

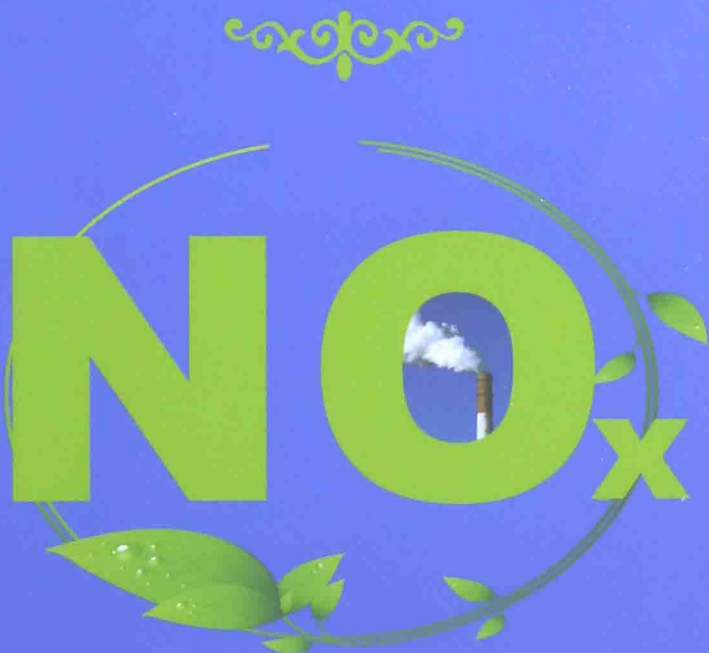


国家电网公司
电力科技著作出版项目

火电行业氮氧化物 排污权交易理论与实践

江 汇 著

Theory and Practice of Nitrogen Oxides Emissions Trading for
the Thermal Power Industry



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



国家电网公司
电力科技著作出版项目

火电行业氮氧化物 排污权交易理论与实践

江 汇 著

Theory and Practice of Nitrogen Oxides Emissions Trading for
the Thermal Power Industry



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

关于排污权交易的理论研究与实践在发达国家相对较多,但在我国总体上还处于起步阶段。本书在充分吸纳国内外排污权交易理论研究成果与实践经验的基础上,结合我国具体国情和火电行业的发展状况,全面深入地研究了火电行业实施氮氧化物排污权交易的相关问题,推导了火电行业氮氧化物治理的最优脱除量计算模型,系统提出了火电行业氮氧化物排污权交易的总量控制与初始分配计算方法,构建了火电行业氮氧化物排污权交易的总体框架和管理信息系统设计思路。

本书可供能源、电力、环保、产业经济等相关领域的研究人员、管理人员及师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

火电行业氮氧化物排污权交易理论与实践 / 江汇著. —北京: 中国电力出版社, 2015.2

ISBN 978-7-5123-7321-1

I. ①火… II. ①江… III. ①火电厂—排污交易—研究—中国 IV. ①X773②X196

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 042984 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2015 年 2 月第一版 2015 年 2 月北京第一次印刷

710 毫米×980 毫米 16 开本 15 印张 174 千字

印数 0001—2000 册 定价 42.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

序

党的第十八次全国代表大会要求把生态文明建设放在突出地位，融入经济建设、政治建设、文化建设、社会建设的各个方面和全过程，努力建设美丽中国，实现中华民族永续发展。十八届三中全会进一步指出要加快建立生态文明制度，健全生态环境保护的体制机制，用制度保护生态环境。排污权交易作为一种先进的制度设计，自 20 世纪 70 年代在美国诞生以来，已在发达国家的环境保护工作中得到普遍应用，并取得了良好成效。我国原国家环保（总）局曾于 20 世纪 90 年代和 21 世纪初先后在部分地区和城市开展了二氧化硫等大气污染物排污权交易试点，为我国全面开展排污权交易积累了宝贵的理论与实践经验。

近年来，在党中央、国务院的正确领导下，我国环境保护工作取得了举世瞩目的成就，但部分地区、部分领域的环境保护形势仍然不容乐观，特别是最近两年持续出现的雾霾天气给人们正常的生产、生活带来了严重影响，引起了社会各界的广泛关注。为深入贯彻落实十八大及十八届三中全会精神，加快建设生态文明和美丽中国，还人民以碧水蓝天，在学习借鉴发达国家先进经验并及时总结我国试点经验的基础上，尽快在大气污染治理等工作中全面实施排污权交易制度是十分必要的。

