

前言

全球工业化进程的持续深化与能源消费总量的不断攀升，使得全球二氧化碳减排的压力持续加剧。应对气候变化、加速绿色低碳转型已成为国际社会的广泛共识。在这一背景下，中国能源消费总量和碳排放居全球前列，其能源结构的优化、碳排放强度与总量的控制、碳减排绩效的提升，不仅关乎自身的可持续发展，更对全球气候治理目标的实现具有重要影响。科学系统地识别全球与中国碳排放的现状特征，深入理解中国碳减排政策的演变路径，精准评估区域、行业 and 企业的碳减排绩效，已成为实现“双碳”目标过程中不可或缺的关键环节。在这样的时代背景下，本书的作者团队开展了系统深入的研究，构建了一个系统性的碳减排绩效评估理论框架，通过创新的方法论和丰富的实证研究，为全球和中国的低碳转型提供了科学的决策支撑。全书围绕衡量碳减排绩效的两个核心指标——碳生产率和碳边际减排成本，从多个维度展开了深入分析，为政府、企业及相关决策者提供了一套科学精细、可操作的碳减排绩效评估、分析和管理体系。

研究背景：全球气候治理与中国角色

当前，全球气候变化威胁日益严峻，推动低碳转型已成为国际共识。中国正处于工业化后期转型阶段，面临着“双碳”目标刚性约束与经济发展动态平衡的双重挑战。一方面，“双碳”目标具有明确的时限性与刚性约束，要求碳排放总量在特定时间节点达到峰值并进入下降通道；另一方面，作为发展中大国，维持经济社会的稳健发展、保障能源安全与产业竞争力仍是核心诉求。破解这个复杂问题的核心难点在于，减排决策所需的基础数据往往存在显著波动性与不确定性，同时，国内外应对气候变化的政策环境、市场机制以及技术发展态势也处于快速动态演化之中。这种数据和环境的高度不确定性，对科学评估减排行动的真实经济成本构成了严峻挑战。因此，准确估计在特定时空和技术条件下的碳减排绩效，成为破解上述双重挑战、制定兼具经济效率与环境效益政策的关键科学基础。

理论基础：构建碳减排绩效的核心概念体系

碳减排绩效是衡量碳排放主体低碳发展水平与减排效果的重要指标，不仅反映了减排目标的实现难度和达成情况，还能够引导碳减排政策的制定与优化。通过设定具体的碳减排绩效指标，将碳排放主体在应对气候变化方面的努力和成效予以量化，从而在实现减排目标的基础上，不断降低碳减排的成本与社会经济影响，持续提升减排行动的效率与效果。在碳减排绩效评估体系中，碳生产率(carbon productivity, CP)和碳边际减排成本(carbon marginal abatement costs, CMAC)是两个核心指标，

对于科学制定和评估碳减排政策具有重要意义。碳生产率是衡量碳排放主体低碳经济发展水平的核心指标，精准评估碳生产率及其驱动因素，能够为科学制定低碳发展战略提供坚实的决策依据。碳边际减排成本反映了排放主体额外减少一单位 CO_2 排放所需付出的经济代价，科学估计碳边际减排成本，不仅可以为制定合理的碳定价政策提供参考，还能帮助企业评估生产减排策略的经济可行性。

方法创新：构建碳减排绩效的多维度评估体系

本书的核心贡献在于构建了一个多维度的碳减排绩效评估体系。传统的碳减排评估往往采用单一维度或简化假设，难以全面反映复杂的现实情况。本书针对这一问题，从能源与排放结构、技术异质性、经济-环境综合效益、市场机制与环境容量约束等多个维度，系统性地构建了碳减排绩效评估的理论框架和模型体系。

第一，能源结构维度的创新。化石燃料燃烧是 CO_2 排放的主要来源，化石能源消费的结构差异会对 CO_2 排放造成直接影响。因为不同能源品种的排放系数和排放强度不同，且不同能源品种间存在不完全替代关系，在碳生产率的测度中，如果不考虑能源和碳排放结构，将无法反映单个能源品种对碳生产率变化的贡献。本书基于方向距离函数(directional distance function, DDF)，构建了分别考虑能源结构和排放结构的碳生产率评估模型，通过对 CO_2 排放按照其来源进行分解，衡量能源和碳排放结构对碳生产率变化的直接影响。

第二，技术异质性维度的突破。考虑到不同生产单元在生产过程中的技术异质性对碳排放效率和减排潜力具有显著影响，在碳生产率评估中需要纳入生产和减排技术异质性。各生产单元在技术水平、工艺流程、能源利用效率、减排措施的实施程度上存在显著差异，这些差异导致其碳排放强度和减排潜力各不相同。本书将共同边界生产前沿建模技术和非参数方向距离函数的最大改进潜力方向识别技术相结合，建立了同时考虑生产技术异质性和减排潜力内生性的碳生产率测度模型，该模型不仅可以区分不同生产单元的生产和减排技术异质性，还可以识别每一生产单元在不同技术下的最大碳强度下降潜力。

第三，经济-环境综合效益的统筹。在全球气候治理加速推进与中国“双碳”目标深度耦合的背景下，传统碳生产率评估面临根本性挑战。若仅追求碳排放强度的技术优化，可能陷入高碳锁定型增长陷阱，而单纯以经济产出最大化为导向，则易引发生态系统超载风险。本书结合物料平衡原理(material balance principle, MBP)和数据包络分析(data envelopment analysis, DEA)模型，嵌入技术效率、环境效率、成本效率、经济-环境综合效率四维概念，构建兼顾经济和环境综合效益的碳生产率评估体系，实现经济发展与环境保护的动态平衡。

第四，市场机制与环境容量的双重约束。在碳生产率评估中，充分考虑市场机制与环境容量约束，对于实现经济发展与环境保护的协同共进具有重要意义。一方面，排放主体需在满足市场需求、维持竞争力的基础上，优化资源配置、提升碳生

产率；另一方面，地球生态系统的碳容纳能力存在阈值，一旦碳排放量超出该阈值，将引发气候变化加剧、生态系统失衡等一系列不可逆的环境问题。本书基于市场与环境容量约束，融合运作绩效、环境绩效、运作-环境整体绩效三维概念，构建基于内生方向距离函数的碳生产率评估模型体系。

