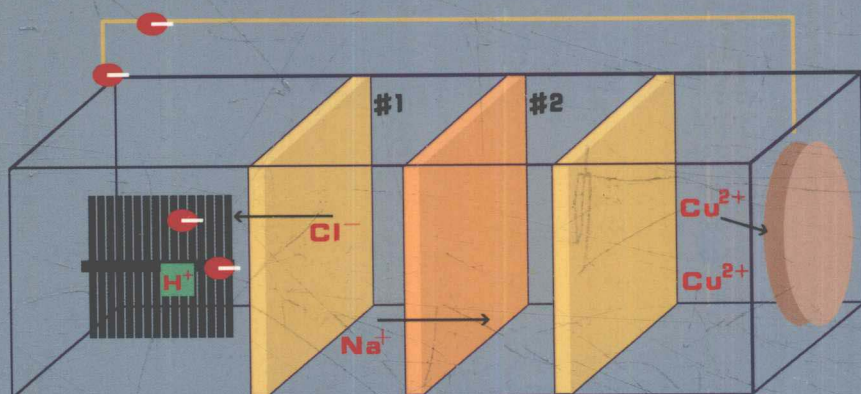


微生物电化学系统除盐及 重金属性能研究



安众一 张慧超 著



中国海洋大学出版社
CHINA OCEAN UNIVERSITY PRESS

微生物电化学系统 除盐及重金属性能研究

安众一 张慧超 著

中国海洋大学出版社

• 青岛 •

图书在版编目(CIP)数据

微生物电化学系统除盐及重金属性能研究/安众一,
张慧超著. —青岛:中国海洋大学出版社, 2017. 8
ISBN 978-7-5670-1572-2

I. ①微… II. ①安… ②张… III. ①微生物—
应用—化学脱盐—电化学处理 ②微生物—应用—重
金属废水—电化学处理 IV. ①TQ028 ②X703

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 228585 号

微生物电化学系统除盐及重金属性能研究

安众一 张慧超 著

出版发行	中国海洋大学出版社	
社 址	青岛市香港东路 23 号	邮政编码 266071
网 址	http://www.ouc-press.com	
出 版 人	杨立敏	
责任编辑	孟显丽 刘宗寅	
电 话	0532—85901092	
电子信箱	1079285664@qq.com	
印 制	日照日报印务中心	
版 次	2017 年 9 月第 1 版	
印 次	2017 年 9 月第 1 次印刷	
成品尺寸	170 mm×230 mm	
印 张	10.5	
字 数	194 千	
印 数	1—1000	
定 价	32.00 元	
订购电话	0532—82032573(传真)	

发现印装质量问题,请致电 0532—88785354,由印刷厂负责调换。

前言

FOREWORD

回首人类的发展历史,我们不难发现所有文明的起源地都是伴水而建,正是拥有丰富的水资源,它们才得以孕育璀璨的文化硕果;工业革命的崛起,少不了能源作为坚实的物质基础,可以说是化石能源的大规模应用推动了近代的科学技术的飞速发展。而我们是否应反思一下,如果没有足够的水资源和能源,人类该何去何从?

水资源的短缺和能源的匮乏已成为限制当今世界发展的两大危机,尽管要提倡公民树立“节能减排”的意识,但加大对新能源的开发、提高海水淡化的效率才是解决这场危机的关键。

最近十年中,众多国内外学者将研究重点转移至微生物电化学系统,希望完善这项技术来解决上述危机。微生物电化学系统是以微生物细胞作为生物催化剂来驱动固态电极上的氧化反应和还原反应的新型能源技术,两种反应之间由相应的膜来间隔,因此可以分别处理不同类型的底物。其中,目前最常见的形式是以降解有机物和产电为目的的微生物燃料电池,其他形式如具有脱盐功能的微生物脱盐燃料电池以及具有产氢功能的微生物电解池也在各自领域初见端倪。

本书中,研究者针对目前亟待解决的重金属污染和海水淡化问题,提出利用一种新型的复合型微生物脱盐燃料电池同时处理海水和重金属废水的技术,其目的在于利用微生物自身的氧化还原作用所形成的电场,对于其中脱盐室的海水进行淡化处理,同时对于阴极的重金属进行还原回收;此外,结合微生物生态学检测手段,分析在处理过程中微生物群落的交替变化。

