

第 1 章 全球气候变化与碳市场背景

章节学习目标

知识目标

理解全球气候变化的科学基础、关键术语(温室效应、辐射强迫、CO₂e、GWP、净零等)与主要政策框架(《巴黎协定》、NDC、全球盘点)。

能力目标

能基于公开数据完成一次“气候—能源—碳市场”三维度的背景研判,提炼与本专业、本地区相关的发展驱动力;能阅读并解读一份碳市场政策文件。

素养目标

形成“以证据为基础、以标准为依据、以市场促减排”的职业意识,理解 MRV 与信息披露的价值。

章节导入情境

从极端事件到制度响应

工业革命前(约 1750 年),大气中的 CO₂ 浓度约 503mg/m³,而 2023 年已超过 756mg/m³,据英国气象局报道,2024 年全球大气中的 CO₂ 平均浓度为 766mg/m³,增速创 1958 年有监测数据以来的最高值。2024 年全球平均气温较工业化前水平升高(1.55±0.13)°C,成为有记录以来最暖年份,全球气温升幅首次突破《巴黎协定》设定的 1.5°C 温控目标。

极端高温、暴雨与干旱事件频发,已成为世界各国共同关注的焦点。随着全球平均气温较工业化前上升幅度超过 1°C,气候风险呈非线性跃迁态势。热浪叠加城市热岛效应,洪涝叠加基础设施老化等复合型灾害,供应链更易遭遇“气候中断”。面对气候系统的不确定性,各国通过更新国家自主贡献(NDC)与制定长期减排战略,推进深度脱碳。

制度层面,碳市场以“总量控制+交易”的方式,将碳排放权转化为稀缺资源,借助价格信号驱动能效提升与绿色技术推广,成为“成本—效果”兼顾的重要政策工具。本模块围绕“科学—政策—市场”三大主线展开。

1.1 气候科学基础

1.1.1 温室效应与辐射平衡

温室效应是指地球大气中的温室气体(如 CO₂、CH₄、N₂O、水汽等)对地球表面辐射能

量的吸收与再辐射过程。太阳辐射以短波形式进入地球大气层,大部分被地表吸收并转化为热量,然后以长波辐射的形式向外释放。温室气体能够吸收部分长波辐射,并将其重新辐射回地表,从而起到“保温”的作用,使地球维持适宜的温度。辐射平衡是指地球系统在长期平均状态下,从太阳获得的入射短波辐射能量,与地球向外释放的长波红外辐射能量相等的状态。在这种平衡下,地球气候保持相对稳定。如果入射能量大于出射能量,地球将逐渐变暖;反之,则会逐渐变冷。

1. 自然温室效应

自然温室效应是地球大气系统中至关重要的现象,它使地球表面温度维持在适合生命存续的水平。自然温室效应对地球至关重要。如果没有这一机制,地球的平均气温将下降至约 -18°C ,大部分地区将不适合生命生存。而正是由于自然温室效应的存在,地球表面平均温度得以稳定在 15°C 左右,为动植物和人类的繁衍提供了良好的环境。然而,自然温室效应是一把“双刃剑”。当温室气体浓度过度增加时,这一效应会被显著增强,导致地球表面吸收更多热量,从而引发全球变暖及一系列环境问题。因此,准确理解和区分“自然温室效应”和“人为增强温室效应”对于气候科学研究、气候政策制定及全球气候治理具有重要意义。

2. 人为增强的温室效应

自工业革命以来,人类活动显著增加了大气中温室气体的浓度。化石燃料(如煤碳、石油、天然气等)燃烧排放了大量 CO_2 、森林砍伐和土地利用变化减少了碳汇能力、畜牧业、垃圾填埋场排放 CH_4 、化肥使用增加氧化亚氮排放,这些活动使温室气体浓度不断升高,增强了温室效应,导致更多长波辐射滞留在大气中,引发全球变暖。

3. 主要温室气体及特征

(1) 二氧化碳(CO_2)是人类活动排放量最大、对全球变暖贡献最显著的温室气体。其主要来源包括化石燃料燃烧、森林砍伐和水泥生产等。 CO_2 在大气中的寿命可达数十年至上百年,因而具有长期积累效应,对全球气候系统产生持久影响。因此,降低 CO_2 排放是全球应对气候变化的核心任务。

