

■ 环保公益性行业科研专项经费项目系列丛书 >>>

# 稀土尾矿库区地下水污染 风险评估与防控修复研究

滕 应 陈梦舫 等 著



科学出版社

环保公益性行业科研专项经费项目系列丛书

# 稀土尾矿库区地下水污染风险评估 与防控修复研究

滕 应 陈梦舫 等 著



科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书系统地分析了我国稀土金属冶选尾矿库渗漏对地下水污染的生态风险评估与控制研究的最新成果。全书共九章,分别介绍了我国稀土金属冶选尾矿库区的生态环境问题、包钢稀土尾矿库区的污染特征与生态环境状况、地下水中污染物的迁移过程、地下水对生物体的遗传损伤、地下水污染的生物监测方法与生态风险评价、尾矿库渗漏污染地下水的防控预警与修复技术以及稀土尾矿库区的环境管理策略等,并提出了包头稀土尾矿库区地下水污染存在的关键问题与解决这些问题的管理技术,具有重要的学术价值和现实指导意义。

本书可作为地下水科学与工程、环境科学、生态学领域的科研工作者、研究生以及技术人员的参考书,也可作为高等院校、研究所相关专业研究生课程的参考教材。

### 图书在版编目(CIP)数据

稀土尾矿库区地下水污染风险评估与防控修复研究/滕应等著. —北京:科学出版社,2016

(环保公益性行业科研专项经费项目系列丛书)

ISBN 978-7-03-050930-7

I. ①稀… II. ①滕… III. ①稀土元素矿床-尾矿-地下水污染-污染防治 IV. ①X523

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第283381号

责任编辑:周丹 王希/责任校对:李影

责任印制:张倩/封面设计:许瑞

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>

北京佳信达欣艺术印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2016年11月第一版开本:720×1000 1/16

2016年11月第一次印刷印张:18 1/2 插页:44

字数:373 000

定价:99.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

# 环保公益性行业科研专项经费项目系列丛书

## 编著委员会

顾 问：吴晓青

组 长：刘志全

成 员：禹 军 陈 胜 刘海波

# 《稀土尾矿库区地下水污染风险评估 与防控修复研究》著者名单

主要著者：滕 应 陈梦舫 张雪峰 龙 涛  
蔡 超 郑春苗

著者成员：（按姓氏拼音排序）

安新丽	蔡 超	曹国亮	陈梦舫
陈 云	邓攀博	邓绍坡	高海荣
高晓玲	贺小英	黄 翔	黄 阳
李 婧	林玉锁	林 忠	龙 涛
吕保义	骆永明	马文亭	任文杰
司万童	滕 应	王建英	王晶妍
吴运金	晏井春	张雪峰	郑春丽
郑春苗	郑丽萍	祝 欣	

# 环保公益性行业科研专项经费项目系列丛书

## 序言

我国作为一个发展中的人口大国，资源环境问题是长期制约经济社会可持续发展的重大问题。党中央、国务院高度重视环境保护工作，提出了“建设生态文明、建设资源节约型与环境友好型社会、推进环境保护历史性转变、让江河湖泊休养生息、节能减排是转方式调结构的重要抓手、环境保护是重大民生问题、探索中国环保新道路”等一系列新理念新举措。在科学发展观的指导下，环境保护工作成效显著，在经济增长超过预期的情况下，主要污染物减排任务超额完成，环境质量持续改善。

随着当前经济的高速增长，资源环境约束进一步强化，环境保护正处于负重爬坡的艰难阶段。治污减排的压力有增无减，环境质量改善的压力不断加大，防范环境风险的压力持续增加，确保核与辐射安全的压力继续加大，应对全球环境问题的压力急剧加大。要破解发展经济与保护环境的难点，解决影响可持续发展和群众健康的突出环境问题，确保环保工作不断上台阶、出亮点，必须充分依靠科技创新和科技进步，构建强大坚实的科技支撑体系。

