

# 碳中和,未来之变

演讲人:贺克斌 演讲地点:清华大学“人文清华讲坛” 演讲时间:2021年6月



贺克斌 中国科学院院士,清华大学环境学院教授。国家自然科学基金委杰出青年基金获得者,教育部长江学者特聘教授。现任国家生态环境保护专家委员会副主任,教育部科技委环境学部主任,全球排放研究计划(GEIA)中国工作委员会主席,全球能源评估研究计划(GEA)环境组组长等。长期致力于大气复合污染源与多污染物协同控制方面的研究。获国家自然科学基金二等奖1项,国家科技进步二等奖3项和省部级科技奖励11项。



▲4月21日,在济南市舜耕国际会展中心,与会嘉宾在第二届世界内燃机大会上参观。  
▶三峡新能源格尔木500MW领跑者项目工作人员查看太阳能电池组件。



▼北京五棵松体育中心地下停车场的电动汽车充电站,一辆电动汽车在充电。 新华社发



新华社发  
新华社发

## 碳市场与碳减排

5月26日,生态环境部宣布全国碳市场将在6月底上线交易。全球关于碳的定价问题,已有61个国家启动,采取了两种机制,其中31个国家采用碳市场,还有30个国家采用碳税。在碳市场机制的实施上,中国实际从2011年开始就在7个城市逐步试点,北京、天津、上海和深圳在2013年启动,重庆、广东和湖北在2014年启动。

全国碳市场上线交易,首先从电力系统推进,电力工业覆盖中国二氧化碳排放量的35%;第二步将会引入建材行业的水泥和有色金属行业的电解铝,这两个行业引入后,覆盖的二氧化碳排放量将达到47%;之后引入化工、建材、石化等八大行业,这八大行业会覆盖全国二氧化碳排放量的70%。未来还会从生产领域扩展到生活领域,在我们生活中也会逐步引入碳市场的概念和实际应用,也就是我们个人的碳足迹。

碳市场主要目的是促进二氧化碳减排。比如,2008年到2016年,欧盟通过碳排放交易体系ETS机制减少了10亿吨二氧化碳,相当于欧盟总排放量的4%左右。为什么要花这么大力气来减少二氧化碳?因为全球变暖问题已越来越严重,造成热浪、暴雨、北极冰盖融化、干旱、海平面上升等等。目前为止造成的这些威胁,仅仅因为地表升温1摄氏度左右。如果不大幅控制像二氧化碳这样的温室气体排放,到21世纪末,最大的升温可能会达到3~4摄氏度。从历史温度记录看,冰河时期全球平均温度和现在比也就低6摄氏度;恐龙时期,天气比较热,平均温度和现在比也就高了4摄氏度,研究发现当时在北极有典型耐热动物比如鳄鱼存在。所以,3~4摄氏度对于全球气候系统和生态系统的影响巨大。

所以,碳达峰、碳中和最核心的是要实现各种措施,采取共同行动,把二氧化碳排放量大幅降低。为实现全球“零碳未来”愿景,截至2020年年底,已有100多个国家或地区提出了碳中和承诺,占全球二氧化碳排放量65%以上和世界经济70%以上。

应对气候变化,中国在行动

## 碳达峰与碳中和

未来温控目标安全线是升温幅度不能超过2摄氏度,更稳妥一点,是要实现不超过1.5摄氏度的温控目标,这也是2015年《巴黎协定》里全球达成的基本共识。温度上升最大驱动力是温室气体,温室气体里最典型的是二氧化碳。最近二百年中,特别

下降。非化石能源占比稳步上升,到2019年已超过15%,在我们已宣布的目标当中,2030年这个比例会超过25%,还会继续往上推进。

碳达峰是指某一个时点,二氧化碳排放不再增长,达到峰值,之后逐步回落。它可能有个平台期,即达到峰值不再上升,稳定一段时间,然后再下降。碳中和是指一定时期内二氧化碳排放量与二氧化碳吸收量相平衡的状态。人类的生产生活会大量排出二氧化碳,但生态系统,陆生生态系统如森林,以及海洋生态系统,对碳有吸收作用,这叫碳汇,目前人类生产活动造成的二氧化碳的排放大大超过了陆生生态系统和海洋生态系统的吸收能力,这叫碳中和或者不平衡,碳中和的目标就是要在一定时段内使二氧化碳的排放量下降到和二氧化碳的陆生生态系统、海洋生态系统的吸收量相平衡的状态。

