贺克斌：碳中和的未来之变

本刊记者　曾卓崑

贺克斌，中国工程院院士、清华大学环境学院教授，大气污染防治专家。

近日，清华大学环境学院贺克斌院士课题组与地球系统科学系张强教授课题组合作在《国家科学评论》（National Science Review）在线发表了题为《碳中和背景下中国 2015-2060 年 $PM_{2.5}$ 空气质量改善路径》（Pathways of China's $PM_{2.5}$ air quality 2015-2060 in the context of carbon neutrality）的论文，首次定量揭示了碳达峰与碳中和目标下中国及重点区域 2015-2060 年的空气质量持续改善路径，指出了实现碳中和目标对我国未来空气质量根本改善的决定性作用。

如果搜索“贺克斌”几个字，出现的除了“中国工程院院士”“清华大学环境学院教授”之外，最常见的是“空气质量保障专家”。这个词听起来很酷，仿佛可以呼风唤雨。与贺院士聊，他说这是团队的成绩，是数万人的联动，是一批人在一个平台上经年累月的积累，使得这个平台的数据可以成为大气污染防治研究的基础。他们的工作目前已经不仅局限于“保障空气质量”，自习近平总书记宣布我国 2030 年碳达峰、2060 年碳中和以来，碳达峰与碳中和成为了热门词汇，贺院士以及清华团队几年前就已经开始了前瞻性的研究，现阶段成果初显。

碳中和所要求的是协同，这就使更多人团结在一起，为了同一个目标，为人类的命运共同体而努力。

“空气质量保障”是为了蓝天白云而战。2008 年北京奥运会期间良好的空气质量，使得“奥运蓝”成为一个名词，后来又有“APEC 蓝”“阅兵蓝”等等。毕竟成绩的取得是与贺克斌以及清华团队分不开的，目前团队也在开展 2022 年北京冬奥会的空气质量保障研究。我们不妨先回溯一下此前的奥运时刻。

奥运大考“奥运蓝”

记　者　作为彼时北京奥运会空气质量保障专家组的成员，请您讲一下“奥运蓝”背后的故事。

贺克斌　2008 年，在北京举办了第 29 届奥运会。为履行申办时的环保承诺，保证赛时空气质量，成立了保障专家组，由我的老师环境学院的郝吉明院士和北大的唐孝炎院士领衔。1998 年，我们就率先在国内建立了 $PM_{2.5}$ 的长期观测采样平台，积累了十年的数据。我作为当时的骨干，负责空气保障方案的目标制定等

工作。

当时这项工作面临着双重压力：在 2008 年之前，北京的空气质量与国际奥委会要求的标准有较大差距。国际奥委员官员每天上网查看北京环保局的监测数据，如果空气质量明显不达标，可能会随时中断和调整赛程。西方媒体也一直质疑北京的空气质量能否像政府承诺的那样达到标准。

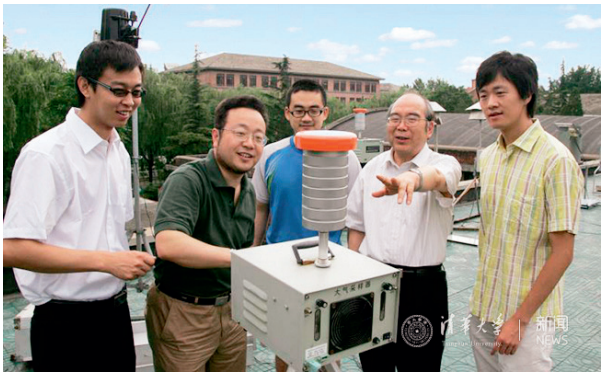
空气质量保障工作的背后是多方联动的过程。北京采取了机动车排放控制、严控重点施工工序、重点污染企业减排等覆盖多领域的治理措施。

如何说服众人，形成合力？我们采用了很多渐进式的办法让大家逐渐形成共识。先由清华、北大和北京市环境科学研究院与监测中心形成技术方案，之后请周边省市主管环保的领导，比如河北省环保厅长和主管环保的副省长等组成领导小组会，会上由技术组先讲工作方案，介绍北京的工业企业和能源结构怎么调整、机动车怎么治理，以及临近奥运会时的一些临时性限制措施。

