



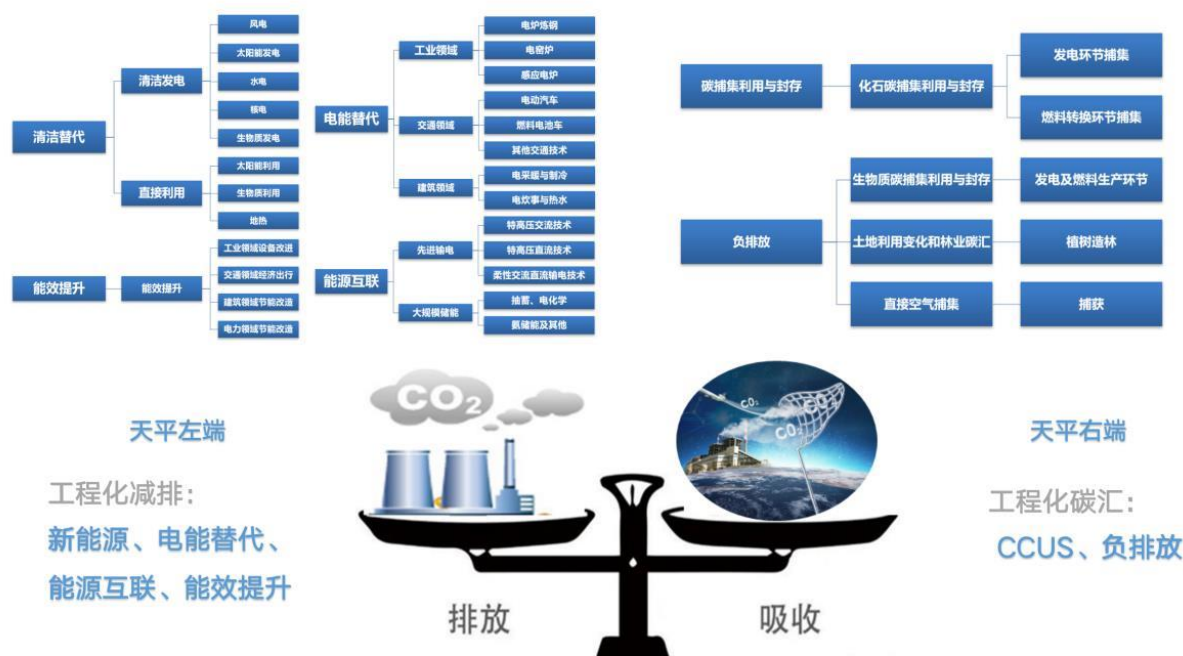
“碳中和天平”左端主要技术路线及其痛点



近日新华社发布中央政治局集体学习时聚焦“双碳”课题，强调深入分析推进“碳达峰、碳中和”工作面临的形式任务，必须加快绿色低碳科技革命，推进产业优化升级。在推进能源革命的过程中，必须坚持先立后破，立足于我国能源禀赋（保障煤炭供应安全，保持原油天然气稳定增长）的基础上，有序地推进新能源替代。同时，推进碳中和的减排不能影响生产力发展，“双碳”切忌搞一刀切，而是循序渐进地积小胜为大胜，在经济发展中促绿色转型。

通往碳中和的主要技术路线，归纳起来主要包括以下六大板块：一是清洁能源替代，比如风力、光伏、氢能等清洁能源逐渐取代化石能源在能源结构中的位置；二是在有关行业中的电能替代，也就是尽可能用电能来替代化石能源在交通、建筑、工业等领域的作用；三是能源互联网（数字化工业互联网），包括先进输电和大规模储能；四是能效提升，即各行业之节能减排；以上属于上一期专栏《碳中和：一场深远持久而循序渐进的绿色变革》所讲的碳中和天平左端，其本质是通过新旧动能转换减少排放。而碳天平右端聚焦于怎么吸收二氧化碳（和其他温室气体）排放；上一期专栏讲到，从全生命周期的角度来讲，要实现2060年碳中和，我们不能过多地依赖生态（自然）的方式；从工程化路径掌控和驾驭碳循环的角度出发，碳天平右端的板块五是碳捕集利用和封存（CCUS, Carbon Capture, Utilization and Storage），主要为面向碳排放源的捕集、利用和封存；六是工程化负排放，即直接空气捕集（DAC, Direct Air Capture）。