不确定性：应对复杂的现实挑战

在碳减排绩效评估中，不确定性是一个不可忽视的重要因素。无论是数据的不确定性，还是政策环境的不确定性，都会对评估结果产生重要影响。本书特别关注对不确定性的处理，从生产与减排策略不确定性和数据与环境不确定性两个维度，构建了相应的处理机制。在生产与减排策略不确定性方面，本书指出不同的企业会选择不同的生产与减排策略，部分企业会通过减少期望产出来降低 CO_2 排放，而部分企业会维持现有的期望产出水平或增加期望产出，采用先进的减排技术去降低 CO_2 排放。本书基于参数化 DDF 模型，构建了考虑生产与减排策略不确定性的碳边际减排成本估计模型。在数据与环境不确定性方面，本书在传统随机半参数数据包络分析模型 (StoNED) 的基础上，利用凸非参数最小二乘 (convex nonparametric least squares, CNLS) 技术，构建了一种改进的多阶段随机半参数数据包络分析模型 (StoNEZD)，这种方法不仅能够更好地处理数据随机误差，还能够将环境的不确定性纳入模型中。

动态视角：适应政策演进的需求

碳减排是一个动态的过程，减排目标会随着时间的推移而不断调整，减排成本也会随着技术进步和政策变化而发生改变。因此，静态的评估方法难以适应动态的政策需求。本书基于参数化 DDF 碳边际减排成本估计模型，构建了一个考虑动态减排目标的碳边际减排成本曲线估计模型。碳边际减排成本曲线 (marginal abatement cost curve, MACC) 是评估 CO_2 减排成本与路径可行性的关键工具之一，用于表征减排努力和减少一单位 CO_2 排放的边际成本之间的动态关系。基于 MACC，可以为评估不同政策情景下的成本效益提供量化依据，识别出最具成本有效性的减排技术与措施，并为实现特定排放控制目标提供决策支持。

实证研究：行业应用的深度剖析

理论的价值在于实践，模型的价值在于应用。本书不仅构建了具有创新性的理论框架和模型体系，更重要的是通过丰富的实证和应用研究，验证了理论方法的有效性和实用性。本书选择了多个具有代表性的行业进行深度剖析，包括火电行业、钢铁行业、石油化工行业、建筑陶瓷行业、制浆造纸行业、玻璃制造行业和建筑业等。

在针对火电行业的研究中，本书从碳强度最大下降潜力的角度评估了中国“十三五”和“十四五”时期碳强度减排目标在火电行业的可达性，并测度了该行业碳生产率的变化情况及其驱动因素。在针对建筑业的研究中，本书基于 2011~2022

年的省级建筑行业面板数据，通过技术效率、环境效率、成本效率与经济-环境综合效率的测算，实证揭示碳生产率的空间分布差异，并利用影子价格和影子成本，从“效率-成本-减排”视角提出兼顾减排合理性与经济可行性的相关建议。针对建筑陶瓷行业和制浆造纸行业，本书从国家、省(区、市)、企业层面测算了碳边际减排成本及减排策略，并结合行业的生产特点，分析了影响碳边际减排成本的关键因素。在针对钢铁行业的研究中，本书面向绝对量减排和相对量减排两类典型的环境政策情景，分别量化评估不同环境规制对行业碳边际减排成本的影响。

政策含义：为科学决策提供支撑

本书的研究成果具有重要的政策含义。首先，本书为差异化的减排政策制定提供了理论支撑。不同行业、不同地区的减排成本和潜力存在显著差异，“一刀切”的政策往往会导致效率损失。本书的研究可以帮助政策制定者识别最具成本效益的减排路径。其次，本书为中国碳市场的建设和完善提供了科学依据。通过准确估计不同行业、不同地区的碳边际减排成本，可以为碳配额的分配和碳价的确定提供科学参考。然后，本书为企业减排决策的制定提供了科学指导。企业可以根据自身的碳边际减排成本，制定最优的减排策略，在实现减排目标的同时，最大限度地降低经济成本。最后，本书为国际气候谈判提供了科学依据。通过准确评估中国的碳减排成本，可以在国际气候谈判中为合理分配减排责任提供科学支撑。

全书结构：系统性的研究框架

本书共分为 11 章，形成了一个完整的系统性研究框架。

第一部分包括第 1 章和第 2 章，构建了研究的理论基础。第 1 章阐述了研究背景，分析了全球及中国的能源消费与碳排放趋势，系统梳理了中国碳减排政策体系的演变历程。第 2 章界定了碳生产率和碳边际减排成本的核心概念，介绍了典型的基础模型，为后续的实证和应用分析提供了理论支撑。

第二部分包括第 3~第 6 章，聚焦碳生产率评估的多维度分析。第 3 章从能源结构视角，构建了考虑能源结构和排放结构差异的碳生产率评估模型。第 4 章从技术异质性视角，建立了同时考虑生产技术异质性和减排潜力内生性的碳生产率测度模型。第 5 章从经济与环境综合效益视角，构建了兼顾经济和环境综合效益的碳生产率评估体系。第 6 章从市场机制与环境容量约束视角，构建了基于内生 DDF 的碳生产率评估模型体系。

第三部分包括第 7~第 10 章，聚焦碳边际减排成本的多维度分析。第 7 章从生产与减排策略不确定性视角，构建了考虑策略不确定性的碳边际减排成本估计模型。第 8 章从数据与环境不确定性视角，构建了能够有效整合数据随机误差与环境政策不确定性的碳边际减排成本估算模型。第 9 章从动态减排目标视角，构建了考虑动态减排目标的碳边际减排成本曲线估计模型。第 10 章从函数数据分析视角，构建了基于函数型数据分析方法的碳边际减排成本曲线特征识别模型。

第四部分为第 11 章，对全书进行了总结，提炼了主要的研究结论，提出了相应的对策建议。特别阐述了中国在结合自身国情的基础上，通过持续提升碳减排绩效以统筹发展与减排的绿色低碳转型路径，介绍了其中的实践经验，为全球气候治理提供了可参考的中国案例。

