



煤炭的未来

□刘清 / 编译

《煤炭的未来》报告分析了煤炭在限制碳排放以缓和气候变暖趋势的背景下的作用。其第一个假设是,全球变暖的风险真实存在,美国政府以及其他国家政府应该并且将要采取行动以抑制二氧化碳以及其他温室气体的排放;第二个假设是,煤炭在限制温室气体排放的背景下继续具有重要的、不可或缺的作用。政府和产业部门面临的挑战是,一方面要寻求途径来缓和碳排放的形势,然而另一方面又要继续利用煤炭,以满足迫切的能源需求(特别是在发展中经济体)。这一产业的规模十分巨大。麻省理工学院这一研究的目的是确定用于确保示范技术得以应用的方法。示范技术有助于在煤炭依旧作为全球能源需求的重要部分的时候达成削减碳排放的目标。研究并不是要分析碳排放控制的政策选择,因而也就不就当前应采用何种缓和碳排放的方法提出建议。然而,研究人员希望,这一研究能够为促进接受美国的综合性碳排放政策做出贡献。

未来将继续消费大量煤炭以满足全球能源需求。在限制碳排放的背景下,碳捕获和封存(carbon capture and

2003年,美国麻省理工学院的研究人员决定开展一系列跨学科研究,探究美国和世界应如何在不增加二氧化碳或者其他温室气体排放的前提下满足未来的能源需求。第一个研究《核能的未来》在2003年发布。第二项研究始于2004年,其结果是今年3月发布的《煤炭的未来》报告。这份报告的目的是,在限制碳排放以缓和气候变暖趋势的背景下分析煤炭的作用,重点是结合碳捕获和封存系统的不同煤炭燃烧技术的性能和成本。研究报告的结论是,碳捕获和封存技术是显著减少二氧化碳排放的关键技术,能保证煤炭作为重要的能源资源满足未来紧迫的能源需求。报告传达的主要信息是,商业规模燃煤电厂碳捕获和封存的技术、经济与制度上的示范,有助于提高决策者和公众信心,可以让他们了解,存在可行的缓和碳排放的途径;如果接受限制碳排放的政策,将会缩短部署碳捕获和封存技术的时间,并降低成本;可以用成本最低并广泛可用的能源形式,以环境友好的方式来满足日益紧迫的能源需求。

sequestration, CCS)技术是未来关键的技术选择,它在促进减少二氧化碳排放的同时,使煤炭消费保持在当前水平之上。

研究人员相信,由于煤炭价格低廉、储量丰富,在任何可以预见的场景下,煤炭消费都将会增长。用煤炭产生可利用的能源,其成本是1-2美元/MMBtu(百万英制热量单位,下同),而石油和天然气则为6-12美元/MMBtu。而且,与石油分布的地域性不同,煤炭资源在全球广泛分布。特别是美国、中

国和印度有巨大的煤炭储量。对于这些国家以及欧洲和东亚的煤炭进口国而言,经济和供应安全是保持煤炭消费的重要动机。无碳排放的技术(主要是核能发电和可再生能源发电),在限制碳排放的背景下,也将发挥重要作用,但是由于缺乏可以预见的重大技术突破,从量的角度而言,煤炭将是不可或缺的。

然而,煤炭在其生产和消费的过程中具有不利的环境影响。过去二十多年来,在减少所谓“标准”的空气污染物(硫化物、氧化氮以及燃煤电厂的粉尘)方面已经取得了重要进展,降低汞排放的规章最近也已就位。相对而言,由于高碳含量,煤炭产生每Btu(英制热量单位,下同)热能的碳排放相当高。

