

Emission Characteristics and
Environmental Impacts of Atmospheric
Mercury in China and Control Approaches

中国大气汞排放特征、环境影响 及控制途径

王书肖 张 磊 吴清茹 王凤阳 等 著



科学出版社

中国大气汞排放特征、 环境影响及控制途径

Emission Characteristics and Environmental Impacts of
Atmospheric Mercury in China and Control Approaches

王书肖 张 磊 吴清茹 王凤阳 等 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

中国是世界上大气汞污染最严重的国家。科学地分析中国大气汞排放特征、确定大气汞污染现状、建立大气汞排放清单及预测未来减排潜力,对中国开展汞污染治理具有重要意义。本书首先讨论了适于中国污染源的汞排放特征测试方法,测量了典型污染源大气汞排放特征;建立了中国人为源大气汞排放清单,介绍了主要的大气汞排放控制技术,并预测了重点排放源的大气汞减排潜力;分析了典型区域的大气汞污染特征,确定了中国大气汞污染时空变化特征及其来源,并系统地总结了国内外汞污染控制技术和政策法规法规体系。

本书可供从事大气科学、环境科学、大气污染控制、汞污染等研究工作的科研人员参考,也可供从事环境保护事业的管理人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

中国大气汞排放特征、环境影响及控制途径 = Emission Characteristics and Environmental Impacts of Atmospheric Mercury in China and Control Approaches/王书肖等著. —北京:科学出版社,2016.3

ISBN 978-7-03-047740-8

I. ①中… II. ①王… III. ①空气污染-汞污染-空气污染控制-研究
IV. ①X511.06

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 050820 号

责任编辑:范运年 / 责任校对:郭瑞芝
责任印制:张 伟 / 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>

北京教图印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 3 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2016 年 3 月第一次印刷 印张:29 1/2

字数:589 000

定价:168.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

作者简介



王书肖 清华大学环境学院教授,博士生导师,教育部“长江学者奖励计划”特聘教授。1974 年生于河北藁城。1995 年毕业于天津大学化学工程系,1998 年获天津大学化工过程机械硕士学位,2002 年获清华大学环境工程博士学位。2001~2003 年在美国哈佛大学环境中心从事博士后研究。2003 年底回国受聘清华大学环境科学与工程系。长期在大气污染控制理论与技术领域开展研究,主要研究方向为区域大气复合污染和大气汞污染的来源与控制。系统研究我国大气汞排放特征和清单,揭示烟气中汞的化学形态转化的关键影响因素,提出我国大气汞污染控制的核心技术途径,为国家汞污染控制和履行全球汞公约提供了重要科技支撑。发表学术期刊论文 120 多篇,被 SCI 收录 80 篇。获国家科技进步奖二等奖 3 项、省部级一等奖 2 项,并获中国青年科技奖、中国产学研合作创新奖等奖项。

前 言

汞具有持久性、长距离迁移性和生物富集性,在自然界中能转化成剧毒的甲基汞,通过食物链高度富集和放大,并最终被人体摄入,对健康造成严重的影响。自日本水俣病爆发以来,汞污染问题逐渐引起关注。20 世纪 80 年代末,科学家研究发现,人为排放的汞可通过大气远距离传输沉降到偏远地区。由此,汞的全球性污染成为研究的热点问题。联合国环境规划署于 2002 年完成了《全球汞评估报告》,指出人为活动的汞排放已经对人体健康和生态系统构成严重威胁。此后,全球汞污染问题从学术层面上升至政府层面,并被正式纳入环境外交。世界各国经过多轮政府间谈判,于 2013 年 10 月通过了一项新的国际公约《关于汞的水俣公约》,以有效遏制汞的使用、释放和排放。包括中国在内的 91 个国家和欧盟率先签署了该公约,预计该公约将于 2016 年左右生效。