如果我们还继续延续过去以末端治理为主的控制路径,未来十年我们减排大气污染物的潜力将基本耗尽,即使是进一步努力,一直干到2060年,PM2.5浓度最好大概是在25微克/立方米左右,现在全国300多个城市平均浓度是33微克/立方米,可以发现,减下去的仍非常有限,所以我们寄希望于在碳中和目标下实现深度能源转型。在碳中和目标下,我们可以大幅降低PM2.5浓度,未来可以降到世卫组织现在的最低推荐值10微克/立方米以下,全中国平均值大概在8微克/立方米左右,老百姓的健康获益会大幅增加。

要实现碳中和目标,我们任务非常艰巨。全国二氧化碳总排放量在2020年是104亿吨,到2030年前达峰,预计达到110亿吨左右,略有增长。我们的碳汇能够吸收的那部分能力大概是十亿吨左右,要把二氧化碳排放

降到这个水平,意味着超过90%的排放量要减下来。

考虑到现阶段我们的国情,减碳存在三大难度:第一,我们现在还是高碳能源结构,化石能源比例和欧美比明显高,虽然煤炭比例已下降,但仍是全球煤炭比例最高的国家之一。

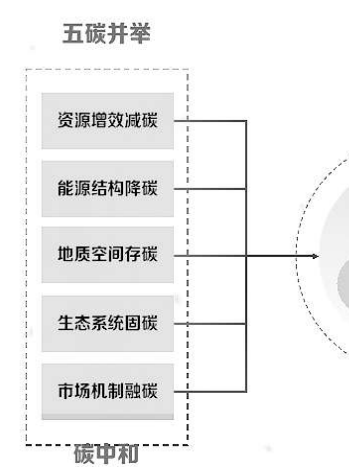
第二,我们是高碳产业结构。现在在全球产业链分工里,水泥、钢铁、石化这样高耗能的工业,在我们整个产业中的比例还比较高,这些是比较难减排的行业。

第三,我们是世界上最大的发展中国家,还在中高速发展阶段,在这个过程中,减碳绝不是轻轻松松能实现的。

我们未来的减排任务怎么逐步完成?可通过“五碳并举”来攻坚克难。第一,资源增效减碳。达到同样的经济目标,但将能源需求降到最低。第二,能源结构降碳,大幅提升非化石能源比例。非化石能源比例大幅提升后,仍有部分化石能源存在,即使到了2060年仍会存在,还会产生一部分二氧化碳,要有其他措施来解决。第三,地质空间存碳,通过碳捕集利用和封存(CCCS技术)来解决一部分二氧化碳。第四,生态系统固碳,通过各种生态建设手段,使二氧化碳的碳汇能力巩固和增加。这四个都是技术手段,什么样的技术在什么样的时空范围里应该优先使用,第五个措施即市场机制融碳可以发挥重要作用,碳市场会通过市场机制来推动各类技术更合理有效地应用。“五碳”一起发力是我们未来可能实现碳中和的基本路径。

我认为,“五碳并举”实现碳中和会带来政府行为、企业行为和个人行为的根本变化,影响范围非常大。这场经济社会系统性变革,涉及观念重塑、价值重估、产业重构及广泛的社会和生活影响。

第一是观念重塑。全球推进实现碳中和目标,世界经济发展将从资源依赖型向技术依赖型转变。现在的全球经济高度依赖化石能源,但化石能源地域分布极不均匀,目前,煤炭储量最多的前五个国家占了全球煤炭75%的储量;石油储量,前五个国家占了62%;天然气储量,前五个国家占了64%。“五碳并举”里的第二碳是能源结构降碳,核心是要大幅提升可再生能源或非化石能源比例。非化石能源最典型的分别是风能、太阳能、水能、核能。其中风能、太阳能将来比例会更高。全球风、光资源分布相对更均匀,谁能够更好更快地抓取风、光资源,即开发出大规模应用风电、光伏的领先技术体系,谁就提升了长期经济发展支撑能力。未来更关注关键技术的竞争。国际能源署(IEA),分别对低碳发电、电力基础设施、交通运输用电、工业用电、建筑物用电、燃料转化用电等技术做了梳理分析,在低碳发电领域像光伏发电等技术已比



资料图片

本报教育部主办  
(了解更多光明讲坛内容请扫描二维码关注光明讲坛微信公众号。欢迎留言、探讨、推荐。)



未来温控目标安全线是升温幅度不能超过2摄氏度,更稳妥一点,是要实现不超过1.5摄氏度的温控目标,这也是2015年《巴黎协定》里全球达成的基本共识。温度上升最大驱动力是温室气体,温室气体里最典型的是二氧化碳。最近二百年中,特别