作 者

2026 年 1 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 全球气候变化和 CO ₂ 排放	1
1.2 中国一次能源消费和能源相关 CO ₂ 排放趋势	5
1.3 中国碳减排政策的发展历程	8
1.4 碳减排绩效评估的必要性	10
1.5 本章小结	12
第 2 章 碳减排绩效评估的理论和方法基础	14
2.1 碳生产率的概念和内涵	14
2.2 碳边际减排成本的概念和内涵	15
2.3 碳生产率评估与碳边际减排成本估计的基础模型	16
2.3.1 参数模型：以 PLP 模型为例	17
2.3.2 非参数模型：以 DEA 模型为例	21
2.3.3 半参数模型：以 StoNED 模型为例	24
2.4 本章小结	28
第 3 章 考虑能源和排放结构差异的碳生产率评估	30
3.1 考虑能源和排放结构的碳生产率评估模型	30
3.1.1 考虑能源结构的碳排放效率评估及分解	30
3.1.2 考虑排放结构的碳排放效率评估及分解	36
3.2 考虑能源结构的中国能源和碳生产率	39
3.2.1 数据来源及处理	40
3.2.2 中国综合能源生产率变化及其分解	42
3.2.3 中国综合特定能源生产率变化及其分解	43
3.2.4 中国能源和碳排放生产率变化及其分解	47
3.3 考虑排放结构的全球主要国家碳生产率	49
3.3.1 数据来源及处理	49
3.3.2 内生方向与外生方向下的碳生产率比较	49
3.3.3 排放结构对碳生产率的影响	52
3.3.4 考虑排放结构的碳生产率变化	52
3.3.5 考虑能耗结构分组的碳生产率变化	54
3.3.6 不同国家的碳生产率变化比较	56
3.4 本章小结	58
第 4 章 考虑生产和减排技术差异的碳生产率评估	60
4.1 基于共同边界生产前沿的碳生产率评估模型	60

4.1.1 基于内生方向距离函数的碳生产率评估模型	61
4.1.2 基于共同边界生产前沿的 Luenberger 碳生产率指数及其分解	62
4.2 中国“十三五”碳强度减排目标在火电行业的可达性	64
4.2.1 数据来源及处理	65
4.2.2 国家层面碳强度减排目标的可达性分析	67
4.2.3 省级层面碳强度减排目标的可达性分析	68
4.2.4 企业层面碳强度减排目标的可达性分析	70
4.2.5 火电行业碳生产率变化的驱动因素分析	71
4.3 中国“十四五”碳强度减排目标在火电行业的可达性	75
4.3.1 数据来源及处理	75
4.3.2 国家层面碳强度减排目标的可达性分析	77
4.3.3 省级层面碳强度减排目标的可达性分析	77
4.3.4 火电行业碳生产率变化的驱动因素分析	78
4.4 本章小结	82
第5章 兼顾经济和环境综合效益的碳生产率评估	83
5.1 基于物料平衡原理的碳生产率评估模型	83
5.1.1 物料平衡原理	84
5.1.2 物料平衡原理下的碳生产率评估模型	84
5.2 中国建筑业碳减排的成本和环境效率及其驱动因素	88
5.2.1 数据来源及处理	88
5.2.2 建筑行业碳减排成本和环境效率变化	95
5.2.3 建筑行业碳减排成本和环境效率的权衡关系	97
5.2.4 建筑行业碳减排的影子成本和影子排放	100
5.3 本章小结	101
第6章 兼顾市场和环境容量约束的碳生产率评估	103
6.1 市场和环境容量约束下的运作和环境绩效评估模型	103
6.1.1 运作绩效评估模型	104
6.1.2 环境绩效评估模型	108
6.1.3 运作-环境整体绩效评估模型	111
6.2 中国火电行业的生产运作和碳排放综合绩效	113
6.2.1 数据来源及处理	114
6.2.2 中国火电行业的运作绩效	115
6.2.3 中国火电行业的环境绩效	118
6.2.4 中国火电行业的运作和环境整体绩效	121
6.3 本章小结	123
第7章 面向生产和减排策略组合的碳边际减排成本估计	125
7.1 生产和减排策略不同组合下的碳边际减排成本估计模型	126
7.1.1 方向距离函数	128
7.1.2 方向距离函数的求解	129
7.1.3 碳强度目标下可行的生产—减排策略组合	130
7.1.4 最优碳边际减排成本估计	131

7.2 中国建筑卫生陶瓷行业的碳边际减排成本	132
7.2.1 数据来源及处理	133
7.2.2 行业层面碳边际减排成本及减排策略	135
7.2.3 省级层面碳边际减排成本及减排策略	136
7.2.4 企业层面碳边际减排成本及减排策略	138
7.2.5 碳边际减排成本的影响因素分析	139
7.3 中国制浆造纸行业的碳边际减排成本	143
7.3.1 数据来源及处理	143
7.3.2 行业层面的碳边际减排成本及减排策略	144
7.3.3 省级层面的碳边际减排成本及减排策略	146
7.3.4 企业层面的碳边际减排成本及排放模式	149
7.4 本章小结	151
第8章 应对数据和环境不确定性的碳边际减排成本估计	152
8.1 基于随机半参数前沿面的碳边际减排成本估计模型	153
8.1.1 条件平均生产函数估计	154
8.1.2 生产前沿面估计	156
8.1.3 最优碳边际减排成本测算	157
8.2 中国钢铁行业的碳边际减排成本	159
8.2.1 数据来源及处理	159
8.2.2 绝对量减排的环境规制下碳边际减排成本及减排策略	160
8.2.3 相对量减排的环境规制下碳边际减排成本及减排策略	164
8.2.4 碳边际减排成本的影响因素分析	168
8.3 中国碳市场拟覆盖工业行业的碳边际减排成本	170
8.3.1 数据来源及处理	171
8.3.2 不同工业行业的碳边际减排成本	173
8.3.3 特定工业行业碳边际减排成本的省间异质性	176
8.4 本章小结	177
第9章 应对减排目标动态性的碳边际减排成本曲线估计	179
9.1 动态减排目标下的碳边际减排成本估计模型	180
9.1.1 基于碳边际减排曲线的碳边际减排成本估计模型	180
9.1.2 基于祖父原则的碳边际减排成本估计模型	181
9.2 中国石油化工行业的碳边际减排成本曲线	182
9.2.1 数据来源及情景设置	182
9.2.2 行业层面碳边际减排成本曲线	183
9.2.3 省级层面碳边际减排成本曲线	184
9.2.4 碳强度减排目标下的减排路径	186
9.3 中国玻璃制造行业的碳边际减排成本曲线	187
9.3.1 数据来源及处理	187
9.3.2 行业层面碳边际减排成本曲线	188
9.3.3 省级层面的碳边际减排成本曲线	189
9.3.4 企业层面的碳边际减排成本曲线	191