(2) 甲烷(CH_4)的单位质量温室效应增强能力约为 CO_2 的28倍(以100年时间尺度计算)。其主要来源包括农业(如稻田种植、牲畜反刍)、垃圾填埋场、化石燃料开采与运输过程中的泄漏。 CH_4 在大气中的寿命相对较短,大约12年,但其强效的增温潜能使其在近几十年内的气候变化中占有重要地位。因此,减少 CH_4 排放被认为是实现短期快速降温的有效途径。

(3) 氧化亚氮(N_2O)的温室效应约为 CO_2 的265倍,是一种强效温室气体。其主要来源为农业活动中的化肥使用、畜禽粪便管理,以及部分工业生产过程(如硝酸与己二酸的生产)。 N_2O 不仅对气候系统造成严重影响,还会破坏平流层臭氧层,加剧紫外线辐射对人类健康和生态系统的威胁。因此,控制 N_2O 排放是农业和工业减排的重点方向。

(4) 水汽是大气中最丰富的温室气体,但其浓度主要受蒸发、降水等自然过程影响。水汽本身并不是人为大量直接排放的温室气体,但它在气候系统中起到重要的正反馈作用。随着气温升高,蒸发量增加,空气中水汽浓度上升,从而增强温室效应,加剧全球变暖。水汽的这种反馈效应放大了其他温室气体的增温作用,是全球气候变化中不可忽视的因素。

4. 温室效应的双重作用

(1) 温室效应的积极作用。温室气体能够吸收和再辐射地球表面释放的长波辐射,使地表保持约 15℃ 的平均温度。适度的温室效应维持了全球气候系统的稳定性,保证了蒸发、降水、冰雪融化等自然水循环过程,从而支撑陆地与海洋生态系统。CO₂ 是光合作用的必要原料,在合理范围内增加 CO₂ 浓度可以促进植物生长,提高农作物产量,对保障人类粮食安全有一定的正面作用。同时,大气中适度的能量收支平衡使大气环流、洋流等自然过程稳定运行,形成季风、洋流等典型气候与海洋现象,推动全球物质和能量循环。

(2) 温室效应的消极作用。人类活动导致温室气体过量排放,使原本适宜的温室效应被显著增强,引发全球气候变暖,极端气候事件频发。强降雨、干旱、热浪、飓风等极端天气事件发生频率与强度增加,严重威胁人类生命财产安全。极地和高山冰川加速消融,导致全球海平面持续上升,威胁沿海低洼地区的生存环境。过强的温室效应破坏了生态平衡,不仅引发物种迁徙、灭绝和生态系统退化,危及生物多样性,更会诱发农业减产、能源需求增加、基础设施受损,以及气候移民等连锁问题,对全球经济社会的可持续发展构成严峻挑战。

1.1.2 关键指标

在气候变化研究与温室气体核算中,不同气体的物理化学性质存在差异,对气候系统的作用机制也各不相同。为了实现不同气体气候影响的可比性、建立统一的衡量标准,科学界引入了二氧化碳当量(CO₂e)和全球增温潜势(GWP)两大核心指标。

1. 二氧化碳当量(CO₂e)

二氧化碳当量(CO₂e)是指将某种温室气体的排放量按照其对全球变暖的贡献,折算为等量二氧化碳的排放量。由于不同温室气体的温室效应能力差异显著,例如甲烷(CH₄)的温室效应约为 CO₂ 的 28 倍,而氧化亚氮(N₂O)的效应则约为 CO₂ 的 265 倍,因此直接比较其排放量并不能反映对气候系统的真实影响。通过折算为 CO₂e,可以实现不同温室气体间的统一度量。

CO₂e 的计算通常基于全球增温潜势(global warming potential,GWP)指标。GWP 衡量的是在特定时间尺度内,单位质量的某种温室气体对全球变暖的贡献与二氧化碳相比的相对值。例如,排放 1t CH₄ 相当于排放 28t CO₂ 的气候效应。

采用 CO₂e 作为统一计量单位具有重要意义。一方面,它为国际气候谈判和政策制定提供了共同的衡量标准,便于设定减排目标与比较各国的减排行动。另一方面,在企业碳核算、碳足迹评价和碳市场交易中,CO₂e 成为普遍使用的核心量化指标,帮助企业 and 组织量化其碳排放责任,推动低碳转型。