2006年，我国发布了《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006—2020年）》（以下简称《规划纲要》），提出了建设创新型国家的战略，科技事业进入了发展的快车道，环保科技也迎来了蓬勃发展的春天。为适应环境保护历史性转变和创新型国家建设的要求，原国家环境保护总局于2006年召开了第一次全国环保科技大会，出台了《关于增强环境科技创新能力的若干意见》，确立了科技兴环保战略；2012年，环境保护部召开第二次全国环保科技大会，出台了《关于加快完善环保科技标准体系的意见》，全面实施科技兴环保战略，建设满足环境优化经济发展需要、符合我国基本国情和世界环保事业发展趋势的环境科技创新体系、环保标准体系、环境技术管理体系、环保产业培育体系和科技支撑保障体系。近年来，在广大环境科技工作者的努力下，水体污染控制与治理科技重大专项实施顺利，科技投入持续增加，科技创新能力显著增强；现行国家标准达1500余项，环境标准体系建设实现了跨越式发展；完成了100余项环保技术文件的制修订工作，确立了技术指导、评估和示范为主要内容的管理框架。环境科技为全面完成环保规划的各项任务起到了重要的引领和支撑作用。

为优化中央财政科技投入结构，支持市场机制不能有效配置资源的社会公益研究活动，“十一五”期间国家设立了公益性行业科研专项经费。根据财政部、科

技部的总体部署，环保公益性行业科研专项紧密围绕《规划纲要》和《国家环境保护科技发展规划》确定的重点领域和优先主题，立足环境管理中的科技需求，积极开展应急性、培育性、基础性科学研究。“十一五”以来，环境保护部组织实施了公益性行业科研专项项目 479 项，涉及大气、水、生态、土壤、固废、核与辐射等领域，共有包括中央级科研院所、高等院校、地方环保科研单位和企业等几百家单位参与，逐步形成了优势互补、团结协作、良性竞争、共同发展的环保科技“统一战线”。目前，专项取得了重要研究成果，提出了一系列控制污染和改善环境质量的技术方案，形成了一批环境监测预警和监督管理技术体系，研发出了一批与生态环境保护、国际履约、核与辐射安全相关的关键技术，提出了一系列环境标准、指南和技术规范建议，为解决我国环境保护和环境管理中亟需的成套技术和政策制定提供了重要的科技支撑。

为广泛共享“十一五”以来环保公益性行业科研专项项目研究成果，并及时总结项目组织管理经验，环境保护部科技标准司组织出版了环保公益性行业科研专项经费项目系列丛书。该丛书汇集了一批专项研究的代表性成果，具有较强的学术性和实用性，可以说是环境领域不可多得资料文献。该丛书的组织出版，在科技管理上也是一次很好的尝试，我们希望通过这一尝试，能够进一步活跃环保科技的学术氛围，促进科技成果的转化与应用，为探索中国环保新道路提供有力的科技支撑。

中华人民共和国环境保护部副部长

吴晓青


2011 年 10 月

# 序 言

随着社会经济的迅速发展，我国对稀土资源的需求日益增大，稀土资源的开发规模和开采强度也不断加大。稀土矿的开采和冶炼过程中会产生大量的尾矿，运行过程中将废渣和废水不断地排入尾矿库。且尾矿库在运行期间，由于传统设计问题及尾矿库渗流的影响，坝基和坝身都可能存在一定的渗漏问题，对地下水产生污染，严重危害尾矿库周边人体健康及生态环境安全。因此，系统开展稀土尾矿区地下水污染生态风险评估与防控修复研究，是我国环境科学与技术研究领域关注的重要内容之一。

该书认为，地下水是水资源的重要组成部分，是农业、工业级生活用水的重要来源。稀土金属冶选尾矿库的存放破坏了当地原有的地质环境和水文地球化学条件，也破坏了地下水生态系统。地下水污染是一个非常复杂的地质-地球化学过程，具有长期性、复杂性、隐蔽性的特点，且污染治理难度大、费用高、时间长。因此，稀土金属冶选尾矿库渗漏对地下水造成污染的生态风险评估与控制技术，是我国地下水环境科学与工程学的研究重点。该书突出了稀土金属冶选尾矿库区地下水污染特征-迁移过程-生态风险评估-防控修复的主题，全面系统地介绍了我国包头稀土尾矿库区地下水的污染特征、污染物迁移过程、生物监测方法、生态风险评估、防控修复及综合管理对策等方面的最新研究成果，具有重要的科学价值和实践意义。

该书是在“十二五”环保公益性行业科研专项经费项目（No. 201309005）资助下，项目组成员三年来研究成果的系统总结。该书结构完整、内容丰富、图文并茂，具有系统性、前瞻性和引导性，是一本中国稀土金属冶选尾矿库区地下水环境与修复领域的系统著作。相信该书的出版将对地下水科学与工程、环境科学、生态学等研究领域的广大科技工作者和研究生有所帮助，也能有力地推动我国地下水环境科学与修复工程技术体系的发展。



