

碳中和将是主导我国经济增长和转型的最大驱动力，是今后我国经济活动最核心的元素之一。碳中和目标的实现，主要靠产业结构调整 and 科技创新。

“产业 + 技术” 破题碳中和

文 / 金涌

碳中和不是一个单纯的能源问题或气候变化问题，而是一场深刻、广泛的系统变革，涉及社会经济的方方面面。中国这项远大目标的实现，目前还面临以下四方面挑战。

一是我国现在是全世界碳排放量最大的国家，二氧化碳排放量占全球的三分之一。

二是我国设定的从碳达峰到碳中和的时间较短，只有30年。发达国家由碳达峰到碳中和的过渡期普遍为50~70年，英国是79年，日本是63年，美国也有40多年。

三是碳减排要与经济发展同步。按照《中国宏观经济蓝皮书》的设定，到2050年，我国人均GDP要超

过4万美元，而目前水平在1万美元左右。2019年，我国万元GDP能耗约为0.519吨标准煤，同期主流发达国家的万元GDP能耗一般维持在0.1~0.2吨标准煤。从这两组数据可以看出，我国正处在实现碳达峰碳中和的关键期，人均GDP要达到现行水平的4倍，难度很大，需要在降能耗方面下大功夫。

四是我国制造业占比较高、能耗大。在我国的二氧化碳排放中，电力占比35%，水泥、电解铝和工业占比47%。发达国家的经济发展模式是从农业到制造业再到服务业，最后到金融业和虚拟经济，其碳排放也在这个经济变迁过程中逐渐下降。中国是一个制造业大国，产能供给占世界的



衡量能源技术创新的前景如何，不能只看其“能不能减排”，还要看其“能源转化效率高不高”。

30%，经济发展模式是从农业到制造业到金融业再到制造业，高端制造业会是未来的重要产业之一，随着经济转型升级，碳排放同步降低的难度会越来越大。

产业调整为主，技术创新为辅

碳中和将是主导我国经济增长和转型的最大驱动力，是今后我国经济活动最核心的元素之一。对于上述我国在实现碳中和目标中遇到的挑战，可以从两方面着手解决，即产业结构调整 and 能源科技创新。

在产业结构调整方面，我国生产

了全世界50%的钢铁、60%的水泥。2019年，中国人均钢铁产量0.9吨，是美国的3倍；人均水泥产量1.69吨，是美国的6倍。制造业实现碳中和，主要的努力方向应是产业结构调整。现在全世界的发展趋势是附加值低、初级产品、能耗大、产值低的产品会逐渐退出市场。未来，我国需要发展信息、智能、5G等高附加值、低能耗产业。

在能源科技创新方面，我国可开发的潜力不小。以煤电为例，2019年我国煤电平均煤耗为306.7克/千瓦时，发达国家煤电平均煤耗为270克/千瓦

时,进步空间达10%~20%。这方面科技创新的思路有很多,如信息产业配套需要的高纯试剂、CF3I、高档光刻胶、封装材料等;生化产业配套的医药、活体3D打印材料、靶向合成;精细化、个性化设计如有机发光半导体、碳纤维、滤膜材料,光电膜,卤化丁基胶,特种聚合物(双峰、超高分子量、耐冲、茂金属聚乙烯)纳微限域合成等,都是当下亟待突破的方向。

化石能源:从燃料到材料

人为二氧化碳排放中,90%来自化石燃料燃烧。我国二氧化碳排放中,燃煤占80%,石油占14%,天然气占4%。要实现碳中和目标,一定是少用甚至不用煤炭、石油等传统能源。

未来,传统化石能源会更多在化工领域发挥作用。

石油方面,在传统的炼化技术下,80%的原油最终变成了汽油、柴油,仅有20%用来制作塑料、橡胶和纤维。到2060年,如果电动汽车在全国普及,这一比例将会反过来,即80%的原油用来制作材料,20%用来做燃料。

煤炭方面,煤炭的分质利用是一种思路。通过分质,煤炭最终变成半焦和氢气。氢气可以作为碳汇处理二氧化碳;经过加热,半焦也可以成为一种碳汇,生成性质活泼的一氧化碳,一氧化碳可以用来制作酒精,从而用于汽车燃料,甚至塑料、橡胶纤维的使用,实现无机碳向有机碳的转

化。现有的煤变油、煤变烯烃甚至乙二醇可能不会受到广泛支持,只有耗能少、碳排放少、收益高的技术才能实现发展。因此,我国需要发展新的技术,提高煤炭利用率。

从碳中和的角度看,天然气是很好的碳中和原料,应当分离碳和氢元素,氢是碳汇中的一部分,可以与碳氧化合物反应,碳可以作为还原剂,将二氧化碳还原为用途更广泛的一氧化碳。类似的做法为目前正面临淘汰风险的高耗能企业提供了退出路径,可以帮助它们改造原有技术,减少碳排放,提高能源利用率,以降低损失,契合碳中和目标。

未来能源:零碳电力

如果所有的化石能源都退出,那么终极能源会是什么?可能性有二:一是可再生能源+储能;二是核聚变。

自然界的可再生能源非常丰富。根据国际组织绿色和平发布的报告,全世界可再生能源可以提供全球能源需求的3078倍,其中风能可以提供全球能源需求的200倍,太阳能可提供2850倍。

假如我国年消费的40亿吨煤炭全部用于发电,发电量约为14万亿千瓦时。按照规划,到2030年,我国风电和光伏发电的装机容量要达到12亿千瓦以上,可发电2.4万亿千瓦时。这就需要2030年以后大力发展风电和光伏发电,才能补上这巨大的距离。