此外,CO₂e 还在产品全生命周期评价(LCA)、项目碳减排评估以及绿色金融等领域广泛应用。通过对不同环节和不同类型温室气体的折算与汇总,CO₂e 能够清晰反映某项活动或产品的整体气候影响。

总之,CO₂e 的提出与应用,有助于在科学研究、政策制定和市场实践中实现温室气体排放的标准化与可比性,是全球气候治理体系中的基础性工具。

2. 全球增温潜势(GWP)

全球增温潜势是衡量某种温室气体在特定时间范围内(通常为 20 年、100 年或 500 年),

相对于 CO₂ 的增温效应的一种指标。它为不同温室气体的气候影响提供了统一的比较尺度。在计算方法上, GWP 综合考虑了两方面因素: 一是温室气体对红外辐射的吸收能力, 即其温室效应强度; 二是温室气体在大气中的寿命, 即其在大气中滞留的时间。一个温室气体的 GWP 数值越高, 意味着它在相同质量下对全球变暖的影响越大。

最常用的时间尺度是 100 年 (GWP100), 这一标准在政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 的评估报告和国际气候谈判中被广泛采用。以 GWP100 为例:

$$\text{GWP}(\text{CO}_2) = 1 (\text{作为基准值})$$

$$\text{GWP}(\text{CH}_4) \approx 28$$

$$\text{GWP}(\text{N}_2\text{O}) \approx 265$$

$$\text{GWP}(\text{SF}_6) \approx 23900$$

不同时间尺度下, GWP 数值可能存在显著差异。例如, 在 20 年尺度下, CH₄ 的 GWP 值超过 80, 远高于其在 100 年尺度下的值。这反映了 CH₄ 虽然寿命较短, 但在短期内具有极强的增温效应。因此, 在短期气候治理和减排策略中, 减少 CH₄ 排放具有重要意义。

GWP 的应用十分广泛。在碳核算、碳足迹评价、碳市场交易以及气候政策制定中, 通常将各类温室气体的排放量通过其 GWP 数值折算为 CO₂e, 以便进行统一统计和比较。这不仅为国际合作和谈判提供了科学依据, 也为企业和组织制定低碳战略、开展绿色转型提供了量化工具。

3. GWP 的一致性与版本选择

IPCC 历次评估报告会更新 GWP 数值, 随着科学研究的推进, 不同气体的吸收特性和大气寿命估算更为精确。在碳核算、碳交易和国际合作中, 必须明确采用 IPCC 哪一版本的 GWP 数值。例如, 《京都议定书》常用 IPCC 第二次评估报告的数值, 而《巴黎协定》则建议使用 IPCC 第五次评估报告的数据。为了保证核算和报告结果的可比性和公信力, 应在文件中注明采用的 GWP 数值对应的评估报告版本。



教学视频:
《京都议定书》
的由来及发展

1.1.3 气候模型与情景

气候模型是理解气候系统运行机制、预测未来气候变化趋势的重要工具。它基于大气、海洋、陆地和冰冻圈等多个圈层的物理和化学过程耦合, 能够对气候系统的演变进行模拟与预测。国际上, 常用的多模式比较计划 (coupled model intercomparison project, CMIP) 为气候情景分析和国际气候评估提供了重要依据。

1. 气候模型的基本原理

气候模型是一类基于数学方程的科学工具, 能够模拟和预测地球气候系统的演变。其基本原理是通过描述大气环流、海洋环流、陆面过程、冰冻圈演变, 以及碳循环等复杂过程的物理方程和动力学方程, 对气候系统进行计算机仿真。这些模型运行依赖于超级计算机的强大算力。由于气候系统涉及时间和空间上的巨大差异, 例如从几秒到几百年, 从局地现象到全球尺度, 超级计算机的高速并行计算能力使得模型能够在多尺度下进行数值模拟, 从而再现地球系统的运行状态。随着计算能力的不断提升和科学认识的进步, 现代气候模型已

