

欧盟和德国碳捕获与封存技术发展现状及展望

王志强

(中国21世纪议程管理中心, 北京 100053)

摘要: 欧盟和德国认为, 碳捕获与封存技术是一种潜在的、可供选择的二氧化碳减排方案, 并为其制定了雄心勃勃的发展战略规划。文章对欧盟特别是德国在碳捕获与封存技术的研发进展、政策机制和管理立法等方面的做法和案例进行了调研, 并对其面临的主要问题及未来发展进行了展望。

关键词: 德国; 欧盟; 碳捕获与封存; 气候变化

中图分类号: F13/17; F41 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3772/j.issn.1009-8623.2010.10.002

全球气候变化、能源资源紧缺、生态环境恶化已为人类社会的发展带来了重要挑战:更加频发的自然灾害和极端气候现象、日益严重的干旱和水资源危机、更为快速的海平面上升和生物物种灭绝。科学研究表明,上述问题的发生与大气中温室气体增加所造成的温室效应有着密切关联,其中二氧化碳(CO₂)是人为产生的对气候变化影响最大的温室气体,由它带来的大气增温效应占到了所有温室气体总增温效应的63%,而且这些二氧化碳将在地球大气中留存200年。为了减缓全球变暖趋势,应对气候变化,世界各国已开展了一系列的温室气体减排行动。

欧盟高度重视推进碳捕获与封存技术发展。2009年,欧盟为二氧化碳地质存储建立了法律框架基础,并计划启动12个工业生产级的大规模碳捕获与封存示范项目。欧盟为碳捕获与封存技术制定的发展目标是:通过加快技术研发、降低应用成本、树立公众信心等措施,确保在2020年左右实现碳捕获与封存技术的商业化运行。德国联邦政府在推动碳捕获与封存技术发展方面也位居欧盟各国前列:在国家高技术战略、国家适应气候变化战略、第五能源研究计划、能源基础研究2020+、环境技术总

体计划等研究计划中对碳捕获与封存技术研发创新进行支持,并已在Ketzin、Schwarze Pumpe、Niederaussem和Altmark等地启动了碳捕获与封存技术的试点项目。

一、碳捕获与封存的基本技术路线

从技术发展路线来看,碳捕获与封存技术最早起源于20世纪70年代初。美国得克萨斯州将二氧化碳气体注入地下岩层,用于提高石油的采收率。在此同时,二氧化碳地质存储作为温室气体减排的可选方案被一些科研学者提出,但其后所开展的研究工作并不多。随着人们对气候变化问题的认识和重视程度不断提高,碳捕获与封存概念逐渐得到了社会各界的认可。目前,碳捕获与封存技术已被广泛认定为是一种潜在的、可供选择的温室气体减排技术方案。碳捕获与封存由三个阶段构成:二氧化碳分离捕获、二氧化碳运输和二氧化碳封存。

(一)二氧化碳分离捕获

二氧化碳分离捕获的目的是生产能运输到封存地点的高压二氧化碳浓缩液,其主要对象是火力发电、钢铁、水泥、炼油、石化等二氧化碳集中排放行业。目前,针对电厂排放的二氧化碳分离捕获系

作者简介: 王志强 (1977-), 男, 中国21世纪议程管理中心 副研究员; 研究方向: 可持续发展、科技政策与管理。

收稿日期: 2010年7月9日

统主要有三大类:燃烧后系统、燃烧前系统及富氧燃烧系统。燃烧后系统从一次燃料在空气中燃烧所产生的烟道气体中分离二氧化碳,该类系统通常使用液态溶剂来捕获二氧化碳。燃烧前系统先是在一个有蒸汽和空气或氧的反应器中处理一次燃料,制备出主要成分为一氧化碳和氢的混合气体,然后在第二个反应器内通过一氧化碳与蒸汽反应生成氢和二氧化碳,最后从混合气体中分离出二氧化碳;该类系统可应用于整体煤气化联合循环发电系统(IGCC)。富氧燃烧系统是采用氧气代替空气进行一次燃烧,产生以水汽和二氧化碳为主的烟道气体,然后通过对气流进行冷却压缩清除水汽,目前该技术还处在实验阶段。图1给出了三类二氧化碳分离捕获系统的技术流程。

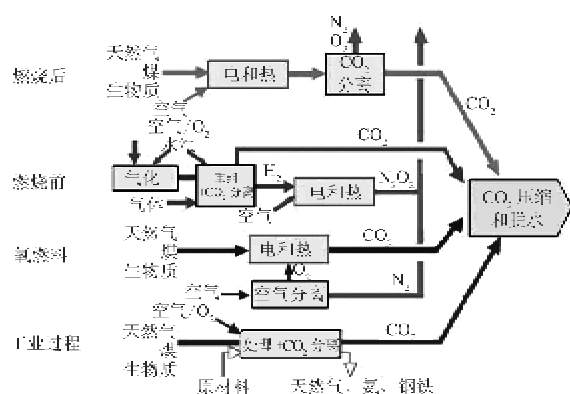


图1 三类二氧化碳捕获系统技术流程示意图

(二)二氧化碳运输

除非碳捕获源直接位于地质封存地上部,否则必须将前一阶段收集到的二氧化碳运送到合适场所进行封存。目前,二氧化碳的运输方式主要有:管道运输、船舶运输和公路铁路运输三种。管道运输是一种比较成熟的技术,也将是运输二氧化碳最常用的方法。典型的做法是将气态二氧化碳施加8兆帕以上的压力进行压缩,以避免二相流和提升二氧化碳的密度,便于运输和降低成本。在某些情况或地点,使用船舶运输二氧化碳从经济角度讲更具吸引力,其技术要求与石油液化气运输大体相似,压力保持在0.7兆帕,由于需求有限,目前船舶运输的规模并不大。公路铁路运输在技术上也可行,一般将二氧化碳存储在零下20度和2兆帕环境下的绝