火电行业的煤炭消耗量占我国煤炭消耗总量的一半左右，是大气污染物的排放“大户”之一，而且这种格局还将延续较长一段时间，因此火电行业是我国大气污染治理的重点领域。通过坚持不懈的努力，我国火电行业的烟尘、二氧化硫等大气污染物排放已得到有效控制，但氮氧化物的治理工作由于起步较晚，目前排放绩效仍然处于较高水平，后续治理任务还十分繁重。对现役机组进行脱硝设施改造以及新建机组同步安装脱硝设施是最直接并且有效的手段，如果与此同时引入排污权交易这样一

种先进的制度设计，不仅能够激发火电企业进行氮氧化物治理的积极性和主动性，而且还有利于促进社会治理成本的最小化。

该书选题紧扣当前社会热点问题，顺应大气污染治理的现实需要，内容涵盖了火电行业氮氧化物治理及排污权交易的主要方面。全书内容大体可以分为三个方面：一是全面介绍了国内外关于排污权交易的理论研究与实践进展情况；二是对我国火电行业实施氮氧化物排污权交易的必要性及经济性进行了分析，运用经济学理论构建了我国氮氧化物治理的成本、收益分析模型，并推导了火电企业基于当前政策的氮氧化物最优脱除量计算模型；三是对火电行业氮氧化物排污权交易的重要环节逐一进行了研究，构建了总量控制、初始分配等环节的相关计算模型，综合提出了我国火电行业氮氧化物排污权交易的总体框架和管理信息系统建设的总体思路。最后，作者还实事求是地指出了本书的不足，并对未来的进一步研究指明了方向。

该书作者是环境经济与环境管理专业的博士，有着多年在电力行业管理部门和企业从事电力规划发展工作的实践经验。书中凝聚了作者多年的理论积累与实践总结，引用了大量第一手的案例资料，数据翔实。全书逻辑清晰，结构严谨，层次分明，理论联系实际。尽管书中的个别观点尚值得进一步商榷，部分结论需要在实践中进一步检验，但总体来看，作者构建的有关火电行业氮氧化物治理的经济性分析及排污权交易的相关模型是科学合理的，提出的火电行业氮氧化物排污权交易的总体框架和管理信息系统建设思路基本符合我国实际情况，具有较强的理论指导意义和现实可操作性。相信该书的出版发行能够为促进我国火电行业氮氧化物治理起到积极作用。

是为序。

中国华电集团公司董事、总经理、党组成员



前言

对于现代社会而言,发电行业既是终端能源的重要生产者,也是一次能源的主要消费者,在将一次能源转化为电能(或热能等)的过程中不可避免地会向周围环境排放一定数量的污染物,如果不能采取妥善的治理措施,将给生态环境带来负面影响。我国当前正处于全面建成小康社会的关键时期,新型工业化、信息化、城镇化、农业现代化的步伐不断加快,国民经济发展对电力需求的拉动作用十分强劲,但由于受到一次能源资源禀赋的影响,当前及今后很长一段时间我国以火电特别是煤电为主体的发电行业格局将难以改变,电力增长将给节能减排带来压力。与此同时,我国环境保护形势总体上不容乐观,特别是部分经济发达地区的生态环境非常脆弱,环保容量空间十分有限,经济发展水平与环保容量空间的逆向分布特点十分明显。由此,经济发展与环境保护之间的矛盾要求我们必须采取一些新的方法和手段来尽量减少电力生产过程中的污染物排放。

