



我国 钢铁与水泥行业 碳排放核查技术与低碳技术

**RV AND LOW-CARBON TECHNOLOGIES OF IRON-STEEL
AND CEMENT INDUSTRIAL SECTORS IN CHINA**

马秀琴 董慧芹 郭鸿湧 李海瑞 著



中国环境出版社

国家科技支撑计划项目“我国主要行业温室气体监测与核算技术研究”

(课题编号: 2012BAC20B11)

河北省科技支撑计划项目“钢铁行业碳排放核查技术与低碳技术评价”

(项目编号: 14273701D)

河北省技术转移体系建设专项“河北省节能减排技术转移服务平台推广与应用”

(项目编号: 2014045702)

我国钢铁与水泥行业碳排放 核查技术与低碳技术

MRV AND LOW-CARBON TECHNOLOGIES OF IRON-STEEL
AND CEMENT INDUSTRIAL SECTOR IN CHINA

马秀琴 董慧芹 郭鸿湧



中国环境出版社·北京

图书在版编目 (CIP) 数据

我国钢铁与水泥行业碳排放核查技术与低碳技术/马秀琴等著. —北京: 中国环境出版社, 2015.10

ISBN 978-7-5111-2524-8

I. ①我… II. ①马… III. ①钢铁工业—二氧化碳—废气排放量—空气污染控制—研究—中国②水泥工业—二氧化碳—废气排放量—空气污染控制—研究—中国 IV. ①X757.017②X781.501.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 219004 号

出 版 人 王新程

责任编辑 殷玉婷

责任校对 尹 芳

封面设计 宋 瑞

出版发行 中国环境出版社

(100062 北京市东城区广渠门内大街 16 号)

网 址: <http://www.cesp.com.cn>

电子邮箱: bjgl@cesp.com.cn

联系电话: 010-67112765 (编辑管理部)

010-67187041 (学术著作图书出版中心)

发行热线: 010-67125803, 010-67113405 (传真)

印 刷 北京中科印刷有限公司

经 销 各地新华书店

版 次 2015 年 10 月第 1 版

印 次 2015 年 10 月第 1 次印刷

开 本 787×960 1/16

印 张 24.75

字 数 410 千字

定 价 60.00 元

【版权所有。未经许可, 请勿翻印、转载, 违者必究。】

如有缺页、破损、倒装等印装质量问题, 请寄回本社更换

前 言

2014年9月,我国发布了《国家应对气候变化规划(2014—2020年)》,这一规划成为国家从“十二五”跨越“十三五”应对气候变化领域纲领性文件。规划指出“中国将确保实现到2020年单位国内生产总值二氧化碳排放比2005年下降40%~45%、非化石能源占一次能源消费的比重达到15%左右,森林面积和蓄积量分别比2005年增加4000万 hm^2 和13亿 m^3 的目标”。规划在明确总体目标的基础上,着重提出要重点推进电力、钢铁、建材、有色、化工等行业节能,严格控制工业领域温室气体排放。规划还特别针对钢铁和水泥两个行业提出了总量控制目标,到2020年两个行业的二氧化碳排放总量基本稳定在“十二五”末的水平。规划中仅针对钢铁和水泥行业,国家设置了潜在的总量碳排放限额,这表明在钢铁与水泥行业推广节能低碳技术、降低碳排放总量已成为国家工业领域节能减排的重中之重。

我国高耗能行业作为工业以及国民经济发展的基础性行业,为促进经济增长作出了重要贡献。然而,这些高耗能行业同时也消耗了工业生产中的大部分能源,排放了大量的温室气体和细颗粒物,成为环境污染的元凶。近几年频频出现的全国范围的大面积重度雾霾天气,是多年来高消耗、高排放、高污染的传统经济方式所带来的必然后果,严重的环境问题已经极大地影响了民众的健康生活,阻碍了社会经济的可持续发展,低碳经济、

绿色发展已成为我国的必然选择。

在第 20 届联合国气候大会召开前期的 2014 年 11 月,中美发布《中美气候变化联合声明》,我国首次正式提出,计划 2030 年左右二氧化碳排放达到峰值且将努力早日达峰值,并计划到 2030 年非化石能源占一次能源消费比重提高到 20%左右。这一目标的提出,勾勒出了我国今后 20 多年的低碳发展路线图。实现低碳发展,核心是要推动低碳工业技术的开发与推广应用,抑制高碳行业过快增长,优化工业空间布局。