研究人员认为,CCS是一种重要技术,有助于显著减少二氧化碳的排放,同时也使煤炭能够满足日益紧迫的能

源需求。

为探索这一前景,研究人员应用了麻省理工大学开发的“碳排放预测与政策分析”(EPPA)模型,设定在各种假设的情况下,全球煤炭消费和二氧化碳排放的场景。这些假设的情况包括,可能施加在二氧化碳排放上的碳排放收费的水平和时间节点,以及从煤炭中去除二氧化碳的成本。全球经济对于针对二氧化碳排放设定价格的反应是多种多样的:能源消费减少,逐渐减少碳燃料,改善新的和已有电厂的效率,采用新的控制碳排放的技术(如CCS)等等。在设定碳排放价格时,研究人员设定一种“高”价格轨迹,从2015年每吨二氧化碳25美元开始,每年增长4%。25美元/公吨的价格非常有意义,这是因为这一价格使得CCS技术具有经济性。研究人员同时也研究了“低”价格轨迹场景。在这一场景下,轨迹始于7美元/公吨的二氧化碳排放价格,此后每年增长5%。“低”价格场景的关键特点是在差不多25年后会达到最初的“高”价格水平。其他假设包括到2050年核能的发展状况(限制发展或膨胀发展),和天然气价格状况。

研究结论是,将继续消费大量煤炭以满足全球能源需求。高二氧化碳排放价格将导致在2050年煤炭消费相对于常规情况下实质性地减少,但在大部分情况下相对于2000年有增加。在限制碳排放的背景下,CCS技术是未来关键的技术选择,它在促进减少二氧化碳排放的同时,使煤炭消费保持在当前水平之上。表1显示的是较高二氧化碳价格

从数据看碳捕获面临的挑战

当前,化石能源资源占能源需求的80%,其中煤炭占25%,天然气占21%,石油占34%,核能占6.5%,水电能占2.2%,生物质能等占11%。地热、太阳能和风能所占的份额仅为0.4%。

美国国内50%的电力生产是源于煤炭。

美国有相当于500多座,装机容量500兆瓦,平均运行时间35年的燃煤电厂。

一间500兆瓦的燃煤电厂每年产生约300万吨二氧化碳。

美国每年从燃煤电厂产生约15亿吨二氧化碳。

如果所有这些二氧化碳被加以封存,数量上相当于在正常运行条件下美国燃气管道每年传输的天然气重量的3倍、体积的1/3。

如果60%由美国燃煤电厂产生的二氧化碳被捕获并被压缩成液态封存,其体积相当于美国每天的石油消耗(2000万桶)。

目前,最大的碳封存项目是在Sleipner向北海深部的咸水含水层(saline aquifer)每年注入100万吨二氧化碳。

表1 2000年和2050年煤炭消费(单位: EJ)和全球CO₂排放(单位: Gt/yr)比较

	常规情况		限制核能		扩张核能		
	2000	2050	2050		2050		
			采用 CCS	不采用 CCS	采用 CCS	不采用 CCS	
全球煤炭消费	100	448	161	116	121	78	
	美国	24	58	40	28	25	13
	中国	27	88	39	24	31	17
全球 CO ₂ 排放	24	62	28	32	26	29	
煤炭 CO ₂ 排放	9	32	5	9	3	6	



场景和应用 EPPA 模型预测的天然气参考价格。不考虑二氧化碳的价格水平(表中没有展示)或者核能增长的假设, CCS 技术的使用在本世纪中叶会造成煤炭消费的显著差异。采用 CCS 技术,到 2050 年煤炭消费将高于当前,而全球源自各种能源资源的二氧化碳排放比常规情况下的碳排放水平低一半,仅仅略高于当前的水平。促成到 2050 年碳排放减少的关键因素是源自煤炭的二氧化碳排放的减少。到那时,源自煤炭的二氧化碳排放将减少至当前水平的一半或更低,减少至常规情况下的 1/6 或更低。

“低”二氧化碳价格场景下, CCS 技术达到经济性要比高价格场景下晚 25 年,因而,到 2050 年煤炭消费量也比“高”价格场景高,而且 CCS 技术做出的贡献也相当有限,这导致相当高的二氧化碳排放。