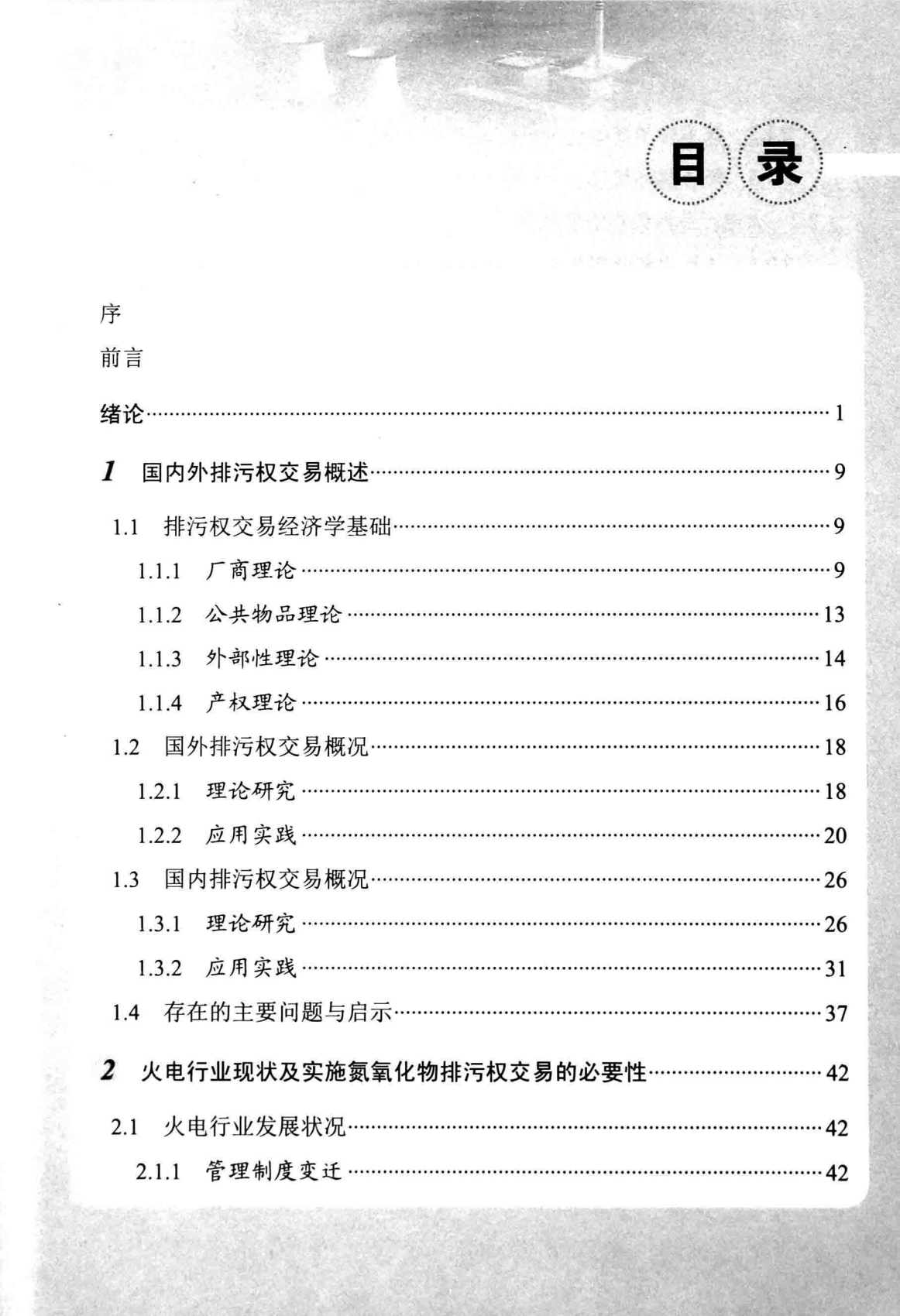
火力发电技术以及节能减排技术的不断发展,对于降低污染物排放水平的促进作用是十分明显的。但一定时期内在既定的技术条件下,综合运用经济、法律,甚至辅之以必要的行政手段来促进节能减排将起到事半功倍的效果,其中排污权交易(emissions trading,又称排放权交易)是最为有效的经济手段之一。排污权交易于20世纪70年代起源于美国,此后逐步扩展到欧洲、日本等发达国家和地区。我国于20世纪90年代引入排污权交易,原国家环保局于1990—1994年在全国16个重点城市进行了“大气污染物排放许可证制度”试点并在6个重点城市进行了大气排污权交易试点,此后陆续在一些地区开展了化学需

氧量 (COD)、二氧化硫 (SO₂) 等污染物排污权交易的试点和推广工作,对于促进我国水污染治理、二氧化硫等大气污染治理起到了积极作用,并在排污权交易方面积累了一定的理论与实践经验。

