



全球能源系统脱碳之路 的新视角

● 执行摘要 (供政策决策者参考)

Matthew Ives, Luca Righetti, Johanna Schiele, Kris De Meyer,
Lucy Hubble-Rose, 滕飞, Lucas Kruitwagen, Leah Tillmann-Morris,
王天鹏, Rupert Way & Cameron Hepburn

2021年4月





关于本报告

本报告为中英气候风险评估合作项目第三阶段成果之一。中英气候风险评估合作项目第三阶段由英国外交、联邦事务及发展部资助，由英国皇家国际事务研究所 (Chatham House) 牵头与中英合作伙伴共同执行。

● 作者

- Matthew C. Ives | Institute for New Economic Thinking & Smith School for Enterprise and the Environment, University of Oxford, UK
- Luca Righetti | Future of Humanity Institute, University of Oxford, UK
- Johanna Schiele | Harvard Kennedy School, Harvard University, USA
- Kris De Meyer | Earth Sciences, University College London, UK
- Lucy Hubble-Rose | Communicating Climate Science Policy Commission, University College London, UK
- 滕飞 | 中国, 北京, 清华大学, 能源环境经济研究所
- Lucas Kruitwagen | Smith School for Enterprise and the Environment, University of Oxford, UK
- Leah Tillmann-Morris | Smith School for Enterprise and the Environment, University of Oxford, UK
- 王天鹏 | 中国, 北京, 清华大学, 能源环境经济研究所
- Rupert Way | Institute for New Economic Thinking & Smith School for Enterprise and the Environment, University of Oxford, UK
- Cameron Hepburn | Smith School for Enterprise and the Environment, University of Oxford, UK

电子邮件 : matthew.ives@smithschool.ox.ac.uk

引用本报告时请参照:

Ives, M.C., Righetti, L., Schiele, J., De Meyer, K., Hubble-Rose, L., Teng, F., Kruitwagen, L., Tillmann-Morris, L., Wang, T., Way, R. & Hepburn, C. 2021. 全球能源系统脱碳之路的新视角: 执行摘要 (供政策决策者参考). Oxford: Smith School of Enterprise and the Environment.

致谢

非常感谢英国外交、联邦事务及发展部对本报告提供资金支持。



Foreign, Commonwealth
& Development Office



全球能源系统脱碳之路 的新视角

● 执行摘要 (供政策决策者参考)

在对能源技术的历史成本趋势进行了严谨的分析后,我们发现,过去几十年来,随着可再生能源及其存储技术(如太阳能、风能、电池和氢能)的不断推广,其成本也出现了大幅下降。例如,由于太阳能得到了更广泛应用,太阳能光伏的成本在过去50年里下降了3个数量级(即降幅达1000多倍)。这些成本的降低得益于设计、制造、财务、安装和维护等多方面不断积累的经验——与此同时,“经验曲线”(experience curves)这个术语也应运而生。

相比之下,在过去50年中,不可再生能源技术并没有因为其部署规模而出现显著的成本下降。在同一时期,煤和天然气发电的成本基本上保持稳定,波动幅度不到一个数量级(an order of magnitude)。与此同时,某种程度上来说,由于安全问题带来的顾虑和担忧,核电的平均成本甚至有所上升。

这些技术成本趋势从表面上看是一致并可预测的。这得益于技术本身的进步、技术变革在经济发展中的广泛渗透以及快速发展的技术之间的共同特征越来越多地被世人了解(Wilson等人,2020年)。对技术进步的预测已经开发出经过统计验证并有充分数据支持的相关方法(Farmer & Lafond, 2016; Lafond等, 2018年)。