微生物电化学涵盖了电化学、微生物学、材料学、工程学等相关领域的知识,这就决定了其技术的多样性和复杂性。目前,此项技术仍处在实验室研究阶段,还有不少科学难题亟待解决。本书仅想以抛砖引玉的方式,阐述笔者目前关于此项技术的研究情况,借以激发更多同行的新思想和新观点,进而开创微生物电化学系统研究的新局面。微生物电化学是一门不断发展的新技术,有许多问题处于探讨之中,加上笔者理论水平和实践经验的局限,书中疏漏之处在所难免,敬请各位读者批评指正。

目 录

CONTENTS

前言	001
第1章 绪论	001
1.1 国内外能源发展现状	001
1.2 废物的能源化技术	003
1.3 重金属废水的污染及治理	004
1.4 淡水资源现状和海水淡化	007
1.5 本章小结	007
第2章 微生物电化学系统概述	011
2.1 微生物电化学系统的发展及原理	011
2.1.1 微生物电化学系统的发展历程	012
2.1.2 微生物电化学系统的结构和基本工作原理	013
2.1.3 阴极在微生物电化学系统中的应用及发展	016
2.2 微生物电化学系统的材料和构型	022
2.2.1 阳极材料	022
2.2.2 阴极材料	024
2.2.3 膜材料	025
2.3 微生物电化学系统的应用	026
2.3.1 在污水、废水处理与同步产电中的应用	026
2.3.2 在产氢方面的应用	028
2.3.3 在土壤修复中的应用	028
2.3.4 作为生物传感器的应用	029

2.3.5 在海水淡化中的应用	029
2.4 本章小结	032
第3章 电容去离子技术	043
3.1 电容脱盐法的原理及发展	043
3.2 膜电容脱盐法的原理及发展	045
3.3 微生物电化学系统与 CDI 系统耦合	046
3.4 本章小结	046
第4章 生物阴极 MDC 脱盐效能及长期运行对其的影响	049
4.1 生物阴极 MDC 的构建及启动	050
4.1.1 生物阴极 MDC 的构建	050
4.1.2 生物阴极 MDC 的启动	050
4.1.3 阴、阳极表面微生物形态观察	051
4.2 生物阴极 MDC 的性能	052
4.2.1 电化学性能研究	052
4.2.2 脱盐性能	056
4.2.3 生物阴极 MDC 的有机物去除能力	057
4.3 生物阴极 MDC 的长期运行	059
4.3.1 长期运行后 MDC 性能的变化	060
4.3.2 长期运行中内阻的变化情况	063
4.3.3 更换离子交换膜对 MDC 的影响	065
4.4 运行后微生物群落变化分析	066
4.4.1 微生物多样性水平分析	066
4.4.2 阳极内微生物分析	067
4.4.3 阴极内微生物分析	070
4.4.4 脱盐室内微生物的生长	071
4.5 不同盐浓度下 MDC 的产电及脱盐效果	072
4.6 本章小结	073
第5章 生物阴极 MDC 驱动电容脱盐法性能研究	077
5.1 前言	077
5.2 自制板式活性炭电极的表征	078
5.2.1 CDI 电极的结构特性	078
5.2.2 CDI 电极的表面特性	079