钢铁行业 and 水泥行业都是高耗能、高排放的行业,是温室气体排放的大户,一直是我国节能减排的重点行业。因为钢铁行业与水泥行业不仅仅在使用过程中会排放二氧化碳,在生产过程中也要排放二氧化碳。目前,钢铁和水泥行业的碳排放量占了全国碳排放总量的 1/5 左右。为了发展低碳经济,减少钢铁和水泥行业的温室气体的排放,就需要大力地发展与钢铁和水泥生产相关的节能减排技术,抓住以钢铁和水泥行业为核心的传统产业升级改造与节能降耗,对于推进我国经济结构调整,推动产业结构优化升级意义重大。通过钢铁和水泥行业的低碳技术的广泛推广应用,来控制 and 降低二氧化碳的排放,这对于我国实现温室气体减排目标,促进社会、经济、环境可持续发展等方面都具有非常重要的现实意义。

本书共分为七篇,第一篇为国内外温室气体排放现状,主要论述了 CO_2 排放量与经济发展的关系,国际与国内温室气体排放现状及减排政策,是本书的背景篇章。第二篇为国内外 MRV 的研究进展,重点介绍了 MRV 的基本内涵,以欧盟为代表的国外 MRV 研究进展,并从研究现状和发展框架分析入手,提出构建适合中国国情的 MRV 机制。第三篇为国内钢铁和水泥行业的能耗与排放调查研究,选择了国内 7 家重点钢铁和水泥企业开

展了调研,在获取企业相关数据基础上,通过数据分析,对国内钢铁和水泥行业的能耗以及排放进行了基本计算和分析。第四篇为钢铁和水泥行业 MRV 方法学研究,开发了适合于中国国情的钢铁行业 and 水泥行业的 MRV 方法学,内容涵盖了方法学的使用条件、边界的确定、温室气体核算与量化计算、泄露与不确定分析、监测与监测报告等内容。第五篇为钢铁和水泥企业的 MRV 报告实例研究,选取了 1 家典型的长流程钢铁企业和 1 家水泥企业进行案例研究并编制了企业 MRV 报告,为企业开展 MRV 工作提供了样本。第六篇为钢铁与水泥行业的低碳技术,钢铁行业从焦化、烧结、炼铁、炼钢和轧钢 5 个主要工序介绍了技术先进、适宜推广应用的低碳技术;水泥行业从矿石原料、生料加工、熟料加工和生产管理等方面介绍了相关低碳技术和其他与钢铁和水泥行业相关的技术,为钢铁和水泥企业节能减排降碳提供了技术参考。第七篇为前景与展望。

作者期望本书对从事低碳发展决策的政府部门、相关行业领域的高级管理者和技术专家、高等院校师生、从事相关领域低碳技术研究的专家、大众媒体以及关心致力于低碳技术推广应用的中介服务机构与人员在其工作中有所帮助和参考作用;也期望能够为钢铁行业 and 水泥行业的企业在碳盘查、低碳技术的投资决策、推广应用上提供帮助,助力企业实现绿色低碳发展。

本书的出版得到了国家科技支撑计划项目“我国主要行业温室气体监测与核算技术研究”(课题编号:2012BAC20B11)、河北省科技支撑计划项目“钢铁行业碳排放核查技术与低碳技术评价”(项目编号:14273701D)和河北省技术转移体系建设专项“河北省节能减排技术转移服务平台推广与应用”(项目编号:2014045702)的联合资助。本书的内容是对以上研究

成果的总结和归纳。作者对以上项目的管理部门中华人民共和国科学技术部、河北省科学技术厅致以诚挚的谢意，感谢这些部门对节能降碳研究开发工作的重视与支持。感谢以上课题承担依托单位河北省科学技术情报研究院和河北工业大学对课题组研究开发工作提供的大力支持和对项目的精心管理。

河北联合大学的龙跃博士、刘志刚博士，河北工业大学研究生林虹同学、苏柳文同学、王洋同学、霍婕同学，河北省科学技术情报研究院技术转移中心的各位同事参与了上述部分课题的研究工作，河北联合大学的李运刚教授、封孝信教授，天津环境科学研究院张宁工程师对本书的编写提供了指导与帮助，他们为本书的出版作出了重要贡献，在此一并表示衷心感谢。