下降。非化石能源占比稳步上升,到2019年已超过15%,在我们已宣布的目标当中,2030年这个比例会超过25%,还会继续往上推进。

碳达峰是指某一个时点,二氧化碳排放不再增长,达到峰值,之后逐步回落。它可能有个平台期,即达到峰值不再上升,稳定一段时间,然后再下降。碳中和是指一定时期内二氧化碳排放量与二氧化碳吸收量相平衡的状态。人类的生产生活会大量排出二氧化碳,但生态系统,陆生生态系统如森林,以及海洋生态系统,对碳有吸收作用,这叫碳汇,目前人类生产活动造成的二氧化碳的排放大大超过了陆生生态系统和海洋生态系统的吸收能力,这叫碳中和或者不平衡,碳中和的目标就是要在一定时段内使二氧化碳的排放量下降到和二氧化碳的陆生生态系统、海洋生态系统的吸收量相平衡的状态。

如果我们还继续延续过去以末端治理为主的控制路径,未来十年我们减排大气污染物的潜力将基本耗尽,即使是进一步努力,一直干到2060年,PM2.5浓度最好大概是在25微克/立方米左右,现在全国300多个城市平均浓度是33微克/立方米,可以发现,减下去的仍非常有限,所以我们寄希望于在碳中和目标下实现深度能源转型。在碳中和目标下,我们可以大幅降低PM2.5浓度,未来可以降到世卫组织现在的最低推荐值10微克/立方米以下,全中国平均值大概在8微克/立方米左右,老百姓的健康获益会大幅增加。

要实现碳中和目标,我们任务非常艰巨。全国二氧化碳总排放量在2020年是104亿吨,到2030年前达峰,预计达到110亿吨左右,略有增长。我们的碳汇能够吸收的那部分能力大概是十亿吨左右,要把二氧化碳排放

降到这个水平,意味着超过90%的排放量要减下来。

考虑到现阶段我们的国情,减碳存在三大难度:第一,我们现在还是高碳能源结构,化石能源比例和欧美比明显高,虽然煤炭比例已下降,但仍是全球煤炭比例最高的国家之一。

第二,我们是高碳产业结构。现在在全球产业链分工里,水泥、钢铁、石化这样高耗能的工业,在我们整个产业中的比例还比较高,这些是比较难减排的行业。

第三,我们是世界上最大的发展中国家,还在中高速发展阶段,在这个过程中,减碳绝不是轻轻松松能实现的。

我们未来的减排任务怎么逐步完成?可通过“五碳并举”来攻坚克难。第一,资源增效减碳。达到同样的经济目标,但将能源需求降到最低。第二,能源结构降碳,大幅提升非化石能源比例。非化石能源比例大幅提升后,仍有部分化石能源存在,即使到了2060年仍会存在,还会产生一部分二氧化碳,要有其他措施来解决。第三,地质空间存碳,通过碳捕集利用和封存(CCCS技术)来解决一部分二氧化碳。第四,生态系统固碳,通过各种生态建设手段,使二氧化碳的碳汇能力巩固和增加。这四个都是技术手段,什么样的技术在什么样的时空范围里应该优先使用,第五个措施即市场机制融碳可以发挥重要作用,碳市场会通过市场机制来推动各类技术更合理有效地应用。“五碳”一起发力是我们未来可能实现碳中和的基本路径。

我认为,“五碳并举”实现碳中和会带来政府行为、企业行为和个人行为的根本变化,影响范围非常大。这场经济社会系统性变革,涉及观念重塑、价值重估、产业重构及广泛的社会和生活影响。

第一是观念重塑。全球推进实现碳中和目标,世界经济发展将从资源依赖型向技术依赖型转变。现在的全球经济高度依赖化石能源,但化石能源地域分布极不均匀,目前,煤炭储量最多的前五个国家占了全球煤炭75%的储量;石油储量,前五个国家占了62%;天然气储量,前五个国家占了64%。“五碳并举”里的第二碳是能源结构降碳,核心是要大幅提升可再生能源或非化石能源比例。非化石能源最典型的分别是风能、太阳能、水能、核能。其中风能、太阳能将来比例会更高。全球风、光资源分布相对更均匀,谁能够更好更快地抓取风、光资源,即开发出大规模应用风电、光伏的领先技术体系,谁就提升了长期经济发展支撑能力。未来更关注关键技术的竞争。国际能源署(IEA),分别对低碳发电、电力基础设施、交通运输用电、工业用电、建筑物用电、燃料转化用电等技术做了梳理分析,在低碳发电领域像光伏发电等技术已比