5.2.3	CDI 电极的电化学特性	081
5.3	CDI 和 MCDI 的运行优化	081
5.3.1	不同电压下 CDI 的运行	081
5.3.2	CDI 与 MCDI 的对比研究	083
5.4	MDC 与 MCDI 耦合提高脱盐速率	084
5.4.1	不同供电形式下 MDC-MCDI 的脱盐效果	084
5.4.2	MDC-MCDI 系统连续流脱盐研究	086
5.5	本章小结	088
第6章	微生物燃料电池利用铜、铬的产电特性研究	090
6.1	引言	090
6.2	微生物燃料电池利用铜的产电性能研究	091
6.2.1	微生物燃料电池的启动特性	091
6.2.2	微生物燃料电池的产电效能研究	092
6.2.3	微生物燃料电池的阴极效能研究	096
6.2.4	连续运行下 MFC 的产电性能	098
6.3	微生物燃料电池利用铬产电性能的研究	099
6.3.1	微生物燃料电池的启动特性	099
6.3.2	微生物燃料电池的产电效能研究	100
6.3.3	微生物燃料电池的阴极效能研究	103
6.3.4	连续运行下 MFC 的产电性能	104
6.4	生物阴极型微生物燃料电池利用铬产电性能研究	105
6.4.1	生物阴极微生物燃料电池的启动特性	106
6.4.2	生物阴极 MFC 产电性能与阴极效能研究	108
6.4.3	连续运行下 MFC 的产电性能	111
6.4.4	生物阴极内微生物群落结构特征分析	112
6.5	本章小结	115
第7章	微生物脱盐燃料电池利用铜、铬产电与脱盐特性的研究	118
7.1	引言	118
7.2	三室微生物脱盐燃料电池利用铬产电性能研究	119
7.2.1	三室微生物脱盐燃料电池的启动特性	119
7.2.2	三室微生物脱盐燃料电池产电效能研究	120
7.2.3	三室微生物脱盐燃料电池脱盐效能研究	123
7.2.4	三室微生物脱盐燃料电池阴极效能研究	125

7.2.5	连续运行下三室 MDC 效能研究	127
7.3	四室微生物脱盐燃料电池利用铜产电性能研究	129
7.3.1	四室微生物脱盐燃料电池的配制及启动特性	129
7.3.2	四室微生物脱盐燃料电池产电效能研究	129
7.3.3	四室微生物脱盐燃料电池脱盐效能研究	132
7.3.4	四室微生物脱盐燃料电池阴极效能研究	133
7.3.5	连续运行下四室 MDC 的产电效能	135
7.4	微生物脱盐燃料电池中的重金属转化途径与产物分析	136
7.4.1	Cu^{2+} 的转化途径与最终产物分析	136
7.4.2	Cr(VI) 的转化途径与最终产物分析	137
7.5	利用铜产电的两室 MFC 与四室 MDC 的内阻比较	139
7.6	本章小结	140
第8章	微生物燃料电池产电驱动 CDI 吸附 Cu^{2+} 的特性研究	142
8.1	引言	142
8.2	粉末活性炭 CDI 电极的物理、化学性质研究	142
8.3	直流稳压供电驱动 CDI 电极吸附 Cu^{2+} 的性能研究	143
8.3.1	电压对 CDI 吸附 Cu^{2+} 效果的影响	143
8.3.2	pH 对 CDI 吸附 Cu^{2+} 效果的影响	144
8.3.3	初始 Cu^{2+} 浓度对 CDI 吸附 Cu^{2+} 效果的影响	145
8.4	MFC 产电驱动 CDI 处理含铜废水效能研究	146
8.4.1	MFC 作为供电电源产电性能研究	146
8.4.2	直流电与 MFC 供电模式下 CDI 除 Cu^{2+} 效能对比研究	147
8.4.3	不同共存离子对 MFC 驱动 CDI 除 Cu^{2+} 效能的影响	149
8.4.4	多组 MFC 联合供电方式对 CDI 除 Cu^{2+} 效能的影响	151
8.4.5	吸附前后的电极表面分析	153
8.5	MFC 驱动 CDI 吸附 Cu^{2+} 的动力学过程研究	155
8.5.1	吸附动力学研究	155
8.5.2	吸附等温线研究	157
8.6	本章小结	159

第1章 绪论

1.1 国内外能源发展现状

宋朝学者沈括在其著作《梦溪笔谈》中写道：“鄜、延境内有石油……颇似淳漆，燃之如麻，但烟甚浓，所沾幄幕甚黑……此物后必大行于世，自余始为之。盖石油至多，生于地中无穷，不若松木有时而竭。”正如沈括所预言的那样，他所命名的“石油”这种物质，成为当今社会经济发展和人类生存不可或缺的关键资源。以石油、煤、天然气为主的化石能源已然成为一个国家军事、经济、文化能否迅速发展的物质资本，而且随着社会的进步，一个国家乃至整个世界对能源的依赖程度逐年提高^[1]。因此，如何开发新能源和有效地利用已知化石能源已成为当今世界所关注的焦点问题^[2]。