作者

2015年3月

目 录

第一篇 国内外温室气体排放现状.....	1
1 温室气体排放量与经济发展.....	1
1.1 温室气体的源与汇.....	2
1.2 CO ₂ 排放量与经济发展.....	3
2 国际温室气体排放现状及减排政策.....	6
2.1 国际温室气体减排政策.....	6
2.2 国内排放现状.....	8
2.3 国内温室气体减排政策.....	9
第二篇 国内外 MRV 的研究进展.....	13
3 国内外 MRV 的研究进展.....	13
3.1 MRV 的基本内涵.....	13
3.2 中国的 MRV 发展.....	15
3.3 欧盟 MRV 研究现状.....	18
4 构建适合中国国情的 MRV 机制.....	19
4.1 中国企业面临的问题.....	19
4.2 构建我国 MRV 的政策建议.....	20
第三篇 国内钢铁和水泥行业的能耗与排放调查研究.....	23
5 国内钢铁和水泥行业的能耗与排放现状.....	23
5.1 钢铁行业能耗现状.....	23
5.2 水泥行业能耗现状.....	26
5.3 钢铁行业温室气体排放现状.....	27

5.4	水泥行业温室气体排放现状	34
6	钢铁企业的调研数据与分析	38
6.1	参与调研的钢铁企业	38
6.2	钢铁工艺流程简介	39
6.3	调研数据汇总和分析	40
7	水泥企业的调研数据与分析	44
7.1	参与调研的水泥企业	44
7.2	水泥工艺流程	45
7.3	水泥调研相关数据汇总和分析	47
第四篇	钢铁和水泥行业 MRV 方法学研究	55
8	钢铁行业 MRV 方法学的开发	55
8.1	方法学的使用条件	55
8.2	边界的确定	55
8.3	温室气体的核算量化	56
8.4	泄露与不确定分析	59
8.5	监测与报告	60
9	水泥行业 MRV 方法学的开发	62
9.1	方法学的使用条件	62
9.2	边界的确定	62
9.3	温室气体的核算量化	63
9.4	泄露与不确定分析	66
9.5	监测与报告	67
第五篇	钢铁和水泥企业的 MRV 报告实例研究	71
10	某钢铁公司的 MRV 报告	71
10.1	排放主体的基本信息	71
10.2	边界描述	72
10.3	温室气体排放量的计算	75

10.4	检测与核查.....	79
10.5	报告的责任与目的.....	80
11	某水泥企业的 MRV 报告.....	81
11.1	排放主体的基本信息.....	81
11.2	边界描述.....	81
11.3	温室气体排放量的计算.....	83
11.4	监测与核查.....	86
11.5	报告的责任与目的.....	87
第六篇	钢铁与水泥行业的低碳技术.....	88
12	钢铁行业的低碳技术.....	88
12.1	焦化工序.....	88
12.2	烧结球团工艺.....	124
12.3	炼铁工序.....	175
12.4	炼钢工序.....	233
12.5	轧钢工序.....	272
13	水泥行业的低碳技术.....	307
13.1	生料环节.....	307
13.2	熟料环节.....	323
13.3	生产管理.....	333
14	其他相关的低碳技术.....	345
14.1	ESP 电能调节系统.....	345
14.2	室内即热式电热水器.....	348
14.3	天然气锅炉 NO _x 排放控制.....	351
14.4	烟气脱硫技术.....	354
14.5	煤气化联合发电 (IGCC)	354
14.6	烧结砖瓦相关低碳技术.....	359
14.7	建筑行业相关技术.....	368
14.8	其他新颖智能技术.....	370

第七篇 前景与展望..... 373

15 钢铁行业发展前景展望..... 373

16 水泥发展前景展望..... 375

17 节能减排和碳市场发展前景展望..... 376

参考文献 379

第一篇

国内外温室气体排放现状

1 温室气体排放量与经济发展

“温室气体”这个词汇对于大众来说并不陌生，但究竟什么是温室气体呢？准确地说，温室气体就是地球周围能扣住地球辐射热的气体。也许很多人并不知道，水汽是地球上最重要的温室气体，占据了温室气体的近 95%。但水汽取决于自然活动，并不受人类活动的影响。 CO_2 、 CH_4 、HFCs（氢氟碳化物）、 N_2O 和 O_3 是人们所能控制的主要温室气体。 O_3 在大气化学中有许多作用，虽然是温室气体，在引起逆温现象的同时也能吸收紫外-B 带的紫外光。而 CO_2 、 CH_4 、HFCs 和 N_2O 才是引起气候变暖的真正原因^[1]，也就是造成气候变暖的罪魁祸首——温室气体。相关数据表明 CO_2 对温室气体的贡献率超过了 70%，因此其也成为大气污染的主要研究对象。