2016年5月1日



# 前 言

尾矿库是指由筑坝拦截谷口或围地构成的，用以堆存金属或非金属矿山进行矿石冶选后排出尾矿或工业废渣的场所。全国共有尾矿库一万多座，其中危库、险库、病库两千多座。尾矿库渗（泄）漏环境事件时有发生，造成尾矿库区及周边地下水严重污染，影响矿区生态环境质量和人体健康。因此，当前亟须研发尾矿库周边地下水污染风险评估与控制技术，完善我国尾矿库环境应急管理的科技体系。“十二五”期间，中国科学院南京土壤研究所承担了环保公益性行业科研专项经费项目（No. 201309005），该项目以我国储量极为丰富的稀土金属尾矿库的管理为切入点，依托包钢尾矿库为研究示范基地，针对金属冶选尾矿库渗漏对周边地下水造成的污染问题，调查了稀土金属冶选尾矿库周边地下水污染状况及其生物生态效应；明确了地下水污染生态风险受体与生态风险暴露途径；建立了反映污染程度和生态危害的生物监测方法；评价了尾矿库周边地下水的污染程度；提出了可操作的生态风险评价指标体系；建立了尾矿库渗漏对周边地下水生态风险评价模型；划定了尾矿库周边地下水安全警戒线；提出了尾矿库渗漏的防控管理技术及已污染地下水的修复技术，为尾矿库周边地下水污染的防控与修复提供技术与支撑。该项目的实施主要依托于中国科学院南京土壤研究所的中国科学院土壤环境与污染修复重点实验室等场所。

本书是项目组对包头稀土尾矿库区地下水污染的生态风险评估与防控修复多年研究工作的总结。本书围绕稀土金属冶选尾矿库渗漏对地下水污染的生态风险评估与控制的主题，全面系统地分析了我国稀土金属冶选尾矿库区生态环境问题、包钢稀土尾矿库区的污染特征与生态环境质量、稀土尾矿库周边地下水中污染物迁移过程、稀土尾矿库周边地下水对生物体的遗传损伤与污染生物监测方法、稀土尾矿库周边地下水的生态风险评价、稀土尾矿库渗漏的污染防控预警与污染地下水的修复技术等。全书共分九章。第一章简要介绍我国稀土金属冶选尾矿库的概况，系统分析了尾矿库区存在的环境问题及其对生态系统和人体健康产生的风险；第二章主要介绍包钢稀土尾矿库概况、地下水和土壤污染状况和生物多样性调查等；第三章主要介绍包钢稀土尾矿库周边水文地质概况、水文地质概念模型及地质结构可视化、水流和溶质迁移模型、运移反应模型等；第四章主要介绍生物遗传损伤研究概述和研究方法、尾矿库周边地下水对植物和动物的遗传损伤等；第五章主要介绍污染生物监测概述、微生物原位评估地下水环境质量的方法研究、生物毒性测试异位监测方法、水质生物监测存在问题与展望等；第六章主要介绍

生态风险评价模型框架概述、稀土尾矿库区地下水生态风险分析与初筛、风险表征及生态风险防控区划等；第七章主要介绍地下水污染预警与防控概述、稀土尾矿库地下水渗漏的预警体系、污染防控体系和控制措施等；第八章主要介绍地下水修复技术概述、稀土尾矿库污染地下水修复技术的筛选、可渗透反应墙（PRB）修复材料的筛选和 PRB 的构建等；第九章主要介绍稀土尾矿库区的环境管理基础、环境监测技术、环境风险评估技术、环境风险管理及环境应急管理等。

本书是环保公益性行业科研专项经费项目团队的集体成果，其内容框架由滕应研究员主持拟定和完成。全书共九章，具体撰写分工如下：前言：滕应；第一章：任文杰，滕应，马文亭；第二章：郑春苗，曹国亮，黄翔，任文杰，滕应，龙涛，张雪峰，王建英，郑春丽；第三章：郑春苗，曹国亮，黄翔；第四章：张雪峰，王建英，郑春丽，司万童，贺小英，邓攀博，王晶妍，高海荣，林忠，吕保义，高晓玲；第五章：安新丽，蔡超；第六章：龙涛、邓绍坡、吴运金、郑丽萍、祝欣、林玉锁；第七章：陈梦舫，晏井春，陈云，李婧；第八章：陈梦舫，晏井春，陈云，李婧；第9章：黄阳，滕应，任文杰，马文亭，骆永明。全书由滕应研究员拟定框架，由任文杰博士和滕应研究员统稿、定稿。本书在出版过程中，得到了赵其国院士和骆永明研究员的悉心指导，在此一并表示诚挚的谢意！