当前煤炭的优先目标应该是构成大规模 CCS 集成系统的关键单元的各种技术在技术、经济和环境性能上成功的、大规模的示范

当前,不管采取何种碳限制措施,关于煤炭的优先目标应该是构成大规模 CCS 集成系统(捕获、运输和封存)的关键单元的各种技术在技术、经济和环境性能上成功的、大规模的示范。这种示范是响应未来缓和碳排放的政策,以及寻求在减少源自化石燃料的碳排放和满足全球未来能源需求之间达成平衡的情况下,实现十亿吨规模(gigatonne scale)广泛部署的先决条件。

CCS 技术的成功实践将不可避免地增加煤炭消费和转换的成本。研究人员预测,对于新的电厂,大约每吨 30 美元的二氧化碳排放价格就会使得 CCS 技术的成本相对于未采用 CCS 技术的煤炭燃烧和转换系统具有竞争性。这足够抵消二氧化碳捕获、加压(大约 25 美元/公吨)以及运输和封存(大约 5 美元/公吨)的成本。CCS 成本的这一预测不太确定,可能会高些;如果采用新的技术,也可能低些。

燃煤电厂部署 CCS 技术的步伐取决于两个方面,一是二氧化碳排放价格的水平和时间节点,二是 CCS 技术的成熟度和成功的商业示范。二氧化碳排放

价格的水平和时间节点是不确定的。然而,为响应使 CCS 技术具有经济性的控制碳排放政策,执行能大规模利用 CCS 技术的计划将不应该延迟。到 21 世纪中叶,每年 10~20 亿吨碳封存率(差不多相当于 40~80 亿吨二氧化碳)将会使煤炭消费略微提高,同时显著降低二氧化碳排放。

当前所需要的是一定规模的二氧化碳捕获、运输和封存集成系统的示范。这是一个实际目标,需要在实施过程中的协同行动。集成示范应包括一个适当的、设施完备的封存地点,按照一定的规范框架运行,包括场址选择、注入和检测,也要包括在一段时期的良好实践之后,将最终义务转移给政府的各种条件。

获得民众和政府支持的明确而严格的管理程序是实现大规模碳封存的先决条件。这种管理程序必须解决与产权、义务、场址选择和监测、所有权、补偿安排以及其他制度上、法律上的考虑相关的事项。需要确定针对封存计划的管理条例,内容应包括场址选择、注入操作、在一段时期的成功运行之后向公共当局的监护权转移等。除了限制二氧化碳排放之外,在控制温室气体排放的环境下,接受 CCS 技术的步伐快慢要看与在适当的地质条件下进行碳封存相关的科学的、工程的以及制度的因素。这些因素得到的关注程度应当远远高于其被关注的现状。

当前,政府和私营部门开展的用以证实碳封存的适当性的大规模集成示范项目远远不够。如果这种状况得不到改善,美国和其他国家政府就会发现由于调节可靠的碳封存技术的必要工作未得以开展,而无法执行某些碳控制政策。因此,研究人员相信应该给予在不同地质条件下的开展每年百万公吨规模的二氧化碳封存项目高度优先权。

研究人员对于大规模二氧化碳的注入项目的安全运作很有信心,但是,当前运行的二氧化碳存储项目(挪威的 Sleipner 项目、加拿大的 Weyburn 项目、阿尔及利亚的 In Salah 项目)没有一个拥有必需的建模、监测和认证能力以解决突出的技术问题。任何一个大规模封存地都有其自身的特点,需要进行特定的地质研究,开展一系列的地质调查。

研究人员估计,上规模的 CCS 项目的数量,在美国应在 3 个左右,全球应在 10 个左右,以覆盖可能进行大规模封存的不同地质条件和类型。每个项目的数据应该被充分分析和共享。每个项目的成本(不包括碳捕获的成本)大约在 1500 万美元/年(为期十年)。