我国是世界上大气汞排放量最大的国家,大气、土壤、水和沉积物的汞污染形势严峻,局部地区汞污染问题突出。因此,无论是从国际履约还是从国内汞污染防治的角度,我国均将面临巨大的汞减排压力。然而,我国汞污染防治工作基础比较薄弱,基础信息、污染防治技术与对策都严重滞后于形势需求。这主要体现在以下几个方面:其一,我国汞排放特征测试数据缺乏。目前国内外主要针对燃煤电厂开展排放特征测试,但针对工业锅炉、有色金属冶炼、水泥厂等典型汞排放源的测试还相对较少,而国外的排放特征测试结果在我国的适用性较低;其二,我国典型污染源与汞排放相关的基础活动水平信息缺乏,国内已收集的基础信息资料零散,数据相互支持性差,亟须在科学统一的方法指导下,进行更为深入的调查评估,从而编制更为准确可靠的汞排放清单;其三,我国汞污染控制起步较晚,国内汞污染控制技术尚不完善,亟须在发展我国汞污染控制技术的同时,对国际上正在使用的技术进行总结,从而确保汞污染控制有配套技术使用,也为建立我国汞污染控制路线图提供依据。此外,我国污染源烟气汞测试方法仍有待改进、环境汞污染风险仍有待分析、汞污染政策仍有待完善。在这样的背景下,研究我国污染源大气汞的排放特征、环境污染和控制途径,具有重要意义。

为使我国在汞污染及其防治领域走在国际前列,并为我国防治汞污染和履行国际公约提供各种决策依据和技术手段,在国家自然科学基金重点项目、国家 973 基础研究计划、环保公益性行业科研专项、挪威政府和美国环保署的资助下,清华大学进行了重点源汞排放特征的测试、排放清单的建立、典型区域汞污染监测及汞排放潜力分析研究。本书介绍近年来国内外在这些领域内的研究进展,以及作者

自身的研究和创新性成果。

全书共 14 章,主要围绕排放特征、环境影响及控制途径展开,主要内容包括污染源汞排放特征测试方法和典型污染源测试结果、大气汞排放的环境影响,以及大气汞污染控制的技术、减排情景和控制途径。在编写上既考虑了专业研究人员的需要,又考虑了普通读者的需求。全书力图通过对污染源汞排放和环境污染的分析,完善我国人为源汞污染现状的基础数据,从而为汞污染控制决策提供依据。希望本书的出版能对读者了解我国汞排放及污染现状有所帮助,并进一步推动该方向的研究和技术发展。

全书由王书肖负责书稿总体设计、撰写、修改、审校和定稿工作。各章的具体执笔人如下:第 1 章由王书肖、张磊共同撰写;第 2 至 3 章由张磊、王书肖共同撰写;第 4 章由吴清茹、王书肖共同撰写;第 5 章由王书肖、王凤阳、杨海共同撰写;第 6 章由王凤阳、惠霖霖共同撰写;第 7 章由王书肖、张磊、吴清茹共同撰写;第 8 至 9 章由王书肖、王龙、李舒共同撰写;第 10 章由杨梅、吴清茹、刘芳共同撰写;第 11 章由王书肖、张磊、吴清茹和王凤阳共同撰写;第 12 章由张磊、王书肖共同撰写;第 13 章由吴清茹、王书肖共同撰写;第 14 章由王书肖、张磊、吴清茹、王凤阳、惠霖霖共同撰写。

在本书成稿过程中,宋敬祥、李庆、黄文博、苏海涛、李智坚等同学对书稿涉及的研究工作做出了贡献;科学出版社的范运年编辑对本书的立项和出版的各个环节提供了诸多的建议和帮助,在此一并表示衷心的感谢。

特别感谢郝吉明院士一直以来对课题组汞污染研究的大力支持、鼓励和指导,也感谢段雷教授、吴烨教授和蒋靖坤博士在研究过程中的鼎力支持和帮助。

本书涉及的主要内容和研究成果,得到国家自然科学基金重点项目、国家 973 基础研究计划、环保公益性行业科研专项、挪威政府和美国环保署的资助,在此一并表示感谢。同时,感谢挪威水环境研究所、国家环境保护对外合作中心、中国科学院地球化学研究所、中国环境科学研究院、环境保护部环境规划院、国家环境分析测试中心、环境保护部固体废物与化学品管理技术中心等单位在相关研究中提供的大力支持。