缘罐中进行运输,与前两种方式相比公路铁路运输的经济性较差,不大可能用于大规模碳捕获与封存。

(三)二氧化碳封存

目前,碳封存技术主要有三大类:地质封存、海洋封存、矿石碳化及工业应用。地质封存是将二氧化碳压缩液注入地下岩石构造中。含流体或曾经含流体(如天然气、石油或盐水等)的多孔岩石构造(如枯竭的油气储层)都是潜在的封存二氧化碳地点的选择;在沿岸和沿海的沉积盆地(充有沉积物的地壳内的大规模天然凹地)中也存在合适的封存构造;目前,在煤床中封存二氧化碳提高甲烷生产的技术方案正处在示范阶段。海洋封存是一种潜在的二氧化碳封存方法。该方法是将捕获的二氧化碳直接注入深海(深度在1000米以上);通过管道或船舶将二氧化碳运输到海洋封存地点,在那里再将其注入海底,被溶解和消散的二氧化碳随后会成为全球碳循环的一部分。目前,该封存方法还处于理论研究和实验模拟阶段。工业利用与矿石碳化包括两种方式,一种方式是利用化学反应将二氧化碳转化为固体无机碳酸盐;另一种方式是直接或者以生产各种含碳化学物填料形式加以利用。但目前这两种存储方法均受限于工业生产规模 and 市场需求,无法满足未来大规模二氧化碳封存要求。图2给出了碳捕获与封存技术综合实施方案示意图。

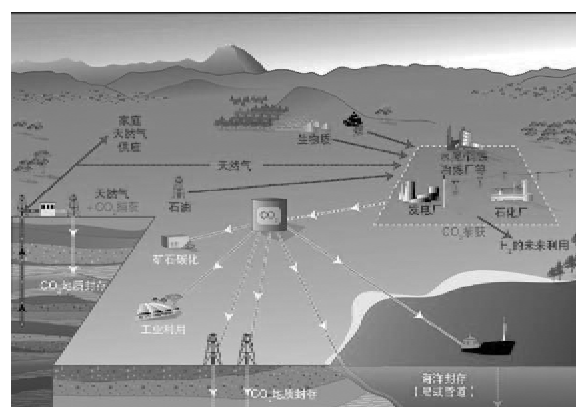


图2 碳捕获与封存技术综合实施方案示意图

二、欧盟推进碳捕获与封存技术发展的政策机制与现状

欧盟将碳捕获与封存技术作为应对气候变化

的重要减缓技术措施之一。2007年3月,欧盟委员会曾表示:要完成欧盟的二氧化碳减排目标,必须依靠碳捕获与封存技术的支持。2009年4月,欧盟正式发布了《欧洲议会关于二氧化碳地理封存的指令(2009/31/EC)》为二氧化碳地理存储构建了法律管理框架,也成为欧盟各成员国推动和规范碳捕获与封存技术发展的法律基础。同年,欧盟宣布启动12个工业生产级的大规模碳捕获与封存示范项目。欧盟碳捕获与封存技术的总体发展目标是:通过加快技术研发、降低技术应用成本、树立公众信心等措施,确保2015年前完成大规模碳捕获与封存的工业化示范,到2020年左右实现碳捕获与封存的商业化运行。

(一)欧盟层面推动碳捕获与封存发展

欧盟委员会主要从两个层面在欧洲推动碳捕获与封存技术的发展:一是积极为碳捕获与封存在欧盟地区的发展应用建立相适应的法律框架与激励政策机制;二是在欧盟各国以及欧盟地区以外的重要国家实施碳捕获与封存实验项目、建设合作研发网络。具体来看:

1. 在管理立法和激励政策方面。

2005年2月,在第二个欧洲气候变化计划启动后,欧盟组建了碳捕获与封存专家工作组,专门研究如何发展和利用碳捕获与封存技术应对气候变化问题。该工作组于2006年提交了关于二氧化碳

捕获和地质储存的研究报告,提请欧盟委员会继续支持在碳捕获与封存技术政策和管理制度等方面开展深入研究。2007年3月,欧洲理事会敦促各成员国和各委员会要努力消除碳捕获与封存发展和应用的技术、经济和法律等方面的障碍,确保该技术能在2020年左右实现商业化运行。2009年4月,欧盟通过并发布了《欧洲议会关于二氧化碳地理封存的指令(2009/31/EC)》,为欧盟范围内开展二氧化碳地理封存的地域选择、许可申请、运行监测和管理机制等制定了详细的法律规范,该指令已成为欧盟各成员国规范碳捕获与封存工作的法律基础。同时,欧盟环境委员会还在积极规划通过制定:强化欧盟排放贸易体系(ETS);要求欧盟成员国政府给予公共财政补贴、确保二氧化碳交易价格等;实行欧盟低碳组合标准交易证书;将碳捕获与封存技术作为新建火力发电厂的标准规范;鼓励公共和私营部门共同参与基础管道设施建设等政策措施,来鼓励和推动碳捕获与封存技术发展和市场化。目前,上述措施建议已经以《在欧盟范围内推动碳捕获与封存》报告形式提交欧盟委员会讨论审议。

2. 在技术研发与示范方面。

欧盟最早的碳捕获与封存技术研究项目起始于第三研究框架计划(1990-1994年),其后在各类研究计划中对碳捕获与封存技术研究的支持得以逐渐增强。目前,在欧盟层面仍在实施中的研究项

表1 欧盟在实施中的二氧化碳捕获与封存项目一览表

序号	项目名称	资金来源	主要研究内容
1.	CACHET	欧盟第六研究框架计划	天然气电厂温室气体减排技术
2.	CAESAR	欧盟第七研究框架计划	增强吸附的水煤气无碳排放转化技术
3.	CASTOR	欧盟第六研究框架计划	清洁化石能源电厂二氧化碳捕获与封存技术
4.	CCP2	行业和企业	碳捕获技术二期研究
5.	CESAR	欧盟第七研究框架计划	火力电厂燃烧后系统低成本碳捕获技术
6.	CO2GEONET	欧盟第七研究框架计划	由13个欧洲公共研究机构共同组建二氧化碳地下封存技术研究网
7.	CO2NET	参与者自费	二氧化碳捕获与封存知识共享网
8.	CO2NET EAST	欧盟第六研究框架计划	东部地区(欧盟)二氧化碳捕获与封存知识共享网
9.	CO2REMOVE	欧盟第六研究框架计划	二氧化碳地质埋存监测与核查技术研究
10.	CO2SINK	欧盟第六研究框架计划	德国Ketzin地区二氧化碳盐水区地质埋存实验项目
11.	COACH	欧盟第六研究框架计划	二氧化碳捕获与封存中欧合作项目
12.	DECARBIT	欧盟第七研究框架计划	火力发电厂燃烧前系统碳捕获先进技术
13.	DYNAMIS	欧盟第六研究框架计划	发电与氢燃料生产过程的碳捕获与封存技术
14.	ENCAP	欧盟第六研究框架计划	燃烧前系统碳捕获先进技术
15.	NANOLOWA	欧盟第六研究框架计划	火力发电厂纳米膜结构二氧化碳捕获技术
16.	NASCENT	欧盟第六研究框架计划	二氧化碳地质封存自然环境物质研究
17.	STRACO2	欧盟第七研究框架计划	二氧化碳捕获与封存规范管理研究