用以提高石油采收率(EOR)的二氧化碳注入项目,对于长期的、大规模的二氧化碳封存重要性有限——规则不同,提高采收率项目的能力对于大规模部署而言很不充分,地质建造过程因生产活动而中断,提高采收率的项目通常并未被很好地利用。可造成全球温室气体浓度显著变化所要求的 CCS 技术规模是巨大的。例如,每年隔绝 10 亿公吨碳(差不多 40 亿公吨二氧化碳)需要注入从约 600 个 1000MWe 燃煤电站得到的约 5000 万桶超临界二氧化碳。

研究人员认为扩大 CCS 技术的部署是全面的控制碳排放政策的必需部分。由于严格的二氧化碳封存示范项目是扩大 CCS 技术部署的重要基础,研究人员强调在封存项目完成之前没有理由拖延对美国碳排放控制政策的采用。

第二个高度优先的要求是示范针对几种不同的煤炭燃烧和转换技术的二氧化碳捕获技术。当前,整体煤气化联合循环(IGCC)技术是具备二氧化碳捕获能力的电力生产的首要技术,因为其成本预计低于具备碳捕获能力的粉煤燃烧技术。但是无论是 IGCC 技术还是其他技术都没有结合 CCS 的示范项目。政府 R&D 项目不要堕入挑选技术“优胜者”的陷阱是非常关键的,特别是在美国国内和全球,私营部门正在开展优秀的煤炭燃烧和转换技术研发的时候。

IGCC 之外的碳捕获技术对于进一步技术开发具有吸引力,例如氧气粉煤燃烧技术(oxygen fired pulverized coal combustion),特别是低品质煤。当然,IGCC 技术也需要加以改进。子系统内需要开展研发活动,例如在改进二氧化碳分离技术(无论是氧燃烧还是空气燃烧)和氧分离技术(自空气中)方面就需要进行研发。技术项目会从广泛的建模和模拟活动中获益,建模和模拟是为了比较不同的技术和集成系统,并为研发提供指导。新颖的分离方案,如化学链

(chemical looping),应当在工艺开发单元(PDU)层面继续加以研究。现实情况是,煤炭类型的多样性意味着实际应用的运行条件的不同,将要部署的技术很可能是多样性的。

这些示范项目以及 R&D 项目需要政府的支持。政府的补贴是必需的,这种补贴应当体现在示范技术的性能和采用 CCS 技术(包括 IGCC 技术)的煤炭技术的成本上。从燃煤电厂进行碳捕获并无实际的运行经验,在集成封存过程当然也缺乏实际经验。在存在技术不确定性以及尚未展开对碳排放收费的情况下,对于私营企业而言,不存在实施这些项目的经济动机。能源公司已经推进不少主要计划,所有计划都显示,为了进行未经证实的“无碳技术”的研究,需要政府的补贴是毋庸置疑的。

美国《2005 年能源法案》包含条款,批准联邦政府为 IGCC 技术和采用高级技术的粉煤电厂(无论采用 CCS 技术与否)提供补助。研究人员相信,这种补助只能针对采用 CCS 技术的电厂(无论是新建电厂还是老电厂翻新改造)。许多正在计划建立燃煤发电电力设施和电厂开发者都选择超临界粉煤单元,这是因为在未对二氧化碳排放征收费用的时候,粉煤电厂的发电成本要低于 IGCC,并具有较高的实用性。这些预期的新电厂以及那些现存的燃煤电厂提出了一个问题,即未来燃煤电厂的翻新改造问题。这一问题与那些在碳排放收费后建造的电厂将要选取的技术的问题截然不同。在接受限制碳排放政策的过程中,如果联邦政府的补助要扩展到煤炭项目,这种补助就应该限制在采用 CCS 技术的项目上。

未来碳排放收费的前景会造成对二氧化碳捕获和存储具有最低改造成本的技术的偏好,或者当前建造的电站应当具备“碳捕获”技术(这通常被诠释为仅为 IGCC 类型),人们对这些问题有所争论。