地球表面将太阳发出的高能光波吸收，高能光波波长较长，其发出的辐射热会被物体再次辐射出去^[1]。温室气体分子会吸收发出的部分辐射热，阻止了其向外部空间的辐射，相当于给大气罩上了一层“保温材料”。可将此效应类比于温室玻璃效应：可见光凭借对玻璃较大的透过率，射入玻璃室后的可见光将会被室内

物体吸收。玻璃对物体放出的其他光种透过率很低，比如红外光，因此透过率较大的可见光和透不出去的红光就将能量保留在了室内。温室气体的种类特征见表 1-1。

表 1-1 温室气体种类特征

种类	增温效应/%	生命期/年	100 年全球增温潜势
二氧化碳 (CO ₂)	63	50~200	1
甲烷 (CH ₄)	15	12~17	23
氧化亚氮 (N ₂ O)	4	120	296
氢氟碳化物 (HFCs)	11	13	1 200
六氟化硫 (SF ₆) 及其他	7	3 200	22 200

数据来源：北京碳汇网，2010-11-01，<http://www.bcs.gov.cn/cms/viewarticle/3900>。

1.1 温室气体的源与汇

碳源包括人为碳源和自然碳源，即向大气释放 CO₂ 的过程、活动或机制。

碳汇与碳源相反，是从大气中清除 CO₂ 的过程、活动或机制。主要指陆地生态系统的碳汇，包括植被碳汇、土壤碳汇以及水体碳汇等^[2]。

二氧化碳 (CO₂) 的源与汇：CO₂ 的排放源分为生物源和非生物源。生物源主要是生物呼吸释放 CO₂；非生物源有生物及化石燃料燃烧、大气 CH₄ 氧化、土壤微生物分解有机物等。面积广阔的海洋是较大的碳汇，陆地生态系统也是碳汇的一个组成部分。

甲烷 (CH₄) 的源与汇：大约 80% 的 CH₄ 是由厌氧微生物对有机物分解产生的。太阳红外光谱分析表明，近 40 年大气 CH₄ 浓度增加了 30%。目前全球大气中 CH₄ 浓度已达 1.72 μL/L，年增长率为 0.8%~1.0%。沼泽和稻田是 CH₄ 的主要来源，二者排放的 CH₄ 占据 CH₄ 排放总量的比例分别达到了 22% 和 21%。大气 CH₄ 最主要的汇是它被大气中 •OH 自由基所氧化。土壤也是甲烷汇的一个组成部分，因为土壤中的 CH₄ 氧化菌能将 CH₄ 氧化成 CO₂ 和 H₂O，比例约占 CH₄ 总汇的 5%。

氧化亚氮 (N₂O) 的源与汇：大气中 N₂O 的排放源由生物源和非生物源两部

分组成。含量现已达 $310 \mu\text{L}/\text{m}^3$ ，正以每年 $0.2\%\sim 0.3\%$ 的速度增加。 N_2O 主要生物源指陆地和海洋的生物源，其排放量约占大气中 N_2O 的 90% 。土壤微生物的硝化和反硝化作用是其中陆地生态系统 N_2O 的主要生物源。另外最新发现植物也能排放 N_2O 。我国陆地生态系统主要指农田、森林、草原等，这三部分 N_2O 的排放量分别占我国 N_2O 排放总量的 35% 、 22% 和 27% 。非生物源 N_2O 的排放约占我国 N_2O 排放总量的 16% 。化石燃料燃烧是 N_2O 的重要排放源，应通过减少其使用来降低其排放量。己二酸生产过程及大规模农业活动（如施肥、毁林等）也是大气 N_2O 浓度增加的重要原因之一^[3]。