氮氧化物 (nitrogen oxide, NO_x) 作为火电行业的主要污染物之一,其排放绩效目前仍然处于较高水平,对其进行有效治理已经迫在眉睫。本书通过对国内外理论文献和实践情况的梳理与总结,发现美国、欧洲、日本等发达国家和地区关于氮氧化物排污权交易的研究与实践相对较多,并在氮氧化物治理方面发挥了重要作用。我国火电行业氮氧化物治理起步相对较晚,主要是通过各级环保部门以行政命令的方式强制要求现役机组进行脱硝改造和新建机组同步建设脱硝设施以达到氮氧化物减排的目的,氮氧化物排污权交易的理论与实践几乎处于空白。本书在深入分析我国火电行业及其氮氧化物排放现状的基础上,充分吸取国内外已有理论研究成果与实践经验,基于对火电企业氮氧化物治理成本与收益分析,对开展火电行业氮氧化物排污权交易的总量控制、初始分配、市场交易及政府规制等方面进行了较为深入的研究。

本书采取定性与定量分析相结合、理论与实证分析相统一的分析方法,深入分析了我国火电行业实施氮氧化物排污权交易的必要性和经济性,推导了火电企业氮氧化物治理的最优脱除量计算模型,系统提出了火电行业氮氧化物排污权交易的总量控制与初始分配计算模型,构建了与我国基本国情和经济发展阶段相适应的火电行业氮氧化物排污权交易的总体框架及管理信息系统设计思路,力求为促进火电行业氮氧化物治理、建设美丽中国贡献绵薄之力。

限于作者水平,书中难免存在疏漏或不足之处,敬请广大专家、学者和读者朋友批评指正。



目 录

序

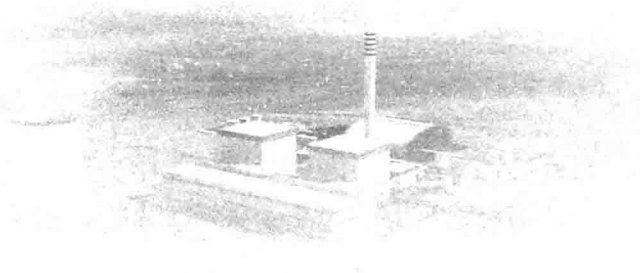
前言

绪论	1
1 国内外排污权交易概述	9
1.1 排污权交易经济学基础	9
1.1.1 厂商理论	9
1.1.2 公共物品理论	13
1.1.3 外部性理论	14
1.1.4 产权理论	16
1.2 国外排污权交易概况	18
1.2.1 理论研究	18
1.2.2 应用实践	20
1.3 国内排污权交易概况	26
1.3.1 理论研究	26
1.3.2 应用实践	31
1.4 存在的主要问题与启示	37
2 火电行业现状及实施氮氧化物排污权交易的必要性	42
2.1 火电行业发展状况	42
2.1.1 管理制度变迁	42

2.1.2	技术结构演进	45
2.1.3	经济指标优化	49
2.2	火电行业污染物治理状况	53
2.2.1	二氧化碳治理状况	55
2.2.2	烟尘治理状况	58
2.2.3	二氧化硫治理状况	60
2.2.4	氮氧化物治理状况	62
2.3	火电行业氮氧化物治理技术	68
2.3.1	低氮氧化物燃烧技术	68
2.3.2	烟气脱硝技术	70
2.4	实施氮氧化物排污权交易的必要性	74
3	火电行业实施氮氧化物排污权交易的经济性	79
3.1	治理成本	79
3.1.1	总成本	79
3.1.2	平均成本	86
3.1.3	边际成本	88
3.2	治理收益	89
3.2.1	总收益	89
3.2.2	边际收益	90
3.2.3	最优脱除量	91
3.3	脱硝电价与敏感性分析	93
3.3.1	脱硝电价	93
3.3.2	敏感性分析	100
3.4	实证分析	102

3.4.1	河北石家庄某电厂	102
3.4.2	内蒙古包头某电厂	105
3.4.3	山东烟台某电厂	109
3.4.4	分析评价	111
4	火电行业氮氧化物排污权总量控制与初始分配	116
4.1	总量控制的概念与意义	117
4.1.1	概念	117
4.1.2	意义	119
4.2	全国总量控制目标	121
4.2.1	“从上到下”计算模型	122
4.2.2	“自下而上”计算模型	124
4.3	区域总量控制目标	126
4.3.1	基本原则	127
4.3.2	计算模型	128
4.3.3	实证分析	132
4.4	火电企业排污权初始分配	135
4.4.1	基本原则	135
4.4.2	计算模型	137
4.4.3	实证分析	140
5	火电行业氮氧化物排污权交易市场与政府规制	147
5.1	市场构成	147
5.1.1	市场主体	147
5.1.2	市场客体	150
5.1.3	市场载体	150