纵观世界历史，每一次产业革命均离不开能源的支持，任何产业的进步都是以能源的消耗为代价换来的。19世纪70年代的产业革命，主要是以煤炭为主的化石燃料消耗；20世纪以后，石油和天然气的消耗量日益加大，推动了相关产业的发展；进入20世纪60年代以后，石油消耗跃居能源消耗的首位，此后虽经历了两次石油危机，但仍然没有撼动石油消耗在能源消耗中的主导地位。但自21世纪初以来，世界范围内加大对天然气的开发力度和提高其使用率，使得天然气的消耗比例逐年增加，而石油和煤炭的消耗比例相应下降。伴随着世界经济的迅猛发展，能源的消费需求也随之增长。根据《2014年BP世界能源年鉴》^[3]数据可知，2010年后，全球经济增长势头放缓，2013年的增速仅为3%，而能源消费增长与经济增长基本保持一致，其能源消费增长由2012年的1.8%提高至2013年的2.3%。其中，石油主导能源的霸主地位仍未被撼动，其消费量约占全球一次能源消费量的1/3。但令人欣慰的是，唯一没有改变的事实是探明储量在增长。在过去的10年中，石油和天然气的探明储量分别增长了27%和19%，尽管与之对应的产量增幅仅为11%和29%。

世界各区域经济增长模式的差别造成了各区域能源需求增长程度的不同。

由图 1-1 可以看出,非洲、中东、中南美洲、亚太地区 and 北美洲的能源需求均有所增长,但经济水平稍高的欧洲及欧亚大陆地区却出现了能量需求负增长趋势。需要注意的是,只有北美洲的能源需求增长高于 1999—2009 年期间的平均水平,其显著成效就是北美洲经济的增长推动了经济合作与组织发展需求的增长,而亚太地区的增速已经放缓,但我国 2009 年以来能源需求增长仍保持在 5.2% 的水平。作为世界两大能源消费国,美国和中国的能源消费增长之和可以占全球能源消费增长总和的 72.52%。BP 首席经济学家克里斯托弗·鲁尔指出,中国的能源需求增长放缓主要体现在煤炭方面,但也包括石油的消费。美国的能源消费的增长主要是石油消费,尽管这种消费增长有天然气方面的原因,但美国工业部门对石油产品的需求已出现根本性增长的迹象。因此,由全球燃料种类需求总量分布可以看出,中国能源消费的放缓造成了煤炭需求增长的相对疲软,而美国推动了石油需求的强劲增长。

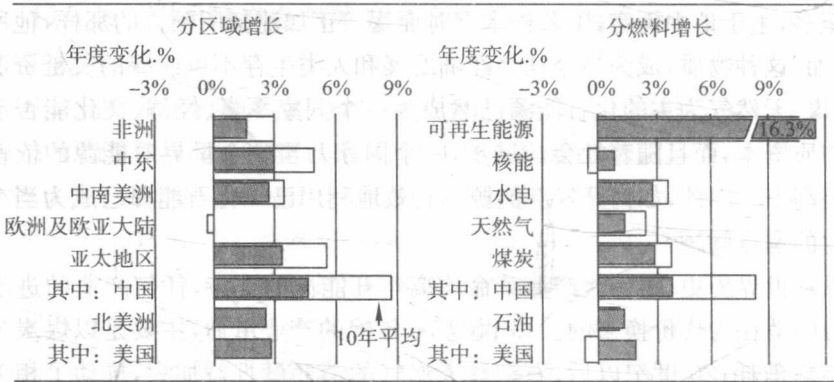


图 1-1 1999—2009 年世界能源形势

我国的经济增长速度已居于世界前列,这对维护整个世界的能源市场的安全有着举足轻重的作用^[1]。能源是经济和科技发展的基础,因此加大能源的勘查开发和提高能源利用率是目前世界各国所面临的重要任务。相比于西方发达国家,我国的能源的开发和利用有着以下特点。