将技术成本趋势纳入一个简单、透明的能源系统模型便形成了新的气候减缓情景,这与目前联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)和国际能源署(IEA)所采用的情景形成了鲜明的对比。令人惊讶的是,在大多数主流的气候减缓模型中——比如IPCC的综合评估模型(IAMs)中,对于能源技术的成本计算缺乏透明度,这些评估模型对成本下降所设定的限制也缺乏依据,而且其中不少数据较为过时(Jaxa-Rozen & Trutnevyte, 2021; Krey等人, 2019年)。本报告对现有新型脱碳情景采用的研究方法是,根据新能源技术的历史趋势以及该趋势将继续持续的速度和时间,选择不同的技术普及率,对技术成本进行数十万次模拟计算,从而进行概率预测,由此得到的一个重要结果就是对各种能源技术的成本分布所做出的预测,而将这些预测结合在一起,就可以形成能够反映基于当前技术趋势的能源系统演变的情景。

这一新视角表明,对全球能源体系转型的潜在成本和速度进行估算迫在眉睫。当前,政策决策者普遍认为,能源系统向符合《巴黎协定》的排放路径进行转型将耗费巨资,给能源服务或者经济增长带来净减损,并且还将严重依赖目前代价昂贵、未经证实或可能存在争议的技术,比如碳捕集和碳封存(CCS)、第二代生物燃料和新的核能设计(如小型模块化反应堆)。

全球能源系统脱碳之路的新视角

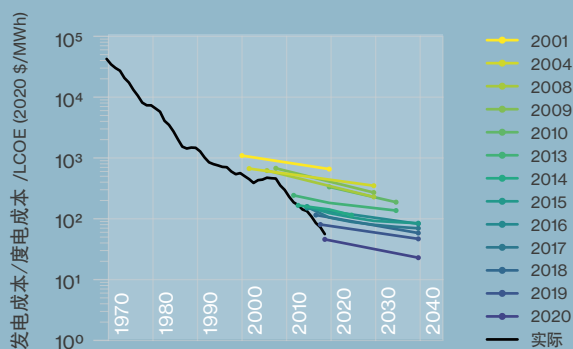
采用能源系统建模的新方法——以透明的方式考量可再生能源历史成本的真实趋势——即全球能源系统的脱碳之路：

- 其成本可能会比目前普遍认为的情况更低
- 可能不需要削减必要的能源消费
- 可能不需要采用尚不成熟的技术

问题

现有的能源系统模型持续低估了可再生能源技术的增长潜力和成本下降空间。

全球太阳能光伏平均成本

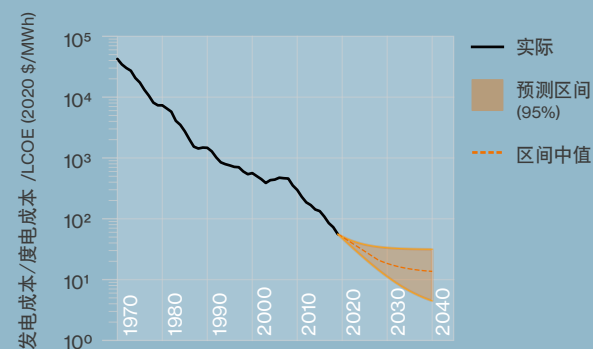


国际能源署《世界能源展望2001-2020》, Nemet 2006, 国际可再生能源机构2020

具体方法

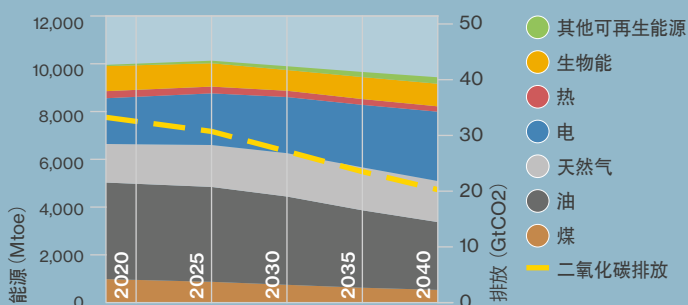
对能源技术普及率(如太阳能、风能、电池及氢能)及技术成本之间的关系趋势进行分析,并以此作为能源系统模型的基础。

全球太阳能光伏平均成本



(基于Way等, 2020)