9.3.5 特定减排目标下的碳边际减排成本曲线	192
9.4 本章小结	194
第 10 章 基于函数型数据分析的碳边际减排成本曲线特征识别	195
10.1 碳边际减排成本曲线特征识别的函数型数据分析模型	195
10.1.1 离散的碳边际减排成本数据的函数化	197
10.1.2 函数型数据的主成分分析和聚类分析	199
10.1.3 函数型数据的线性回归分析	202
10.2 碳边际减排成本曲线特征识别的数据处理	203
10.2.1 影子价格与碳边际减排成本	203
10.2.2 企业和行业碳边际减排成本曲线的构建	204
10.2.3 碳边际减排成本曲线数据的获取和函数化	204
10.2.4 初始碳边际减排成本曲线数据的函数化	211
10.3 中国工业行业碳边际减排成本曲线特征分析	213
10.3.1 主成分分析	213
10.3.2 聚类分析	217
10.3.3 回归分析	222
10.4 本章小结	225
第 11 章 碳中和目标下中国碳减排绩效展望	227
11.1 碳中和目标下碳减排绩效提升的机遇	227
11.2 碳中和目标下碳减排绩效提升的挑战	231
11.3 提升中国碳减排绩效的对策建议	234
11.4 碳减排绩效管理的中国智慧力量与方案	235
参考文献	240
后记	249

第 1 章 绪 论

全球工业化进程持续推进，以化石能源为主体的能源消费规模不断扩张，由此带来的二氧化碳(CO₂)排放压力日益严峻。气候变化已从潜在的长期风险，演变为当下最紧迫的全球性挑战之一。加速绿色低碳转型、实现碳达峰碳中和，正在从国际社会的理念共识转化为各国的战略行动。作为能源消费与碳排放规模位居前列的国家，中国的能源结构调整、碳排放强度与总量双控，以及碳减排绩效的提升，不仅深刻影响本国高质量发展的实现路径，也在全球气候治理格局中发挥着不可替代的作用。系统把握全球与中国碳排放的现状格局与动态特征，深入理解中国碳减排政策的演变路径，科学评估区域、行业及企业层面的碳减排绩效，对于深化气候治理认知、优化低碳政策设计、推动减排目标落地见效，具有重要的理论价值与现实意义。

本章回答的科学问题包括：

- (1) 全球及中国的能源消费、碳排放呈现怎样的趋势与格局？
- (2) 中国的碳减排政策体系经历了怎样的演变过程？
- (3) 开展碳减排绩效评估的意义是什么？

1.1 全球气候变化和 CO₂ 排放

本节首先探讨了全球气候挑战现状以及一系列应对措施，然后分析了 2000 年以来全球一次能源消费量及结构、能源相关 CO₂ 排放量，最后探讨了中国一次能源消费量和能源相关 CO₂ 排放量在全球的占比情况。在分类标准方面，能源种类包含煤炭、石油、天然气、水电、核能和可再生能源六大类。相关数据来源于国际能源署(IEA)、英国石油公司(BP)和英国能源学会(EI)，其中 2000~2023 年的全球能源相关 CO₂ 排放量数据来自 IEA；2000~2021 年的全球一次能源消费量、全球各地区一次能源消费量和全球各地区能源相关 CO₂ 排放量等数据来自 BP；2022~2023 年的全球一次能源消费量、全球各地区一次能源消费量和全球各地区能源相关 CO₂ 排放量等数据来自 EI。

(1) 气候变化成为最紧迫的全球问题之一，各主要国家均在推进碳中和相关政策。

全球气候变化正导致冰川加速消融、海平面上升和极端气候事件增加，这些现象对人类生活、社会经济和生态环境构成了严峻挑战，全球气候变化已然成为 21 世纪最为紧迫的全球性问题之一。根据联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)

报告,过去 50 年间全球地表气温显著上升,超过 90%的可信度表明是由人类活动产生的温室气体(尤其是 CO₂)排放引起的,而化石燃料的广泛使用则是这些温室气体的主要来源(IPCC, 2024)。因此,为了有效减缓气候变化进程,全球范围内的紧密协调与合作至关重要,有必要通过政策、技术和国际合作等多方面措施,逐步降低全球 CO₂ 排放量。

为应对减排行动的不可回避性,一系列应对气候变化的目标陆续被提出。2015 年 12 月,全球 196 个缔约方在法国巴黎举行的《联合国气候变化框架公约》第 21 届缔约方大会(COP21)上通过《巴黎协定》,标志着全球气候治理进入目标量化与制度约束的新阶段,其提出的长期目标是将全球平均气温较工业化前时期上升幅度控制在 2 摄氏度以内,并努力将温度上升幅度限制在 1.5 摄氏度以内。在全球气候治理的框架下,各国积极响应《巴黎协定》号召,纷纷设定了各自的温控目标。《2024 全球碳中和年度进展报告》显示,截至 2024 年 5 月,全球已有 151 个国家提出碳中和目标,其中 120 个国家以法律或政策文件形式确立了目标的法律地位。这一系列目标的提出不仅是应对气候变化的重大举措,也是推动全球能源结构重整、产业结构优化及经济模式深刻变革的宝贵契机。然而,全球气候治理之路并非坦途,各国在推进碳中和目标的过程中,正面临着日益加剧的策略博弈。深刻洞察并有效应对这些挑战,对于全球携手减缓气候变化、守护地球家园至关重要。

(2)2023 年全球一次能源消费量达 211.6 亿吨标准煤,能源相关 CO₂ 排放达 347 亿吨的历史峰值。

2000 年以来,全球一次能源消费量持续攀升,对应的一次能源消费结构长期以煤炭、石油和天然气为主(图 1-1)。全球一次能源消费量从 2000 年的 135.5 亿吨标准煤增长至 2023 年的 211.6 亿吨标准煤,复合年均增长率 1.96%。其中,2023 年全球一次能源消费量创下历史新高,同比增加 2.6%,高于 2000~2023 年 1.96% 的复合年均增长率。在一次能源消费的组成中,煤炭、石油、天然气、水力和可再生能源的消费量均呈上升趋势,煤炭、石油、天然气的占比之和一直维持在 81.5% 以上。具体来看,2000~2023 年,全球石油消费量从 52.7 亿吨标准煤增长至 67.1 亿吨标准煤,复合年均增长率为 1.1%,其在全球一次能源消费中的占比从 38.9% 小幅下降至 31.7%;全球煤炭消费量从 33.7 亿吨标准煤增长至 56.0 亿吨标准煤,复合年均增长率为 2.2%,其在全球一次能源消费中的占比始终保持在 24.9% 以上;与此同时,天然气的消费量呈现稳定增长,从 29.5 亿吨标准煤增加至 49.3 亿吨标准煤,复合年均增长率为 2.3%,其占比在此期间从 21.8% 略微上升至 23.3%。相比之下,水电、核能和可再生能源的消费量在一次能源消费量中的占比较小,三者合计的消费量同期从 19.6 亿吨标准煤增长至 39.2 亿吨标准煤,复合年均增长率为 3.1%。到 2023 年,这三类能源的总占比增至 18.5%。