从电厂开发者的立场来看,当前新的电厂燃煤技术的选择牵涉到各种考虑的精微平衡。一方面,一些因素会有助于选择 IGCC 技术,这些因素包括,空气质量标准对 SO₂、NO_x 以及汞的含量要求可能更为严格,对碳排放收费,或者联邦或州政府可能对 IGCC 技



术提供财政补助；另一方面，也有一些因素有助于选择超临界粉煤技术(SCPC)，这些因素包括高效率、低成本煤炭消费的能力、响应电网条件的电厂循环能力，以及达到能效目标的信心等。除了建议新建电厂应具有最高效率外，研究人员无法相信明确选择何种技术是适当的。

更有甚者，无论采用 SCPC 技术还是 IGCC 技术，翻新改造现有不具备碳捕获能力的电厂，需要重大的技术修正。改造工程不仅仅是添加一种工艺来捕获二氧化碳；所有工艺条件都要改变，这包括涡轮机、热耗率、燃气净化系统以及其他保证高效运行的工艺单元。按照当前的预测，改造一座最初设计无 CCS 技术的 IGCC 电厂以捕获相当部分的碳，看起来要比改造一座 SCPC 电厂便宜。然而，IGCC 的这一特点并未得到示范。而且，即便 IGCC 电厂的改造成本较低，当前建造 IGCC 电厂和 SCPC 电厂和为响应未来碳排放收费进行电厂改造的当前净价值的差异，严重取决于对碳排放收费的时间节点和规模的预测，也取决于改造成本的差异。本质上，在实行碳排放收费之前的低发电成本和之后的高发电成本之间有一个平衡。

不考虑技术，在新建燃煤电厂整合碳捕获能力的机会是有限的。除了对工厂布局的简单修正，以腾出空间用于安置改造设备（如变换反应器，shift reactor）之外，对最初设计并无 CCS 技术的电厂进行预投资以改造为具备“碳捕获”能力的 IGCC 电厂或者粉煤燃烧电厂，具备经济上的吸引力。建造一座低资本成本的电厂，今后或者支付碳排放价格，或者增加投资实现碳捕获能力，成本应该要低些。

然而，很少有工程分析或者数据可用于研究可能加以考虑的预投资选择的范围。

存在这样的可能性，一些对无碳捕获能力的燃煤电厂的早期投资怀着不正当的动机，期望这些电厂被赋予免费排放二氧化碳的特权（这是未来碳排放规则的一部分），并（在不加限制的市场）因为限制碳排放造成电价上涨而获利。研究人员认为，美国国会应当立法，

在这种动机成为问题之前，堵上“豁免”的漏洞。

包括捕获二氧化碳用于封存示范的集成 CCS 示范项目的责任，应赋予一种新的具有政府色彩的（quasi-government）碳封存示范公司。这种公司应该遴选示范项目，并为项目提供补助，使得产业界尽可能地以商业的方式来管理示范项目。

减少二氧化碳排放能否成功，最终要看发达国家和发展中国家对缓和二氧化碳排放政策的坚持程度

减少二氧化碳排放能否成功，最终要看发达国家和发展中国家对缓和二氧化碳排放政策的坚持程度。从当前的情况来看，朝向所必需的国际协议的努力还鲜有进展。虽然欧盟已经实施“总量管理制度”（限量控制与交易，Cap-and-Trade），涵盖了大约一半的二氧化碳排放，但是美国在联邦层面依然未接受限制二氧化碳排放的强制政策（mandatory policy）。美国在碳排放方面的领导地位是促进新兴经济体采取实质行动的一种可能的先决条件。

美国采取更强烈的政策看来符合公众的态度。美国现在把全球变暖作为该国面临的首要环境问题，70%的美国公众认为美国政府在削减温室气体排放方面应更有作为。在过去3年里，持有希望通过收费解决这一问题的人数比例上升到50%。然而，对当前发展中国家能源发展状况的了解显示，一些国家要接受和实施限制碳排放政策还得假以时日。