(1) 能源总量丰富,种类繁多;煤炭储藏量较多,石油、天然气的储藏量相对偏少。

(2) 人均占有量较低。由于我国巨大的人口基数,造成我国的人均煤炭占有量仅占世界平均水平的 50%,石油和天然气的人均占有量是世界平均水平的 1/15。

(3) 由于国土面积跨度大,造成了能源分布极其不均匀。煤炭资源主要分布在我国的华北和西北地区,石油、天然气资源主要分布在我国的东北、中部和西部

地区以及东南海域。

(4) 能源开采条件较差,需要较高的勘查开发水平。

经济和科技的发展离不开能源的供给,我国也不例外。在经济高速发展的今天,我国面临的能源问题也极为突出。首先,资源约束因素多,造成能源利用率低。我国的优质能源相对较少且分布不均,加上粗放型经济造成能源需求结构不合理、国内对能源的勘查开发和管理水平较低,这些都造成了我国单位生产总值能耗要远远高于欧美发达国家。其次,我国的能源消费主要以煤炭为主,对周边环境的压力加大:煤炭消费造成了温室气体的大量排放,给生态环境带来了很大的压力。再次,我国的能源管理体系的应急处理能力较差,因此必须完善能源法律法规、建立能源安全预警体系。

面临能源危机,我们不得不重视能源的开发利用所造成的环境污染问题。化石能源如石油、煤、天然气等直接燃烧,会产生二氧化硫、氮氧化物、烟尘、痕量重金属和大量的二氧化碳,这些排出物对环境造成了极大的损害,带来了酸雨、温室效应和臭氧层破坏等后果。此外,化石能源对全球气候的影响日益加剧。据 EIA (U. S. Energy Information Administration) 统计,世界二氧化碳的排放量在 1990 年时约为 215 亿吨,到 2001 年已经上升到 277.2 亿吨,预计在 2025 年将上升至 371 亿吨,这无疑会对环境造成极度的污染和对气候产生极大的影响。

因此,积极倡导能源的清洁利用、提高化石能源的利用效率和开发新型洁净型能源已成为当今世界各国亟须解决的焦点问题。开发新型能源特别是生物质能源,可以从废物中挖掘潜力,利用有关技术对废物进行改造,利用其产能达到“变废为宝”的目的。这样做,在解决产能问题的同时,又可以消除环境污染,最终达到环境保护和能源利用的和谐发展^[1]。

1.2 废物的能源化技术

传统的化石能源的有限性、短时间内难恢复性以及对环境污染性,使得各国加快了对新型能源的开发利用。目前已投入生产使用的新型能源主要有水能、风能、核能、太阳能和生物质能等。但是,水能和风能由于受地理因素和季节变化因素的限制,不能大范围地推广利用;太阳能利用前期需要投入的设备费用较高,而且目前的光能转化率较低;发展最快的核能,由于需要配备高端技术和设备、操作和维护又较复杂,使得其不能小型化发展^[2],此外,日本福岛的核泄漏事件又让民众对核能发电的安全性产生了质疑,多国的核能产业处于停滞不前的状态。

生物质能源作为一种新兴的能源,拥有独特的开发潜力和良好的环境共存性。生物质能是指太阳能以化学能形式贮存在生物质中的能量形式,即以生物质

为载体的能量。自然界里的任何有生命迹象的个体,如动物、植物、微生物,它们本身具有能量或在进行生理活动时可以产生能量。在生物质能技术中,将农副产品和工业废弃物、工业废水或生活用水以及污水处理厂的剩余污泥作为原料,利用微生物的作用,最大限度地将其转化为可以利用的能源或资源,达到废物再利用的目的,这就是废物的资源化技术。这一技术既可以消除废物对环境的污染,又可以创造额外的经济价值,是一种环境友好型生物处理技术。目前世界各国都在加强对废弃生物质能的开发和转化研究,已经报道的生物质资源化技术,按照处理对象的不同主要分为以下三类。