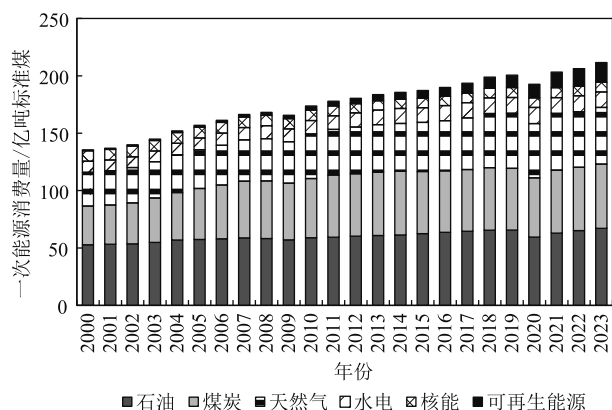
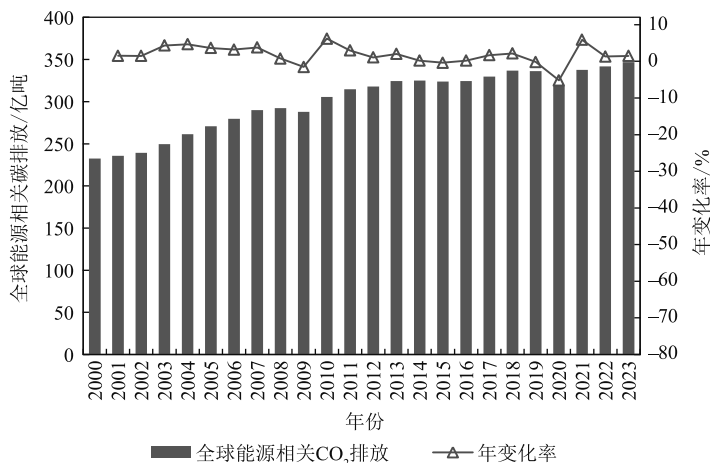


图 1-1 全球 2000~2023 年一次能源消费结构

数据来源: BP Statistical Review of World Energy(2001~2022); Statistical Review of World Energy(2023~2024)

2000~2023 年,全球能源相关 CO₂ 排放量总体呈现上升趋势(图 1-2)。2000~2023 年,全球能源相关 CO₂ 排放量从 232 亿吨增长至 347 亿吨历史峰值,复合年均增长率 1.77%。这一时期,全球能源相关 CO₂ 排放量先后经历了三次降低。第一次降低发生在 2009 年,受全球经济危机及各国加大可再生能源投资的影响,该年全球能源相关 CO₂ 排放量(287.8 亿吨)较 2008 年下降了 1.6%。第二次降低发生在 2015 年(323.7 亿吨),年下降率较小,仅为 0.4%。第三次降低出现在 2019 年(336.3 亿吨)和 2020 年(318.8 亿吨),新冠疫情导致全球经济活动显著减少,直接导致了能源需求的降低,进而减少了 CO₂ 排放量。在这两年中,全球能源相关 CO₂ 排放量出现了连年下降,2019 年下降率为 0.2%,2020 年下降率急剧上升至 5.2%,创下了 2000 年以来的最大降幅。

图 1-2 全球 2000~2023 年能源相关 CO₂ 排放量

数据来源: CO₂ Emissions from Fuel Combustion in World

全球一次能源消费量和能源相关 CO₂ 排放量的趋势表明,尽管全球经济增长的可持续性面临质疑,能源需求的增长势头依然强劲,碳排放压力将会持续加剧。在此背

景下,全球能源结构的调整与加速绿色转型,将成为未来应对气候变化挑战的关键路径。

(3)2023 年中国一次能源消费量和能源相关 CO₂ 排放量在全球占比达 27.6%和 31.9%。

2000~2023 年,中国一次能源消费量在全球占比呈显著上升趋势(图 1-3)。2000~2023 年,经济相对发达的欧洲和北美地区的一次能源消费量在全球占比均呈明显下降趋势,分别从 22.2%和 28.9%下降至 12.6%和 18.8%,分别下降 9.6 个百分点和 10.1 个百分点。而中国和亚太地区(不包括中国)由于仍处于工业化和城市化进程中,一次能源消费量在全球占比呈现上升态势。具体来看,作为全球重要的能源消费国,2000~2023 年,中国一次能源消费全球占比从 10.7%升至 27.6%,累计增长 16.9 个百分点。这一增长呈现明显阶段性特征:2001 年加入世贸组织后,国内经济高速发展与工业化加速推动能源需求激增,占比快速攀升,2009 年已达 20.2%,较 2000 年提高 9.5 个百分点;2009 年后增速显著放缓,至 2023 年仅再增 7.4 个百分点。与此同时,亚太地区(不包括中国)一次能源消费量在全球占比增长较慢,从 2000 年的 17.7%上升至 2023 年的 19.5%,增长 1.8 个百分点。其他地区一次能源消费量在全球占比在 2000~2023 年略微上升,从 20.5%增至 21.5%,增长 1 个百分点。

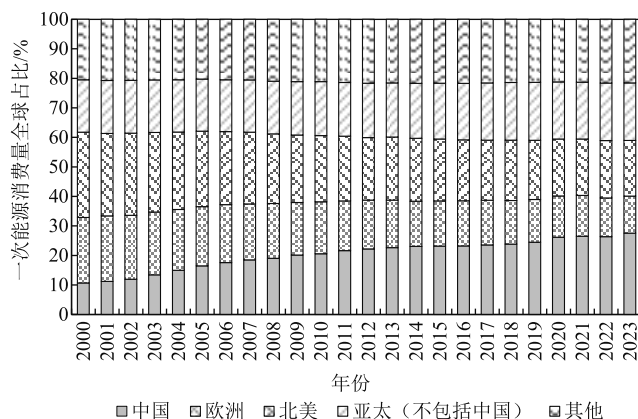
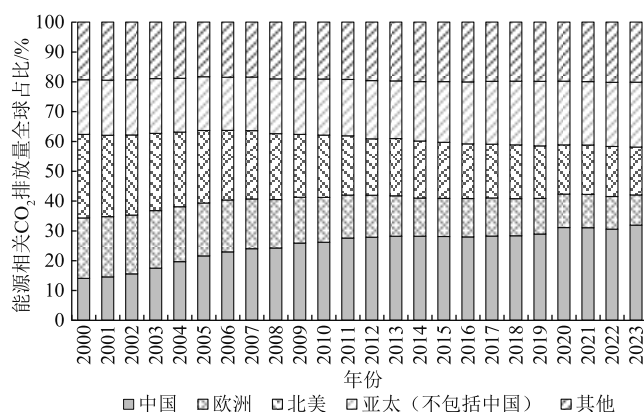


