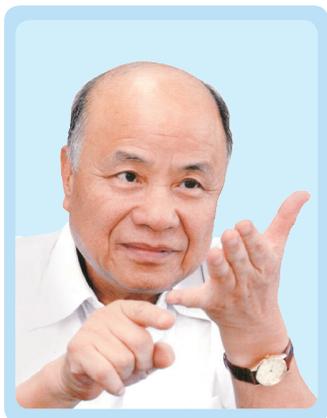


# 开启我国低碳转型窗口的几点意见

○ 倪维斗



## 倪维斗

清华大学热能工程系教授。历任清华大学热能系、汽车系主任，副校长，校务委员会副主任，北京市科协副主席，教育部科技委员会主任，国家重点基础研究规划专家顾问组第一届和第二届成员，国家电力公司科技委员会委员，中国环境与发展国际合作委员会(CCICED)能源组中方组长，煤燃烧国家重点实验室主任，国家“攀登计划”B项目首席专家。1999年当选中国工程院院士。

## 全球能源与严峻的环境形势

生态文明和美丽中国，这是最近比较热门的一个话题。

可以说，想要实现“美丽中国”，就必须建设生态文明。所以今天很高兴能来到这个讲座，也想借此机会谈谈我国低碳转型的问题。在此之前，我觉得有必要先跟大家聊一聊目前全球的能源和环境形势。

首先，必须明确一点，能源环境是人类可持续发展的永恒课题。如今，世界人口不断增长已成为必然趋势，全球人口很快将增加到90亿。随着科技的发展，人们对于美好生活的标准也在不断提高，人均能源需求量越来越大，所要求的能源服务水平也越来越高。公共汽车、私家车、高铁、飞机，这些交通工具无一例外需要消耗能源。再如，无论是北方还是南方，夏天需要制冷，冬天希望有暖气，这些也都需要消耗能源。

人类对舒适度的要求，必然随着技术的发展越来越高。从这个角度来说，一方面全世界的人口不断增长，另一方面每个人要求的能源消费量

也在增长，两者相乘，总量之大地球将难以承担。因此，能源与环境的可持续发展是人类永恒的课题，人类想要存活下去，就必须解决好能源问题。

下面再谈一下能源与环境的关系。能源问题，实际上也是人类和大自然是否和谐相处的一个焦点。但如今的情况并不和谐，总量巨大的温室气体排放对气候变化的影响、细颗粒物PM2.5对空气质量的影响等，一方面是由于大量化石能源消耗破坏了大自然，另一方面其实也是大自然对人类的惩罚。在很长一段时期内，我国乃至全世界的发展，都

认为技术可以决定一切。所谓“人定胜天”，只要我们同心合力，就能克服大自然的一切问题。事实上，大自然是永远不可能被征服的。如果人类掠夺了大自然，大自然必定要报复。能源利用和环境问题就是人类和大自然交流中产生不和谐的一个焦点。

随着技术的发展，我们渐渐发现以往强调不可再生的资源，主要指化石能源，总量其实还是很可观的。比如说，在北冰洋地下就蕴藏着很多的资源可以利用。南海问题、钓鱼岛争端，实际上都包含着海底资源的问题。能源资源并不是没有，真正没有的，是环境资源。也就是说人类在消耗完化石能源——煤、石油、天然气之前，首先被消耗光的会是环境资源。环境资源的损耗，导致了气候变化、全球变暖、空气污染，其所引发的后果将不堪设想，例如极端气候、海平面上涨和持续重度污染的雾霾天气等。人类的诸多活动导致气温不断上升，经历量变到质变的过程后，突发事件会在某一时刻降临地球，届时人类是否还能存在就是个问题。因此，环境资源、生态资源才是问题的核心。

而如今，允许人类用智慧思考和处理这个问题的时间已经所剩无几，人类在耗尽有形的资源之前，会首先把环境资源用光，形势已然迫在眉睫。

## 我国特殊资源禀赋加剧能源形势

中国的资源禀赋以煤为主，这使我国能源和环境问题更为严重。目前我国CO<sub>2</sub>排放总量居世界第一，但换个角度分析，从人均排放量和历史责任来看，发达国家应该承担更多的责任。不过这并不是说，包括我国在内的发展中国家就可以放任不管，因为气候问题是全世界的问题。发达国家应该投入更多的资金、提供更好的技术来减排CO<sub>2</sub>，而发展中国家也应重视CO<sub>2</sub>的排放问题，积极减排以应对全球环境问题。