全球终端能源结构

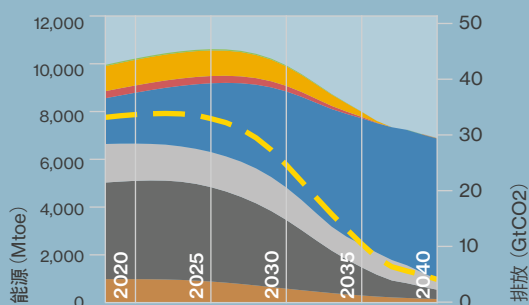


可持续发展情景

国际能源署采用的情景(国际能源署《世界能源展望2019》):

- 年均经济增长率3.4%
- 包括昂贵的碳捕集和封存技术(CCS)
- 通过大规模CCS改造以保留燃煤
- 获得电气化效益
- 电价降低可能性很小
- 排放水平低于《巴黎协定》要求

全球终端能源结构

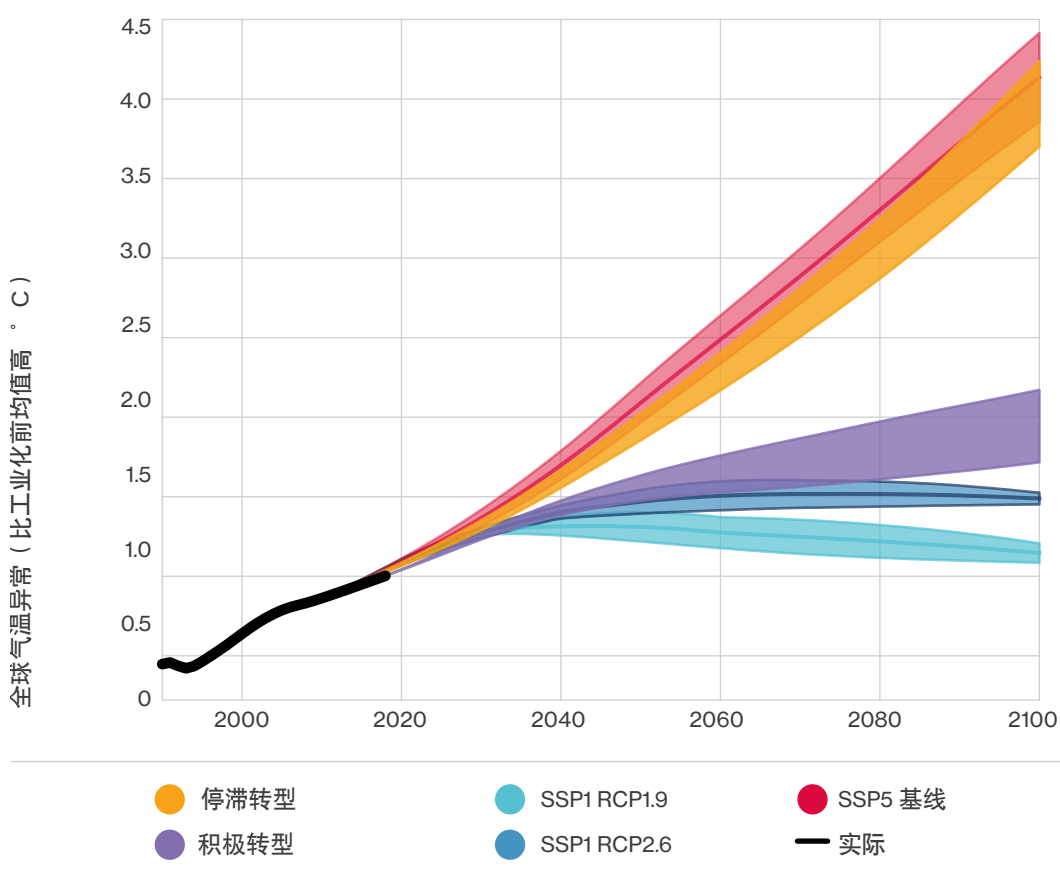


积极转型情景

我们的积极转型情景:

- 年均有效能源增长率2%(经济增长率>3%)
- 不需要对大规模化石能源进行CCS改造
- 迅速淘汰所有化石能源
- 通过电气化大幅提升效率
- 电价低廉
- 排放水平更加符合《巴黎协定》要求

本报告提出了两种截然不同的情景,以证明如果能对技术成本的趋势进行正确考量,目前常见的在清洁和可再生能源积极转型时所需成本和收益的基本假设将会被颠覆。本研究的建模产生了两种截然不同的转型情景:一个是**停滞转型(Stalled Transition)**,即能源服务的总需求继续以每年2%的历史平均水平增长,但不同能源技术的比例将停留在当前值。这种情况为估算相对成本提供了一个有用的“最坏情况”的基线和反证。第二种情景是**积极转型(Decisive Transition)**,即清洁和可再生能源技术未来10年将会保持当前的增长速度,此后逐渐回落到系统性的低增长。在未来25年内,能源领域中的化石燃料将被取代,所有必需的液体燃料都将被“绿色”氢燃料取而代之,太阳能和风能会是能源系统的主要来源,交通行业将基本实现电气化,能源储存将能够维持可靠的电力供应。与其他深度脱碳情景不同的是,为了与停滞转型情景进行同等对比,本情景中有效能源也同样设定为以每年2%的速度增长。



● **图1:** 对比全球预计排放量导致的气温异常: 停滞转型与积极转型两种PTEC情景以及SSP5-RCP8.5基线、SSP1-RCP1.9和SSP1-RCP2.6三种 IPCC情景

本研究中的积极转型情景几乎实现了IPCC最雄心勃勃的情景下所有必要的温室气体的减排。图1展示了相较于IPCC三种关键变暖情景,停滞和积极转型情景下全球变暖情况。其中,停滞转型情景与IPCC公布的“最坏的情况”情景(SSP5 RCP8.5)最为一致;积极转型情景与高度减排目标的“绿色之路”情景(SSP1 RCP2.6)最为相似。这是一个不同寻常的结果,因为与目标宏大的IPCC情景(SSP1 RCP1.9和SSP1 RCP2.6)相比,积极转型情景在不需要大规模部署核能、碳捕集和封存或节能技术,也不需要减少能源需求或牺牲经济增长的前提下就能实现这种结果,而只需要将当前的技术趋势再延长10年便可实现。

积极转型情景的成本要比停滞转型情景成本低很多。该报告中的建模数据表明,建立清洁能源系统的成本可以比延续当前化石燃料系统的方案低数万亿美元(Way等,2020年),既不会导致污染及污染相关的发病和死亡(Vohra等,2021年),也不会引发石油冲突,亦不会带来全球变暖以及气候变化带来的数以万亿的风险。

在中短期内,在某些地区可能会出现可再生能源无法以低成本的方式满足能源需求的局面。在这种情况下,对化石燃料,比如天然气,进行投资来作为权宜之计的做法时常发生。然而,毋庸置疑的是,这种投资无法推动最终的转型,反而可能导致碳锁定效应和进一步的转型风险。各方海外援助应该保持一致,帮助发展中国家“跨越式”地实现电气化,推广新型清洁发电技术、负载平衡和存储技术。

与多数主流气候减缓模型的宏远目标情景不同,积极转型情景并不依赖尚不成熟的技术,比如碳捕集和封存(CCS)以及利用CCS的生物能源技术(BECCS)。这就带来一个问题,即继续引导投资CCS技术和核聚变等技术以进行能源供应是否是一个最为行之有效的途径,因为这两种技术都无法与可再生能源进行完美结合,并且会削弱资本对进一步降低可再生能源及其存储技术成本的关注。