二氧化碳的排放不断增加，从这个角度来看，新兴经济体采取的审慎推延的国际体制是易于管理的。然而，如果其他国家（如中国和印度）将要处理这一问题，那么 CCS 技术也就成为这些国家的关键技术，也许当这些国家开始采取更严厉的控制措施，研发活动以及商业示范就会与具备 CCS 能力具有同等重要的地位。

（作者单位：中国科学院国家科学图书馆武汉分馆）

科学学派最显著的特征是一个社会群体或集团，而且往往是处在科学研究的最前沿，是最积极、最活跃、最富有成果的创造性的科学家集团。它不仅是科学的一种社会表达方式，而且是科学共同体的特殊构型。科学学派的生命力在于它的开拓和创新。科学学派具有高度的创造性和有效性，对自主创新有着巨大的推动作用。

科学学派是科学家的一种特殊的创造性联合，它是在学科带头人领导下的某一科学方向上，具有高度技能的几代研究者的创造性合作。这种合作不是基于形式上的组织，而是基于解决问题方法的统一，基于一定的工作作风和思维方式，基于实现问题的思想和方法的独特性，这种合作在这一知识领域获有重要的成果，赢得了声望和社会的承认。

一、科学学派：创建新的研究范式

所谓范式，就是某一学科领域中被公认的科学成就，或者叫做学科模式。范式必须具有两个特点：第一，所取得的成就足以空前地把一批坚定的拥护者吸引过来，使他们不再去进行科学活动中的各种形式的竞争；第二，这种成就又足以毫无限制地为一批重新组合起来的科学家留下各种有待解决的问题。这些重新组合起来的科学家组成了一个科学共同体，范式就成为科学共同体中的成员共同认识的基础。科学学派不是在传统的或既定的科学范式指导下从事常规的科学活动，而是通过学派的研究工作创建新的科学研究范式，形成新的研究领域和方法，培育科学的新的生长点。科学学派形成最重要的原因在于该学派以理论上的创新为核心，提出了跟以往不同的新理论、新方法、新视角，并对特定学科的理论和方法产生了巨大的影响。因此，科学学派与科学共同体或一般意义上的科学群体和集团的区别表现在，它并不仅仅从事常规科学的研究和发现，而是进行具有开拓性、创造性的研究工作。科学

学派在研究方法、科学思想和学术理论上往往是独树一帜，它是孕育新的科学范式的基地。科学学派是集科学发现和理论评价为一身的科学家集团，它以出色的科学成果和研究方法，在科学界或科学共同体中占有一定的学术地位和影响力。由此可见，原始创新思想的提出是科学学派形成的关键。不但如此，为了使研究能贯彻始终并发展壮大，学派成员需要不断地开拓前进，探索创新。

在现代物理学革命中占有十分显赫地位的哥本哈根学派，就是科学学派的典型代表。哥本哈根学派是以丹麦哥本哈根大学理论物理学研究所为活动场所，以著名的丹麦理论物理学家、诺贝尔奖金获得者尼尔斯·玻尔（Niels Bohr 1885—1962）为学派领袖和导师，云集了一群来自各国的富有才华、年轻有为的物理学家。他们在学派领袖玻尔的带领下，共同学习、研究、讨论、交流，以群体合作的方式，突破了牛顿经典物理学的理论框架的束缚，创立了全新的力学体系——量子力学。在哥本哈根学派的形成和发展过程中，玻尔的合作者、助手、学生中就有6位获诺贝尔奖金，同时涌现出几十位优秀的物理学家，从而形成了一个强大的科学家集团阵容。哥本哈根理论物理学研究所也一举成为世界原子物理学的研究中心。

二、科学学派：构建强大的创新链条

学术组带的强弱在科学人才新生和成长过程中起着重大作用，可以说是一个关键的因素。

科学学派最大的特点是在以学派