另外，能源安全也是我国能源领域面临的一个重大挑战。我国的能源消费量，尤其是石油，

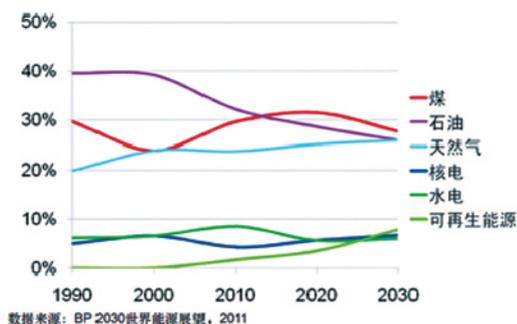
一直在不断增长。如今，我国年石油消费量接近5亿吨，但自产量却只有2亿吨，这就意味着一半以上的石油消费量都需要进口，对外依存度接近60%。如此高的石油对外依存度，显然会威胁到能源安全。因此，我国理应扩大石油储备。但是石油储备不仅需要大量资金，储存石油的技术也是个大问题，短期内难以解决。由此看来，我国液体燃料处于极不安全的状态。

提到能源和环境，就不得不提最近大家都非常关心的一个问题——PM2.5。其来源非常广泛，其中约一半来自于燃煤和汽柴油的燃烧。2012年，我国的一次能源消费总量已达36.2亿吨标准煤，其中煤炭占66.4%。煤在燃烧过程中产生很多污染物，除CO<sub>2</sub>外，还包括硫氧化物、氮氧化物、粉尘、细颗粒物、汞和其它重金属等痕量元素。但如果我国不以煤为主，而以石油为主，那能源的对外依存度就必然更高，全世界都无法支撑中国的能源消耗。因此，就目前来看，我国的能源供应依然主要靠煤，因此如何清洁、高效地利用煤炭，这是个值得研究的课题。

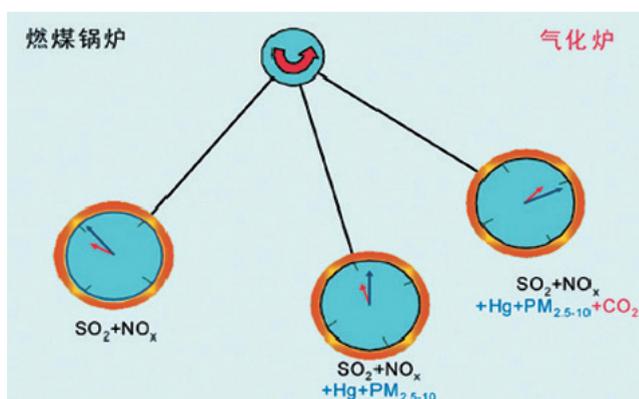
中国未来的能源结构中，可再生能源、核电以及天然气的发展都很快，但是到2050年依旧累计需要约1200~1500亿吨的煤。预计在2050年我国能源消费总量高达65亿吨标准煤，人均消耗量约为4吨标准煤，而如今我国人均煤炭的消耗量已经达到2.7吨标准煤。这意味着，我国人均煤炭消费量的增长空间已经非常小了。

经过全世界很多科学家的分析，到2050年，如要维持全球气温升高不超过2°C，那时候全球CO<sub>2</sub>的排放量只能是1990年的一半，即104亿吨，这也是届时全球CO<sub>2</sub>排放的总空间。如此看来，即使发达国家承诺减排其中的80%，发展中国家整体上也需比2005年减排36%。而中国正处于CO<sub>2</sub>排放的上升期，面临国际上对我国CO<sub>2</sub>排放峰值出现时间和绝对值的要求（譬如2030年80亿吨，2035年90亿吨，2040年100亿吨等），在已经大力强化节能、发展核能和可再生能源的条件下，未来我国在碳减排上仍将处于被动状态。正因为国际留给中国的CO<sub>2</sub>排放空间非常小，我们应及早主动采取措施而不是

在世界一次能源消费中的比重



在世界一次能源消费中的比重



随着越来越严格的环保规定，煤气化多联产在经济上的优势将会越来越显著。



2013年12月24日高新区科技路



2013年12月24日，西安连续第8天出现重度雾霾污染天气，能见度极低，空气质量重度污染，12月24日PM2.5达712，古城的高新区现代化地标建筑都“隐身”于雾霾之中