那时北京真是下了大力气。但最后我们通过模型分析发现，北京做了这么多事以后，离国家承诺的目标还差一截，那这一截需要大家共同努力，共同完成国家任务。第一次会开完以后，我们把北京的方案发给大家，请大家参照方案来看有哪些北京做的事情，在其他地区也可以做。

由当时的环保部组织，把各地会后一个月内报上来的措施整理出来以后，我们技术单位又把它算到分析模拟体系里，看能减多少污染物，环境空气浓度能改善多少。第二次开会时又说，你看你们加入进来以后明显好转了，但是离承诺目标还差那么一点儿。再给一个月时间，大家再想一想是不是还可以再加码。

至少经过 2~3 轮，最后再到北京开会时，我们把整个方案拿出来。实际上这个方案不是北京市或者中央政府的环保部门单向要求地方做什么事，而是大家群策群力共同提出可以做哪些事，然后经过科研单位反复核算分析形成的。按照这个方案做下去，我们能够较大概率地完成空气质量保障任务。上至决策，下至执行，六省市区几十万人联动，仅重点源减排工程就达 500 多项。即便有这些努力，赛事当天的大考也还是令人捏一把汗。



郝吉明（右二）、贺克斌（左二）与团队在工作中

2008 年 8 月 8 日，奥运会如期举办。闷热的天气给空气质量保障专家组带来巨大的压力。气象条件湿度太大，开幕式前后要下雨又下不来，这对空气质量、污染物浓度的下降是非常不利的。我的老师，当时的组长郝吉明院士参加完当天中午的奥运新闻发布会后急得吃不下饭。为了确保开幕式结束时的烟花效果，气象部门采取了很多措施延迟降雨，让开幕式最后的烟花燃放能够顺利完成，一直憋到当天晚上 12 点半之后，观众大部分已经上公交车撤离了，那一场雨才下来，一直下到了第二天。雨下来以后，前几天憋的那个不利的气象过程就一下子缓解了。

到 8 月 17 日左右，专家组的大考才算真正心里有底可以交卷。我们觉得可能是几十万人的拼命努力，感动了上天。正式开奥运会的时候，给我们送来了一段相对有利的气象条件，我们既有的保障措施实施之后，最后的效果非常好：污染物浓度低到超出大家的想象，蓝天白云，大家都说多年来没有看过这么好的天气，所以后来管它叫“奥运蓝”。

北京奥运会空气质量保障工作的成功为后续系列大型活动的空气质量保障提供了借鉴。继北京奥运会

之后，贺克斌教授和清华团队先后负责和参加了2010年上海世博会、2010年广州亚运会、2014年APEC会议、2015年大阅兵、2016年杭州G20峰会、2017年厦门金砖国家峰会等重要活动的空气质量保障工作。

新时期有新要求，也有新的问题需要解决，并有新的技术手段提供帮助。北京奥运会前后大部分监测和观测以离线的方法居多，到了2016年，全国一批研究团队已经积累了大量在线数据，还有卫星和地面遥感等光学信息。

北京奥运会的空气质量保障工作还为之后的工作奠定了基础。工作的基本构架与思维方式基本是延续的。对于联防联控国人也有了共识，不需要再像北京奥运会那样一轮一轮地做说服工作。很大程度上，中国大气污染治理的联防联控与区域联动机制是经由北京奥运会的实践检验之后，推动形成的。

会议蓝是治标“促”治本

记　者　**“奥运蓝”“APEC蓝”“阅兵蓝”等说法肯定了空气质量保障方面的相关工作，但也包含了一些质疑：为什么重要会议的时间点能保证“蓝”，平时不能总“蓝”呢？这是治标不治本吗？**