目有 17 项,见表 1。

2005 年,欧盟组建了“化石燃料电厂零排放欧洲技术平台”(ZEP),该平台组建了专家咨询委员会负责为欧盟碳捕获与封存示范项目提供建议与评估。2009 年,根据新修订的《欧盟排放交易指令》,欧盟委员会会同欧洲投资银行和各成员国启动实施了“新进入者储备计划”(NER),用以支持新能源应用和碳捕获与封存技术的示范项目,该计划启动资金为 3 亿欧元。2009 年 7 月,根据“欧洲经济复兴能源计划”(EEPR)欧盟将投入 10.5 亿欧元来支持 12 个碳捕获与封存技术试点和示范项目。图 3 给出了欧盟计划支持的碳捕获与封存部分示范项目分布情况。

(二)欧盟成员国最新进展

从欧盟内部来看,英国、荷兰、挪威和德国等国在推动碳捕获与封存技术研究、试点示范和管理立法等方面走在了前列。表 2 给出了欧盟各成员国在

推进碳捕获与封存工作方面的最新进展。

1. 英国

2008 年,英国政府在《能源条例》中正式引入了二氧化碳地质存储国家管理办法,该条例于 2009 年 4 月正式生效。2009 年 5 月,英国举办了题为“向碳捕获与封存前进”的专家咨询会,研讨二氧化碳海洋封存许可制度等问题。2009 年 12 月,英国政府讨论了二氧化碳封存管理与许可草案,并根据《欧洲议会关于二氧化碳地理封存的指令(2009/31/EC)》开始起草二氧化碳运输第三方管理办法。英国政府计划:2010 年 4 月制定出台二氧化碳地理封存管理办法,2010 年 5 月实施二氧化碳地理封存许可制度,2010 年底前制定出台二氧化碳运输管理办法。

2. 挪威

挪威环境部在《能源条例》、《规划条例》和《污染控制条例》(修订)等立法中为陆地碳捕获与封存

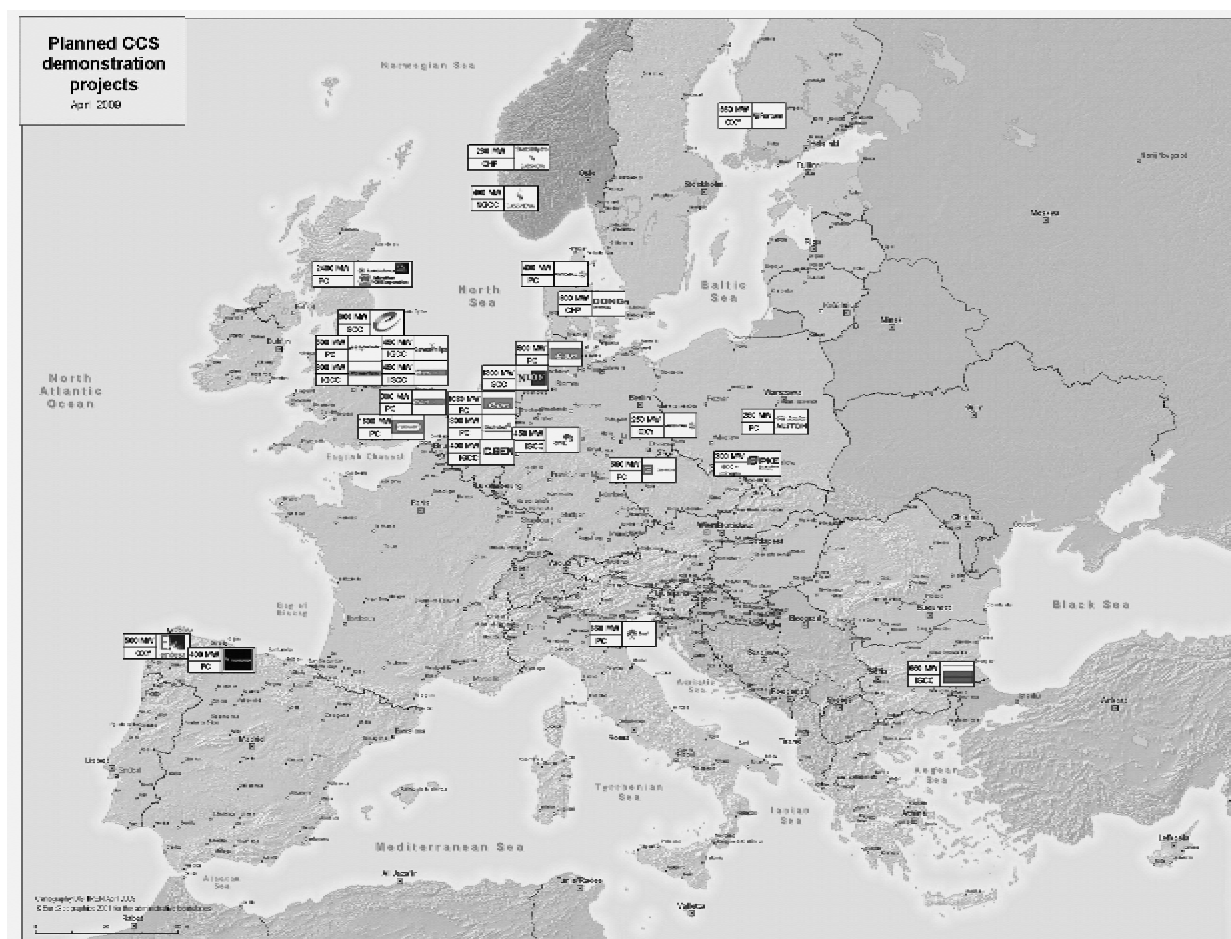


图 3 欧盟规划的碳捕获与封存示范项目分布情况示意图

表 2 欧盟各国推进碳捕获与封存工作进展情况表

工作内容	国 家
设立碳捕获与封存研发计划	德国、法国、挪威、英国、荷兰、意大利、西班牙
支持碳捕获与封存示范项目	德国、法国、挪威、英国、荷兰、意大利、西班牙、波兰、罗马尼亚、芬兰、捷克
为碳捕获与封存立法	海洋封存：英国、挪威；陆地封存：比利时、荷兰
设立国家碳捕获与封存基金	英国、挪威、法国、荷兰
绘制国家碳地质封存潜力图	波兰、挪威、英国、荷兰、意大利、德国