5.1.4 市场规则	154
5.2 市场机制	154
5.2.1 交易方式	155
5.2.2 供求机制	157
5.2.3 定价机制	160
5.3 政府规制	162
5.3.1 法律规范	163
5.3.2 经济规制	166
5.3.3 社会规制	167
6 火电行业氮氧化物排污权交易总体框架与信息系统	172
6.1 总体框架设计	172
6.2 信息系统建设	175
7 结论与展望	179
7.1 主要结论	179
7.2 主要创新点	182
7.3 不足与展望	183
附录 A 煤电节能减排升级与改造行动计划（2014—2020 年）	186
附录 B 湖北省排污权交易的相关规定	197
参考文献	218
致谢	225



绪 论

（一）背景

自改革开放以来，我国国民经济已经连续保持了 30 多年的快速增长，国内生产总值（GDP）从 1978 年的 3645 亿元增长到 2013 年的 568 845 亿元，增长了 155 倍，跃居世界第二大经济体，综合国力得到显著提升，人民生活水平有了明显改善。然而，一方面，由于很长一段时间内我国采用的是传统的粗放型经济增长模式，在经济快速增长的同时，消耗了大量的自然资源和一次能源，单位国内生产总值的能源消耗水平是世界平均水平的 2 倍以上；另一方面，受技术水平及认识水平的限制，长期以来人们对环境保护的重视程度不够，导致部分地区的自然生态系统遭到严重破坏，大气、土壤、水等环境污染十分严重，外部性成本不断加大，不仅极大地危害了人民群众的身体健康和幸福生活，而且对我国经济、社会实现可持续发展的瓶颈制约与日俱增。

可持续发展的本质特征，一是强调人类在追求生存与发展权利时保持与自然关系的和谐，二是强调当代人在创造与追求今世发展和消费之时使自己的机会与后代人的机会平等，也就是要走一条人口、经济、社会、环境与资源相互协调的，既能满足当代人需要，又不对后代人的生存与发展构成危害的发展道路。可持续发展的理念自 20 世纪 70 年代提出以来，得到了世界各国的普遍认同。中国共产党第十六次全国代表大

会召开后，以胡锦涛为总书记的党中央结合我国具体国情提出了科学发展观，强调科学发展观的基本要求是全面协调可持续。胡锦涛总书记在中国共产党第十八次全国代表大会上的报告中进一步明确指出：“必须更加自觉地把全面协调可持续作为深入贯彻落实科学发展观的基本要求，全面落实经济建设、政治建设、文化建设、社会建设、生态文明建设五位一体总体布局，促进现代化建设各方面相协调，促进生产关系与生产力、上层建筑与经济基础相协调，不断开拓生产发展、生活富裕、生态良好的文明发展道路。”“加快建立生态文明制度，健全国土空间开发、资源节约、生态环境保护的体制机制，推动形成人与自然和谐发展现代化建设新格局。”“面对资源约束趋紧、环境污染严重、生态系统退化的严峻形势，必须树立尊重自然、顺应自然、保护自然的生态文明理念，把生态文明建设放在突出地位，融入经济建设、政治建设、文化建设、社会建设各方面和全过程，努力建设美丽中国，实现中华民族永续发展。”“坚持节约资源和保护环境的基本国策，坚持节约优先、保护优先、自然恢复为主的方针，着力推进绿色发展、循环发展、低碳发展，形成节约资源和保护环境的空间格局、产业结构、生产方式、生活方式，从源头上扭转生态环境恶化趋势，为人民创造良好生产生活环境，为全球生态安全作出贡献。”上述要求对于我国进一步转变经济发展方式，促进节能减排，加强环境保护，实现经济和社会可持续发展指明了方向。

对于现代社会而言，火电行业既是终端能源的重要生产者，也是一次能源的主要消费者，在将一次能源转化为电能（或热能等）的过程中不可避免地会向周围环境排放一定数量的污染物，如果不能采取妥善的治理措施，将给生态环境带来负面影响。2000年以来，为了在满足国民经济快速发展对电力需求的同时尽量减少化石能源的消耗，我国以前所未有的速度加快了可再生能源发展。截至2013年底，我国发电