贺克斌　从现象上看，这些“蓝”确实涉及短时间的临时减排措施，但我认为更合理的认识是将“治标不治本”改一个字，把“不”改成“促”，“治标促治本”。保障工作可以通过预先的模型推演和短期的措施实施，这两者分别从理论和短期实践上证明所采取的技术方案与措施的可行性与有效性。至少可以让决策者和基层群众都了解一点：今后长期改善如果按照这样的措施和路径一步一步走下去，在环境方面的投入将会是卓有成效的。

重大活动的空气质量保障工作还可以发挥大型现场科学实验的作用。重大活动前和举办期间，实施的短期减排措施相当于通过人为干预使污染物大幅度下降，这个过程积累了大量涉及排放、气象和污染物成分等方面的科学数据，十分宝贵，对研究人员修正和提升相关理论与模型也有非常大的帮助。

一些人片面地认为雾霾防治就是对工地、工厂、机动车等实行简单直接的关停，其实不然，因为这不能从根本上解决发展与保护的问题。

天上的实际反映和理论模型预估状态不一定一致。如果没有特定的实测数据检验，面对不同学者提出的不同模型，就难以辨别优劣。通过重大活动大气污染治理工作的实践，众多理论模型孰优孰劣就有了数据支持，正确的理论模型被检验后会获得更广泛的认同，也能够更好地被推广使用。

通过模型预报和短期实践，研究人员证明了哪些治理措施最合理、最有效。我们不是只关心大型活动，有客人来了才做点什么，客人一走就忘掉了。相反，我们以短期的实验为基础，规划出此后五年、十年、二十年的发展路径。

会议蓝为未来环境的长期改善积累了实战经验。一批治理措施已经不仅仅是在计算机上演示，而是被短期实践证明确实有效。因而，这些短期积累的实践经验是在“促”科研人员更有信心地提出方案，“促”决策者更有信心地去出台政策。

以山东为例，长期以来，山东地区因燃煤消耗量高导致二氧化硫排放量大。如果按照正常的国家总量控制方案，山东到2010年完成总量减排任务就可以。但是，为保障2008年北京奥运会的空气质量，山东被国家纳入了华北六省市联动的空气质量保障方案，要求在2007年年底之前完成煤电脱硫预定任务，之后山东煤电二氧化硫排放问题提前得到了有效解决，为提升自身的空气质量和保障北京奥运空气质量做了贡献。

再比如，通过重大活动，证明了机动车对空气质量的重要影响。2008年北京奥运会期间，通过交通限行、奥运特别车道等措施降低了交通流量，实现了排放量和污染物浓度的降低；北京北四环交通环境监测

点数据显示，奥运期间 PM_{25} 和 PM_1 平均浓度降幅分别高达 60% 和 67%。这证明了控制燃油机动车排放可有效提升空气质量，为北京制订和实施“车 - 油 - 路”一体的机动车污染治理政策，以及国家制定新能源汽车战略提供了有力支持。

所以我始终坚持，不能简单地认为短期保障是治标不治本。从发展看，它确实起到了非常关键的促进作用，治标“促”治本。

二氧化碳是导致全球变暖的主要元凶，气候变暖带来许多灾害，为改善气候环境，2015 年各国签署《巴黎协定》，确定“将全球平均气温较前工业化时期上升幅度控制在 2 摄氏度以内，并努力将温度上升幅度限制在 1.5 摄氏度以内”的目标。

在《巴黎协定》的框架下，各国相继提出碳达峰和碳中和的目标。**碳达峰是指在某一个时点，二氧化碳的排放不再增长，达到峰值，之后逐步回落。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。**截至 2020 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。

2020 年 9 月，习近平总书记在第七十五届联合国大会一般性辩论上宣布中国将力争 **2030 年前二氧化碳排放达到峰值，努力争取 2060 年前实现碳中和。**

近年来随着我国污染治理进程的深入，污染物减排幅度逐渐收窄，末端治理的减排难度日益增大，空气质量改善任务依然艰巨。生态环境部提出将以“减污降碳协同增效”为总抓手，加快推动从末端治理向源头治理转变，通过应对气候变化降低碳排放，进而从根本上解决环境污染问题。