设立了国家管理办法。目前,挪威石油能源部正在起草新的二氧化碳海洋封存法令,以及二氧化碳运输管道管理办法。在 2010 年,上述新法令将提交公众咨询讨论。

3. 荷兰

根据《欧洲议会关于二氧化碳地理封存的指令(2009/31/EC)》,荷兰政府提出了修改采矿法议案。目前,政府内阁已通过了此议案并递交至枢密院和议会咨询意见和讨论表决。

三、德国推进碳捕获与封存技术发展的政策机制与现状

近年来,虽然德国联邦政府在推动可再生能源开发和利用方面有了很大进展,但是面对国内日益增长的能源需求和未来更高的二氧化碳温室气体减排目标,考虑到其国内仍有近 60%的电力生产依赖化石能源(煤炭、石油和天然气等),德国联邦政府认为碳捕获与封存技术(CCS)是一种在化石能源发电行业非常具有潜力的二氧化碳减排技术。根据德国尤利希研究中心专家研究预测:2030 年通过碳捕获与封存技术将有可能帮助德国实现减少 40%的二氧化碳排放量。从总体上看,德国联邦政府较为重视碳捕获与封存技术的研发储备,在国家高技术战略、国家适应气候变化战略、能源基础研究 2020+、环境技术总体计划等研究计划中都对碳捕获与封存技术的可行性研究、技术开发和试点示范项目进行了支持,并计划和将要在 Ketzin、Schwarze Pumpe、Niederaussem 和 Altmark 等地开展二氧化碳捕获与封存试点示范。

(一)德国国内各方态度

1. 联邦政府与政党

德国国内各主要政党对碳捕获与封存技术的立场不尽相同。上一届联合政府[基民盟(CDU)、基

社盟(CSU)和社民党(SPD)]对发展碳捕获与封存技术总体上持积极态度。基民盟认为:碳捕获与封存技术是今后全球范围内实现二氧化碳减排的重要技术措施,为此要大力支持该技术领域的研发;基社盟把发展低碳排放化石燃料

电厂作为其能源政策的重要基石;社民党呼吁要加快协调低碳或零碳排放化石燃料电厂的技术研究和示范工作。自民党(FPD)认为碳捕获与封存技术是可选的二氧化碳减排技术之一。而绿党则认为碳捕获与封存技术在目前仍然非常不成熟,无法为解决火力电厂的二氧化碳减排发挥作用。左翼党所持的观点是:德国在未来将逐步淘汰火力电厂,同时,随着可再生能源技术等技术的发展,2050 年将没有对此项技术的市场需求。2009 年 10 月,由基民盟、基社盟和自民党组建了新一届德国联邦政府,新政府对发展碳捕获与封存技术仍持积极态度,在其执政联盟协议中表示:将继续建设高效煤炭火力发电厂,并在现有的煤炭火力发电厂中推广碳捕获与封存技术(CCS)。

2. 学术与企业界

在学术界方面。德国可持续发展委员会(RNE)认为碳捕获与封存技术只是从化石能源时代向可再生能源时代过渡的一个“桥梁性技术”,并且认为,从长远角度看应当优先支持可再生能源和高能效技术的研发。德国全球变化咨询委员会(WBGU)表示:由于化石燃料电厂还将在未来一段时期内居于主要地位,因此,碳捕获与封存将是应对气候变化的近端技术。德国环境咨询委员会(SRU)认为与其他技术相比碳捕获与封存技术成本过高,而且还需要对二氧化碳地质存储的环境安全性进行深入评估。德国联邦议院技术影响评估办公室(TAB)在《可持续能源供应评估报告》中将发展碳捕获与封存技术列入其中。

在企业界方面。德国各大能源集团公司对碳捕获与封存技术持较为积极态度。近几年来,意昂能源集团公司(E.ON)、莱茵能源集团公司(RWE)和瀑布能源集团公司(Vattenfall)都启动实施了碳捕获与封存试点项目。目前,德国一部分行业协会,如德

国褐煤工业协会(DEBRIV)、德国煤矿协会(GVSt)和德国工程师协会(VDI)等也都表示了对发展碳捕获与封存技术的支持。

(二)相关政策与立法

1. 行政立法方面。

2009年4月,根据《欧洲议会关于二氧化碳地理封存的指令(2009/31/EC)》,德国联邦政府起草了《联邦德国碳捕获与封存法草案》。该草案在提高碳捕获与封存技术环境安全性、确保产业部门投资的积极性、以及平衡环境与经济利益方面,根据本国的具体情况做了进一步补充完善。2009年6月,联邦议会考虑到技术成熟度、经费来源和公众接受度等因素暂时推迟了该项立法。2009年10月,基民盟、基社盟和自民党联合组建了新一届联邦政府,在其执政联盟协议中提出了进一步推动碳捕获与封存技术发展方面的阶段性任务:积极支持在煤炭火力发电厂推广碳捕获与封存技术;加快德国碳捕获与封存立法过程,在2010年底前颁布实施《国家碳捕获与封存条例》(CCS-Regulation);进一步组织以提高社会公众意识为目标的碳捕获与封存技术科普宣传活动;规划和实施新的二氧化碳捕获、封存与循环利用研发项目等。

2. 政策机制方面。

2005年,联邦经济部启动了第五能源研究计划,将碳捕获与封存技术作为现代化电站技术领域的研发重点。2007年,联邦教研部在《高技术战略》框架下制定了德国气候保护高技术战略,支持二氧化碳地质封存技术基础研究。2007年7月,为了更好的向社会公众宣传普及二氧化碳捕获与封存技术,向议会、政府及相关国际机构及时提供关于二氧化碳捕获与封存技术信息,并为工业界提供技术经验交流平台,德国成立了环境友好型煤炭电站协会信息中心(IZ-Klima)。2007年12月,德国联邦政府发布了《能源与气候集成计划》,碳捕获与封存技术研发应用位列其中。2008年12月,德国联邦政府通过了《德国适应气候变化战略》,构建了跨部门合作的适应气候变化国家行动框架。德国联邦政府也非常重视促进碳捕获与封存技术政府间合作,支持各类研究机构参与碳捕获与封存技术领域的国际合作,如碳封存领导人论坛、国际能源署矿物燃料