较成熟,可走向市场;在电力基础设施领域,智能充电等技术目前还需要进一步研发、竞争,才能推向市场。IEA2021年的最新报告显示在全球能源行业的路线图技术中,50%目前尚未成熟,需要进一步研发提升,可见走向技术依赖型的发展模式对科技创新的需求更加迫切。

第二,价值重估。先看能源成本。目前风、光发电和火力发电的成本已相近。但如果加上并网成本,风、光发电目前和火电还比较高。碳市场的建立和逐步完善会使碳价在全国或者全世界发挥作用,逐渐使技术的竞争优势发生变化,并网成本随着规模的应用将大大降低,因此风电、光伏电的价值和竞争力会被重新认识。

再看看地域价值。目前,我们国家东部是发达地区,中西部是欠发达地区,但风、光资源恰恰比较集中在中西部,这会把这些地域带来新的发展机遇,可能一些耗能比较高的产业在那些供能比较密集的地域有更多的发展机遇,一定程度上也能带动这些地区的经济发展,使发展不平衡的问题得到一定解决。举个例子,宁夏地域很广阔,但沙地很多,一家企业做了大量的太阳能板,获得的太阳能用于发电,太阳能板造成大量的阴影,在阴影下种的宁夏特产枸杞,和没有太阳能板覆盖的枸杞相比,水分保持时间更长。太阳能板到一定时候是有污染的,会影响吸收太阳能,需要冲洗,冲洗太阳能板的水可以用来灌溉下面的枸杞,实现循环利用。这个经济模式,把原来比较荒的沙地大幅改变为能源利用地,为发展新的经济作物生产地,为发展带来全新机遇。

价值重估还有一个例子,光伏发电需要多晶硅薄膜材料,制造这种材料需要的关键稀缺元素如硼、磷等,这些元素如果以现有资源量供给现有用量没有问题,但2050年光伏装机总量的目标是要比2020年增加19倍,因此这些稀缺元素的累计需求量会大幅增加,其未来价值会更大提升。现在的固体废物里有这些元素,但现在更多地把这些元素视为有毒有害物,想办法进行无害化处理,一旦其价值增加后,可能就需要提高技术精打细算地从固体废物里把它们提取出来,这将大大推动它们的循环利用,这也是价值重估推动技术变化。

第三,产业重构。未来在减碳推动下,传统加油站会变成加能站,在我们国家正在走向现实。中石化在“十四五”期间计划利用原有3万座加油站、870座加气站的布局优势,建设1000座加氢站或油氢合建站、5000座充换电站、7000座分布式光伏电站点。

供电系统也会发生变化。传统上,我们通过火电、核电、水电的电网系统满足生产生活所需,但未来,风和光这两种新能源会引入到新型电力系统,其比例高了以后,有一个非常重要的特点,即其波动性非人为可控,风、光是天然资源,有季节性变化,甚至有

日变化,波动性很大,不像火电可控。这个情况下电力供需管理系统会催生新型产业——虚拟电厂。以前“以需定供”的模式相对稳定,现在“供”的地方出现了不稳定,就要最大限度挖掘“需”的地方,找到调节能力,这个调节能力如果在建筑物里,就是调节生活用能,比如洗碗机、洗衣机这些生活用电对时间不是特别敏感,早点干晚点干都行,放在什么时候清洗系统来控制,反正是时候就洗干净,这是生活用能的一种做法。生产上,比如水泥工业一些研磨工艺,有色冶金电解铝工艺、钢铁行业电炉用电等,在一定幅度里可调节,这个调节通过智能系统就能在供需之间形成相对平衡。大规模的电动车应用,其充电也有较大的调节波动能力。我们把未来发展中,这部分从调节“需”方来适应“供”方的波动的功能,叫做虚拟电厂。这是未来发展中非常值得期待的。现在江苏等一些省份已有这样的例子,水泥、有色冶金电解铝、钢铁行业这三种工业已可形成2000兆瓦的虚拟电厂,相当于十来个燃煤火电厂的发电量的供需调节能力。未来,这部分新业态发挥的作用还会更大。

