

丁仲礼院士：中国碳中和框架路线图研究

1、碳中和是什么？如何实现？

“双碳行动”是应对气候变暖的国际行动的一部分。欧盟国家是“碳中和”的首倡者，他们提出要在2050年达到碳中和。我国去年9月承诺，2030年碳达峰，2060年达到碳中和。多年以来，美国由于党派争执，对待气候变化问题的态度一直摇摆不定，但是民主党上台以后，他们提出的目标还是非常激进的，尤其是提出2035年要达到无碳发电，2050年要达到碳中和。鉴于美国这么多年来反复立场，其如何落实到实际行动上，还是要“走着瞧”。现在有不少国家都在制定碳中和计划，但我们认为这是一个雄心勃勃但又极其艰难的目标。

从人均角度来分析的话，美国、英国、法国的碳排放已经处于下降阶段，正在走向碳中和。印度的人均排放量增长刚刚“启动”，大概相当于我国60年代的人均排放水平，尚未真正达到快速增长时期。我国基本上从2012、2013年开始就进入了碳排放的“平台期”。世界上还有许多农业国家尚未启动工业化，所以还没有“启动”碳排放。

现在我们有二个目标，一个是碳达峰，一个是碳中和。在碳达峰上，达到什么样的高度，我们并没有一个天花板，也没有设定一个具体目标。理论上有两种选择，一种是把峰调高，以后的减排数据会好看一点；第二种是尽量把峰值压低。我个人认为，出于改善空气质量的考虑，还是要追求尽量把峰值压低。所以，碳达峰其实不需要太多研究，要研究的问题主要是如何实现碳中和。

碳中和的概念，就是人为排放的二氧化碳（化石燃料利用和土地利用），被人为努力（木材蓄积量、土壤有机碳、工程封存等）和自然过程（海洋吸收、侵蚀-沉积过程的碳埋藏、碱性土壤的固碳等）所吸收。目前全球每年排放的二氧化碳大约是400亿吨，其中14%来自土地利用，86%来自化石燃料利用。排放出来的这些二氧化碳，大约46%留在大气，23%被海洋吸收，31%被陆地吸收。这个数据可能不是特别准，但一百年来碳循环基本上就是这么一个规律。

碳固定过程非常多，我在这里举一个不被大家特别关注的例子——土壤。干旱、半干旱地区的碱性土壤中含有很多钙离子，不像南方酸性土壤钙离子很少，这些钙离子和大气中的二氧化碳结合，降水的时候就会淋溶形成碳酸钙沉淀，这是一个非常强大的自然过程。做黄土研究的专家经常说，黄土里面有料姜石，这就是碳酸钙的结核，还有在温暖时期沉淀下来的钙板。我国有大面积的干旱半干旱地区，这个自然过程对碳的固定，是一个非常重要的过程。

接下来讲未来碳中和的主要途径。我们要考虑到，接近2060年的时候，因为人为排放下降了，二氧化碳分压降低，海洋吸收可能也会相应降低，但降低的幅度现在很难预测。陆地土壤沉积的固碳过程还是会存在，甚至有可能加强。所以，不得不排放的二氧化碳，就要通过生态建设、工程封存等措施去除掉，这样才能达到中和。

需要特别说明的是，自然过程吸收二氧化碳的量，只能理解为自然界存在的一个基数，比如海洋吸收的碳就不能归结为哪个国家的功劳。我们要考虑如何依靠人为努力，比如生态建设、工程封存、土壤固碳等措施来进行碳固定。也就是说，碳中和等于排放量同自然过程吸收、生态碳汇、工程封存等等抵消。

2、中国如何达到碳中和

我们这个学部咨询项目是从排放端、固碳端、政策推动这几个角度来考虑的。要特别说明，这个项目只是想将碳中和框架设计出来，把问题清单列出来，至于碳中和具体怎么做，还需要大家共同进行大量的研究。我们现在只是设计一个初步路线图，供大家研讨完善。这个咨询项目设立了九个专题，我把每个专题简单向大家报告一下。

专题一：未来能源消费总量预测

第一个专题由江亿院士他们来负责。这个专题要解决的一个核心问题是，在不同时间节点（面向2060），我国居民生活、工业、建筑、交通等重点领域的能源需求以及全社会能源总需求。

这里有个主要的几个边界条件要明确：一个是到2035年，我们GDP比目前还会翻一番，2060年还需要再翻一番，达到人均4万美元，生活水平也要相应地同发展阶

段相当，产业结构从目前的中低端发展到中高端。

另外一个因素就是人口变动，少子、老龄化这些因素必须考虑进去，要建立一个预测的模型。但预测常常是不准的，2009年有部门预测2020年我国一次能源消费将达到44亿吨标准煤，但实际上2020年我国一次能源消费达到50亿吨标准煤。所以我们希望高中低都有预测，不要局限于某一种观点。