由于著者水平有限，书中难免存在疏漏之处，敬请各位同仁批评指正。

滕 应

2015年12月于南京

# 目 录

环保公益性行业科研专项经费项目系列丛书序言

序言

前言

第一章 稀土金属冶选尾矿库区生态环境问题 .....	1
第一节 我国稀土金属冶选尾矿库的概况 .....	1
第二节 稀土金属冶选尾矿库区的环境问题 .....	7
第三节 稀土金属冶选尾矿库区的生态风险 .....	10
第四节 稀土金属冶选尾矿库区的健康风险 .....	15
参考文献 .....	16
第二章 包钢稀土尾矿库区的生态环境质量状况 .....	19
第一节 包钢稀土尾矿库概况 .....	19
第二节 地下水污染状况调查 .....	22
第三节 土壤污染状况调查 .....	41
第四节 生物多样性调查 .....	49
参考文献 .....	67
第三章 包钢稀土尾矿库周边地下水中污染物的迁移过程 .....	69
第一节 包钢稀土尾矿库周边水文地质概况 .....	69
第二节 水文地质概念模型及地质结构可视化 .....	76
第三节 水流和溶质迁移模型 .....	79
第四节 运移反应模型 .....	88
参考文献 .....	101
第四章 包钢稀土尾矿库周边地下水对生物体的遗传损伤 .....	102
第一节 生物遗传损伤研究概述 .....	102
第二节 生物遗传损伤的研究方法 .....	103
第三节 尾矿库周边地下水对植物的遗传损伤 .....	106
第四节 尾矿库周边地下水对动物的遗传损伤 .....	122
参考文献 .....	135
第五章 包钢稀土尾矿库周边地下水污染的生物监测方法 .....	138
第一节 水污染生物监测概述 .....	138
第二节 微生物原位评估地下水环境质量的方法研究 .....	142

第三节	生物毒性测试异位监测方法	153
第四节	水质生物监测存在问题与展望	158
	参考文献	159
<b>第六章</b>	<b>包钢稀土尾矿库周边地下水的生态风险评价</b>	<b>161</b>
第一节	生态风险评价模型框架概述	161
第二节	包钢稀土尾矿库周边地下水生态风险分析与初筛	175
第三节	包钢稀土尾矿库周边地下水生态风险表征	184
第四节	包钢稀土尾矿库周边地下水生态风险防控区划	198
	参考文献	204
<b>第七章</b>	<b>包钢稀土尾矿库渗漏的污染预警及防控</b>	<b>207</b>
第一节	地下水污染预警与防控概述	207
第二节	包钢稀土尾矿库地下水渗漏的预警体系	214
第三节	包钢稀土尾矿库地下水渗漏的污染防控体系	230
第四节	包钢稀土尾矿库渗漏污染地下水的控制措施	233
	参考文献	235
<b>第八章</b>	<b>包钢稀土尾矿库污染地下水的修复技术</b>	<b>237</b>
第一节	地下水修复技术概述	237
第二节	包钢稀土尾矿库污染地下水修复技术的筛选	238
第三节	可渗透反应墙 (PRB) 修复材料的筛选	240
第四节	包钢稀土尾矿库周边污染地下水 PRB 的构建	252
	参考文献	263
<b>第九章</b>	<b>稀土尾矿库区的环境管理策略</b>	<b>265</b>
第一节	稀土尾矿库区的环境管理基础	265
第二节	稀土尾矿库区的环境监测技术	270
第三节	稀土尾矿库区的环境风险评估技术	275
第四节	稀土尾矿库区的环境风险管理	277
第五节	稀土尾矿库区的环境应急管理	279
	参考文献	283