(1) 生活垃圾中的有机物处理。生活垃圾中含有丰富的有机物,用高温分解的方式可以获得燃油;同样,在微生物的降解作用下可以将这些有机物转化为氢气和沼气能源。

(2) 农作物的秸秆处理。秸秆中含有大量的纤维素,直接燃烧或利用热解法生成可燃气体直接获得相应能量;在特定微生物的厌氧发酵作用下,可以转化为氢气、乙醇、丙酸或其他有机酸类物质作为工业原料进行使用。

(3) 废水的处理。生活废水中含有大量的氮、磷元素和其他有机物质,可作为微生物生长所需的底物加以利用,微生物可以将其中的有机物分解从而获得氢气或甲烷。氢气和甲烷作为清洁型能源,已经受到国内外学者的广泛重视,其中如何提高生物光合制氢和厌氧发酵制氢的产氢量已成为世界范围内此类研究的焦点问题^[6]。此外,以有机废水做底物培养微藻,然后从微藻中提取油滴,提纯后可以制成“生物柴油”^[7]。新型的微生物燃料电池(MFC)技术,可以通过微生物的作用将废水中有机物中的化学能转化为电能,从而达到处理废水和同步发电的目的。总之,利用这些生物技术,可以将废水“变废为宝”,在解决环境问题的同时又可以取得经济效益。目前亟待解决的问题是如何提高这种转化中的生物质能源的产量及品质。

1.3 重金属废水的污染及治理

重金属废水来源主要集中于采矿业、冶金业、金属加工业、电镀加工业、电池制造业和化工加工业等行业,尤其是采矿业和冶金业^[8]。这些废水中含有大量的重金属离子,如铜、铅、锌、镍、镉、汞等离子和含 6 价铬的酸根离子,盐酸、硫酸等酸类物质和氢氧化钠等碱类物质,以及氰化物和其他难降解的有机物等。

重金属废水排放至周边环境后,其中毒性很大的重金属离子不能被微生物降解,将长期存在于收纳水体中污染周边环境,而且部分重金属离子会经微生物作用转化为毒性更大的化合物;重金属离子在水中不断迁移转化,还可以通过食物

链进行高浓度的富集,通过食用或饮用的方式进入人体,使人体的器官和组织呈现慢性中毒症状,甚至以遗传的方式危害后代^[18]。因此,对重金属废水的治理必须受到高度的重视,将其中的有毒、有害物质经处理达标后才能排放至周边水体。

目前重金属废水的处理方法可以概括为化学法、物理化学法、生物处理法三大类。其中,化学法主要包括化学沉淀法、铁氧化体法、氧化还原法、电解法;物理化学法主要包括吸附法、溶剂萃取法、反渗透法、离子交换法、电渗析法;生物处理法主要包括生物絮凝法、植物富集法和生物吸附法^[19]。笔者将各种处理法的优缺点进行了总结,见表 1-1。

表 1-1 各种重金属废水处理法的比较

方法名称	基本原理	优点	缺点
化学沉淀法 ^[20]	针对废水中的重金属离子,使用相应的药剂使其转化为沉淀物,从水中去除	技术比较成熟,处理成本较低,能够去除废水中的大部分重金属离子	反应速度较慢;产生大量含重金属离子的污泥,难于处理,易造成二次污染
铁氧化体法 ^[21]	向废水中投加铁盐,调节参数,使其易于和水中重金属离子形成稳定的铁氧化体共沉淀	易于固液分离和脱水,可以同时去除多种重金属离子	须加热,能耗较高,而且不能处理含汞及其络合物的废水,处理后的水碱性较强
氧化还原法 ^[22]	加入活泼金属使高价金属元素变为低价金属元素,加入碱试剂与重金属离子共沉淀使其得以去除	原料来源广,处理效果较好,适用于规模较小的水处理	设备所需场地较大,后续污泥量较多,出水偏碱性,不能直接排放
电解法 ^[23]	阴阳两极通电,使水中的重金属离子发生氧化还原反应并富集后得以去除	集电气浮、电絮凝、电氧化还原于一身,技术较成熟,操作便利	耗电量较大,出水水质较差,处理规模较小
吸附法 ^[24]	利用天然或人工合成的多孔性吸附材料去除废水中的重金属离子	天然吸附剂的制备资源广泛,制作工艺简单,价格低廉;人工合成吸附剂也具有以上优点	吸附剂应用寿命较短,难再生或再生后吸附效率降低,而且吸附上的重金属难于被回收