经发展为地球系统模型(earth system models, ESM)。与传统气候模型仅关注大气和海洋等物理过程不同,ESM 不仅包含大气、海洋、冰冻圈和陆地表面的相互作用,还引入了生物地球化学循环。例如,碳循环、氮循环和植被动态等被纳入模型,使模拟结果更加接近真实地球系统的复杂性。地球系统模型的应用范围十分广泛,它们能够为未来气候变化情景分析提供科学依据,帮助评估不同温室气体排放路径下的气候响应。此外,ESM 还在极端气候事件预测、海平面变化模拟、生态系统演变研究以及全球碳收支评估等方面发挥重要作用。

尽管气候模型已取得巨大进展,但仍存在一些不确定性。例如,云过程和气溶胶效应的刻画尚不完善,区域气候预测的精度仍需提高。未来的发展方向是通过提升分辨率、引入更多反馈机制以及结合人工智能方法,进一步提高气候模型的精度和适用性。

2. CMIP 系列与国际合作

耦合模型比较计划(coupled model intercomparison project, CMIP)是全球气候研究计划(WCRP)下的重要国际合作项目,旨在对来自不同国家和研究机构的气候模式结果进行系统比较与评估。通过统一的实验设计和数据共享平台,CMIP 为全球气候研究提供了标准化框架。CMIP 自 20 世纪 90 年代启动以来,经历了多个发展阶段。目前最具影响力的阶段为 CMIP5 和 CMIP6。CMIP5 在 2013 年为 IPCC 第五次评估报告(AR5)提供了关键的模拟结果,而 CMIP6 则成为 2021 年 IPCC 第六次评估报告(AR6)的核心科学依据。与 CMIP5 相比,CMIP6 在分辨率、过程模拟和情景设置上都有显著改进,例如引入了更高分辨率的大气和海洋模式,以及对社会经济路径(SSPs)的考量。

CMIP 的核心意义在于通过多模式集合方法(multimodel ensemble),减少单一模式可能带来的系统性偏差和不确定性。通过对不同模式结果进行平均和比较,科学家能够获得更为稳健和可靠的气候预测结果。例如,对未来温室气体排放情景下的全球温度升高、降水分布变化、极端气候事件频率等,都可以通过集合分析来提高可信度。此外,CMIP 不仅服务于科学研究,还为政策制定和气候治理提供了坚实基础。各国政府、国际组织和研究机构都依赖 CMIP 的模拟结果来制定减缓和适应气候变化的战略。例如,《巴黎协定》的温控目标及相关政策的制定,都在很大程度上参考了 CMIP 模式集合提供的科学依据。

未来,CMIP 将继续向更高精度、更强综合性的方向发展。随着计算资源和观测数据的不断丰富,CMIP 有望进一步提升对区域气候变化的预测能力,并在极端事件模拟、碳循环反馈机制研究等方面发挥更大作用。

3. 典型排放情景

快速减排情景假设人类迅速采取强有力的减排行动,包括加快能源结构转型、大规模发展可再生能源、提升能效和推广低碳技术等措施。在这种路径下,温室气体排放将在未来数十年内显著下降。根据模型预测,全球平均气温升温有望被控制在较低水平(如 2°C 以内)。这一情景能够最大限度降低气候变化对人类社会和自然生态系统的不良影响,有助于实现《巴黎协定》提出的温控目标。但同时也对全球治理能力、技术创新速度以及国际合作提出了极高要求。

中间路径情景假设温室气体排放将在 21 世纪中叶左右达到峰值,随后逐步下降。尽管全球平均气温仍将上升,但增幅较为温和,预计维持在 2°C 左右。这种情景下,部分极端气候事件的频率和强度将有所增加,但风险相对可控。中间路径情景反映了在经济发展和减排努力之间寻求平衡的现实选择,适合那些在短期内难以完全摆脱化石能源依赖的发展中国

家。然而,该情景仍可能带来严重的区域性风险,例如干旱、洪涝和海平面上升问题。

惯性发展情景假设人类未能采取足够的减排行动,继续沿用高排放的发展模式。随着化石燃料的大规模使用和森林破坏,温室气体浓度将持续上升,全球平均气温升温可能在 21 世纪末超过 4℃。这一情景将导致极端气候事件显著增加,包括更加频繁的热浪、暴雨、飓风和干旱,以及冰川和极地冰盖快速消融、海平面大幅上升、对沿海城市和小岛国家造成严重威胁。同时,生态系统遭受严重破坏,生物多样性大幅下降,全球粮食安全和人类健康都将面临巨大挑战。惯性发展情景被视为最不可取的路径,也是国际社会亟须避免的未来。