重度雾霾中的北京

被动减排以应对全球气候变化。

### 低碳减排：煤炭现代化协同利用

为了掌握碳减排的主动权，我也作了一些思考，想借此机会与大家交流一下。

首先，我们需要认清一个不可改变的事实：煤现在是、将来仍是我国能源的主力，而且煤用于发电的比例也将越来越大。但是煤的直接燃烧已引起严重的环境污染，如果仍延续这种做法，将很难解决温室气体减排问题。因此，要减排CO<sub>2</sub>，对于中国来说，也只有在煤炭利用上下功夫。

如何在煤燃烧的过程中大量减排CO<sub>2</sub>，这也是我国面临的大问题。目前来看，比较好的方法之一，就是采用煤炭现代化协同利用—多联产的方式。也就是说，煤不直接燃烧，而是先将煤气化，生成合成气，主要成分是CO、H<sub>2</sub>和一部分

CO<sub>2</sub>等。合成气净化之后，可用于发电，也可用于生产化工产品，同时把这些过程协同起来，也提高了煤炭利用效率。考虑到不同产品对合成气成分的要求，把合成气里CO通过变换过程生成H<sub>2</sub>，分离出CO<sub>2</sub>，再对CO<sub>2</sub>进行处理。H<sub>2</sub>可以做燃料，氢能是很干净的能源。

简单来说，将来的煤需要经过这样的处理：经过气化、净化，然后用于多联产，生产电、液体燃料、化工产品等。这种方式可以使煤炭利用更加清洁，效率也提高10%左右。同时，CO<sub>2</sub>以此种方式处理会比直接燃烧后在烟气尾部处理要容易一些，因为气化过程中压力比较高，CO<sub>2</sub>浓度高。整个过程相互耦合，可以实现能量流、物质流的总体优化。一方面达到了氢碳比合理优化利用，尽量减少“无谓”的化学放热过程，另一方面通过蒸汽联合循环等方式也实现了热量的梯级利用，以及温度、压力潜力和物质的充分利用。

对中国来说，煤的清洁、高效利用是低碳发



展的核心。以气化为基础的煤碳多联产是一条可行的途径。它具有捕捉CO<sub>2</sub>的天性，是实现未来CO<sub>2</sub>捕捉和埋存的途径，也是中国CO<sub>2</sub>减排的战略方向，对于中国乃至世界都具有重要的战略意义。

在可再生能源利用方面，要强调有序发展，根据技术经济约束条件，采用分散式、分布式开发方式，就地、就近利用；政府补贴政策要贯彻效率原则，政策的实施要依靠竞争和比较机制。

煤炭多联产方式是综合解决我国能源问题的重要方案。它不但有助于缓解能源需求总量巨大和液体燃料短缺的问题，还能彻底解决直接燃煤发电的污染问题，并且减少或消除常规燃煤污染物的排放。除此之外，可以以更低的成本脱除重金属等污染物。另外，多联产方式还有助于解决快速城市化引起的小城镇和农村洁净能源供应问题：

一方面，为具有天然气管道的城镇提供城市煤气；另一方面，煤制二甲醚可以作为LPG（液化石油气）的补充或替代物，很可能是小城镇，尤其是住宅高度分散的农村地区的最终能源解决方案。最重要的是，由于煤气化系统可以较小的成本捕捉CO<sub>2</sub>，该方式能满足未来减排CO<sub>2</sub>的需要。

因此，以气化为基础的多联产是一条可行的途径。这符合可持续发展的要求，在技术上也有良好的继承性和可行性，而且还有较高的经济效益和环保性能。

这个途径具有捕捉CO<sub>2</sub>的天性，是实现未来CO<sub>2</sub>捕捉和埋存的途径，也是中国CO<sub>2</sub>减排的战略方向，它对于中国乃至世界都具有非常重要的战略意义。

说到底，对中国来说，煤的清洁、高效利用

是低碳发展的核心。

## 新能源和可再生能源的特点与挑战

下面简单说一下可再生能源的问题。可再生能源无非三种：风能、太阳能和生物质能。

我国的风机并不少，现在中国制造风机能力已经是世界第一，风机的装机容量也是世界第一。

装机量大概6000万千瓦，超过了美国，也超过了德国和西班牙。我国的风力发电发展到现在势头有些减缓，主要因为风力发电的间歇性和不可控。不同于烧煤，风力发电很难控制电量，而这种随机的电如果容量很大，电网是承受不了的。可以说，现在的电网和风机容量不配套，电网没法消化这些电。