(续表)

方法名称	基本原理	优点	缺点
溶剂萃取法 ^[25]	利用重金属离子在有机溶剂和水中溶解度的不同,将重金属离子浓缩于有机层中	其处理设备相对简单,操作方便,所需萃取剂量较小,基本不产生二次污染	处理过程中所用的萃取剂成本相对较高
反渗透法 ^[26]	利用半透膜与高压过滤实现离子浓缩分离	既可以净化水质,又可以达到从废水中回收金属的目的,无二次污染	膜组件价格昂贵、使用寿命较短,增加了其处理成本;对进水的预处理要求较高
电渗析法 ^[28]	废水中的阴、阳离子在电场作用下定向、选择性地分别通过阳离子交换膜和阴离子交换膜	废水中的重金属离子得到分离浓缩,同时净化了废水	当处理液电解质浓度过低时,膜表面容易结垢,能耗升高,出水水质下降
生物絮凝法 ^[29]	利用微生物或微生物代谢的产物与重金属离子发生絮凝沉淀反应	处理废水安全、简便,不会产生二次污染,处理效果较好	生产成本较高、活体絮凝剂难以保存且产业化较难等,其研究仍处于实验室阶段
植物富集法 ^[30,31]	利用植物的吸收、沉淀和富集作用来降低被污染土壤或地表水中的重金属含量	可利用的植物较为广泛,而且积累在植物体内的重金属可以减轻对土壤的污染	植物生长周期较长,需要较大的种植面积
生物吸附法 ^[32]	水中的重金属离子被生物体中的化学官能团或特殊成分吸附而去除	不会发生二次污染,吸附剂来源较广且价格便宜,通过解吸可以回收贵金属	微生物培养周期较长、产率较低,而且吸附剂总体吸附容量偏低,目前的研究仍处于实验室阶段

重金属废水成分复杂,其中含有多种有毒的重金属离子和有机物,严重威胁着周边居民的身体健康和生态系统的稳定^[9]。例如,其中的氰化物是剧毒物质,人体口服氰化钾 120 mg/L 或氰化钠 100 mg/L 即可造成死亡^[10];6 价铬的化合物可以对人体的呼吸系统、内脏和皮肤造成伤害,铬的化合物还会导致支气管癌^[11];镉及其化合物会延缓骨骼生长,造成骨质疏松、变形等,此外还会影响肾脏功能和引起贫血症状^[12];铜及其化合物主要对皮肤影响较大,会诱发皮炎或湿疹,若接触高浓度的铜离子溶液甚至会造成皮肤坏死^[13];锌及其化合物若服用或

接触过量,会引起呕吐、恶心、腹痛等急性肠胃病,并伴有四肢无力和头晕等症状,此外锌对鱼类及其他水生生物的毒性尤为厉害^[14];汞的毒性极强,它会引起人体消化道、肝脏、口腔、肾脏等多种器官的损害,还会导致人体神经系统的紊乱^[15];镍及其化合物进入人体后,主要存在于肺中,其毒性表现为抑制酶系统,此外还会造成皮肤疾病^[16];其他酸类或碱类物质、油类物质、氟化物、苯胺类物质、硫化物尽管含量不大,但排放后也会对周边环境造成危害,因此也不可忽视^[17~32]。

1.4 淡水资源现状和海水淡化

地球上水总量大约为 $13.8 \times 10^8 \text{ km}^3$,但其中可用的淡水资源仅占 0.01%,而海水资源极其丰富^[33]。伴随着人口的增长、工业的扩张、农业的发展及水体的污染等,淡水资源的短缺变得愈发严重,全世界每 7 个人中就有 1 个人处于极端缺水的状态。在我国,由于地表水系发达,淡水资源总量较大,但由于人口众多,导致淡水资源的人均占有量仅为世界平均水平的 25%;并且,我国的水资源分布与耕地面积不匹配:在北方,水资源严重不足,而耕地面积又大,水资源可利用程度下降。我国淡水资源分布不均且应用的不合理,使得许多地区出现了淡水资源危机。我国沿海城市人口占全国人口总量的 40%,社会生产总值占全国总产值的 60%以上,而沿海地区的缺水总量却占到 33%以上^[34]。在沿海地区,海水资源丰富且经济发达,利用海水淡化获得淡水资源具有较大优势,因此海水淡化是沿海地区淡水的重要来源之一。因而,如何更经济有效地从海洋中获得淡水就是一个重要的研究课题。