图 1-3 2000~2023 年全球各地区一次能源消费量占比

数据来源: BP Statistical Review of World Energy(2001~2022); Statistical Review of World Energy(2023~2024)

2000~2023 年,中国能源相关 CO₂ 排放量在全球占比保持增长态势(图 1-4)。与全球各地区一次能源消费量占比变化趋势相似,欧洲和北美地区 2000~2023 年的能源相关 CO₂ 排放量在全球占比呈下降趋势,分别从 20.3%和 28.0%下降至 10.1%和 16.1%,分别下降 10.2 个百分点和 11.9 个百分点。受工业化和经济增长影响,中国和亚太地区(不包括中国)2000~2023 年的能源相关 CO₂ 排放量在全球占比明显上升,分别从 14.1%和 18.3%上升至 31.9%和 21.7%,分别上升 17.8 个百分点和 3.4 个百分点。其他地区 2000~2023 年的能源相关 CO₂ 排放量在全球占比变动不大,在 18.3%~20.2%范围内波动。

图 1-4 2000~2023 年全球各地区能源相关 CO₂ 排放占比

数据来源：BP Statistical Review of World Energy(2001~2022)；Statistical Review of World Energy(2023~2024)

1.2 中国一次能源消费和能源相关 CO₂ 排放趋势

本节分析了 2000~2023 年中国一次能源消费量、能源相关 CO₂ 排放量和一次能源消费结构的变化趋势。其中，能源种类包含煤炭、石油、天然气、水电、核能和可再生能源六大类。2000~2021 年中国一次能源消费量、一次能源消费结构数据来自 BP；2000~2022 年中国能源相关 CO₂ 排放量数据来自 IEA；2022~2023 年中国一次能源消费量和一次能源消费结构、2023 年中国能源相关 CO₂ 排放量数据来自 BP；2000~2023 年中国国内生产总值和国内生产总值指数数据来自《中国统计年鉴》。

(1) 2000~2023 年中国一次能源消费量和能源相关 CO₂ 排放量持续增长，复合年均增长率分别为 6.1%和 5.8%。

2000~2023 年中国一次能源消费量持续增长(图 1-5)。自 2000 年以来，中国一次

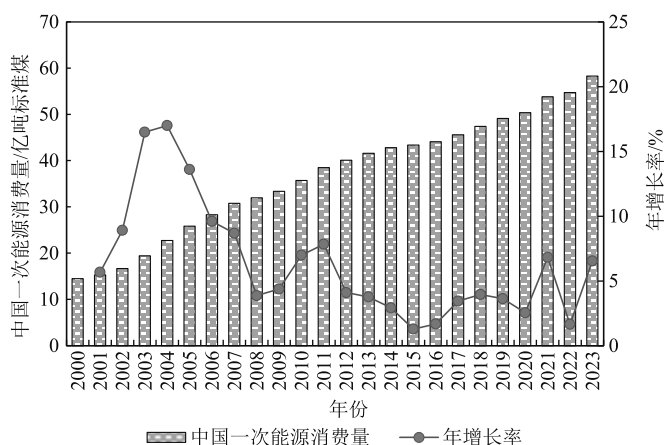


图 1-5 中国 2000~2023 年一次能源消费总量

数据来源：BP Statistical Review of World Energy(2001~2022)；Statistical Review of World Energy(2023~2024)

能源消费量从 2000 年的 14.5 亿吨标准煤增加至 2023 年的 57.2 亿吨标准煤，复合年均增长率为 6.1%。其中，2000~2019 年，中国一次能源消费量的年增长率总体呈先增后降的趋势。具体来看，2000~2004 年，中国一次能源消费量从 14.5 亿吨标准煤增长至 22.7 亿吨标准煤，复合年均增长率为 11.9%；2005~2019 年，中国一次能源消费量从 25.8 亿吨标准煤增长至 49.1 亿吨标准煤，复合年均增长率为 4.7%，较上一阶段有所降低；2020~2023 年，中国一次能源消费量年增长率波动较大，但一次能源消费量仍然稳步增长，从 2020 年的 50.4 亿吨标准煤增长至 2023 年的 57.2 亿吨标准煤，复合年均增长率为 4.3%，较上一阶段再次小幅下降。

2000 年以来，中国能源相关 CO₂ 排放量也呈现出持续上升的趋势(图 1-6)。2000~2023 年，中国能源相关 CO₂ 排放量从 30.8 亿吨增长至 112.2 亿吨，复合年均增长率为 5.8%，年最大增长率出现在 2004 年，达 16.5%。自 2020 年中国首次提出碳中和目标后，受新冠疫情的影响，能源相关 CO₂ 排放量增速有所减缓，2020~2023 年的复合年均增长率为 3.9%。尽管当前能源相关 CO₂ 排放量仍然处于较高水平，但随着绿色技术的不断进步、清洁能源的日益普及以及产业结构的持续优化，中国的 CO₂ 排放增速已逐渐放缓，经济发展逐步呈现出向绿色低碳转型的态势。

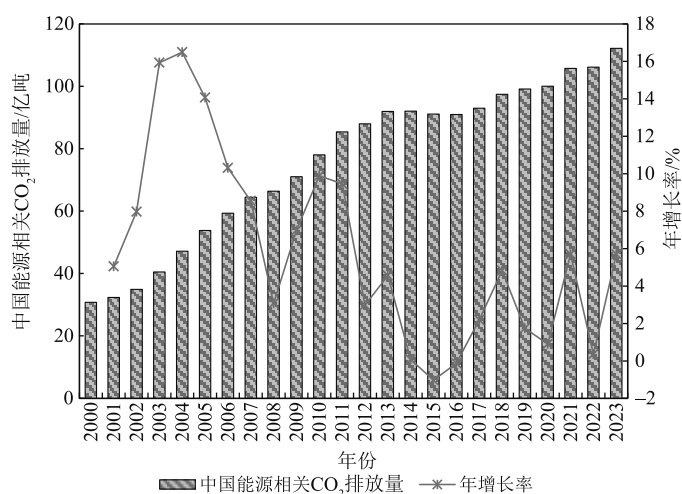


图 1-6 中国 2000~2023 年能源相关 CO₂ 排放量

数据来源：CO₂ Emissions from Fuel Combustion in World; Statistical Review of World Energy (2023~2024)