4. 情景对未来的影响

不同排放情景将导致全球平均气温上升幅度的显著差异。在快速减排情景下,平均气温升高可被控制在 2℃ 以内,有助于减轻气候变化带来的风险;在中间路径情景中,平均气温预计在 21 世纪末上升约 2℃,尽管风险增加,但整体仍在可控范围;而在惯性发展情景下,由于温室气体排放持续增加,全球平均气温升温可能超过 4℃,这将带来严重且不可逆转的环境后果。

随着全球平均气温上升,极端气候事件的发生频率和强度将显著上升。在高排放情景下,极端高温事件更为频繁和强烈,极端暴雨事件可能造成更严重的洪涝灾害,而长期干旱的范围将扩大、持续时间也将延长。这些极端事件将直接威胁粮食生产、水资源安全和人类健康。相反,在快速减排情景下,虽然极端事件仍会发生,但其频率和强度将明显减弱,对社会和生态系统的冲击相对有限。

海平面变化是气候变化最直观且长期的影响之一。在快速减排情景下,由于全球变暖幅度有限,冰川和极地冰盖的融化速度相对减缓,海平面上升幅度可能控制在几十厘米的范围内。而在惯性发展情景下,全球气温大幅升高将导致冰盖加速消融,海水热膨胀效应加剧,到 2100 年前后,海平面上升幅度可能超过 1m。这将严重威胁沿海低洼地区、小岛国家的生态安全,以及全球数亿人口的生存与发展。

5. 不确定性与应用价值

模型不确定性来源于对自然过程的简化、参数化处理以及未来社会经济路径的未知性。尽管存在不确定性,气候模型仍是政策制定和国际气候谈判的重要科学依据。模型模拟结果广泛应用于国家适应气候变化战略制定、区域气候风险评估以及重大基础设施规划等工作中。

1.2 国际气候治理

1.2.1 《巴黎协定》的核心逻辑

1. 协定的总体框架

《巴黎协定》于 2015 年 12 月在巴黎气候大会(COP21)上通过,并于 2016 年 11 月正式生效。它是继《京都议定书》之后全球气候治理的核心法律文件,覆盖全球几乎所有缔约方。其核心逻辑在于建立一个自下而上与自上而下相结合的制度框架,推动全球逐步减排。其主要目标包括:努力将全球平均升温控制在 1.5℃ 以内,确保不超过 2℃;在 21 世纪下半叶实现温室气体净零排放;并坚持“共同但有区别的责任”,允许各国根据国情确定减排路径。

2. 国家自主贡献(NDC)制度

《巴黎协定》要求所有缔约方提交国家自主贡献(NDC)文件,阐述本国在一定时期内的减排目标与政策措施。其制度逻辑体现在:一是自下而上,各国根据自身国情自愿提出减排目标;二是逐轮强化,每五年进行一次更新与加严,形成“递进式提升机制”;三是全球盘点,通过统一的核算和报告框架,每五年开展一次全球盘点,评估各国行动总体是否符合温控目标。

3. 《巴黎协定》的约束与支持机制

不同于《京都议定书》强调“强制减排与惩罚机制”的刚性模式,《巴黎协定》采用更加灵活和包容的“自下而上”柔性约束体系。其核心机制包括资金与技术支持机制、透明度框架(enhanced transparency framework)、市场机制。资金与技术支持机制是发达国家承诺每年向发展中国家提供不少于1000亿美元的资金与技术援助,支持其减缓与适应气候变化的行动;透明度框架的目的是建立统一的温室气体排放监测、报告与核查(MRV)制度,确保各国减排数据的可比性、真实性与公开性,以增强全球气候治理的信任基础;市场机制的作用是构建国际碳市场与合作机制,通过自愿合作、碳交易和减排成果转移等方式,提高全球减排效率并促进可持续发展。