工作组(WPFF)、欧洲委员会化石燃料电厂零排放技术平台(ZEP)等。

3. 战略规划方面。

2007年9月,德国联邦经济部、教研部和环境部联合发布了题为《德国碳捕获与封存发展与展望》建议报告。在该报告中提出了德国碳捕获与封存技术发展应用总体规划:第一阶段到2008年,主要是碳捕获与封存技术开发,启动寻找勘探封存地工作,建立0.5兆瓦级的实验设备;第二阶段到2010年,规划和批准碳捕获与封存技术应用试点电厂,勘探批准封存地,建立3万千瓦级的实验项目;第三阶段到2015年,开始建设小规模碳捕获与封存技术示范电站,建设二氧化碳封存地,建设30万千瓦的示范电厂;第四阶段到2020年,大规模碳捕获与封存技术在发电站建设中投入使用,100万千瓦级的碳捕获与封存技术电厂投产使用,碳封存地及相应设施开始投入使用,进一步完善碳捕获与封存技术并实现技术出口。

(三)技术研发进展

从部门分工来看:德国联邦教研部负责二氧化碳封存等基础技术研发;德国联邦经济部负责碳捕获与封存技术的推广应用;德国联邦环境部负责碳捕获与封存技术的环境安全性影响评估及公众意识提高等。在国家层面上,联邦教研部和联邦经济部分别实施了两个内容互补的碳捕获与封存技术相关研发计划,即地质科学研究计划和二氧化碳减排技术研发计划。

1. 地质科学研究计划

该项研究计划由联邦教研部和德意志研究联合会(DFG)于2005年联合启动实施,其研究目标是实现全球地质资源的可持续利用。迄今为止,德国已有44所大学、31个校外科研机构和50个行业合作伙伴参与了该研究计划的实施。二氧化碳在地质构造中可持续存储技术是该研究计划13个重点领域之一。从2005年开始,联邦教研部在该领域共支持了两期共21个项目,其中2005-2008年为第一期,实施了9个研究项目,研发经费投入约900万欧元;2008-2011年为第二期,启动实施了12个研究项目。表3给出了地质科学研究计划支持的二氧化碳地质封存相关项目情况:

表 3 德国地质科学研发计划支持的二氧化碳地质封存项目一览表

序号	项目名称	实施期限	研究内容
1	BENCHMARK	2005-2008年	二氧化碳封存问题数学研究
2	CDEAL	2005-2008年	利用酸矿湖和氧化钙消除二氧化碳
3	CHEMKIN	2005-2008年	二氧化碳封存化学与动态行为实时监测
4	CO ₂ -TRAP	2005-2008年	二氧化碳封存矿物和物理捕集技术集成研究与战略评估
5	CO ₂ -UGS-RISK	2005-2008年	二氧化碳地下封存风险评估及研发需求
6	CO ₂ CRS	2005-2008年	二氧化碳地下封存点高时空分辨率分布图
7	COSMOS	2005-2008年	二氧化碳存储、监测和安全技术
8	CSEGR	2005-2008年	二氧化碳地下封存技术提高德国天然气田采收率可行性研究
9	RECOBIO	2005-2008年	二氧化碳地下封存深层微生物生化循环与转化研究
10	ALCATRAP	2008-2011年	利用碱性捕获残留物优化二氧化碳存储技术研究
11	CLEAN	2008-2011年	大规模利用二氧化碳提高 Altmark 地区天然气田采收率
12	CO ₂ -Leakage	2008-2011年	浅含水层二氧化碳泄露监测方法
13	CO ₂ -MoPa	2008-2011年	深盐水层二氧化碳封存规模与风险分析
14	COBOHR	2008-2011年	二氧化碳存储井注射前后长期密封性研究
15	CO ₂ Depth	2008-2011年	二氧化碳存储与迁移过程定位监测软件
16	CO ₂ SEALS	2008-2011年	二氧化碳地质存储的密封过程研究
17	CO ₂ SINUS	2008-2011年	煤层二氧化碳地质存储研究
18	COMICOR	2008-2011年	二氧化碳存储流体迁移对围岩变化影响及二氧化碳储层完整性影响的关键因素
19	CORA	2008-2013年	二氧化碳富集源及注射后监测技术研究
20	COSONOSTRA	2008-2011年	二氧化碳、二氧化硫和氮氧化物对周围岩层的影响
21	RECOBIO ₂	2008-2011年	二氧化碳地下封存深层微生物生化循环与转化研究二期

2. 二氧化碳减排技术研究计划

该研究计划属于德国能源研究计划的一部分,最新一期的第五能源研究计划由联邦经济部从2005年开始组织实施。该研究计划年度经费预算为2500万欧元,其研究目标是通过研发一系列的创新技术组合,为未来化石燃料发电厂实现低碳乃至零碳排放提供安全可靠的系统解决方案。该研究计划重点资助以提高化石燃料发电厂效率、二氧化碳捕获与存储技术等为研究内容的产学研相结合项目。该研究计划专家咨询委员会下设五个工作组:天然气联合循环发电技术工作组、蒸汽循环发电技术工作组、整体煤气化联合循环与二氧化碳捕获集成工作组、富氧燃烧发电技术工作组、二氧化碳存储技术工作组。2010年,联邦经济部在该计划框架下组织实施的项目共有10个,设立的研究课题有137项。表4给出了该计划支持的部分研究项目。

(四)实验与示范项目

在碳捕获与封存技术实验示范方面,除了欧盟和德国联邦政府联合支持的实验项目外(Ketzin碳封存实验项目),德国各大能源集团也积极参与了

相关实验示范项目的建设,如意昂能源集团公司计划在巴伐利亚州建设能效超过60%的整体煤气化联合循环发电厂;2009年,莱茵能源集团公司在Niedraussem地区建设了燃烧后系统碳捕获试点电厂和微藻固碳技术实验厂;2005年,瀑布能源集团公司开始在Schwarz Pumpe地区建设集成碳捕获技术的富氧燃烧试点电厂,该电厂已于2008年下半年开始试运行;2009年,瀑布能源集团公司与法国天然气公司合作,在德国Altmark地区面积约350平方公里的废弃天然气田开展了大规模的二氧化碳地质封存示范项目,该计划在未来3年内封存约10万吨二氧化碳。表5列出了德国宣布即将实施的部分碳捕获与封存示范项目。

1. Ketzin 碳封存实验

确保二氧化碳安全长期封存是碳捕获与封存技术实现大规模应用的关键,建立实验研究基地开展二氧化碳地质封存安全性研究具有重要意义。在欧盟第六研究框架计划和德国联邦教研部、经济部的共同支持下,德国波茨坦地学研究中心在距柏林西南约40公里Ketzin地区实施了二氧化碳地质封