(2) 2000 年以来中国一次能源消费结构不断优化，清洁能源消费量比重在 2023 年上升至 18.4%。

长期以来，受资源禀赋的影响，中国的一次能源消费结构以煤炭为主导(图 1-7)，而煤炭的高含碳特性直接导致了较高的 CO₂ 排放水平。近年来，中国在应对气候变化方面采取了积极行动，煤炭在中国一次能源消费量中的比重已呈现出下降

趋势,而对环境造成污染和损害相对较小的清洁能源(水电、核能、风光等可再生能源)的比重逐渐上升。2000~2023年,煤炭消费量在中国一次能源消费量中的比重呈先升后降的趋势,其中2000~2007年的比重呈缓慢上升趋势,2008~2023年的比重逐渐下降。到2023年,煤炭消费量占中国一次能源消费量的53.9%,较2000年下降了15.7个百分点;石油消费量占中国一次能源消费量的19.2%,较2000年下降了3.1个百分点;天然气消费量在中国一次能源消费量中的占比略微上升,2023年占比为8.5%,较2000年增加了6.4个百分点;清洁能源消费量在中国一次能源消费量中的占比升幅最大,2023年占比达18.4%,较2000年上升了12.4个百分点。这一变化清晰地反映出,中国正逐步减少对煤炭的依赖,能源消费结构正朝着更加清洁、低碳的方向转型。清洁能源的发展不仅有助于改善能源消费结构,减少对化石能源的依赖,更是应对气候变化的关键措施。清洁能源使用的增加,有效降低了中国温室气体排放的增速,改善了空气质量,并为经济社会的可持续发展提供了有力支撑。

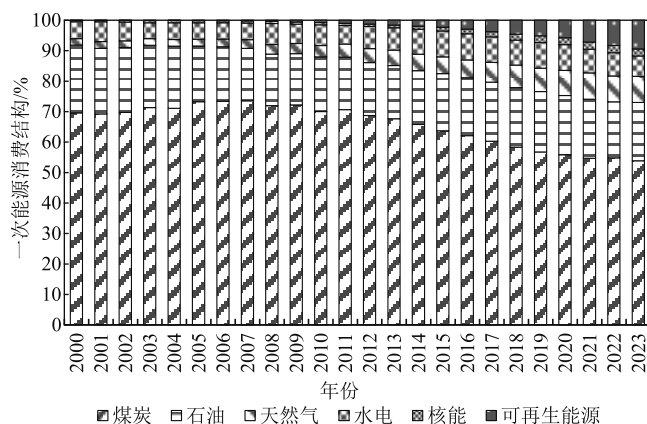


图 1-7 中国 2000~2023 年一次能源消费结构

数据来源: BP Statistical Review of World Energy(2001~2022); Statistical Review of World Energy(2023~2024)

(3)2000~2023 年中国一次能源消费强度总体呈下降趋势,复合年均下降率1.9%。

2000年以来,中国一次能源消费强度(单位GDP的一次能源消费量)呈现先升后降趋势(图1-8)。2000~2023年,中国一次能源消费强度从1.43吨标准煤/万元下降至0.92吨标准煤/万元,复合年均下降率1.9%。具体来看,中国一次能源消费强度在2000~2023年的变化可以分为先上升(2000~2005年)后下降(2006~2023年)两个阶段。2000~2005年,受国内制造业和重工业快速发展的影响,中国一次能源消费强度从1.43吨标准煤/万元上升至1.60吨标准煤/万元,复合年均增长率2.3%。这一时期,中国一次能源消费强度的年增长率快速上升,2004年达到最大年增长率6.3%后开始下降。2006~2023年,随着中国节能减排政策的深入实

施，能源利用效率显著提升，中国一次能源消费强度呈下降趋势，从 1.55 吨标准煤/万元下降至 0.92 吨标准煤/万元，复合年均下降率 3.0%。

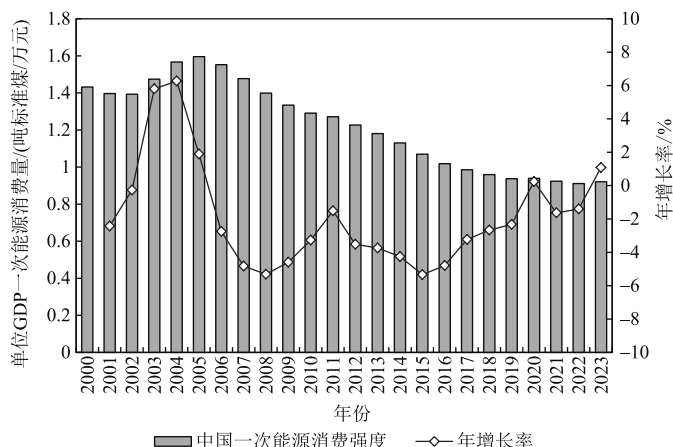


图 1-8 中国 2000~2023 年万元不变价能源消费量(以 2000 年为基准)

数据来源：BP Statistical Review of World Energy(2001~2022)；Statistical Review of World Energy(2023~2024)；
《中国统计年鉴 2024》

1.3 中国碳减排政策的发展历程

本节以中国碳中和目标提出的时间为节点，基于官方发布的政策文件，按照时间顺序梳理了近年来中国碳减排相关政策的演变趋势。

(1) 碳中和目标提出前(2006~2019 年)：初步探索与政策框架建立。

在国际方面，2009 年哥本哈根气候变化峰会是全球气候治理的重要节点，在该峰会上，中国首次提出：到 2020 年，中国单位国内生产总值二氧化碳排放将比 2005 年的水平降低 40%~45%。2015 年在巴黎举行的联合国气候变化大会上，中国政府通过“国家自主贡献”计划，就减缓气候变化进一步做出了三项承诺：一是二氧化碳排放 2030 年左右达到峰值并争取尽早达峰；二是单位国内生产总值二氧化碳排放比 2005 年下降 60%~65%；三是非化石能源占一次能源消费比重达到 20% 左右。这些承诺标志着中国在全球气候治理中的角色逐步增强，对国际社会应对气候变化产生了积极影响。