大气汞排放及污染的相关研究是我国大气环境科学研究的热点和难点,设计多学科复杂问题。由于研究条件和作者能力有限,书中若有疏漏或不足之处,敬请各位读者及同行专家指正。

主要符号对照表

ACI	活性炭喷射(Activated Carbon Injection)
ACT	加严控制情景(Accelerated Control Technology Scenario)
ALT	替代能源情景(Alternative Energy Scenario)
APCD	大气污染控制设备(Air Pollution Control Device)
API	空气污染指数(Air Pollution Index)
ARL	空气资源实验室(Air Resource Laboratory)
ASTM	美国材料与试验协会(American Society for Testing and Materials)
BASE	基准情景(Basic Scenario)
BAT	最佳可行技术(Best Available Technology)
BAU	基准控制情景(Business as Usual Scenario)
BB	沸腾炉(Boiling Bed Boiler)
BDR	阻挡放电反应器(Barrier Discharge Reactor)
BEP	最佳环境实践(Best Environmental Practice)
BIF	炉内溴化物注入(Bromide Injection into the Furnace)
CAMNet	加拿大大气汞监测网(Canadian Atmospheric Mercury Measurement Network)
CAMR	清洁空气汞法规(Clean Air Mercury Rule)
CEMS	连续在线监测仪器(Continuous Emission Monitoring System)
CFB	循环流化床锅炉(Circulating Fluidized Bed Boiler)
CFB-FGD	循环流化床干法烟气脱硫系统(Circulating Fluidized Bed Flue Gas Desulfurization)
CMR	边际贡献率(Contribution Margin Ratio)
CTM	大气化学传输模型(Chemical Transport Models)
CVAAS	冷原子吸收光谱(Cold Vapor Atomic Absorption Spectrophotometry)
CVAFS	冷原子吸收光谱法(Cold Vapor Atomic Fluorescence Spectroscopy)
CYC	旋风除尘器(Cyclone)
DCDA	双转双吸塔(Double Conversion Double Absorbtion Tower)
ECO	电催化氧化技术(Electro-Catalytic Oxidation)
ECPC	人均电力消费量(Electricity Consumption Per Capita)
EEC	政策控制情景(Extended Emission Control Scenario)

EMEP	欧洲监测与评估计划(European Monitoring and Evaluation Programme)
EPRI	美国电力研究协会(Electric Power Research Institute)
ESD	电除雾(Electrostatic Demister)
ESP	静电除尘器(Electrostatic Precipitator)
FF	布袋除尘器(Fabric Filter)
FGS	火灾报警和气体检测系统(Fire Alarm and Gas Detector System)
GDAS	全球数据同化系统(Global Data Assimilation System)
GEM(Hg ⁰)	气态元素汞(Gaseous Elemental Mercury)
GIS	地理信息系统(Geographic Information System)
GSA	悬浮吸收器(GAS Suspended Absorber)
HCC	高精矿消耗量情景(High Concentrates Consumption Scenario)
Hg _t	烟气总汞(Total Mercury in Flue Gas)
HS-ESP	高温电除尘器(High Side Electrostatic Precipitator)
HYSPLIT	后向轨迹模型(Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory)
IEA	国际能源署(International Energy Agency)
IGCC	整体煤气化联合循环(Integrated Gasification Combined Cycle)
IPAC	综合政策评价模型(Integrated Policy Assessment Model of China)
ISO	国际标准化组织(International Organization for Standardization)
ISP	密闭鼓风炉炼铅锌(Imperial Smelting Process)
LCC	低精矿消耗量情景(Low Concentrates Consumption Scenario)
LNB	低 NO _x 燃烧器(Low-NO _x Burner)
LOI	烧失量(Loss on Ignition)
Loto _x	低温氧化技术(Low-Temperature Oxidation)
MDN	汞沉降监测网(Mercury Depositon Network)
NID	新型脱硫除尘一体化技术(Novel Integrated Desulfurization)
NMB	标准化平均偏差(Normalized Mean Bias)
NOAA	美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration)
OH	安大略法(Ontario Hydro Method)
PAC	粉末活性炭(Powdered Activated Carbon)
PBM(Hg _p)	颗粒态汞(Particulate-Bound Mercury)
PC	煤粉炉(Pulverized-Coal Boiler)
PEESP	等离子体强化除汞技术(Plasma-Enhanced Electrostatic Precipitator)