表 4 德国二氧化碳减排技术研究计划实施项目一览表

序号	项目名称	研究内容
1	AG Turbo	涡轮机低二氧化碳排放技术
2	ADECOS	富氧燃烧电厂二氧化碳捕获技术
3	Braunkohleetroknung	增压流化床煤干燥技术（已经进入大规模示范阶段）
4	CLOCK	常压流化床反应器煤化学循环燃烧动力蒸汽二氧化碳捕获技术
5	COORAL	高纯度二氧化碳捕获与存储影响因素评估及发电厂二氧化碳捕获技术
6	COORETEC TD1	镍氢厚壁部件基金属、非焊接接头无损检测技术
7	OXYCOAL-AC	燃煤发电厂二氧化碳零排放技术
8	HotVeGas	整体煤气化联合循环发电（IGCC）高温气化过程的二氧化碳捕获技术
9	MARCKO 700	700/720 度发电厂材料质量保障技术
10	MEMBRAIN	二氧化碳、氮气和氧气的膜分离技术
11	POSEIDON	燃烧或脱碳技术：下游烟气一体化清洗脱碳的动态优化

二氧化碳,并监测二氧化碳的地下封存状态。截至 2010 年 3 月 7 日,该项目已经向地下注入了 31 482 吨二氧化碳。根据项目组采集的监测数据,注入地下盐水层的二氧化碳基本保持了稳

表 5 德国宣布将实施的部分碳捕获与封存示范项目

序号	项目名称	实施企业	时间	地点	行 业
1	JANSCHWALDE	瀑布能源集团	2015	勃兰登堡	能源发电
2	WILHELMSHAVEN	意昂能源集团	2015	下萨克森	能源发电
3	EISENHUTTENSTADT	安赛乐米塔尔集团	待定	勃兰登堡	钢铁
4	GREIFSWALD	DONG 能源集团	待定	梅克伦堡	能源发电
5	HUERTH	莱茵能源集团	2014	北莱茵	能源发电

定。波茨坦地学研究中心专家表示,未来在 Ketzin 地区将可埋存约 2000 万吨二氧化碳。图 4 给出了该实验项目的实地图。

2. Schwarz Pumpe 富氧燃烧碳捕获试点电厂

瀑布能源集团(Vattenfall)公司在 Schwarz Pumpe 地区投资 7000 万欧元建设了全球第一家集成了二氧化碳捕获技术和富氧燃烧技术的煤炭火力发电试点厂。

存实验项目。该实验项目于 2004 年 4 月正式启动,从 2008 年 6 月开始向地下 600 米深的盐水层注入



图 4 德国 Ketzin 二氧化碳地质封存实验项目实地图

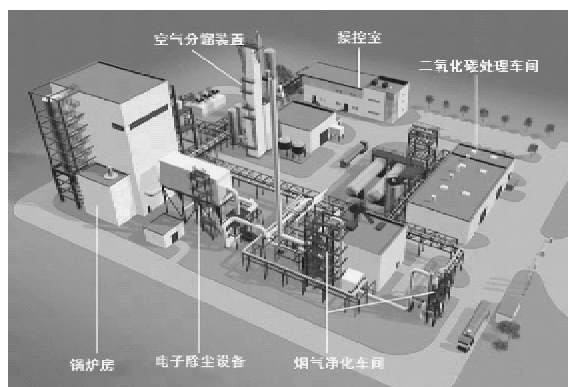


图5 德国 Schwarz Pumpe 富氧燃烧系统碳捕获试点电厂工程示意图

该试点电厂的总装机容量为3万千瓦,从2008年9月开始为期10年的运行,该电厂主要技术参数包括:干褐煤消耗量5.2吨/小时,氧气消耗量10吨/小时,二氧化碳捕获量9吨/小时。在积累试点电厂运作经验的基础上,瀑布能源集团公司计划在2012年启动25万~50万千瓦装机容量的富氧燃烧系统二氧化碳捕获示范电厂,并计划在2015年左右实现100万千瓦装机容量富氧燃烧系统二氧化碳捕获电厂的商业化运作。图5给出了集成二氧化碳捕获技术的 Schwarz Pumpe 富氧燃烧试点电厂工程示意图。

3. Niedraussem 燃烧后系统碳捕获试点电厂

2009年3月,在德国联邦经济部支持下,莱茵能源集团公司联合林德公司(Linde Group)和巴斯夫公司(BASF)在 Niedraussem 地区建立了德国第一个采用燃烧后系统二氧化碳捕获技术的试点电厂。该燃烧后系统二氧化碳捕获装置的总投资为900万欧元,联邦经济部为其提供了40%的建设经费,莱茵能源集团投入8000万欧元用于试点电厂建设。目前,该示范电厂已经正式运行,各方希望通过试点电厂的运作为今后火力电厂燃烧后系统二氧化碳捕获技术的大规模商业化应用提供技术参考。该电厂主要技术参数包括:二氧化碳捕获能力300公斤/小时,二氧化碳捕获效率90%。图6中圆环放大部分即为二氧化碳分离实验装置。

4. Niedraussem 微藻固碳示范厂

在北莱茵威斯特法伦州地方政府的支持下,莱茵能源集团开展了微藻固碳技术研究。2008年8

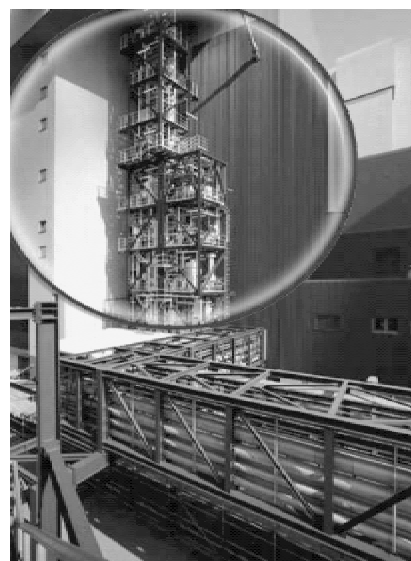


图6 Niedraussem 示范电厂燃烧后烟气二氧化碳分离设备示意图

月,莱茵能源集团在 Niedraussem 地区的煤炭火力发电厂启动实施了目前全球唯一的大规模微藻固碳示范项目。该项目利用火力发电厂燃烧后烟气培育微藻,由于微藻生长速度高于普通陆生植物10倍,从而实现以较高的效率捕获和固定烟气中二氧化碳气体的目的。项目研究人员通过连接装置将电厂燃烧烟气导入含有微藻液体的反应器中进行过滤,通过藻类光合作用吸收烟气中的二氧化碳尾气,由此生产出的微藻经简单处理后可作为生物质能源被直接利用。目前,该微藻固碳示范工厂的光反应器总面积为1000平方米,每年可生产6吨左右的微藻(干物质),每年可吸收固定二氧化碳12吨。图7给出了微藻固碳示范厂光反应器实体及运行流程。