在国内方面，2006 年通过的《中华人民共和国国民经济和社会发展第十一个五年规划纲要》提出，“十一五”时期要努力实现单位国内生产总值能源消耗降低 20% 左右，以及主要污染物排放总量减少 10%。这一目标设定，体现了中国政府应对经济增长过程中能源消耗与环境污染问题的政策努力，标志着中国开始系统探索经济、能源与环境之间的协调发展路径。到 2007 年，国务院正式发布了中国首部应对气候变化的全面政策性国家文件《中国应对气候变化国家方案》，标志着中国

在应对气候变化领域迈出了重要一步。该方案是中国首个全面阐述应对气候变化的立场、目标、政策措施及行动安排的综合性文件，为后续开展碳减排工作奠定了政策基础，提供了指导方针和行动框架。在 2011 年发布的《中华人民共和国国民经济和社会发展第十二个五年规划纲要》中，中国进一步细化了节能减排的具体目标：到 2015 年，相较于 2010 年水平，单位国内生产总值能源消耗降低 16%，单位国内生产总值二氧化碳排放降低 17%。主要污染物排放总量显著减少。在 2016 年发布的《中华人民共和国国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要》（以下简称“十三五”规划）中，中国又设定了新的节能减排目标：到 2020 年，相较于 2015 年水平，单位 GDP 能源消耗降低 15%，主要污染物排放总量减少 10%~15%，同时，单位 GDP 二氧化碳排放降低 18%。这些目标的设定考虑了经济发展水平、产业结构特征、能源消耗结构以及地理分布等因素的差异，并在全国各省（区、市）进行了分解与落实。这一阶段的政策探索，为中国碳中和目标的提出提供了实践基础。

(2) 碳中和目标提出后(2020 年以来)：深化政策与全面系统实施。

为应对气候变化及履行《巴黎协定》承诺，中国在 2020 年 9 月明确提出力争于 2030 年前达到二氧化碳排放峰值、2060 年前实现碳中和的目标，并同步启动一系列与此目标相适应的政策措施。此后，中国围绕“双碳”目标，逐步构建起“1+N”政策体系，出台了一系列国家级、行业级和地方级的碳减排政策。2021 年，《中共中央 国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》发布，其作为“1+N”政策体系中代表“1”的纲领性文件，明确了碳达峰碳中和工作的指导思想、工作原则、主要目标和重点任务，为后续各个行业、各个领域出台具体行动方案(即“N”)提供了政策依据。随后，国务院印发了《2030 年前碳达峰行动方案》，这是碳达峰阶段的总体部署，是“N”中为首的政策文件，其聚焦“十四五”和“十五五”两个碳达峰关键期，提出了提高非化石能源消费比重、提升能源利用效率、降低二氧化碳排放水平等方面的主要目标。

2022 年，生态环境部等 17 个部门联合印发了《国家适应气候变化战略 2035》，在深入分析气候变化影响风险和适应气候变化机遇挑战的基础上，对中国当时至 2035 年适应气候变化工作作出系统规划。同年，国务院印发了《“十四五”节能减排综合工作方案》，明确指出，到 2025 年，全国单位国内生产总值能源消耗比 2020 年下降 13.5%，能源消费总量得到合理控制，化学需氧量、氨氮、氮氧化物、挥发性有机物排放总量比 2020 年分别下降 8%、8%、10%以上、10%以上。节能减排政策机制进一步明确，重点行业能源利用效率和主要污染物排放控制水平基本达到国际先进水平，经济社会发展绿色转型持续推进。同时，作为配套措施，生态环境部等 7 部门联合印发了《减污降碳协同增效实施方案》，首次将应对气候变化与环境污染治理统筹推进。

2023 年，生态环境部发布了《中国应对气候变化的政策与行动 2023 年度报告》，

报告中明确提出要坚持把绿色低碳发展作为解决生态环境问题的重要路径,加快推动产业结构、能源结构、交通运输结构等调整优化。发展绿色低碳产业,健全资源环境要素市场化配置体系,加快节能降碳先进技术研发和推广应用,倡导绿色消费,推动形成绿色低碳的生产方式和生活方式。报告特别指出,要完善和落实碳达峰碳中和“1+N”政策体系。制定出台能源、工业、城乡建设、交通运输、减污降碳等重点领域碳达峰实施方案,有色金属、建材等重点行业碳达峰实施方案以及财政支持、统计核算、科技、教育、标准等支撑保障方案。为实现上述节能减排的量化目标,中国政府已出台并实施了一系列相关政策和措施,包括优化产业结构、提高能源利用效率、发展可再生能源、实施成品油税费改革、加快资源税和环境税改革等多个方面。具体而言,政府旨在通过优化产业结构,减少高耗能、高排放行业的比重;通过提高能源利用效率,降低单位产出的能源消耗;通过发展可再生能源,减少对化石能源的依赖;通过实施税费改革,利用经济手段引导企业和个人节能减排;以及通过加快资源税和环境税改革,进一步强化对资源节约和环境保护的激励与约束。这些综合措施共同构成了中国应对气候变化、推动碳减排和能源节约的政策框架。

2025 年,国家主席习近平在联合国气候变化峰会上宣布中国新一轮国家自主贡献目标:到 2035 年,中国全经济范围温室气体净排放量比峰值下降 7%~10%,力争做得更好。非化石能源消费占能源消费总量的比重达到 30%以上,风电和太阳能发电总装机容量达到 2020 年的 6 倍以上、力争达到 36 亿千瓦,森林蓄积量达到 240 亿立方米以上,新能源汽车成为新销售车辆的主流,全国碳排放权交易市场覆盖主要高排放行业,气候适应型社会基本建成。新一轮国家自主贡献目标引起国际社会关注。

1.4 碳减排绩效评估的必要性

碳减排绩效是衡量排放主体在特定约束下完成碳减排目标的程度与相应付出的成本代价的综合性指标。碳减排目标的制定和达成会对相应的减排与节能活动以及经济与社会发展等方面产生影响,碳减排绩效的评估便是对这个影响的评估,评估结果可以进一步指导碳减排政策措施的制定和完善。具体来说,碳减排绩效指标的设定使得排放主体对其应对气候变化做出的努力和达成效果得以量化,碳减排绩效指标的测度反映了排放主体的低碳发展水平,而关注碳减排绩效的目的是在完成碳减排目标的前提下持续降低减排的代价和造成的影响,不断提升减排的效果和有效性。制定碳减排任务目标、实施碳减排政策措施、进行碳减排绩效评估并提升碳减排绩效是一个持续迭代、循环提升的过程(图 1-9),碳减排绩效评估是这个过程中的基础环节,为有效控制和减少碳排放提供科学支撑。