氢氟碳化物（HFCs）的源不同于其他温室气体，其全部是人为产生的，如用于制冷器、喷雾罐等。HFCs 非常稳定，能进入平流层，与紫外线相遇迸发出氯原子，氯原子又与臭氧反应将其还原为氧，从而加速了大气臭氧的破坏。另外，HFCs 的单分子增温效应是 CO_2 的 $5\,000\sim 10\,000$ 倍。

1.2 CO_2 排放量与经济发展

鉴于 CO_2 对温室效应的贡献率超过了 70% ^[4]，所以目前全世界对温室气体的理论与实践研究均以 CO_2 为主。

经济发展与碳排放之间越来越密切的关系使得人们对二者之间的影响因素日趋关注。目前世界上应用较多的研究工具是环境库兹涅茨曲线（Environmental Kuznets Curve, EKC）假设，通过 EKC 假设来分析经济增长方式、经济发展水平对 CO_2 排放的影响^[5]。人们一直从理论和实践两方面开展对经济发展水平和碳排放关系的研究，而 EKC 假设的提出，进一步印证了经济发展与环境污染程度之间存在倒 U 形的关系：当经济发展处于起步阶段，环境污染程度也处于较低的水平；随着经济的不断发展，环境的破坏程度也不断增加，此后又会出现转折。图 1-1 为库兹涅茨曲线左半部分分析。

通过研究库兹涅茨曲线，可以发现环境污染与经济发展存在正相关和反相关关系。具体可以从两个方面分析：一是“两难”关系，对应正相关关系；二是“双赢”关系，对应负相关关系^[5]。汇总发达国家的历史数据，污染指数的增加是在人均收入水平由低增高即经济发展较快时期，因此经济与环境的关系为对立的负

相关关系；当经济发展达到一定水平即越过这一阶段时，污染破坏指数下降，环境与经济又处于和谐的正相关关系。

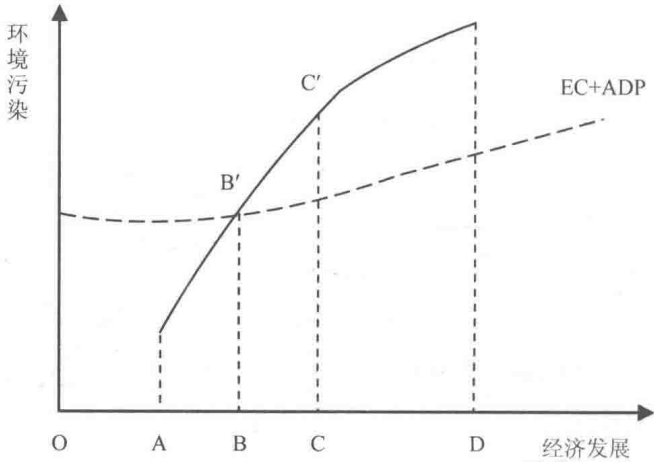


图 1-1 库兹涅茨曲线的左半部分分析

(1) 两难区间

① O—A 区间

从某种意义上来说，EKC 曲线并不包括 O—A 阶段。因为这段时期是开展工业化以前，此时人类的活动对环境的影响可以忽略不计，环境的自净能力完全能够消解人类对环境带来的负效应，因此这不是 EKC 研究的重点。

② A—C 区间

在“两难”区间即 AC 段内，曲线斜率为正，说明经济的快速发展是以破坏环境为前提和代价的，即经济发展与环境污染存在着正相关关系。假定 C 点为转折点，环境污染与经济发展的斜率比为 1，可以从图中分析得出 EKC 上 AC 段增长趋势较为迅速，斜率大于 1；而 CD 段增长较缓，该段斜率小于 1。

AC 段斜率大于 1 说明经济发展的速度与环境的破坏程度相比缓慢，环境污染的增量大于经济增量。尽管在 AB 段中对环境的破坏程度增加较为迅速，但并没有超出环境的自有容量^[6]，因此人们对污染物的增加没有采取措施予以控制。BC 曲线段斜率大于 1，经过 B 点，环境问题更加明显，环境恶化的趋势在加剧。BC 段中环境损失量大于经济增量说明，经济的增长所带来的收益完全被环境破坏

的代价所抵消。

③ C—D 区间

C—D 段斜率小于 1 且呈逐渐减小趋势。曲线 CD 不同于 BC 阶段, 环境污染的增量小于经济增量, 表明人类在吸取环境破坏的教训后, 意识到环境问题的严重性, 有步骤地采取了一系列减排措施, 但环境问题并没有停止。虽然污染物排放量增量在减少, 但总体还是呈现出增加的趋势。