彩图

# 第一章 稀土金属冶选尾矿库区生态环境问题

化学元素周期表中镧系元素——镧 (La)、铈 (Ce)、镨 (Pr)、钕 (Nd)、钷 (Pm)、钐 (Sm)、铕 (Eu)、钆 (Gd)、铽 (Tb)、镝 (Dy)、钬 (Ho)、铒 (Er)、铥 (Tm)、镱 (Yb)、镱 (Lu)，以及与镧系的 15 种元素密切相关的两种元素钇 (Y) 和钪 (Sc)，共 17 种元素，称为稀土元素，简称稀土。稀土具有独特的磁、光、电和化学性质，它们被广泛应用于工业、农业、环保等相关领域，素有“工业维生素”之称。近年来，为了满足高科技产业和新材料等领域的发展需求，稀土资源的开发规模和开采强度不断增大。稀土矿开采和冶炼过程中产生的大量尾矿、废渣、废水排入尾矿库。同时，尾矿库长期暴露于自然环境中；环境管理不善会使得尾矿库逐渐变成一个潜在的污染源，对周边的土壤、大气、水体等造成污染，从而影响周围的陆地生态系统，对人体健康构成潜在的威胁。本章首先简要介绍了我国稀土金属冶选尾矿库的概况，然后系统地介绍了尾矿库区存在的环境问题及其对生态系统和人体健康产生的危害。

## 第一节 我国稀土金属冶选尾矿库的概况

### 一、我国稀土资源概况

我国稀土资源储量丰富、品种齐全，是世界上唯一能提供 17 种稀土元素的国家。2012 年，已在我国 2/3 的省份勘探出稀土矿床（图 1-1），成矿条件有利，矿床类型齐全，已探明的稀土资源储量为 6588 万 t，约占全球稀土资源总量的 23%，是世界第一大稀土拥有国。

我国稀土矿类型主要分为北方轻稀土矿（light rare earth ore）和南方重稀土矿（heavy rare earth ore）。北方轻稀土矿（La、Ce、Pr、Nd、Sm、Eu）包括内蒙古白云鄂博混合稀土矿、四川攀西地区和山东微山氟碳铈矿；南方重稀土矿（Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、Lu）主要为我国江西、广东、广西、福建和湖南等省的离子吸附型稀土矿（亦称风化壳淋积型稀土矿），是我国特有的稀土矿产资源。白云鄂博稀土矿与铁共生，主要稀土矿物有氟碳铈矿和独居石，其比例为 3：1，都达到了稀土回收品位，故称混合矿，稀土总储量为 3500 万 t，堪称世界第一大稀土矿；四川攀西冕宁稀土矿和山东微山

稀土矿均以氟碳铈矿为主，伴生有重晶石，以轻稀土为主，组成相对简单；离子吸附型稀土矿主要位于以江西赣州为代表的南方七省（江西、广东、广西、福建、湖南、云南、浙江），具有稀土类型全、配分高、资源量大的特点，以重稀土为主。