五、欧盟与德国碳捕获与封存技术发展的总体情况与问题

(一) 碳捕获与封存技术研发得到了持续支持和发展

欧盟和其各成员国政府(包括德国联邦政府)均把碳捕获与封存技术作为温室气体减排和减缓气候变化的重要技术措施之一。经过10余年的持续支持,欧盟在碳捕获与封存技术研发创新方面取得了很大进展,如火力发电厂烟道气体中二氧化碳

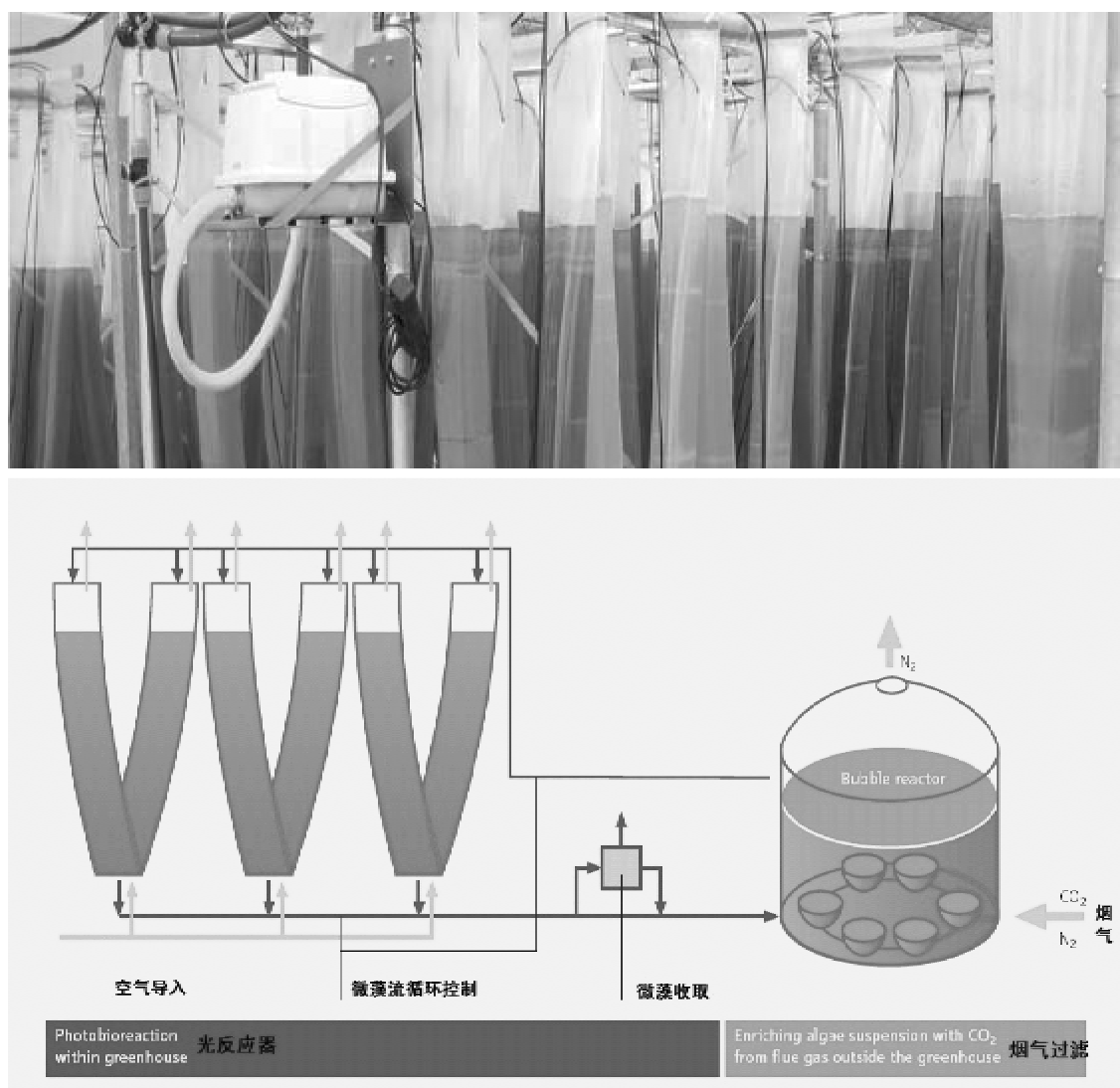


图7 Niederaussem 微藻固碳示范厂光反应器及运行流程示意图

捕获与提纯技术、二氧化碳运输和注入过程中防腐防垢技术、碳封存地点的选择、封存后评估监测以及相关技术的系统集成等。化石燃料电厂零排放欧洲技术平台(ZEP)专家组表示:为了顺利实现碳捕获与封存技术的商业化运行,欧盟各国已开始部署下一代碳捕获与封存技术研发工作;以“碳负战略”(Carbon Negative Strategy)为理念,以碳捕获与封存技术为基础,广泛集成生物质能源、可再生新能源和工程材料等技术,为二氧化碳减排提供经济可行和安全环保的系统解决方案。目前,一些较为成熟的碳捕获与封存技术已开始在欧洲各地进行试点实验。

(二) 碳捕获与封存的示范项目仍处于实验和规划阶段

虽然欧盟制定了雄心勃勃的碳捕获与封存技术发展目标:希望在2015年前建成12个碳捕获与封存技术大规模示范项目,在2020年左右实现碳捕获与封存技术的商业化运行,并在2008年宣布了34个通过专家组评估的待建示范项目,但是到现在为止还没有一个大规模项目真正得以启动实施。而且,目前欧盟各国所开展的试点项目基本都是二氧化碳捕获、运输和封存的单项技术领域小规模实验性项目,如德国在Schwarz Pumpe和Niederaussem地区开展的二氧化碳捕获技术示范、在

Ketzin 地区开展的二氧化碳地质封存技术研究示范等。除了在油气开采领域将二氧化碳从天然气中分离用来驱油并在枯竭的油气田中实现永久封存外(挪威的 Statoil 和 Sleipner 项目),在欧盟还没有实施从二氧化碳排放源(如发电厂、钢铁厂等)到封存地的一体化集成项目。