我们仍然需要消除积极转型面临的体制性和社会性障碍,维系金融稳定,维持或改善性别和社会平等,解决化石燃料行业出现的失业问题。高度依赖燃煤的国家在建立电网平衡、储存和高效电力市场方面需要得到国际支持。国际能源署(IEA)的数据显示可再生能源领域所创造的就业岗位可远远超过其他能源领域的投资项目(国际能源署,2020b),但在关停煤矿的地区这些工作机遇并不会出现。所以需要制定行业发展战略以应对这些转型风险(Mealy & Teytelboym, 2020)。维系或改善性别和社会平等可能是个棘手的问题,因为在这些夕阳产业中,女性的参与度不足,而且低工资岗位的比重过高。

由于技术趋势快速变化,转型风险是真实且很可能存在的,但我们需要牢记,与物理气候风险不同,搁浅资产只是一次性的成本。如果我们不遏止气候变化,会出现更加频繁和破坏性的极端飓风、洪水、干旱和野火,这可能会产生更大数量级的成本损失,而这些成本将是持续的、长期的,甚至可能是永久性的。本报告中做出的保守估计表明,相较于积极转型情景下的转型风险成本,停滞转型情景到本世纪末所造成的气候风险带来的损失要高出好几个数量级。

总而言之,积极转型情景表明,全球能源系统的脱碳之路:

- 其成本可能会比目前普遍认为的情况更低
- 可能不需要减少能源消费或降低经济增长
- 无需对未经验证且成本可能高昂的技术进行巨额投资就可以实现

这一新的观点还表明,太阳能和风能等可再生能源技术确实可以提供稳定而安全的能源供应,这也反驳了人们对可再生能源间歇性问题的普遍担忧。有一种观点认为,可再生能源在全球能源系统中的大规模部署将导致未来能源供应失灵,并推高电网整合成本。而我们的模型将太阳能和风能的部署与充分的短期存储(例如电池)和长期存储(如氢和氨)技术进行了融合,从而对这些观念提出了质疑。这一特性使得这些存储技术能同时“压低”自身的经验曲线,技术普及率远远高出通常的设想。在此过程中,该模型证明了建立一个碳中和能源系统在经济上是可行的,而这种能源系统:

- 能解决可再生能源的间歇性问题；
- 能高度确保能源安全；
- 能承受将可再生能源大规模并入能源系统的成本。

这项研究为重新思考如何以经济上最有效的速度转型到一个符合《巴黎协定》要求的世界创造了一个机会。已获取的证据证明可再生能源当前的成本下降趋势将会持续下去，而目前大多数（即使不是全部）为决策者提供参考的主要气候缓解模型长期以来低估了这一趋势。例如，大多数主流气候减缓模型很少考虑在未来几十年内电动汽车的发展。然而，如果电动汽车继续保持目前的成本下降趋势，在不到10年的时间里，其购买和运行成本将低于传统燃油汽车（Sharpe & Lenton, 2021年）。传统经济模型普遍无法实现的、本研究中所设计的对正反馈动态进行跟踪的模型显示，与我们的直觉不同的是，电动汽车所增加的电力需求反而会降低电力成本（Lafond 等, 2020年）。电动汽车的普及将催生更多的电力需求。如果使用更多的可再生能源来满足这种需求的增长，那么可再生能源就会变得更加廉价，发电成本也会更低，电动汽车也会更便宜，且更受欢迎……只要新增电力需求能够通过可再生能源的普及来满足，该反馈会持续出现。

本研究可作为一种催化剂，以促使各国政府在第26届联合国气候变化缔约方大会（COP26）上重新评估其国家自主贡献（NDCs）。对于那些正在计划实施“绿色复苏”项目或预计未来能源需求将大幅增长，并因此已在考虑对能源基础设施进行新的投资的国家来说，情况尤其如此。如果各国政策制定者都能更好地了解可再生能源的成本下降趋势以及如何在可再生能源及其存储技术投资方面开展《巴黎协定》式的合作，那么所有国家都会受益匪浅。COP26为达成《格拉斯哥协定》（Glasgow Accord）提供了一个成熟的机会。可再生能源显然是这场技术竞赛的“领跑者”，对可再生能源的早期投资将使各国更多地受益于绿色工业革命所带来的繁荣发展（Farmer等人, 2019年）。