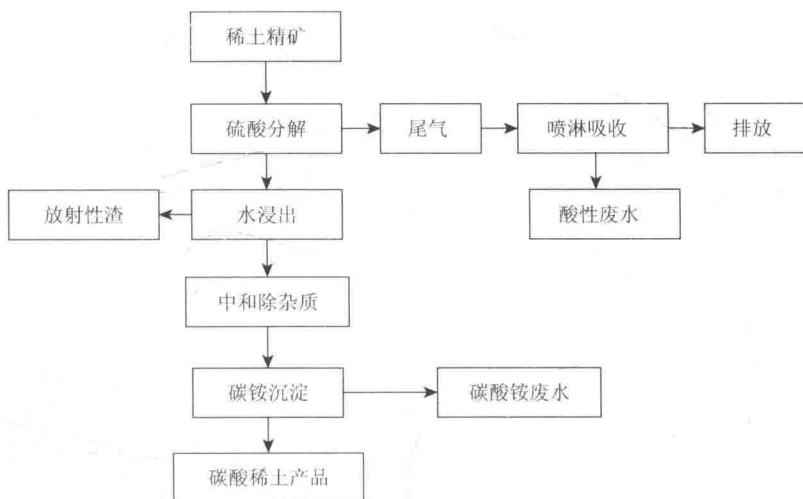


图 1-1 中国大陆稀土矿分布示意图

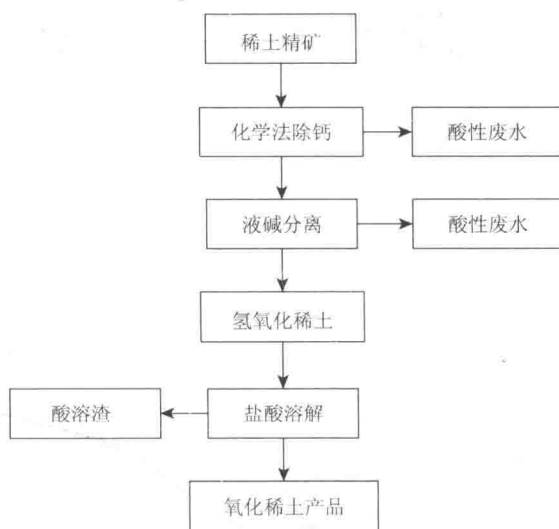
## 二、我国稀土矿开采工艺

根据稀土矿主要类型进行分类，我国稀土矿开采工艺主要有两种：传统露天开采和离子型稀土矿开采工艺。

目前我国北方大部分稀土矿都采用传统的露天开采法。这里以白云鄂博稀土矿为例介绍稀土矿选矿的方法。具体步骤为：将地表覆土剥离后，采用机械大规模开采矿石，然后在矿山破碎后将大矿石用火车运至包头钢铁集团公司的选矿厂，选出稀土精矿后将尾矿运到矿山周围的各大堆放场堆置，稀土精矿再经过酸法分解或碱法分解工艺提取出稀土（程建忠等，2007），常用的酸法工艺和碱法工艺见图 1-2。



(a) 酸法工艺



(b) 碱法工艺

图 1-2 稀土矿选矿工艺

离子型稀土矿的开采始于 20 世纪 70 年代，先后经历了池浸、堆浸和原地浸矿三代技术发展过程（罗仙平等，2014）。池浸工艺号称“搬山运动”，该工艺一般采用面积约  $12\text{m}^2$ 、容积  $10\sim 20\text{m}^3$  的水泥池作为浸取槽，利用氯化钠溶液将稀土置换出来，富集于浸出剂中，然后用草酸沉淀，再经过过滤、洗涤、灼烧和水洗等过程，最后生成稀土混合氧化物，具体工艺流程见图 1-3。该工艺需要剥离地表植被和土壤，从而产生大量的挖矿土、尾砂和尾渣，同时会产生大量含氯化钠

的采矿废水。采矿废水通过淋滤作用和渗透作用污染土壤和地下水，导致矿区土壤盐渍化。堆浸工艺与池浸工艺方法类似，不同之处是将矿石放入堆浸场中将稀土浸出，机械化程度、资源利用率和产量都比池浸工艺高得多，浸出剂也由氯化钠溶液变为硫酸铵溶液，沉淀剂可以使用碳酸氢铵或草酸。但是堆浸工艺并没有从根本上改变池浸工艺的缺点，因此仍然会对矿山生态环境造成严重的破坏。原地浸矿是目前应用效果最好、相对来说较为绿色高效的生产工艺，该工艺不需要破坏矿区地表植被，只需在矿区表面挖一些注射井，直接将浸出剂（硫酸铵溶液）由高位水池注入经封闭处理的注射井内，浸出剂向矿体中的空隙渗透扩散，并将吸附在黏土矿物表面的稀土离子交换解吸下来，形成稀土母液流入集液沟内，待稀土浸出完毕后，注入顶水使残留在矿体内的硫酸铵及稀土洗出，所形成的低浓度母液经处理后回用，具体工艺流程见图 1-4。原地浸矿较池浸、堆浸工艺具有很多优点，如植被破坏少、提取效率高、成本低等，但在生产过程中也存在很多问题，如原地浸矿工艺需要在矿体开挖很多注射井、浅槽和集液沟等，仍会产生一定量的废弃岩土并破坏部分地表植被；残留在矿体中的浸出剂会随着淋滤水的迁移将残留在矿体中的稀土带入河沟溪水中，导致一部分稀土流失；在矿体孔隙水压力增大和浸出剂弱化矿体强度共同作用下，浸矿液的饱和入渗容易引发滑坡等次生地质灾害。