(三) 在推进碳捕获与封存的立法方面取得了新进展

碳捕获与封存技术要实现产业化发展,就需要从国际、国家和行业的法律与规范的角度,对碳捕获与封存工作的法律地位、技术规范、减排效益评价等多方面进行规范,促进碳捕获与封存技术在世界范围内得到普遍认同。2007 年,欧洲理事会就敦促各成员国要努力消除碳捕获与封存技术安全应用的技术、经济和法律等方面的障碍,尽可能确保该项技术在 2020 年左右实现商业化运行。2009 年 4 月,欧盟通过了《欧洲议会关于二氧化碳地理封存的指令(2009/31/EC)》,对在欧盟范围内开展二氧化碳地理封存的地域分布、地点选择、申请许可、运行监测和管理机制等制定了法律规范,该指令已成为欧盟各成员国推动和规范碳捕获与封存发展的法律基础。目前,欧盟内部的英国、挪威、荷兰和比利时等国已经出台了碳捕获与封存的相关管理法规。而由于《国家碳捕获与封存条例(草案)》未能最终通过联邦议会的讨论,德国在碳捕获与封存管理立法方面暂时陷入了停滞状态。

(四) 碳捕获与封存技术未来发展仍面临着各种障碍

从欧盟各国和德国发展情况来看,碳捕获与封存技术要在未来实现商业化运行还存在着各方面的障碍。这集中体现在以下几个方面:一是技术的安全性;二是成本的经济性;三是公众的接受度。

首先,碳捕获与封存技术要确保在技术上是安全的并且在环境影响方面是持久无害的。目前,较大规模的碳捕获与封存项目主要是利用废弃的储油和天然气田地下构造(即地质封存),但这些构造并不足以容纳未来全球经济发展所产出的巨量二氧化碳。而对于海洋封存二氧化碳技术,由于目前还缺乏必要的科学实验测试,学术界许多专家担心注入深海的二氧化碳可能会慢慢地泄漏到海水中,

进而带来海水加剧酸化等诸多预想不到的环境问题。

其次,碳捕获与封存技术要确保在运行成本方面是可以接受的。运行成本是制约碳捕获与封存技术商业化运行的瓶颈性要素,除了新装置设施的建设成本外,额外的能源消耗也导致了其运行成本的上升。德国联邦环境部发布的研究报告显示:安装了碳分离与捕获装置的火力发电厂在能效方面将平均下降 9%,并预测到 2020 年火力发电厂碳捕获与封存的成本将在 35~50 美元/吨。而 2010 年 3 月,欧洲气候交易所(ECX)的实时碳交易价格还不足 13 欧元/吨。在这之间存在着巨大的价格差距,这必将影响到能源企业大规模应用碳捕获与封存技术的积极性。为此,在未来除了要依靠技术创新降低成本外,还需要从政策机制和经费投入等多方面入手,确保碳捕获与封存技术在经济上的可行性。

再次,碳捕获与封存技术还有待得到社会公众的广泛接受和认同。目前,虽然欧盟各国政府、企业界和学术界对发展碳捕获与封存技术保持较为积极的态度,但从总体上看欧洲的社会公众对该项技术的接受和认可程度还普遍不高。欧盟化石燃料电厂零排放欧洲技术平台(ZEP)专家组就曾表示:虽然全球范围内碳捕获与封存技术小规模试点项目已经安全运行了近 12 年,但社会公众对其却知之甚少。一方面原因是,该技术还处于发展阶段,尚未真正实现商业化运作;另一方面原因是,目前在欧洲范围内运行的试点项目数量仍非常有限,尚未达到社会全面认可的程度。而且,欧盟在提高碳捕获与封存公共意识、促进碳捕获与封存知识交流等方面的项目也不足。欧盟表示今后还需要通过公共参与和社会宣传等多种形式,增强社会公众对碳捕获与封存技术的信心。

六、结束语

从总体来看,欧盟将碳捕获与封存技术看作未来应对气候变化的重要减缓技术措施,为碳捕获与封存技术发展制定了雄心勃勃的发展目标,组织实施了系列研究计划,并在 2009 年为碳捕获地理封存正式建立了法律基础。德国联邦政府在推动碳捕获与封存发展方面也居于欧盟各国前列,积极参与

了欧盟组织的各类研究计划,组织实施了本国的碳捕获与封存技术相关研究项目,并已开展了多处试点示范。虽然欧盟和德国在碳捕获与封存技术方面取得了不小的进步,但由于受到技术成熟性、环境安全性、经济可行性、管理规范化和公众接受度等诸多因素制约,欧盟和德国的碳捕获与封存工作仍处于实验规划阶段,要实现其规划的发展目标还需要有更多的后续工作支持。

随着经济社会的发展和人民生活水平的提高,我国未来能源消费和二氧化碳排放量将持续增加。从能源消费结构来看,我国能源消费结构主要以煤炭为主,石油和天然气的消费相对较低。因此,积极关注欧盟和德国碳捕获与封存技术最新进展,开展碳捕获与封存技术可行性研究,作好相关技术的储备,将有助于煤炭资源清洁利用和国家节能减排目标的实现。同时,需要注意的是,碳捕获与封存只是应对气候变化的潜在的减缓技术措施之一,其他包括提高能效、燃料替代、可再生能源、核能和林汇等在内的诸多技术手段都是未来可能的技术选择。而且欧洲未来新一代碳捕获与封存技术的发展方向也是在“碳负战略”的目标前提下,加强传统碳捕获

与封存技术与生物质能源等其他减排技术的集成创新。因此,我们应在借鉴欧洲发展经验的基础上,加强碳减排等应对气候变化相关技术的集成研究与创新,探索一条符合我国国情的应对气候变化和节能减排之路。■

参考文献:

- [1] Directive 2009/31/EC of the European Parliament and of the Council. Official Journal of the European Union. 2009
- [2] CCS-Environmental Protection Framework for an Emerging Technology. 德国联邦环境署. 2009
- [3] Die dauerhafte geologische Speicherung von CO₂ in Deutschland -Aktuelle Forschungsergebnisse und Perspektiven,地质科学研究发展计划. 2009
- [4] EU Demonstration Programme for CO₂ Capture and Storage. ZEP, 2008
- [5] Ecological, Economic and Structural Comparison of Renewable Energy Technologies with Carbon Capture and Storage—An Integrated Approach,德国联邦环境部. 2008
- [6] Entwicklungsstand und Perspektiven von CCS1 -Technologien in Deutschland. 德国联邦经济部、环境部、教研部. 2007

Status and Prospect of CCS Development in Germany and EU

WANG Zhiqiang

(The Administrative Center for China's Agenda 21, Beijing 100053)

Abstract: CCS has been widely recognized as one of the options to mitigate carbon emission by EU and Germany. This paper reveals the study of latest R&D achievements, policy mechanisms and management legislations of CCS, and its main problems and future development prospect in Germany and EU.

Key words: Germany; EU; CCS ; Climate change