专题二：非碳能源占比阶段性提高途径

这个专题要解决的核心问题是，我们需要一个什么样的新型能源供应系统，尤其是电力供应系统，如何逐步增加非碳能源，特别是风、光、水、地热、核等的比重。

其次，我们要重点回答，中国西部有丰富的风、光资源，如何从各种发电、储能、转化、输电、消纳等等环节协调发力，让这些资源得到有效充分利用。

尤其要解决的问题是，由于风、光资源的时空分布不平衡，如何保证稳定输出，需要一套什么样的基础设施来保证稳定输出，这是一个非常大的问题，也需要有一个框架。

另外关于新型电力系统的能源供应系统，我们需要列出一个技术清单，到底需要哪些技术，作为未来研究方向。图4是我国2019年一次能源消费情况，可以看出，非碳能源实际上只占15%，另外85%是煤、油、气，这是一个非常严峻的现实。我国现在大约排放100亿吨二氧化碳。假如到2060年，我国还不得不排放20到25亿吨二氧化碳，在这样的情景之下，我们该怎么办？

现在初步的认识是：非碳能源占比不会是线性提高的，主要靠技术组合和技术突破。煤炭作为主力能源，还会存在较长一段时期，因此煤炭清洁利用技术的进步仍需十分重视。另外一个核能，我们不该追随某些“弃核国家”的脚步，还要加强核能利用，甚至在内陆地区建厂，把核能充分利用起来。尤其是西部干旱地区的风、光资源，是我们实现碳中和最大的底气，我们要考虑如何来稳定输出。

专题三：不可替代化石能源预测

这个专题的核心问题是，不可替代的化石能源必然转化为不得不排放的二氧化碳，对于这部分排放要有一个预测，来自于何处、来自于什么行业、总量有多少。

我们现在讲碳中和，首先要考虑替代，就是用电、热、氢能等来替代，来减少二氧化碳排放。不同行业、不同领域的替代难度肯定是不一致的，我们能否从目前的情况来按照难易排序，这是非常关键的。

其次，我们能否确定不可替代的领域有哪些？在这些领域不得不排放二氧化碳，那就是碳中和需要中和掉的部分，我们就需要进行针对性预测。现在初步认为：居民生活比较容易用电力、地热、太阳能来替代，关键在于国家如何推动；交通领域，目前已经在大力发展电动汽车，以后可能用氢能驱动船和飞机等，这个替代可能只是个时间问题；农业领域大部分也可以替代；比较难替代是工业领域，包括冶金、化工、建材、矿山等等如何替代，还需要特别研究。

另外，我们要克服风电、光电等输出不稳定性问题。未来我们的电力系统如何保证稳定输出将是需要考虑解决的关键问题。美国提出2035年就要实现无碳电力，中国什么时候实现低碳电力或者无碳电力，这也需要认真研究。

目前有很多国家对氢能寄予了很大希望，我们的院士当中也有不同的声音。氢能战略也需要国家拿出方案。我国大约100亿吨二氧化碳排放中，发电端占比约47%，消费端如工业过程、居民生活等等占了53%，要实现碳中和就需要在发电端用更多的非碳能源来发电、在消费端用电和氢能等来替代，构建一个两端共同发力的系统。

专题四：非碳能源技术研发迭代需求

非碳能源技术发展是个迭代的过程，需要逐渐进步，但具体分几步来做是一个问题。大化所的刘中院士他们提出三步走，第一步是化石能源的清洁高效利用与耦合替代；第二步，可再生能源多能互补与规模应用；第三步，低碳能源智能化多能融合。具体怎么做，还需要进一步探讨。这个问题最后还要和第二个专题一起“收口”。

前四个专题主要研究排放端。在固碳端，我们也列了四个专题。



专题五：陆地生态系统固碳现状测算

第五个专题是关于我国陆地生态系统的固碳现状，就是说我国生态系统现在到底有多少固碳能力，以及碳汇的功能与速率，不同有机碳之间什么时候会达到平衡？还有我刚才讲到的碱性土壤这个问题，目前的研究还很少，也需要加强研究。

中科院已经做过一些关于碳收支项目的研究。现在认为，我国目前地表碳储量相当于363亿吨二氧化碳，每年固碳速率是10到40亿吨二氧化碳，我们估计森林在2060年以前将会达到固碳的峰值，之后固碳速率就会降低。干旱半干旱区的土壤还很难估计。图6就是用不同的方法测算出来的碳源，数据差别比较大。

专题六：陆地生态系统未来固碳潜力分析

计算我国陆地生态系统未来固碳的潜力，主要有以下核心问题：

一是陆地和近海不同生态系统的固碳潜力如何，以及未来在气候变化影响下，它们会如何变化；二是我国生态恢复、建设工程这些面状分布区未来的固碳潜力如何；三是新增点状分布区的固碳潜力如何，比如城市造林绿化等；四是其他一些人为措施，比如南水北调西线工程上马后西部干旱区变绿、海水淡化等实现之后，在其影响下新增的固碳潜力如何；还有未来陆地生态系统增加碳汇的措施，比如秸秆焚烧成碳屑等。我们还需要研究证明这些增汇措施的长期性。