装机容量达到了 125 768 万 kW, 比 2000 年增长了 2.94 倍, 超越美国成为世界第一电力大国。其中, 火电^① 87 009 万 kW、水电 28 044 万 kW、核电 1466 万 kW、风电 7652 万 kW、太阳能发电 1589 万 kW, 火电、水电、核电分别比 2000 年增长了 2.66、2.53、5.98 倍; 风电和太阳能发电从零起步, 水电和风电等可再生能源装机容量均位居世界第一。2013 年全国火电装机容量占总装机容量的 69.18%, 比 2000 年降低了 5.21 个百分点, 而且最近两年有加速下降的趋势, 但受我国一次能源禀赋的影响, 火电在未来较长时期占我国发电行业主导地位的格局难以改变。2013 年火电行业 6000kW 及以上电厂发电和供热共消费煤炭 20.5 亿 t, 占全国煤炭消费量的 56.79%, 是国民经济各行业中煤炭消耗量最大的行业, 也是节能减排和污染治理的重点行业。

火电行业的节能减排和污染治理工作一直受到政府部门的高度重视和社会各界的广泛关注。长期以来, 我国火电行业节能减排和污染治理的工作重点主要是针对烟尘和二氧化硫(SO_2)等污染物, 对在役火电机组实施除尘和脱硫设施升级改造, 对新建、扩建和改建的火电机组强制要求同步建设高效率的除尘、脱硫等环保设施, 同时采取积极参加联合国清洁发展机制(clean development mechanism, CDM)等国际合作以及实施排污权交易试点等经济措施, 对于减少这些污染物排放量取得了显著成效。2012 年, 我国火电行业烟尘和二氧化硫排放量分别为 144 万 t 和 706 万 t, 分别比 2005 年下降了 62%和 36%; 排放绩效^②分别为 $0.37\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 和 $1.8\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$, 分别比 2005 年下降了 $1.49\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 和 $3.64\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 。

① 火电包含燃煤发电、天然气发电、秸秆等生物质发电。

② 污染物排放绩效是指单位发电量所排放的污染物数量, 比如二氧化碳排放绩效、二氧化硫排放绩效、氮氧化物排放绩效等, 单位为 $\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 。

我国火电行业氮氧化物治理工作起步相对较晚, 尽管 2012 年以来排放绩效上升的势头已得到了有效遏制, 但距离“十二五”规划目标仍有较大差距。2012 年火电行业氮氧化物排放总量为 982 万 t, 排放绩效为 $2.5\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$, 分别比规划目标^①高出 31% 和 $1\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。1996 年颁布的《火电厂大气污染物排放标准》(GB 13223—1996) 首次对氮氧化物的排放浓度限值作出了规定, 2000 年 9 月 1 日开始施行的《中华人民共和国大气污染防治法》要求企业应当对燃料燃烧过程中产生的氮氧化物采取控制措施。2011 年新修订的《火电厂大气污染物排放标准》(GB 13223—2011) 将我国火电行业的氮氧化物排放标准提高数倍, 达到甚至超过了美国、欧洲等发达国家和地区的标准。国家《节能减排“十二五”规划》中首次明确提出了 2015 年电力行业氮氧化物的排放总量控制目标和削减量目标, 并要求新建燃煤机组全面实施脱硝, 同时加快现役燃煤机组低氮燃烧技术改造和烟气脱硝设施建设, 对单机容量 30 万 kW 及以上的燃煤机组、东部地区和其他省会城市单机容量 20 万 kW 及以上的燃煤机组均要实行脱硝改造。2013 年 9 月 10 日国务院发布《大气污染防治行动计划》, 明确要求除循环流化床锅炉以外的燃煤机组均应安装脱硝设施。2007 年湖南华电长沙电厂 2×60 万 kW 超临界燃煤机组等我国首批同步建设脱硝设施的火电机组建成投产, 标志着我国火电行业氮氧化物治理工作进入了实质性的实施阶段。截至 2013 年底, 我国已安装脱硝设施的火电机组达到 4.3 亿 kW, 占全部火电机组的比例为 49.42%, 仅 2013 年当年即新增脱硝火电机组约 2 亿 kW, 火电行