PM	颗粒物(Particulate Matter)
PMT	光电倍增管(Photo Multiplier Tube)
PSCF	潜在源贡献因子法(Potential Source Contribution Function)
QA	质量保证(Quality Assurance)
QC	质量控制(Quality Control)
REF	参考能源情景(Reference Energy Scenario)
RGM(Hg ²⁺)	活性气态汞(Reactive Gaseous Mercury)
RS	民用炉灶(Residential Stove)
SC	超临界(Supercritical Technology)
SCR	选择性催化还原脱硝系统(Selective Catalytic Reduction)
SCSA	单转单吸塔(Single Conversion Single Absorbtion Tower)
SDA	喷雾干燥吸收器(Spray Drying Absorber)
SF	层燃炉(Stoker Fired Boiler)
SMC	专门脱汞技术(Specific Mercury Control Technology)
SNCR	选择性非催化还原脱硝系统(Selective Non-Catalytic Reduction)
SRM	标准参考物质(Standard Reference Material)
TDF	轮胎生物燃料(Tire Derived Fuel)
TGM(Hg _g)	气态总汞(Total Gaseous Mercury)
TSP	总悬浮颗粒物(Total Suspended Particulate)
UBC	未燃尽碳(Unburnt Carbon)
UNECE	联合国欧洲经济委员会(United Nations Economic Commission for Europe)
UNEP	联合国环境规划署(United Nations Environment Programme)
US EPA	美国国家环保局(United States Environmental Protection Agency)
USC	超超临界(Ultra-Supercritical Technology)
USGS	美国地质调查局(United States Geological Survey)
VCM	氯乙烯(Vinyl Chloride Monomer)
WESP	湿式静电除尘器(Wet Electrostatic Precipitator)
WFGD	湿法烟气脱硫系统(Wet Flue Gas Desulfurization)
WHB	余热锅炉(Waste Heat Boiler)
WS	湿式除尘器(Wet Scrubber)
XPS	X 射线光电子能谱分析(X-Ray Photoelectron Spectroscopy)

目 录

前言

主要符号对照表

第 1 章 绪论	1
1.1 大气汞的形态特征	1
1.2 大气汞的主要来源	3
1.2.1 人为源大气汞排放	5
1.2.2 天然源大气汞排放	6
1.3 大气汞的物理化学过程	8
1.3.1 大气汞的氧化还原过程	8
1.3.2 大气汞的气固相分配过程	10
1.3.3 大气汞的沉降过程	10
1.4 大气汞污染的环境影响	12
1.4.1 对大气环境的影响	12
1.4.2 对土壤和水体环境的影响	17
1.5 全球汞污染控制进展	20
1.5.1 《关于汞的水俣公约》	20
1.5.2 北美汞排放控制历程	21
1.5.3 欧洲汞排放控制历程	21
1.6 本书的研究目的、意义和内容	22
参考文献	22
第 2 章 污染源汞排放测试方法	29
2.1 固体和液体样品的采集和制备方法	29
2.2 固体和液体样品汞含量的测定方法	30
2.2.1 固体样品汞含量的测定方法	30
2.2.2 液体样品汞含量的测定方法	31
2.3 烟气汞排放监测方法	32
2.3.1 湿化学法	32
2.3.2 固体吸附法	37
2.3.3 在线监测法	41