未来之变：碳达峰和碳中和

记　者　碳达峰和碳中和，您与清华团队的研究揭示了什么？

贺克斌　碳达峰和碳中和重大战略目标的提出，为统筹大气污染防治与温室气体减排指明了方向，为空气质量持续改善注入了全新动能。

清华团队自主研发的中国碳中和与清洁空气协同科学评估与决策支持平台，第一次构建了碳达峰与碳中和背景下中国 2015-2060 年的中长期排放情景，提出了全国以及重点区域未来 PM_{25} 污染持续改善的路径。

通过研究我们发现，如一方面加大源头治理力度，提升可再生能源比例，推动钢铁、水泥等高耗能产品产量尽早达峰，加快散煤清洁化替代进程，同时持续推进非电行业、柴油机和 VOCs 重点行业污染治理工作（编者注：VOCs 是指“挥发性有机物”，VOCs 是大气臭氧和二次气溶胶的重要前体物，对区域性大气复合污染形成具有重要影响），则在 2030 年实现碳达峰目标的同时，全国绝大部分地区 PM_{25} 年均浓度可以达到现行环境空气质量标准，实现“减污降碳”的协

同效应。

记　者　实现碳中和会是怎样一种情景？

贺克斌　世界卫生组织（WHO）给出的 PM_{25} 年均浓度指导值为 10 ug/m^3，而我国现行 PM_{25} 标准（35 ug/m^3）只相当于 WHO 第一阶段的目标值，我们距离指导值还有不小的距离。空气污染对老年人的伤害更大，在未来人口老龄化的大背景下，我们还应当推动空气质量长期持续改善，这样才能达到全面保护人群健康的目的。

2030 年之后，由于末端治理措施的减排潜力基本耗尽，碳中和目标下的深度低碳能源转型措施将成为我国空气质量持续深度改善的动力源泉。

在碳中和背景下，到 2060 年我国将基本完成碳能源转型，可再生能源发电占比将达到 70% 以上，工业部门终端煤炭消费比例低于 15%，新能源车占比达到 60% 以上，民用部门能源全面清洁化。

2060 年全国碳排放总量预计约为 6.8 亿吨左右，在当前排放水平基础上减少 90% 以上；与此同时，全国人群 PM_{25} 年均暴露水平达到 8ug/m^3 左右，78% 的人群 PM_{25} 年均暴露水平低于 WHO 指导值，空气污染问题得到解决。

记　者　您用过“地面部队”与“空军和炮兵”来打比方，所比喻和强调的是什么？

贺克斌　空气质量的改善是区域性的环境问题，碳的问题则涉及全球的环境问题，这两个同根同源同过程。

如果要讲蓝天保卫战（即大气污染治理和空气质量改善的过程），从上个世纪 70 年代我们就开始“战”，而且一直“战”，只不过各个阶段的“战法”和重点不一样：上个世纪 70 年代的时候浓烟滚滚，当时是作为工业欣欣向荣的标志，那时空气质量改善针对的是消烟除尘，针对大颗粒污染。上个世纪 90 年代，国家在解决酸雨问题。到 2005 年接近奥运会的时候，污染物的治理慢慢转向治理颗粒物。特别是 2010 年以后，主要是治理 PM_{25}，也就是说粗的、大的颗粒物治理得差不多了或说取得了一定效果，所以这其后的治理主要针对 PM_{25}。

有关 $PM_{2.5}$ 的治理，到 2013 年之后效果越来越好。比较典型的是最近这八年，政策上出台了“大气十条”加“蓝天三年”（编者注：“大气十条”指国务院 2013 年 9 月发布的《大气污染防治行动计划》，“蓝天三年”指国务院 2018 年 7 月印发的《打赢蓝天保卫战三年行动计划》），对大气污染治理给出治理蓝图，并对各省市降低 $PM_{2.5}$ 浓度提出具体要求。全国几乎所有城市的 $PM_{2.5}$ 都在明显改善，有很多数据支撑。