1.2.2 全球盘点(GST)与透明度框架

1. 全球盘点(GST)的核心机制

全球盘点(global stocktake, GST)是《巴黎协定》的重要创新机制,目的是每五年对全球减排进展、适应行动和资金支持情况进行全面评估。其主要作用是:一方面评估各国国家自主贡献(NDC)的落实成效;另一方面衡量全球总体努力是否与控制温升在1.5°C或2°C目标相一致。GST不仅是政策检视过程,更是推动各国加大减排力度的制度化安排。

2. GST 的实施流程

全球盘点的实施过程通常包括三个主要阶段。

(1) 信息收集与准备阶段:系统汇集各缔约方提交的温室气体排放清单、国家自主贡献(NDC)执行进展报告,以及资金与技术支持的落实情况等数据,为后续分析奠定基础。

(2) 技术评估阶段:由国际专家团队对收集的数据进行科学、系统的分析评估,形成综合技术报告,为全球减排进展提供客观依据。

(3) 政治考量与后续行动阶段:在缔约方大会(COP)上对评估结果进行政治层面的讨论,并将其作为更新和强化各国NDC目标的重要参考。该流程实现了科学评估与政治决策的有效衔接,确保了气候治理的公平性与持续改进性(见图1-1)。

3. 透明度框架的作用

增强透明度框架(enhanced transparency framework, ETF)是《巴黎协定》中确保全球盘点(GST)公正性与有效性的核心制度。该框架要求所有缔约方依据统一的规则和方法,开展温室气体的监测、报告与核查(MRV)工作。通过建立透明、可比和可验证的体系,ETF在全球气候治理中发挥了重要作用。

(1) 提升数据可比性:统一的核算标准和报告格式,使不同国家的排放数据能够在国际范围内进行横向比较与评估。

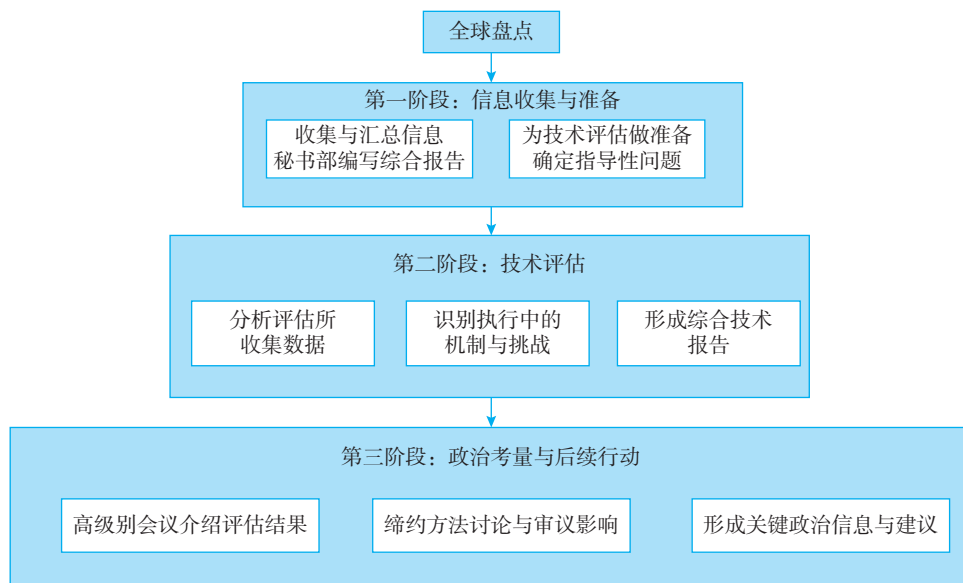


图 1-1 全球盘点(GST)实施流程图

(2) 强化信息公信力:通过第三方核查与公开报告机制,确保数据真实可靠,增强国际社会对各国履约情况的信任。

(3) 支撑政策优化:为各国制定下一轮国家自主贡献(NDC)目标提供科学依据,推动减排政策持续改进,防止“空头承诺”,促进全球气候行动的稳步推进。

1.2.3 气候资金与适应议题

1. 气候资金的核心地位

在全球气候治理框架中,气候资金被视为推动发展中国家参与气候变化减缓和适应行动的关键支柱。《巴黎协定》明确提出,发达国家有责任为发展中国家提供资金支持,以帮助其提升气候减缓与适应能力。这类资金不仅关系到减排技术的应用与推广,更直接影响气候脆弱地区的生存发展权。因此,资金问题成为南北方国家博弈的焦点,也是历届气候大会的核心议题之一。