2.4	烟气汞测试方法比对与选择	43
2.5	质量保证与质量控制	45
	参考文献	46
第3章	燃煤行业大气汞排放特征	48
3.1	中国原煤的物理化学特征	48
3.1.1	中国原煤中的汞	48
3.1.2	中国原煤中的卤素	53
3.2	燃煤过程汞的释放与形态转化	54
3.2.1	卤素对汞形态转化的影响	58
3.2.2	总汞浓度和氯浓度对汞形态转化的综合影响	62
3.2.3	烟气温度对汞形态转化的影响	63
3.3	燃煤电厂大气汞排放特征	63
3.3.1	电厂锅炉中烟气汞的形成	64
3.3.2	脱硝设施内汞的行为过程	66
3.3.3	除尘设施内汞的行为过程	66
3.3.4	脱硫设施内汞的行为过程	68
3.3.5	电厂大气污染控制设施脱汞效果	69
3.4	燃煤工业锅炉大气汞排放特征	70
3.4.1	工业锅炉中烟气汞的形成	70
3.4.2	除尘设施内汞的行为过程	71
3.4.3	脱硫设施内汞的行为过程	71
3.5	燃煤副产物的二次汞排放	71
3.5.1	燃煤副产物的二次利用	72
3.5.2	飞灰中的汞在渗滤过程中的稳定性	74
3.5.3	飞灰在高温利用过程中的汞释放	77
3.5.4	脱硫石膏中汞的二次释放	78
	参考文献	81
第4章	有色金属冶炼行业大气汞排放特征	87
4.1	有色金属精矿的汞浓度	87
4.1.1	国产有色金属精矿的汞浓度	87
4.1.2	其他国家/地区有色金属精矿的汞浓度	92
4.2	有色金属冶炼工艺及污染控制	94
4.2.1	锌冶炼工艺	94

4.2.2 铅冶炼工艺	96
4.2.3 铜冶炼工艺	98
4.2.4 工业黄金冶炼工艺	98
4.2.5 有色金属冶炼过程的污染控制技术	100
4.3 冶炼过程的汞排放特征测试	102
4.3.1 测试冶炼厂的选择	102
4.3.2 测试点位的确定	105
4.3.3 采样和分析方法	105
4.3.4 质量保证和质量控制	105
4.4 测试冶炼厂汞的输入	107
4.4.1 不同原料汞浓度分析	107
4.4.2 不同原料汞的输入比例分析	107
4.5 冶炼过程汞的行为	108
4.5.1 冶炼过程汞的释放	108
4.5.2 大气污染控制设备的脱汞效率分析	109
4.5.3 汞在污染控制设备中的形态转化	111
4.5.4 锌冶炼浸出/电解过程汞的行为	116
4.6 冶炼过程汞的输出	117
4.6.1 大气汞浓度及形态分布	117
4.6.2 冶炼过程大气汞的形态分布	118
4.6.3 冶炼副产物的汞浓度	118
4.6.4 冶炼过程汞的去向	120
4.7 冶炼副产物利用过程汞的二次排放	120
4.7.1 污酸的处理与汞的排放	121
4.7.2 硫酸的利用与汞的排放	125
4.7.3 锌冶炼渣的利用与汞的排放	128
4.7.4 铅、铜冶炼渣的利用与汞的排放	132
4.7.5 冶炼副产物利用过程的汞排放特征	133
参考文献	134
第5章 水泥行业大气汞排放特征	138
5.1 中国水泥生产行业简介	138
5.2 水泥生产工艺简介	141
5.2.1 湿法回转窑生产工艺	141