有些人会问为什么还有雾霾？中国工程院有关于“大气十条”和“蓝天三年”的评估报告。我们要看到变好的趋势非常明显。如果希望治理 $PM_{2.5}$ 有效果，减排是硬道理。而对于减排来说，内因是排放，外因是气象。

2017 年时，我们的研究就提到了末端治理的潜力变小，不过还有一些。末端治理潜力越收越窄，未来的出路在哪里？在火电厂、水泥厂、钢铁厂等安装末端治理的措施，包括增加监管，归根结底都是在地面工作。在碳中和背景下，我们可以期待的能源一个是光，一个是风——这两样能源都在天上。

我用“地面部队”与“空军和炮兵”来打比方，指一般在战争中，空军和炮兵的杀伤力比地面部队更强，可以更大面积地消灭敌人。如果把污染物比作要消灭的敌人的话，“空军和炮兵”（产业和能源结构的调整）与“地面部队”（末端治理）相比，能实现更多的减排量。

记　者　要采取什么措施解决碳中和背景下我国所面临的挑战？

贺克斌　碳中和可能是改革开放四十年后对中国未来具有重大影响的下一个大事件，将带来广泛而深刻的经济社会变革。全国碳市场 6 月底前上线交易，是迈

	煤		油		天然气	
1	美国	23%	委内瑞拉	18%	俄罗斯	19%
2	俄罗斯	15%	沙特阿拉伯	17%	伊朗	16%
3	澳大利亚	14%	加拿大	10%	卡塔尔	12%
4	中国	13%	伊朗	9%	土库曼斯坦	10%
5	印度	10%	伊拉克	8%	美国	7%
前五总和		75%		62%		64%

世界经济发展在从资源依赖型向技术依赖型转变

向碳中和的重要举措。

在 2008-2016 年间，欧盟碳排放交易体系减少了超过 10 亿吨二氧化碳，约减少欧盟总排放量的 4%。我国从 2011 年开始陆续在北京、上海、深圳等地试点碳市场。电力行业已被纳入全国碳市场，预计后续还会纳入石油、化工、钢铁等行业。全国碳市场的启动，会使传统企业转型升级的动力更加强劲，也将大大推动我国二氧化碳排放量的降低。

和 1990 年相比，2020 年单位 GDP 的二氧化碳排放强度降幅超过 90%。煤炭在一次能源当中所占的比例从 1990 年的 76.2% 下降到了 2020 年的 57.7%，非化石能源占比稳步上升，到 2019 年已超过 15%。减碳支持了 $PM_{2.5}$ 浓度的大幅降低，和 2013 年相比，2020 年 $PM_{2.5}$ 浓度下降了 46%。不过，我们仍面临处于中高速发展过程、高碳能源结构、高碳产业结构等挑战，我认为要**资源增效减碳、能源结构降碳、地质空间存碳、生态系统固碳、市场机制融碳**这“五碳并举”来攻克难关。其中全国碳市场的形成是发挥市场机制的有效举措，能大幅度推动降碳技术的应用。

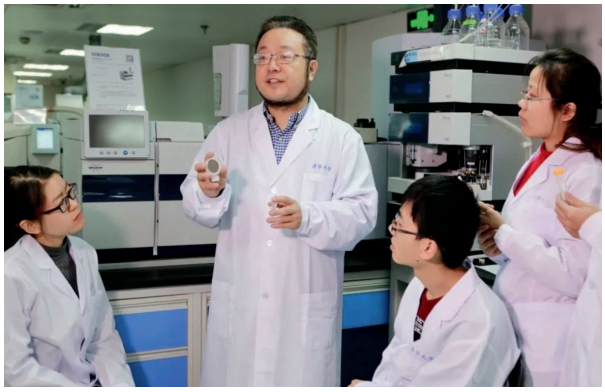
记　者　碳达峰、碳中和时代，什么能源在未来有更大的发展空间？

贺克斌　实现“美丽中国”的目标，碳达峰、碳中和会带来观念重塑、价值重估、产业重构等广泛影响，也会影响政府、企业和个人的行为。

在推进碳中和的进程中，世界经济发展在从资源依赖型向技术依赖型转变。目前，煤炭储量最多的前五个国家占了全球煤炭 75% 的储藏量；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%，传统化石能源资源分布明显不均匀。