专题七：碳捕集利用封存技术评估

第七个专题是碳捕集利用工程封存技术。我们谈到的负排放技术目前有图8中列出的这些，包括将二氧化碳制成化学品、将二氧化碳制成燃料、微藻的生产、混凝土碳捕集、提高原油采收率、生物能源的碳捕捉和存储、硅酸盐岩石的风化和矿物碳化、植树造林、土壤有机碳和土壤无机碳、农作物的秸秆烧成木炭还田等等。这些负排放技术中，前面几项是国际上所谓的CCUS技术，后面用红箭头标出来的这两项——矿物碳化和生物炭，我国研究得还比较少。

这里的核心问题是，这些技术还需要进一步研究，现在还没有必要马上就大规模工程封存，那是要在2060年之前考虑的问题。目前这方面的技术进步是比较快的，未来会进步到什么程度还不好预测，但是我个人认为，最好不要单纯地封存，那样不产生经济效益，还是要想办法如何利用二氧化碳。

专题八：青藏高原率先达标示范区建议

第八个专题是建议在青藏高原建设一个率先达标的示范区。青藏高原在我国境内的面积有250万平方公里，我国正在建设青藏高原生态屏障，同时我国可能也要开发一些河流的水电，如果能把青藏高原建成一个率先达标示范区，我们就能够在气候变化问题上处于一个道德上的制高点。青藏高原固碳的潜力非常之大，因为它有很多退化的草地，所以我们要对它进行专题研究。

另外还要考虑，以后一个地区或一个行业的碳中和程度如何评价，这要从生产端、消费端共同来做，也需要拿出一个思路。

专题九：政策技术分析研究

第九个专题是政策如何推动的问题，包括如何推动非碳技术，如何进行生态建设增加碳汇。目前来说，我国在减排问题上，政府约束性政策大于市场机制，以后可能要更多地依靠市场来发挥作用。

最后再说几个观点：

第一，“碳中和”过程既是挑战又是机遇，其过程将会是经济社会的大转型，将会是一场涉及广泛领域的大变革。“技术为王”将在此进程中得到充分体现，即谁在技术上走在前面，谁将在未来国际竞争中取得优势。国家需要积极研究与谋划，谋定而动，系统布局，组织力量，特殊支持，力争以技术上的先进性获得产业上的主导权，使之成为民族复兴的重要推动力，我们必须积极地看待这个问题。

第二，我们项目组强调：完成这个大转型，需要在能源结构、能源消费、人为固碳“三端发力”，所需之资金将会是天文数字，决不可能依靠政府财政补贴得以满足，必须坚持市场导向，鼓励竞争，稳步推进。政府的财政资金应主要投入在技术研发、产业示范上，力争加快我国技术和产业的迭代进步速度。在此过程中，特别要防止能源价格明显上涨，影响居民生活和产品出口。

第三，本项目只能先给出一个框架性建议，以供科技界讨论、修正、完善。期望汇聚众智后，学部的建议对我国如何推动此大转型，如何在未来国家创新体系中形成布局完善、责任明确的技术研发体系等重大问题，有实质性的指导意义。项目组也认为，我国学术界应该秉持开放的态度，广泛参与，发挥出想象力和创造力；国家有关部门在确定路线图的问题上可考虑先经历一段“百家争鸣”时期，千万不要急于“收口”，千万要急于强力推进。

第四，这个大转型过程中，整个行业的协调共进非常重要。“减碳、固碳”“电力替代”“氢能替代”均需要增加企业的额外成本，如果某一行业不同企业间不能协调共进，势必会使“不作为企业”节约了成本，从而出现“劣币驱逐良币”现象。由此，分行业设计“碳中和”路线图及有效的激励/约束制度需尽早完成，这个非常关键。

第五，评价国家、区域、行业、企业甚至家庭的“碳中和程度”，需从收、支两端计量。从能源消费角度论，“支”（即排放）相对容易计量；“收”（即固碳）由于类型多样，过程复杂，很难精确计量，尤其是“人为努力”下的固碳增量不易确定。由此，国家要尽早建立系统的监测、计算、报告、检核的标准体系，以期针对我国的碳收支状况，保证话语权在我。

当然，这里面还有国际上的合作与斗争，比如未来的排放权如何分配？未来排放的天花板应该如何确定？“共同又有区别的责任”未来怎么来体现？西方国家一直在说“资金与技术援助”，但是一直没做，他们如何兑现？每个国家排放量如何计量？另外我国该如何应对西方国家的舆论抹黑，比如西方国家总说中国是第一污染大国，其实从图2看，我国人均累计排放量远远低于世界平均，但是我们没有人就此问题发声。另外，针对外国对我国绿色产品比如太阳能电池板设立高额关税，我国该如何应对？这里面有很多的问题需要思考。

还有一些基础性的科学问题需要研究，比如到底1.5、2.0增温对应什么样的二氧化碳当量浓度？以前国际上经常说450ppm二氧化碳当量浓度，现在已经达到了这个浓度，但增温并没有达到1.5。我个人认为，格陵兰冰盖融化之前，变暖对中国是有利的，融化之后海平面要上升，对中国就不利了，所以我们还是要有个研究目标。

总之，科技界任重道远。