而这个问题就需要我们用智慧来解决，否则就变成了虽然有资源却无法使用的情况。

太阳能也是如此。我国的太阳能光伏生产能力也是全世界第一，我国的生产能力大概是全世界太阳能光伏生产能力的一半。不久之前，无锡最大的太阳能光伏生产者——尚德宣布破产重组。它原来是“明星企业”，交税多、利润大，但最终却以破产收场，原因何在？就是因为生产量太大，却没有与之相适应的市场。早先，我国的太阳能是“两头在外，中间在内”。这是说制造太阳能的设备和原料是从国外引进的。由于单晶硅的原料纯度要求非常高，达到了99.9999%，我国的生产技术开始时还达不到这个要求，所以实行“买进来”的办法。“中间”指的是在国内加工，但由于价格太高，国内市场需求不多，大部分市场只能转向国外。可是如今价格比原来降低了将近十分之一，即使是国外的市场也是无钱可赚。如此一来，“两头在外”——设备要花钱，市场还要被控制，一旦产品被压价就会很无奈。

新能源一般比煤发电要贵，这是不可避免的。例如，风力发电，国家大概每度电补贴两毛钱，只有这样，风力才能发展起来。而太阳能发电需补贴五六毛钱，因此在中国大力发展太阳能，目前来看国家经济很难承受。另外还有一个电网的问题，太阳能发电的年工作小时数为1500



达坂城风电场

个小时，时间也不是人为控制的。如此看来，主要有两个问题：一方面，电网没法接受难以控制的可再生能源，另一方面，能源及产品生产成本偏高。

相对来说核能是干净的，因为核能产生的过程中，并不存在有毒、有害气体的排放。所以，核能还是要利用，但是要把核能的整个安全标准再提高。

在对可再生能源的利用上，还有一点，就是要强调有序的发展。可再生能源本身的价格就高。现在的情况是，整个生产链不仅要生产，还要传输，要消纳电，还要国家的补贴政策。全靠国家补贴政策来发展新能源，显然是不现实的。如何使新能源的成本更低、价格更低？没有形成批量生产就不可能便宜下来，所以要让更多总量增加，就必须鼓励大家使用。如果条件允许，个人就可以考虑安装一个太阳能电站。花2万块钱安装一个千瓦，那首先自己就省下了每月的电费，同时每年有几百度电可以上网卖给电网。但是，个人投资目前肯定是不划算的，可能20年都无法回本。这么看来，新能源的另一个问题就是要找到降低可再生能源价格的有效方法。

总的来说，可再生能源有以下的特点：一是能量密度低；二是供能过程具有随机性和间歇性；三是没有办法大规模储存；四是在经济性上还不具备竞争力。反过来说，如果可再生能源在提高经济性方面没有明显而且持续的进步，那么也很难发展起来。

## 可再生能源：分散系统，协同利用

在这种情况下，我对开发利用可再生能源也有几点思考。首先要根据技术经济约束条件，采用分散式、分布式开发方式，让这些能源就地、就近利用。这样一来，电力可以就地消纳，不必再远距离输电。另外一方面，电源一分散，接入系统电压等级就很低，好比在“毛细血管系统”里运行，而不是在“主动脉”。就是说，对可再生能源的利用采取分散系统，就地消纳就地用。

其次，政府补贴政策要贯彻效率原则，政策的实施还是要依靠竞争和比较机制。那种认为只要是“新能源”，就该由国家补贴的观点是片面的。补贴政策也要体现阶段性、考虑成本性，不能用国家的科技资金大规模地补贴以获利为目的的商业性建设项目。发展风能和太阳能发电，要看电量，要注重实际业绩。新建的输出通道要采用储能装置，与火电打捆。输出一定要系统地考虑所输出电量的全产业链成本。

另外一点，电网要以公益性为先。电网的应得收入要予以保障，但要调整营利机制，允许分散、分布式就近接入交流电力系统，形成千家万户开发利用新能源的局面。

最后，也是最重要的一点，可再生能源一定要努力和其他能源协同。从传统角度看，每一个产品仅使用它的传统原料，实际上从能源利用和物质利用来看，都是十分浪费的。在21世纪，人类必须要“告别”这种单一的利用。比如电解铝，铝是从氧化铝电解，每吨电解铝要消耗16000度电。那么是否可以用风电来电解铝呢？不用电网，在有大量风电的地方建铝厂，用铝厂来消耗多余的电。氯碱工业、海水淡化也是如此。现在沿海也缺水，南水北调花费很大，在这种情况下，我们可以利用风电和太阳能将海水淡化。风电还可以和煤的多联产结合起来，现在煤的转化需要氧气，但是提取氧气很耗能，如果用风电电解水，是可以得到氧气和氢气的。