而全球风能和光能资源的分布则相对均匀。风电、光电的发电成本目前已经与火电成本接近，但并网成本高。随着技术的进步，当未来这一成本降低后，风电、光电的价值和竞争力会被重新认识。当新能源比例逐渐上升后，谁的新能源技术领先，谁可以有效利用的能源就更多，因此科技创新就成为各国竞争的焦点。

在今年 4 月的清华 110 周年校庆录影中，贺院士自豪地讲到改革开放 40 年以来，大气污染防治领域历次的大仗、硬仗，清华团队从来没有缺席过。



贺克斌（左二）与学生在一起

他的老师是环境学院的郝吉明院士，他的学生张强已成长为他现在的科研伙伴，在地球系统科学系任教、带领课题组。清华的科研与治学理念在一代代科技工作者中传承。

清华大学的地球系统科学系、气候变化与可持续发展研究院、车辆与运载学院、能源与动力工程系、建筑学院等院系，在碳达峰、碳中和的背景下，也在进行交叉性研究，合力攻关，解决国家难题。

科学研究的前瞻性

记　者　请介绍一下清华团队所搭建和依托的数据平台？

贺克斌　清华的数据平台最初的建立是针对单污染物的排放。也就是说，主要测算分析单一污染物的排放时空分布和行业贡献。后面这个平台所承载的数据越来越多，也越来越复杂，到目前已经形成了一个依托于清华无锡超算中心的超级计算机系统来运行的超大数据平台。

上个世纪 90 年代，中国最大的环境问题是二氧化硫造成的酸雨，清华的大气团队就在这方面科技攻关，从燃煤、二氧化硫切入，那时的数据还是表格式的。后来环境问题所涉及的需求一点点增加，比如要研究和解决机动车问题、工业过程的相关问题等。随着社会经济发展复杂程度的增加，这个平台的数据也在积累。2010 年前后逐渐形成了动态、多污染物的表征模型。

这里还涉及科学研究的前瞻性问题。之所以清华团队的成果在国家需要的时候能用得上，是因为我们的科学研究有前瞻性，能走在国家政策前面，为国家预测和解决实际问题。2010 年左右形成多污染物排放数据平台之后，2012 年、2013 年国家开始大力治霾，我们的数据已经积累和准备好了，马上就能发挥作用。这也是为什么几百家单位都在使用我们的在线数据平台。全国 90% 以上的空气污染预报系统都在使用我们的平台。这个科研的布局，我们是很多年前就开始做的。

中国签署《巴黎协定》，碳达峰、碳中和的长期路径还未明确，大家还在讨论雾霾治理之时，清华团队已经认识到气候变化和空气污染是要协同应对的。我们不断充实平台数据，文章是去年投稿的，并不是习主席提到碳中和之后我们现找选题做研究。

科学研究需要前瞻性，赶时髦是不行的。发表文章是要经过国际同行的严格评审，成果不是一两天能凑出来的。正因为我们 5 年前就开始做，现在才有一些成果出来。科研需要预判，也需要积累。为何你有发言权？你的研究结论为何有说服力？这都和平时的数据积累和科研分析方法相关。

记　者　请问清华在此方面的交叉研究有很多吗？

贺克斌　很自豪地讲，清华大学在科学研究以及解决实际问题方面是有优势的。碳达峰、碳中和涉及社会的方方面面，清华很多院系和机构都有交叉研究与合作。比如去年 10 月，气候变化与可持续发展研究院发布《我国长期低碳发展战略研究》；气候院与地学系都有开展 NbS（基于自然的解决方案）；车辆与运载学院一直致力于新能源汽车的研发；建筑学院探讨建筑物外观涂层如何通过吸收碳，从而降低碳排放等等。清华人才济济，也相信清华的众多科研团队，能够在碳中和背景下形成合力，一起攀登科研高峰！

（文中部分数据和观点引自贺院士在 6 月 9 日“人文清华讲坛”的演讲）