2. 适应、损失与损害议题

除了减缓行动外,适应和损失与损害(loss and damage)议题在发展中国家尤其是小岛屿国家中引起高度关注。适应主要通过改进基础设施、农业技术、灾害预警系统等方式,提高社会和经济系统对气候变化的抵御能力。损失与损害则涉及气候变化已经造成或无法避免的破坏,例如海平面上升导致的国土流失、极端天气造成的生命财产损失。这些国家呼吁建立资金机制,对气候变化造成的不可逆影响提供补偿或援助。

3. 新集体量化资金目标(NCQG)

新集体量化资金目标(new collective quantified goal, NCQG)是《巴黎协定》实施阶段中,继“每年 1000 亿美元”承诺之后的核心资金机制和谈判焦点。其设立目的是回应全球气候融资需求的不断增长,并确保资金动员、分配与使用更加公平、透明和高效。2009 年哥本

哈根会议首次提出,到2020年前每年动员1000亿美元用于支持发展中国家应对气候变化,但这一目标在执行过程中存在兑现率低、资金来源分散、统计口径不一等问题。为此,《巴黎协定》要求在2025年前制定新的资金目标,以更科学和系统的机制取代旧有承诺。在2023年迪拜COP28上,缔约方一致同意加快NCQG的磋商进程,并在2024年巴库COP29会议中提出初步资金框架。在2025年巴西贝伦COP30,NCQG正式达成并通过,并将资金重点投向能源转型、气候适应、损失与损害应对等关键领域。

同时,NCQG更加注重资金的可预测性与公平性,要求发达国家提供长期稳定的资金支持计划,并引导私营资本、国际开发银行和多边基金共同参与气候融资体系建设。新目标还明确提出提高气候资金的可追溯性与透明度,通过数字化平台监测资金流向,确保更多资源惠及最脆弱的发展中国家、小岛屿国家及非洲地区。NCQG将成为全球气候资金动员与分配的核心标尺,其实施成效将直接影响各国实现国家自主贡献(NDC)和全球减排目标的进展,标志着国际气候融资进入从“数量承诺”向“质量与公正并重”转型的新阶段(见图1-2)。

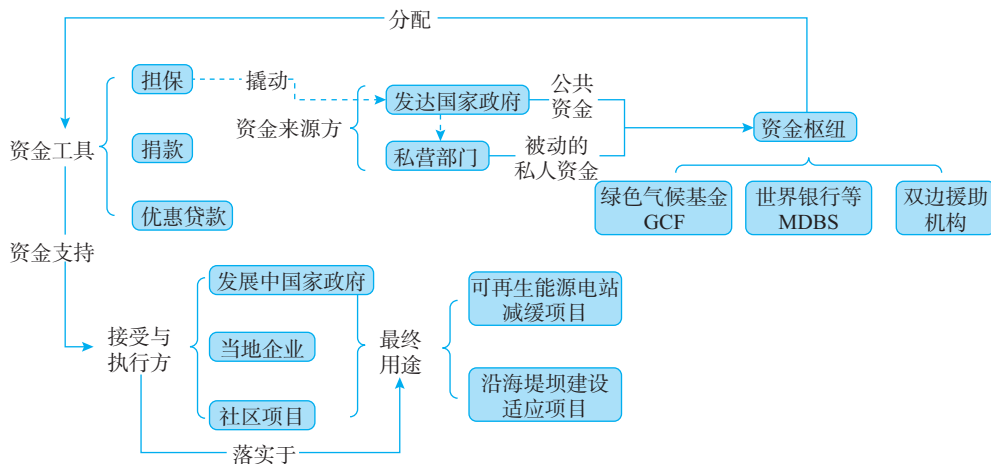


图 1-2 气候资金动员路径图

4. 技术转移与能力建设

资金问题与技术转移密切相关。对于发展中国家而言,单有资金支持远不足以应对气候挑战,还需要获得低碳与适应性技术的使用权和培训机会,以提升自身能力。《巴黎协定》强调发达国家应在资金援助之外,提供技术转移与能力建设支持,帮助发展中国家形成自主应对气候变化的长效机制。