现在风电和光伏发电的成本已经很低。以沙特阿拉伯新建的光伏电站为例,发电成本核算成人民币为每

千瓦时8分钱。从质量、经济、技术方面看,风电和太阳能发电都是可行的。

但风电和太阳能发电不稳定,夜里或者风力不够时就发不出电,必须配套储能。现在储能技术发展很快、方式各异、投资巨大,如化学储能、机械储能、抽水蓄能等等。可再生能源和储能的发展,再通过智能电网做传输,即可形成完整的能源供给网络。

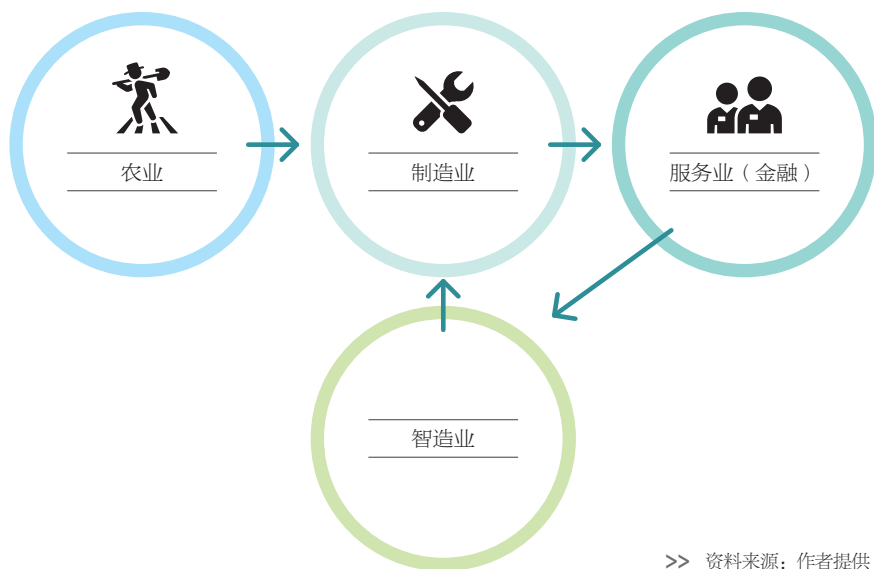
还有一个可以作为人类的终极能源:核聚变。核聚变的原材料主要是氘,每升海水中的氘聚变能够放出的能量,相当于燃烧300升汽油。一个百万千瓦的核聚变电厂每年只需要600千克原料,而同样规模的火电厂每年则需要210万吨燃煤。根据地球上海洋的氘资源总量估计,核聚变产生的能源可以支撑人类几十万年的用能。但目前看,核聚变技术还在发展中,仅可作为一种潜在方案,短期内尚无法投入使用。

技术衡量标准:关键看转化效率

在实现碳中和目标的过程中,各类技术创新涌现。衡量能源技术创新的前景如何,不能只看其“能不能减排”,还要看其“能源转化效率高不高”。

比如,森林固碳就存在一定的制约。成熟森林碳汇白天吸收二氧化碳24.5吨/(亩·年),夜间排放二氧化碳17.9吨/(亩·年),这还不包括农林废弃物代谢如叶、枝等产生的甲烷,整体核算下来,森林固碳的效率

我国产业发展模式



>> 资料来源：作者提供

并不高。

藻类生长速度、阳光利用率和二氧化碳转化率是陆生植物的数倍，且干了以后含油量达到50%以上，会是将来很重要的一个能源方向。目前微藻技术尚不成熟，还处在研发阶段。

再比如氢，氢并不适合作为主体能源，氢燃料电池实际上是在“烧氢”，在发电环节损失较大，能源的转化效率并不高。氢更适合制成材料，未来，如果能够以低成本电解水制氢，绿氢可以代替煤制氢，最终实现二氧化碳零排放。不排除氢在个别领域可能仍然作为燃料，例如潜艇可以使用氢燃料电池，在海底保持电量，但氢未来的主流应用方向还是材料。我们应该大力发展的是制作绿氢的技术。

一项技术要真正成为经济动力，

需要满足三个条件：技术成熟、盈利可行、二氧化碳排放量低。

技术在从小规模的实验室研究到大规模工业生产的过程中，技术人员需要做中间试验，验证其在物理化学特性、过程控制、经济性等方面是否符合产业化要求，接着再将这些试验成果形成“软件包”递交至设计院，最后卖给企业，进入市场。

由于中间试验不提供产品，只提供知识，有的企业投资购买的意愿不强，导致很多技术无法实现商业化，这一环节也常常成为技术的“死亡谷”。因为中间试验放弃产品投入的行为是不理智的，相关部门、投资机构和企业需要有足够的智慧辨别不同的科学家和科研技术的优劣，识别其市场价值，推进一些中间试验阶段的技术跨过“死亡谷”，进入产业化。

实现碳中和目标，意味着我国整个社会要实现四个时代转变：一是从工业化后期的时代转变成信息化、智能化、数字化的时代；二是从当前传统化石能源主导的时代迈向可再生能源时代；三是化石能源将从原来作为燃料时代进入作为材料时代；四是步入资源循环利用时代，把使用过的品类低的资源重新变成高附加值的资源，循环利用。总之，碳中和是一场系统变革，需要我们做好未来四十年方方面面的深入思考和统筹规划。因此，碳中和不是旁人要我们做的，是我们自己的选择，体现了党中央的大智大勇。■

（作者系中国工程院院士、清华大学化学工程系教授）