻菌生物膜系统处理重金属废水	521
8.4.1 引言	521
8.4.2 处理效果分析及机理探讨	521
8.5 零价铁-硫酸盐还原菌(ZVI-SRB)处理重金属废水	522
8.5.1 引言	522
8.5.2 ZVI-SRB 处理重金属废水的研究思路	523
8.5.3 ZVI-SRB 处理重金属废水的实验方法	523
8.5.4 ZVI-SRB 处理重金属废水的效果	524
8.5.5 ZVI-SRB 处理重金属废水的机理分析	526
8.6 固定化 SRB 处理重金属废水	528
8.6.1 引言	528
8.6.2 SRB 等固定化及活性测试	528
8.6.3 固定化 SRB 去除 Ni^{2+} 的特性	529
8.6.4 固定化 SRB 去除 Ni^{2+} 的动力学	530
8.6.5 固定化 SRB 去除 Ni^{2+} 的等温吸附特性	533
8.6.6 固定化 SRB 对多种重金属(Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Ni^{2+})的竞争吸附	535
8.6.7 固定化 SRB 连续处理含 Ni^{2+} 废水	536
8.7 生物法处理实际电镀废水	539
8.7.1 引言	539
8.7.2 处理工艺流程及处理效果	539
8.7.3 重金属离子去除机理分析	540

8.7.4 生物法与物化法的技术经济比较	541
8.7.5 新型纳米生物材料处理电镀废水	541
8.8 一种基于生物抗性机制的新型膜反应器处理重金属废水	543
8.8.1 基本原理	543
8.8.2 重金属废水处理效果	544
8.8.3 重金属污染土壤的修复效果	544
8.9 水生植物治理重金属水体污染	544
8.9.1 水生植物的类型及处理废水的原理	544
8.9.2 水生植物处理废水的方式	545
8.9.3 水生植物去除重金属的潜力	547
8.9.4 水生植物去除重金属的不足	547
8.10 人工湿地去除重金属	547
8.10.1 引言	547
8.10.2 重金属的去除效果	548
8.10.3 人工湿地的作用机理	548
8.11 典型重金属废水的生物处理	549
8.11.1 含 Cr 废水的生物处理	549
8.11.2 含 Hg 废水的生物处理	549
8.11.3 含 As 废水的生物处理	552
8.11.4 含 U 废水的生物处理	556
8.11.5 其他重金属废水的生物处理	558
参考文献	558

第 1 章 重金属及其污染

1.1 重金属及相关基础知识

1.1.1 引言

随着工业的发展,人们对重金属的使用越来越广泛。一方面,重金属资源出现了相对缺乏的局面;另一方面,伴随而来的是环境受到了重金属的污染。震惊世界的“水俣病”和“骨痛病”事件,以及我国出现的“镉大米”,就是由于重金属汞和镉的污染而引起的。

重金属作为矿产资源开发、金属冶炼和金属加工活动的主要污染物,其污染随着我国经济发展以及开发规模的不断扩大日益严重。部分地区污染严重,已引起公众高度关注。

重金属是对生态环境危害极大的一类污染物,其进入环境后不能被生物降解,而往往参与食物链循环并最终在生物体内积累,破坏生物体正常生理代谢活动,危害人体健康。因此,有效处理重金属废水并回收贵重金属,是当今环境保护领域中的一个亟待解决的重要问题。

表 1-1 列出了一些金属元素开采及利用的主要工业部门,这些部门排放的废水中可能含有金属离子,需要特别关注,进行适当的处理。

表 1-1 使用重金属的主要工业部门

工业部门	金属	可能含有的其他干扰物
采矿	阳离子:Cu, Zn, Pb, Mn, U, ...	Fe, Al 硫酸根、磷酸根
	阴离子:Cr, As, Se, V, ...	
电镀	Cr, Ni, Cd, Zn	Fe, 表面活性剂
金属加工	Cu, Zn, Mn	Fe, Al, 表面活性剂
燃煤发电	Cu, Cd, Mn, Zn, ...	Fe, Al
核工业	U, Th, Ra, Sr, Eu, Am, ...	Fe
特殊部门	Hg, Au 及其他贵金属	

1.1.2 元素及元素周期表

2013 年 5 月 1 日,国际纯粹与应用化学联合会(IUPAC)在其网站上发布了最