产业重构方面,减碳压力的产业链传递也很突出。越来越多的全球性大公司自主承诺减排,原来对一家企业到底排多少碳要看生产过程,但现在已扩大到产业链。一个产业链包括上游原料和下游产品应用,把上下游综合考虑起来,就会形成减碳压力的产业链传递。比如,中国现在是世界上最大的小汽车生产和消费市场,每年产销2500~3000万辆,是美国和日本的总和,这么大的量,对钢材需求比较大。一家承诺了产业链上要减碳的跨国公司在生产小汽车时,就会要求上游生产钢材的厂家也要跟着它减碳,形成倒逼,炼钢厂如果达不到要求,它就会去找其他能达到的供应商。

工业产业链也会发生重大变化,传统石油炼制形成汽柴油输送给燃油车,燃油车消费后会排放大量二氧化碳,未来这一产业链的市场空间会被大大压缩。新能源大幅推广后,通过石油生产基础化工原料,产出橡胶、塑料、纤维这样的产品还有很大市场空间,而相关新材料还会进一步拓展市场空间。因此化工生产系统未来的主要方向会是燃料变成原料,能源变成资源,这样在终端产品里碳排放的压力会明显减少。

除了观念重塑、价值重估和产业结构以外,碳中和对社会生活也会造成广泛影响。

先看出行方面。比如大幅使用新能源汽车,特别是电动车,在全国会形成比较大的消纳风电、光伏电的能力,这也是虚拟电厂的组成部分。一个电动小汽车用户,可能根据充电的过程做优化选择,未来可能会通过虚拟电厂的方式,在整个电力系统里发挥调节作用,当光伏电、风电特别充足时,电价相对低,可把小汽车的电充满,形成一个分布式储能系统。当风电、光伏电不足时,电价会涨,小汽车用户可以去放电,

相当于卖电。国家电网在北京一个双向充放电互动桩试点,结果表明,一辆小汽车选择合适时段充放电,一度电能挣4毛钱,一年下来能挣4000块钱。此外,小汽车用户白天到单位上班,把车充满光伏高峰电,晚上回到家,停车位可以直接和家中用电系统关联,晚上用的就是白天充的便宜电,将来怎么优化这个系统也是很有趣的课题。据《节能与新能源汽车技术路线图》研究报告预测,2040年中国电动汽车保有量将达到3亿辆,每辆车平均65千瓦时,车载储能容量约达200千瓦时,将与中国每天消费总电量基本相当。

其次是住——建筑。现在有个概念叫“光储直柔建筑”,“光”指的是利用建筑的表面去发展光伏电,有研究表明,理论上如果把全北京的屋顶都装上光伏电,获得的电能可能是北京市用电量的2倍。“储”就是建筑利用可以链接建筑物外充电桩和蓄电池。“直”是内部直流配电。“柔”是弹性负载、柔性用电,直流和交流用电会提升15%效率,同时如果用了柔性用电系统,建筑在用电上会有15%~30%的调节能力,所以在适应未来高比例的风电、光伏电时,会成为非常重要的系统。如果是典型的住宅建筑和办公建筑群的组合,可以消纳近百公里范围的光伏电,春夏秋冬四季基本可以实现供电平衡,冬季因为有供暖需要,供电量会有缺口。柔性用电是充分利用风光这些非化石可再生资源。

第三,对老百姓个人行为也有影响。在上海已开始实施碳普惠行动,无论是垃圾分类、绿色出行、节约用电,还是光盘行动等,都可以积分抵扣,这个积分叫作碳币,你可以在一定范围内使用它,购买一些你需要的其他商品、服务,这是鼓励简约生活,人人都可以对减碳行动作出或大或小的贡献。

碳中和倒逼能源结构、交通结构大幅调整,可以根本性地解决PM2.5、臭氧污染等大气污染问题,使我们长期稳定地获得蓝天。同时由于增加碳汇的需要,我们的陆生生态系统、海洋生态系统的建设会加速改善,也就是生态恢复和生态工程的建设会大幅加速推进。到2030年,中国森林蓄积量要比2005年增加60亿立方米,这个数字将来还会增加,此外对土壤碳汇、海洋碳汇、矿物碳汇和地质碳汇改善都会不同程度的加速推进。因此,碳中和能大大促进美丽中国的目标稳定实现。

要适应这场经济社会系统性变革,需要政策的引导、技术的变革和人才的培养,这三个是最关键的重要支柱。碳中和可能对中国未来具有巨大影响的一个重大事件,将对自然科学、工程科学、社会科学的发展和提出创新提出巨大需求,需要多学科协同,通过科技创新和人才培养来实现这个重要目标。从现在到2060年,又是一个40年,碳中和的目标绝不是像我们这个年龄段的人可以彻底完成的,需要几代人来传承。所以,我们非常希望有更多年轻人投身新事业,为了“双碳”目标共同努力。