1954 年,世界上第一个能实际应用的海水淡化厂在美国建成,并且至今仍在运行。全球水资源的短缺增加了海水淡化的需求量,特别是从 1980 年之后,全球范围内的海水淡化装机容量大幅度上升,近些年来海水淡化规模则以每年最高 30% 的速度在增长^[35]。在利用海水淡化增加饮用水的同时,如何最大限度地降低海水淡化的能耗就成为一个研究热点。假设一个热力学可逆过程中有 50% 的水被回收,那么淡化 1 吨海水的理论能耗为 $1.0 \text{ kW} \cdot \text{h}$ ^[36,37]。现在效率最高的海水脱盐系统对能量的消耗为 $1.8 \sim 2.2 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$,表明整个系统所需的电能消耗已经非常接近于最低需要值^[6]。当其他消耗也计算在内时,如泵的耗电、进水的预处理消耗等,在最近建设的反渗透海水淡化厂中能量的消耗为 $3 \sim 4 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 。研究者认为,反渗透系统很难进一步将整体能耗降低到 $3 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 以下,而过高的运行成本限制了其广泛应用。

1.5 本章小结

在水污染防治战略目标与技术路线方面,国家进行了重大调整。不再将污水

看作一种“废水”，污水中蕴含的大量有机物、氮、磷等，可以转化为大量的化学能。并且，某些特种废水中含有许多重金属离子等，这些重金属离子能够作为电子受体，完成氧化还原反应。

并且，随着淡水资源的短缺，海水淡化成为获得淡水的最有效途径之一。限制海水淡化广泛应用的最主要因素是海水淡化过程中需要消耗大量的能源，如果能够利用可再生能源为海水淡化过程提供能量，将大大扩展海水淡化可以应用的区域和范围。

参考文献

- [1] 郝龙芹. 对当前我国能源问题的思考[J]. 科技信息, 2009, 31(30): 427-428.
- [2] 樊东黎. 世界能源现状和未来[J]. 金属热处理, 2011, 36(10): 119-131.
- [3] B P Group. BP Statistical Review of World Energy June 2014 [OL]. <http://www.bp.com/en/global/corporate/about-bp/statistical-review-of-world-energy-2013/statistical-review-downloads.html>.
- [4] 周志强. 中国能源现状、发展趋势及对策[J]. 能源与环境, 2008, 6: 9-10.
- [5] Tchobanoglous G, Burton F L. Wastewater engineering: treatment, disposal and reuse, 3rd edition[M]. Metcalf & Eddy, McGraw-Hill: New York, 1991: 52-56.
- [6] Benemann J. Hydrogen biotechnology: progress and prospects[J]. Nature Biotechnology, 1996, 14(9): 1101-1103.
- [7] Pienkos P T, Darzins A. The promise and challenges of microalgal-derived biofuels[J]. Biofuels Bioproducts & Biorefining, 2009, 3(4): 431-440.
- [8] Juttner K, Galla U, Schmieder H. Electrochemical approaches to environmental problems in the process industry[J]. Electrochimica Acta, 2000, 45(15-16): 2575-2594.
- [9] Janssen L J J, Koene L. The role of electrochemistry and electrochemical technology in environmental protection[J]. Chemical Engineering Journal, 2002, 85(2-3): 137-146.
- [10] 水和废水监测分析方法指南编委会. 水和废水监测分析方法指南[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990: 104-105.
- [11] 何宝燕, 尹华, 彭辉, 等. 酵母菌吸附重金属铬的生理代谢机理及细胞形貌分析[J]. 环境科学学报, 2007, 28(1): 194-198.