5.2.2 立窑生产工艺	141
5.2.3 普通干法回转窑生产工艺	142
5.2.4 新型干法水泥生产工艺	142
5.3 水泥原料中的汞浓度	143
5.4 水泥生产过程中汞的行为特征	148
5.4.1 新型干法水泥生产工艺中汞的行为特征	148
5.4.2 其他水泥生产工艺汞的行为特征	158
5.5 水泥生产过程中的大气汞排放特征	159
参考文献	165
第6章 其他主要行业大气汞排放特征	166
6.1 钢铁生产大气汞排放特征	166
6.1.1 中国钢铁生产行业简介	166
6.1.2 钢铁生产工艺简介	167
6.1.3 钢铁生产过程中汞的排放特征	169
6.2 生活垃圾焚烧大气汞排放特征	177
6.2.1 中国生活垃圾焚烧行业简介	177
6.2.2 生活垃圾焚烧工艺简介	179
6.2.3 生活垃圾焚烧烟气处理技术	181
6.2.4 生活垃圾中的汞浓度	182
6.2.5 生活垃圾焚烧过程中汞的行为特征	182
6.2.6 垃圾焚烧过程中汞的排放特征	183
6.3 聚氯乙烯生产大气汞排放特征	184
6.3.1 乙炔法聚氯乙烯生产工艺简介	185
6.3.2 聚氯乙烯生产过程中汞的排放特征	186
6.4 生物质燃料燃烧大气汞排放特征	190
参考文献	191
第7章 中国人为源大气汞排放清单	194
7.1 大气汞排放清单方法学	194
7.1.1 基于工艺过程的排放因子模型	194
7.1.2 基于工艺过程的概率排放因子模型	194
7.1.3 考虑燃料/原料组分影响的概率排放因子模型	195
7.1.4 有色金属冶炼行业汞排放模型	196
7.1.5 中国大气汞排放清单模型	202

7.1.6 清单不确定度计算方法	203
7.2 清单模型参数	204
7.2.1 活动水平	204
7.2.2 燃料/原料中的汞含量	204
7.2.3 污控设施组合脱汞效率	217
7.2.4 污控设施组合安装比例	219
7.2.5 大气汞排放形态分布因子	220
7.3 中国燃煤行业大气汞排放清单	221
7.3.1 中国燃煤电厂大气汞排放清单	221
7.3.2 中国燃煤电厂控硫措施的协同脱汞效果	222
7.3.3 中国燃煤大气汞排放清单	226
7.4 中国有色金属冶炼行业大气汞排放清单	229
7.4.1 有色金属冶炼行业分省份大气汞排放清单	229
7.4.2 有色金属冶炼行业分工艺大气汞排放清单	230
7.5 中国人为源大气汞排放清单	231
7.5.1 中国人为源大气汞排放变化趋势和部门分布	231
7.5.2 中国人为源大气汞排放空间和形态分布特征	233
7.5.3 中国人为源大气汞排放清单比较	239
7.5.4 清单不确定性分析	242
参考文献	243
第 8 章 中国典型区域大气汞污染特征观测	247
8.1 大气汞污染特征的监测方法	247
8.1.1 大气分形态汞的监测方法	247
8.1.2 监测数据分析方法	252
8.1.3 汞湿沉降监测方法	253
8.2 华北地区大气汞污染特征	255
8.2.1 城市地区大气汞污染特征	255
8.2.2 农村地区大气汞污染特征	255
8.3 长江三角洲地区大气汞污染特征	271
8.3.1 城市地区大气汞污染水平	271
8.3.2 农村地区大气汞污染水平	271
8.4 其他地区大气汞污染特征	290
8.4.1 城市地区大气汞污染水平	290

8.4.2	农村及偏远地区大气汞污染水平	291
8.4.3	汞沉降特征	292
参考文献		292
第9章 中国大气汞污染时空变化与来源解析		295
9.1	大气汞污染的模型方法	295
9.1.1	大气汞传输与转化模型	295
9.1.2	GEOS-Chem 大气汞模型	298
9.1.3	GEOS-Chem 东亚嵌套大气汞模型	301
9.2	中国区域大气汞污染模拟	304
9.2.1	大气汞排放清单的网格化	304
9.2.2	中国区域大气汞的初始场和边界场	307
9.2.3	模拟区域内自然源汞排放	308
9.2.4	东亚嵌套大气汞污染模拟结果	309
9.3	基于现场观测结果的模型校验	312
9.3.1	年均与月均大气汞浓度	312
9.3.2	大气汞的湿沉降	316
9.3.3	大气汞浓度的日变化	317
9.3.4	大气汞的日均时间序列	319
9.4	中国区域大气汞污染的来源解析	321
9.4.1	研究方法与情景设置	321
9.4.2	背景值、自然源和人为源对中国区域大气汞的影响	324
9.4.3	中国重点地区大气汞排放的环境影响	324
9.4.4	重点行业大气汞排放的环境影响	328
参考文献		333
第10章 工业大点源周边环境汞污染特征		337
10.1	工业大点源对周边环境的影响	337
10.1.1	工业大点源对大气的影响	337
10.1.2	工业大点源对土壤的影响	338
10.1.3	工业大点源对植物的影响	339
10.2	有色金属冶炼周边环境汞污染特征	340
10.2.1	周边大气汞污染特征	340
10.2.2	周边土壤环境汞污染特征	347
10.2.3	周边植物汞污染特征	353