碳天平（图 1）之平衡为实现碳中和的考量：这个天平的概念可以用于全世界、也可用于一个国家、一个地区、一个行业。通过碳天平左端的新旧动能转换，将左端的砝码降下来；同时，碳天平右端通过 CCUS 和 DAC 等增加工程化碳汇砝码重量，最终左右端达到平衡为碳中和。碳天平左端各技术路径归根结底还是减排，而碳天平右端的 CCUS 和 DAC 是面对排放并尽可能将其捕集后利用或封存，控制大气中二氧化碳总量。近期一系列的政策动向和趋势显示，2060 年中国的能源结构中，化石能源仍然将占据显著地位，因此碳天平右端的重要性在逐渐增强，其未来砝码体量可能会接近碳天平左端之减排体量，这方面的分析在后面专栏中聚焦。本期专栏主要讨论碳天平左端的典型路径及其痛点。



碳天平左端目前是关注较多的；无论是中央还是各地方政府、各行业，都有相当的布局，很多大家都耳目能详。其技术路径百花齐放，优点不必

多述。然而，我们需要清醒地看到，很多技术路径还相对较新，一些核心点尚未取得关键性突破，有可能成为“卡脖子”痛点；而国外的有关预测表明有的技术路径可能到 2050、2060 年都无法成熟，可能难以实现大规模应用。

首先看清洁能源替代，也就是用地球上的其他的相对清洁的能源资源来尽可能代替化石能源。在清洁能源中，全世界水电资源已经开发差不多了，剩下的潜力有限；水电受地理位置、季节和气候影响较大，而全球气候变化带来的中国明显的雨线北移趋势，将给中国未来的水电布局带来较大不确定性。

核电稍为可惜。在地球自有的充足资源中，可支撑人类经济发展所需体量的能源只有三种：化石能源、核能和太阳能。但是核电在一些国家被政治化，而且核电站的建设投资大，可选建设地不多，只能有序推进。如果可控核聚变能够得到突破，那将有望为清洁能源替代带来飞跃式发展。

地热资源尚难以获取，投资大而产出周期短。生物质能源是否真正属于清洁能源尚有争议，其和化石能源一样带来排放，而且其燃烧值和燃烧效率不如传统能源，全生命周期未必能起到很好的碳中和效应。

因此，清洁能源替代未来主要以风光电为主。目前中国的风光电技术在世界领先，但国内风光电的发展与现行电力体制严重不匹配，技术不成熟影响着风电和光电的并网消纳，跨区域消纳风电和光电的难度大，需求侧尚未形成大规模消纳风电和光电的能力，导致弃风弃光问题严重。事实

上，风电和光电呈现很强的分布式能源特点，但是在（需要成为能源供给侧主力前提下）大型风电光电场建设的思路下，其分布式特点没有得到很好地利用。

风光电还有几个较大的痛点：

一是效率：以光伏发电为例，目前市场上单晶硅太阳能电池的光电转换平均效率已在 20%左右，然而普通单晶硅电池理想条件下的最高理论效率也仅为 24.5%，因此从转换效率来看其很难再有质的提升。光电组件的成本下降空间也已有限。如何发展新的光伏材料并将其大规模产业化是一个未来的方向（也是技术不确定性）。二是全生命周期的碳中和效益：晶硅冶炼是高能耗高排放的，而光伏组件的回收再利用也是产生排放的；这些目前尚未合理地计入光电的全生命周期碳核查中，有可能会过于乐观地估计光电带来的碳中和效益。三是风光电的周期性和不稳定性，风电在晚上达到峰值而光电是白天达到峰值，同时也对气候季节敏感，因此其对于储能、电网的消纳性提出很高要求，由此带来未来产业模式的不确定性；绕开电网而就地消化风光电也可能是另一条思路，但是风光电设施多建在经济欠发达地区，就地消化（包括利用风光电制其他化工品）可能带来一些供需的不匹配。基于以上原因，到 2060 年具有 24 小时稳定输出化石能源电厂仍然会在电力行业中占据重要的位置。