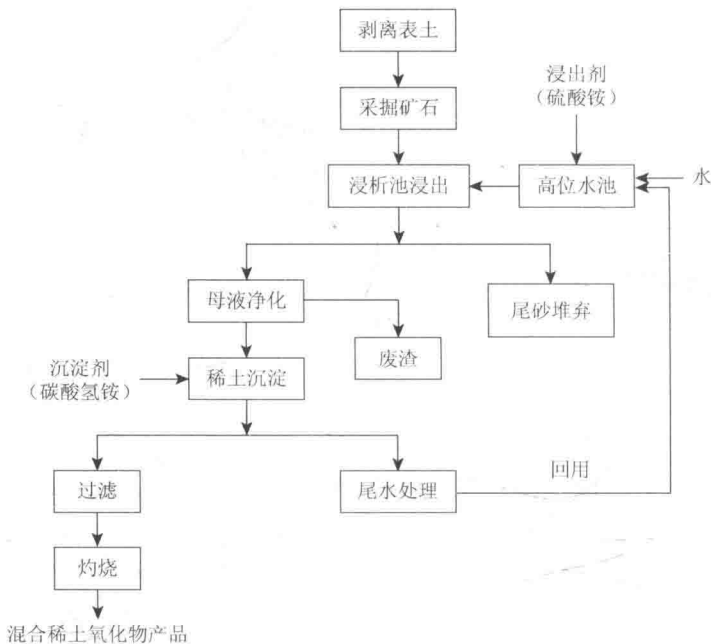


图 1-3 离子型稀土矿池浸工艺



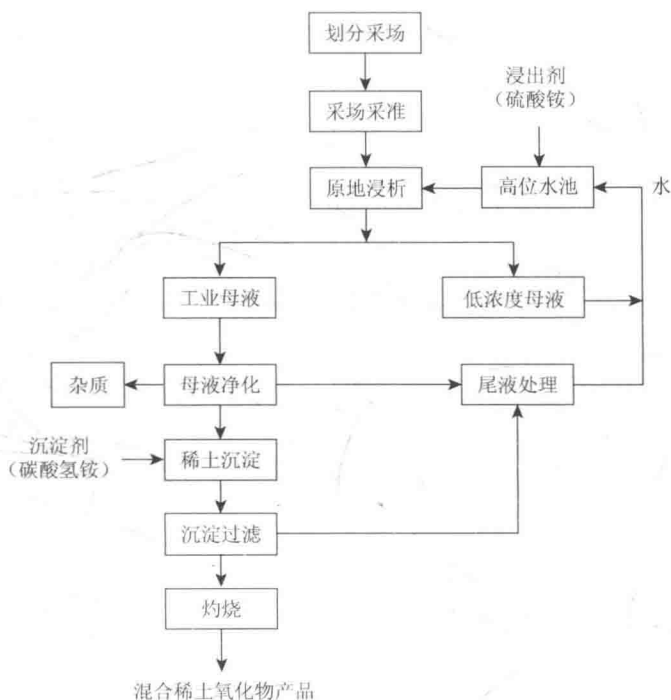


图 1-4 离子型稀土矿原地浸矿工艺

### 三、我国典型稀土尾矿库处置现状

尽管我国稀土资源丰富，但是稀土矿开采长期处于无序状态，乱采滥挖，采富弃贫，开采技术落后，采矿回收率低，资源浪费严重等问题普遍存在。稀土开采直接破坏了地表生态系统，导致水土流失和生态环境恶化，产生了大量的尾矿堆积，成为地质灾害和环境安全的重要隐患之一。据报道，到 2008 年年底，我国累计生产约 1200 万 t 稀土，植被表土破坏面积约 1.9 亿  $\text{m}^2$ ，产生尾矿体积约 14.4 亿  $\text{m}^3$ 。随着稀土资源不断开发利用，尾矿产生量越来越大，并且多数未经处理直接排放，堆积后成为潜在的污染源。全国主要的稀土矿尾矿处置现状如下：

#### 1. 包钢稀土尾矿库处置现状

包钢稀土尾矿库建于 1965 年，是国家级重点工程，包钢集团从白云鄂博采矿后，运到包钢选矿厂粉碎，用磁选法和氟选法将矿粉里的铁元素和部分稀土元素选出来，剩余的尾矿用水输送至尾矿坝。尾矿坝主要包含包钢炼铁产生的废渣以及未经利用的稀土。包钢尾矿库是平地筑坝围成，其东西宽约 3.2km，南北长约 3.5km，占地面积约  $10\text{km}^2$ 。2013 年，尾矿存量约  $1.5 \times 10^8 \text{t}$ ，其中稀土约  $9.3 \times 10^6 \text{t}$ ，钍  $9 \times 10^4 \text{t}$ ，是世界上最大的“稀土湖”。尾矿坝是平地建坝，坝底高低不平，只有