再重点谈一下对太阳能的协同利用。一般来讲，太阳能光伏发电的本身制造过程中要消耗大量能源，而薄膜太阳能PV虽然用材少，制造过

程能耗小，但是光——电转换效率相对较低。近几十年寄予希望的光热发电，由于目前的聚光技术、中间加热介质技术不成熟，使蒸汽参数（主要是温度）受到限制，从而整个系统转换成电的效率较低，只有约20%~25%。其实太阳能热利用有很大潜力。既然太阳能是分散的、能量密度很低的能源，是否一定要费很大的“劲”去提升它的聚光温度呢？聚光温度越高，投资越大，相应的损失也越大。是否能在较低温度范围用太阳的热能，然后和别的高能量密度的化石能源相协同？其实只要在较低温度段用太阳能加热工质，而靠别的能源（如煤和天然气等）把工质温度提上去，这样太阳能可以更好地发挥自身的优势，避开劣势，与传统化石能源各得其所。把太阳能变成整个加热过程的其中一段，不仅使太阳能得到了充分的利用，而且减少了化石能源消耗，煤“站”在太阳能的“肩膀”上发挥了潜能。太阳能热利用的方式可以说是多种多样，例如农产品的干燥，可以和热泵结合以保证合适的干燥过程；还可以用于建筑制冷和采暖等。

总之，要建立“协同”（Synergy）的思想，从各种能源、原料、工艺过程、终端产品等方面，尽可能地贯彻协同，以达到最大限度利用原料的能量和物质的目的，这也是本世纪人类尽可能缩小面对大自然不断扩大的“赤字”的重要措施。

### 挖掘传统能源潜力综合利用能源

2011年我国天然气消费总量近1000亿 $m^3$ ，对外依存度达30%。按照规划，2020年天然气的消费总量将达3000亿 $m^3$ ，这是一支巨大的能源“生力军”。它必然会引起我国能源系统非常大的变化，因为它是清洁能源，可利用的潜力温度比较高，且是便于分配、运输的燃料，这个变化来的势头可能要比可再生能源所引起的变化大得多、快得多。

时至今日，天然气的产量，包括引进与自产的总量和用量已经大幅度增加，我国对如何利用天然气一定要有新的思考、新的战略安排，对其将要引起的能源系统“革命性”的牵引要有充分

认识。其中的核心问题就是天然气在应用过程中是否能发挥其高潜力温度的优势，这也是衡量天然气是否被正确利用的一个重要标准。从这个标准出发，天然气用于直接供暖，用于蒸汽系统发电都是不合适的，是宝贵资源的极大浪费。

因此，一方面，我们要在技术上进一步挖掘传统能源的潜力，另一方面要更加综合有效地整合各种能源的利用。首先，要大幅度提高能源利用效率，减少能源消费总量，减排各种污染物，尤其是 $CO_2$ 。例如，天然气的高效利用可以缓解能源安全危机，使石油对外依存度控制在65%以内。其次，在满足经济发展对能源需求的条件下可以减少煤电站的建设。到2020年天然气的分布式“三联供”至少可以少建50~60套百万等级的燃煤电站。尽可能减少煤在能源消费总量中的比重，这对控制PM2.5也能起到较大作用。另外，分布式电站不同于传统的电、热、冷联产，而是因地制宜，尽可能和可再生能源耦合起来，比如风电、太阳能PV、太阳能热利用、生物质以及各种热泵，使之组成一个高效、低污染，能适应广泛负荷变化的能源系统。在某种意义上也可以说，用以天然气为核心的分布式能源系统能更好地促进可再生能源的发展。值得注意的是，要促进真正意义上的智能电网的发展和应用，就必须使信息技术真正地 and 能源技术结合起来，形成能源信息技术（Energy-Information Technology）。从长远来看，智能电网、智能能源网、智能水网、智能天然气网，四个网整合、协同起来，是未来能源可持续利用的必然趋势。最后，要促进先进制造业的发展，如燃气轮机和各种热泵等，其中燃气轮机已列入我国新的重大专项。只有有了应用火车头，才可能促进新兴产业的发展。

总之，大自然给予我们各种资源，人们一定要合理、科学地应用，把它们所能提供的“潜力”用足，而不能高能低用，“暴殄天物”。■

（本文根据倪维斗院士2013年3月28日做客清华大学新人文讲座所作报告录音编辑整理。编辑整理/张瀛辰 郭智慧 李东雅 马逸昕）