EC (环境容量) + ADP (人们处理污染能力) 与 EKC 的交点 B' 点是 C' 点的理想位置。对环境的破坏程度只要大于等于 EC 与 ADP 之和, 人们就必须拿出所得的部分经济总量来治理环境, 而且此时的环境不一定可以恢复。

(2) “双赢” 区间

人类的活动在双赢阶段内, 并没有破坏环境, 反而在使环境日益变好, 真正达到了经济与环境的协调发展。图 1-2 为库兹涅茨曲线右半部分分析。

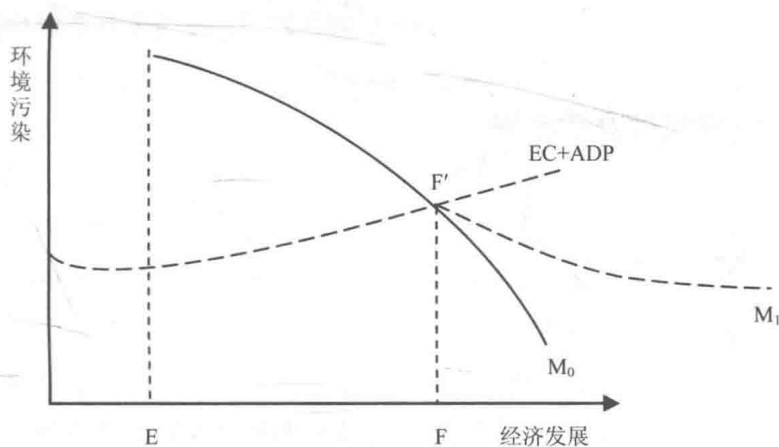


图 1-2 库兹涅茨曲线的右半部分分析

分析可参照图 1-1 (左半部分), 与之相反, 曲线斜率小于 0, 经济发展与环境破坏程度为负相关关系, 即经济发展的同时并没有带来环境的日趋恶化, 反而在不断改善。随着经济的进一步发展, 经济与环境将不再存在明显的相关性^[7]。

我们不能排除环境的污染程度随经济发展有 M_1 走势的可能性。 M_1 和 M_0 的差异性在于 M_1 更多依赖的是环境自身的消化能力和还原能力, 这将大大减少人

为的针对环境的经济投资。而透过 M_0 曲线，我们可以看到环境污染程度下降到人为处理污染物能力和环境容量之和后，对破坏环境的治理仍在继续，力求达到人与自然的进一步协调^[8]。F 点以后的经济发展我们可以真正地称为可持续发展。

在此需要加以说明的是，D 点的纵坐标及 C 点与 D 点的横坐标之差决定了 EKC 曲线的形状，因为不同的国家有不同的国情，所以不能片面地认为所有的国家均符合 EKC 曲线特征。分析发达国家的经济发展与环境污染程度可以得到如下特征：若某国家未达到 D 点，那么 C 点与 D 点的横坐标之差应小于已经达到 D 点的国家，相应的 D 点的纵坐标也应低于已经达到 D 点的国家。从以上分析中推断，应尽量缩短 D 点的纵坐标和 C 点与 D 点横坐标差值，坚决避免走“先污染，后治理”的经济发展模式才是符合经济与环境协调发展的最优选择。

2 国际温室气体排放现状及减排政策

2.1 国际温室气体减排政策

国际层次包括的温室气体的减排政策工具有：清洁发展机制、联合履约、资金和技术转移、排放税协调和国际排放税等。目前全球都是一个大的经济体，以市场经济为主导的经济手段要求所有的减排手段在不影响经济发展的情况下付出最少的经济代价^[9]。一种新形势下的减排激励机制正在成形，关于对其的探讨深化为以后开发更有效的减排技术提供了技术支持和制度保障。基于市场的经济手段是目前研究最深入、最广泛的一种政策措施，但每一种措施都有其片面性，因此在实际应用中并不是单一的手段、方式，往往是多种方法的互补和结合。

根据《联合国气候变化框架公约》(United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC) 的要求，各国政府均在不同程度地减少本国的温室气体排放，根据各自的实际情况制定了一些国家层面的政策减排措施。各政策的具体表现不尽相同，总体上可以概括为以下 6 类：