在经历了新型冠状病毒大流行所带来的动荡和惨痛代价之后，我们不能再一切照旧——这样做风险太大、成本太高。可再生能源如果能与存储技术、传输网络扩展和智能电网相结合，就有可能解决以化石燃料为基础的能源系统无法克服的**能源三难困境**——从而实现一个平价、安全和可持续的能源系统。

参考文献

- Farmer, J. D., Hepburn, C., Ives, M. C., Hale, T., Wetzer, T., Mealy, P., Rafaty, R., Srivastav, S., & Way, R. (2019). 《后碳转型中的敏感干预点》. 科学, 364(6436), 132-134. doi: 10.1126/science.aaw7287
- Farmer, J. D., & Lafond, F. (2016). 《技术进步在多大程度上可被预测?》. 研究政策, 45(3), 647-665. doi: 10.1016/j.respol.2015.11.001
- Jaxa-Rozen, M., & Trutnevyte, E. (2021). 《太阳能光伏技术在全球长期前景中的不确定性来源》. 自然气候变化, 11(3), 266-273. doi: 10.1038/s41558-021-00998-8
- Krey, V., Guo, F., Kolp, P., Zhou, W., Schaeffer, R., Awasthy, A., Bertram, C., de Boer, H. S., Fragkos, P., Fujimori, S., He, C., Iyer, G., Keramidas, K., Koberle, A. C., Oshiro, K., Reis, L. A., Shoai-Tehrani, B., Vishwanathan, S., Capros, P., ... van Vuuren, D. P. (2019). 《探究:不同国家和全球综合评估模型的技术经济假设比较》. 能源, 172, 1254-1267. doi: 10.1016/j.energy.2018.12.131
- Lafond, F., Bailey, A. G., Bakker, J. D., Rebois, D., Zadourian, R., McSharry, P., & Farmer, J. D. (2018). 《经验曲线能在多大程度上预测技术进步?一种分布预测的方法》. 技术预测及社会变革. doi: 10.1016/j.techfore.2017.11.001
- Lafond, F., Greenwald, D., & Farmer, J. D. (2020). 《刺激需求能降低成本吗?以第二次世界大战为例》
- Sharpe, S., & Lenton, T. M. (2021). 《超越技术推广的临界点以满足气候目标:保持希望的理由》. 气候政策. doi: 10.1080/14693062.2020.1870097
- Vohra, K., Vodonos, A., Schwartz, J., Marais, E. A., Sulprizio, M. P., & Mickley, L. J. (2021). 《化石燃料燃烧产生的室外细颗粒物污染造成的全球死亡: GEOS-Chem模型结论》. 环境研究, 110754. doi: 10.1016/j.envres.2021.110754
- Way, R., Mealy, P., Farmer, J. D. D., Way, Mealy, P., Farmer, J. D. D., Way, R., Mealy, P., & Farmer, J. D. D. (2020). 《利用概率预测方法估算能源转型方案成本》(No. 2021-01).
- Wilson, C., Grubler, A., Bento, N., Healey, S., De Stercke, S., & Zimm, C. (2020). 《加速脱碳的粒状技术》. 科学, 368(6486), 36 LP - 39. doi: 10.1126/science.aaz8060



我们的愿景

为了一个健康的地球, 在全球可持续经济和金融体系的支持下, 建设一个更加公平而繁荣的世界。

我们的使命

牛津大学史密斯企业与环境学院通过全球领先的科研、教学和伙伴关系支持企业实现净零排放和可持续发展目标。

牛津大学史密斯企业与环境学院

School of Geography and the Environment | OUCE | University of Oxford |
South Parks Road | Oxford OX1 3QY

+44 (0)1865 614963 | enquiries@smithschool.ox.ac.uk

www.smithschool.ox.ac.uk