最后说一下对氢能的个人观点。上面几种清洁能源都是地球上已有的资源，可是地球上本没有氢。假如氢能是未来的能源主力，则从哲学观点

来说，氢气一定是从化石能源、核能、或太阳能转变而来，那么为什么不直接使用这三种原始能源呢？氢气的制、储、运，目前都存在较高的技术门槛（2060 年未必能全面突破），大规模普及相对困难。如果氢气是燃烧取其热能，则如此高端能源的性价比有些可惜；如果氢气是通过燃料电池等方式获取电能，则从产业流程来看，电解水制氢，然后又回到电能，那么为什么不直接用电能（无论是来自化石能源、太阳能或者核能），我国的智能电网技术和基建都在世界领先且可以远距离传输，似乎没太大必要绕一下氢能这个传输困难的中介。因此，我个人的观点是氢能在未来的能源结构中占比不会特别高，可能会更适用于某些行业（如交通等）的细分领域。无论氢能是未来和其他哪个行业结合（包括用氢制其他化工品或其他燃料），可能都需要更细致的基于全生命周期的分析来确定其在碳中和目标中所的占比和地位。

其次，电能替代：经济活动的电气化取代化石能源，也就是尽可能用更高效的电能来替代燃煤或其他化石能源。以新能源汽车为例，是将烧油的车变相地变为烧煤，利用燃煤电厂的相对汽油发动机的高效来达到减排的目的。这样将较为难以处置的汽车的分布式碳排放的压力转移到燃煤电厂上去，迫使其承担更多排放压力，以碳天平右端的 CCUS 等手段来促进碳中和。虽然从能耗上来说这是可行的，但是从全生命周期角度新能源汽车是否更加“绿色”尚有争议。比如有的国家认为新能源汽车从全生命周期的能耗（包括电池的制造和回收）未必比燃油汽车更减排，而从其他自然资源的消耗（如水）角度来说新能源汽车可能欠的债更多。类似的争议

还需要更细致规范的分析，以指明新能源汽车的未来发展更有利于全局碳中和以及全局资源可持续的方向。

以工业领域的电能替代为例，有钢铁企业提出用电炉炼钢。炼钢本质是需要热能融化铁矿，因此，燃烧化石能源获取热能是最直接经济的方式。如改为电能，则燃煤电厂的三分之一热能才能转换为电能，如果当前电力供应不变，则电炉炼钢会使得整个钢铁行业的整体碳排放增加 2 倍。因此，电能替代不是把发电带来的排放“推卸”给电力行业，不是把“坏事”转移给电力系统来挨板子。正因为各工业用户端仍然呈现分布式的特点，这些分布式的工业用户需要承担其电能替代的等价碳排放，也需要考虑如何用分布式的方式来节能减排。

第三，能源互联网：主要包括先进输电和大规模储能两个板块。我国交直流输电技术世界领先，大规模电网建设成绩也举世瞩目。然而，电网也是有显著温室气体排放的。事实上，二氧化碳只占温室气体的 73%，而甲烷等其他温室气体的贡献也不可小觑，也是碳中和目标的一部分。以电力输送为例，广泛用于断路器的六氟化硫的温室效应指数是二氧化碳的几

预览已结束，完整报告链接和二维码如下：

https://www.yunbaogao.cn/report/index/report?reportId=1_36928