① 2012 年 8 月 6 日,《国务院关于印发节能减排“十二五”规划的通知》(国发〔2012〕40 号)明确提出,到 2015 年全国火电行业氮氧化物排放量目标值为 750 万 t/年。2013 年 1 月 1 日,《国务院关于印发能源发展“十二五”规划的通知》(国发〔2013〕2 号)明确提出,到 2015 年全国火电行业氮氧化物排放绩效目标值为 $1.5\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$, 且作为约束性指标。

业氮氧化物治理速度明显加快。

同步建设或升级改造脱硝设施无疑是降低火电行业氮氧化物排放量的有效手段，但通过行政手段强制实施不利于调动发电企业的积极性，无法实现社会成本最小化。从国外的理论研究与实践经验以及我国开展二氧化硫等污染物排污权交易试点情况来看，在我国火电行业实施氮氧化物排污权交易制度将有助于提高火电行业氮氧化物的治理效率，节省社会成本。通过对国内外理论文献和实践情况的梳理与总结，发现美国、欧洲、日本等发达国家和地区关于氮氧化物排污权交易的理论研究与实践相对较多，而我国关于氮氧化物排污权交易的理论研究与实践几乎处于空白。氮氧化物排污权交易尽管具有污染物排污权交易的一般属性，关于污染物排污权交易的基础理论与实践经验可以适用于氮氧化物的排污权交易，但由于氮氧化物与其他污染物在产生机理、治理技术、总量控制目标等多方面均存在差异，因此在充分吸取国内外已有理论研究成果与实践经验的基础上，结合我国具体国情和火电行业发展状况，对我国火电行业氮氧化物排污权交易的相关理论问题进行深入研究，提出具有可操作性的政策建议，对于促进我国火电行业氮氧化物治理、建设美丽中国具有十分重要的现实意义。

（二）目的与意义

第一，构建我国火电行业氮氧化物排污权交易的总体框架及管理信息系统设计思路。目前我国火电行业氮氧化物治理主要是通过各级环保部门以行政命令的方式强制推进，氮氧化物排污权交易等经济手段的运用尚未引起大家的充分重视，相应的理论研究并不多见。国际上关于氮氧化物排污权交易的理论研究与实践相对较多，其中一些与经济学、生态学等基础理论相关的研究成果适用于我国，但涉及排污权交易的总量控制、初始分配、交易市场及政府规制等具体的制度设计对我国

并不完全适用，至少是不能采用“拿来主义”式地照抄照搬，否则将事与愿违，起到相反的作用。因此，本书拟在充分学习、借鉴国外理论与实践成果的基础上，结合我国的具体国情和火电行业的实际情况，以分析我国火电行业实施氮氧化物排污权交易的必要性和经济性为切入点，对氮氧化物排污权交易的总量控制、初始分配、交易市场及政府规制等各个环节逐一进行研究，最后综合提出我国火电行业氮氧化物排污权交易的总体框架及管理信息系统设计思路。

第二，实现我国火电行业氮氧化物治理的社会成本最小化。在市场经济条件下，每一家火电企业作为“经济人”，追求利益最大化是其本质属性。在实施氮氧化物排污权交易的制度体系下，氮氧化物排污权的交易价格将围绕社会平均边际治理成本上下波动。如果某家火电企业的氮氧化物实际排放量超过了其被允许的最大排放量（即初始分配量）且其自身的边际治理成本高于社会平均边际治理成本，那么这家企业在利益驱动下将作出购买排污权的安排，从而取代其自身投资建设或改造升级脱硝设施的行为选择，以节省综合成本。同理，如果某家火电企业的氮氧化物边际治理成本低于社会平均边际治理成本，也就是说其花在氮氧化物治理方面的投资低于其出售排污权的收益，那么这家企业必然会选择增加氮氧化物治理的投入，尽可能减少其自身的排放量，将低于初始分配量的部分在氮氧化物排污权交易市场上出售，获得相应的利润。因此，在火电行业实施氮氧化物排污权交易，无论边际治理成本高还是低的企业都能够获得利益，且以较低的社会总成本实现氮氧化物治理目标，促进氮氧化物治理的社会成本最小化。

第三，促进我国火电行业氮氧化物治理的技术进步和产业升级。充足的资金投入将促进技术进步，技术进步又将提高氮氧化物的治理效率，同时降低投入成本，从而带动整个氮氧化物治理的产业升级，形成