1.3 能源革命与低碳技术

1.3.1 能源结构低碳化

1. 风电、光伏、核电与水电的低碳电力基础

能源结构低碳化的核心在于大幅降低化石能源在一次能源消费中的比重,加快风电、光伏发电、核电和水电等清洁能源的发展与利用。这四类能源共同构成了全球能源系统向低



教学视频：
能源革命与
能源技术创新

碳转型的核心支撑,为实现终端电气化与工业减排提供清洁、稳定的动力来源。

(1) 风电:风能作为最具规模化潜力的可再生能源之一,近年来保持高速增长。根据国际能源署(IEA)数据,2023 年全球新增风电装机容量约 110GW,累计装机超过 950GW,中国贡献了近一半的新增容量。到 2030 年,全球风电装机预计将突破 1600GW,占电力结构的 15%左右。海上风电具备发电效率高、占地面积小,已成为行业新的增长点。

(2) 光伏发电:光伏是近十年来发展最快的能源形式。2023 年全球新增光伏装机超过 400GW,累计装机容量达到 1400GW,较 2020 年增长一倍以上。中国、美国、印度和欧盟是主要市场。国际能源署预测,到 2030 年光伏发电将占全球电力供应的 20%以上,成为第一大电源。随着储能技术进步和组件效率提升,光伏的平准化度电成本(LCOE)已低于多数化石燃料电源的度电成本。

(3) 核电:核能是一种稳定、清洁且可调度的能源形式。截至 2024 年,全球共有约 410 座运行中的核反应堆,总装机容量约 370GW,核电占全球发电量的 9%左右。新一代“第三代+”和“小型模块化反应堆(SMR)”技术,在安全性、灵活性和经济性方面取得显著进步。核电在基荷电力供应和系统调节中发挥着不可替代的作用,尤其在实现深度脱碳目标中具有战略意义。

(4) 水电:作为最成熟的可再生能源,水电在全球电力系统中仍占主导地位。截至 2024 年,全球水电总装机容量超过 1400GW,占全球可再生能源装机的近 30%。尤其是抽水蓄能电站在平衡电力系统、提高可再生能源消纳率方面作用显著。中国已建成抽水蓄能电站装机超过 55GW,计划到 2030 年达到 120GW 以上。

总体来看,风电、光伏、核电与水电的协同发展构建了多元互补的低碳电力体系。这种组合不仅显著降低了电力行业的碳排放强度,还为交通、建筑和工业领域的电气化转型提供了可靠支撑,为实现碳达峰与碳中和目标奠定了坚实的能源基础。

2. 绿氢、储能与智能电网增强系统灵活性

随着可再生能源在全球电力结构中占比的持续提升,电力系统的灵活性与稳定性成为能源转型过程中的关键挑战。绿氢、储能技术与智能电网三者的协同发展,为构建高比例可再生能源系统提供了核心技术支撑。

(1) 绿氢。绿氢是指利用可再生能源(如风电、光伏)通过电解水制取的氢气,其生产过程几乎零碳排放,是实现深度脱碳的重要途径。根据国际能源署数据,2023 年全球绿氢产能约 20 万 t,预计到 2030 年将达到 2000 万 t,增长近百倍。中国、欧盟、日本等国家和地区已将绿氢纳入国家能源战略,推进大型可再生能源制氢示范基地建设。例如,我国内蒙古和新疆地区已规划超过 50GW 的风光制氢项目,可向交通、冶金、化工等高耗能行业提供低碳化替代方案。

(2) 储能技术。储能是平衡电力供需、缓解新能源波动性的关键手段。截至 2024 年,全球储能总装机容量已超过 230GW,其中电化学储能(以锂离子电池为主)占比超过 60%。国际能源署预测,到 2030 年全球储能市场将达到 600GW 以上。除锂电池外,液流电池、压缩空气储能(CAES)、氢储能等多元化技术正在加速商业化应用。在我国,2023 年新增电化学储能装机约 22GW,同比增长超过 260%,展现出强劲的发展势头。

(3) 智能电网。智能电网通过数字化、信息化与自动化手段实现能源的高效管理与优化调度。它能够实时感知、分析并响应电力供需变化,实现“源—网—荷—储”的协调优化。