10.3 燃煤电厂周边环境汞污染特征·····	362
10.3.1 周边大气汞污染特征·····	362
10.3.2 周边土壤汞污染特征·····	363
参考文献·····	367
第 11 章 重点行业大气汞排放控制技术 ·····	370
11.1 燃煤行业大气汞排放控制技术·····	370
11.1.1 燃烧前控制技术·····	370
11.1.2 专门脱汞技术·····	376
11.1.3 多污染物控制技术·····	380
11.1.4 燃煤脱汞技术成本效益·····	383
11.2 有色金属冶炼行业大气汞排放控制技术·····	387
11.2.1 烟气脱硫协同脱汞技术·····	387
11.2.2 烟气专门脱汞技术·····	388
11.3 水泥行业大气汞排放控制技术·····	395
11.3.1 减少和控制水泥窑汞输入总量·····	396
11.3.2 减少水泥窑内的汞循环累积·····	397
11.3.3 污控设施的协同脱汞·····	398
11.3.4 专门脱汞技术·····	400
参考文献·····	402
第 12 章 燃煤行业大气汞排放未来情景预测 ·····	406
12.1 未来情景设定·····	406
12.1.1 能源情景·····	406
12.1.2 控制情景·····	408
12.2 燃煤大气汞排放未来变化趋势预测·····	411
12.2.1 燃煤电厂大气汞排放未来变化趋势·····	411
12.2.2 工业燃煤大气汞排放未来变化趋势·····	413
12.2.3 民用燃煤大气汞排放未来变化趋势·····	414
12.2.4 燃煤行业大气汞排放总体变化趋势·····	414
12.3 中国燃煤行业大气汞排放协同控制对策·····	415
12.3.1 中国燃煤电厂大气汞排放协同控制对策·····	415
12.3.2 中国工业燃煤大气汞排放协同控制对策·····	418
12.3.3 中国民用燃煤大气汞排放协同控制对策·····	419
参考文献·····	421

第 13 章 有色金属冶炼行业大气汞排放未来情景预测	422
13.1 未来情景设定	422
13.1.1 精矿消耗量发展情景	422
13.1.2 污染控制情景	426
13.2 基准年大气汞排放	430
13.2.1 有色金属冶炼行业大气汞排放	430
13.2.2 大气汞形态分布	433
13.2.3 清单不确定度计算	434
13.2.4 与其他清单结果对比	435
13.3 大气汞减排潜力分析	437
13.3.1 有色金属冶炼行业大气汞排放趋势	437
13.3.2 汞减排效果分析	439
13.4 有色金属冶炼行业汞污染控制对策	443
13.4.1 大气汞减排目标	443
13.4.2 有色金属冶炼行业汞污染控制实施路径	443
参考文献	444
第 14 章 中国大气汞排放控制政策法规体系与对策建议	447
14.1 中国大气汞排放控制政策法规体系	447
14.1.1 燃煤行业大气汞排放控制政策法规体系	447
14.1.2 有色金属冶炼行业大气汞排放控制政策法规体系	447
14.1.3 水泥行业大气汞排放控制政策法规体系	448
14.1.4 焚烧行业大气汞排放控制政策法规体系	448
14.2 中国汞排放控制政策法规体系差距分析	449
14.2.1 汞减排目标	449
14.2.2 大气汞排放标准	449
14.2.3 汞控制行动	451
参考文献	452