

·学科进展与展望·

我国二氧化碳排放控制的一些思考

李政 王哲 麻林巍 付峰 倪维斗*

(电力系统国家重点实验室, 清华大学热能系, 北京 100084)

[摘要] CO₂ 减排是系统问题, 必须从系统层次的角度来看中国的 CO₂ 减排。其中的一个关键是建立一个综合考虑能源系统的外部边界条件, 内部运行规律的评估体系, 从系统的角度指导制定适合国情的控制 CO₂ 排放的技术路线。同时, 本文从能源系统的角度来看中国的 CO₂ 排放控制, 认为需要根据多维度、全生命周期这些思想方法来评估各种技术的 CO₂ 减排, 并简要的探讨了中国 CO₂ 排放控制的几条重要途径。

[关键词] CO₂, 排放控制, 能源系统

1 引言

进入 21 世纪以来, 全球气候变化已经越来越受到关注和重视。IPCC(政府间气候变化合作委员会)报告认为, CO₂ 作为主要的温室气体, 是全球气候变化的主要原因^[1]。据 IEA(国际能源署)统计, 2005 年全球 CO₂ 排放总量约为 271.36 亿吨, 99.7% 来自于化石燃料, 而我国占据了其中 18.8%^[2]。

由于人口众多、经济发展迅速, 我国能源消耗和 CO₂ 排放总量巨大并迅速增长, CO₂ 排放控制问题受到了全世界的广泛关注。粗略估算, 2006 年我国新增的能源需求为 2.1 亿吨标准煤, 比 2005 年大约多排放了 5.1 亿吨 CO₂。根据 IEA 的预测^[3], 虽然 2030 年前中国人均 CO₂ 排放只有 OECD 国家的 60%, 但在总量上, 2010 年前就将超过美国, 成为世界第一大温室气体排放国。

1997 年签订的“京都议定书”规定了从 2005 年开始, 所有发达国家排放包括 CO₂ 在内的 6 种温室气体的减排指标^[4]。中国作为发展中国家, 暂时没有硬性减排指标。但随着排放量的增加, 受到的国际压力也越来越大, CO₂ 减排已成为了事关我国可持续发展的一大挑战。

应该说, 要控制 CO₂ 排放, 最主要的依靠仍然是技术进步, 但技术路线的制定必须紧密结合国情。欧美众多发达国家都根据各自的能源、经济与环境特

点, 制定不同的 CO₂ 控制技术路线。虽然目前国内外已经开展了一些控制我国 CO₂ 排放技术路线的研究, 但总体上看, 仍缺乏对这个问题系统的、整体的认识。

中国的 CO₂ 减排是一个系统的问题, 需要从系统层次来看这个问题。我们首先对美国普林斯顿和斯坦福两所大学的关于 CO₂ 控制的研究进行了回顾, 希望能从这些发达国家顶级研究所的研究中找到中国 CO₂ 减排的一些关键的有用的看法和思路。随后, 本文试图站在能源系统的角度, 来看中国的 CO₂ 排放控制: 首先讨论能源系统发展的外部边界对 CO₂ 减排的约束; 然后讨论了从能源系统看 CO₂ 排放的一些思想方法, 以及中国 CO₂ 减排的一些重要途径。

2 相关 CO₂ 排放控制研究

为应对全球气候变化, 美国普林斯顿大学和斯坦福大学先后成立了 CMI(Carbon Mitigation Initiative)和 GCEP(Global Climate and Energy Project), 开展了有关控制 CO₂ 排放技术路线和具体减排技术的研究。

其中, 普林斯顿 CMI 研究团队的观点是: CO₂ 控制不能再等, 目前已经商业化的 CO₂ 减排技术已经可以满足启动需求。因此 CO₂ 控制需要及早进行, 并且越早进行也就越经济、越安全。但是, 采用什么样的系统、工艺过程、技术, 发展什么样的减排方案, 则需要通过一个起着关键作用的评估系统来

* 中国工程院院士。

本文于 2008 年 4 月 23 日收到。

指导。因此,CMI下设了4个研究团队:碳捕捉,碳埋存,碳科学和碳集成。其中,碳捕捉团队的任务包括:各种CO₂捕捉技术的技术评估,CO₂捕捉技术研究,替代能源燃烧研究,可再生能源分析;碳埋存团队的主要任务是CO₂埋存的风险评估;碳科学团队的研究包括:全球碳平衡研究,碳减排的环境影响研究,以及环境变化对生物圈生态的影响研究。以上3个团队的研究由碳集成团队负责集成,通过评估各种技术路线,选择安全、有效、经济可行的CO₂控制方法(有关普林斯顿CMI的详细具体信息请浏览CMI网站:<http://www.princeton.edu/~cmi/>)。

而斯坦福的GCEP认为:通过长期研究和发展突破性的技术能够在全球范围内产生重大的影响。因此,GCEP更着重于研究包括氢能,可再生能源,CO₂捕捉技术,先进材料,先进交通,先进发电技术,先进燃烧,先进系统集成,先进核能等技术的研究。例如,最近的研究课题包括了纳米光伏电池研究(采用纳米材料来取得高效的燃料电池)和低不可逆性发动机研究。这些研究内容表明,GCEP认为要想真正的解决CO₂控制的问题,技术突破是必由之路。但值得注意的一点是,虽然GCEP已经认定了技术突破是必由之路,它也依然设置了一个独立于技术研究机构的评估机构。这个评估机构通过建立评估模型,结合专家评估系统,对技术研究机构的研究进行系统分析和技术评估,确定技术发展的优先度(有关GCEP的详细信息请浏览GCEP网站:<http://gcep.stanford.edu/>)。

可以看出CMI和GCEP有着以下的基本共识:对温室气体的控制需要通过多种技术的组合来解决,需要有一个综合性的评估系统,来辨识各种技术的成本、性能以及对整体减排目标的贡献程度,从而得出期望的技术组合,为研发创新单元技术提供方向性指导。

近年来国内也展开了一系列的系统层次CO₂减排研究。例如,贺菊煌等^[4,5]研究表明,过早减排CO₂势必影响中国经济的发展;陈文颖等^[5]的研究表明,越早实施碳减排,对中国GDP的增长影响越大。当减排率为0%—45%时,由于CO₂减排造成的GDP损失率在0%—25%;而其他一些研究^[6-8]又认为,应对全球气候变化说不定是中国崛起的一个契机。一方面可以比较以较少的成本得到欧美发达国家开发的CO₂减排技术,另一方面也可以以此带动一部分相关的产业;在评估系统方面,王铮等^[9]通过模型研究了CO₂减排和我国经济发展的关系,

金红光等^[10]则应用了能源系统集成方法,论述了CO₂控制的一体化能源系统理论,用于指导适合国情的CO₂控制能源网络技术路线图。总体上这些研究还是刚刚起步,主要集中在战略、理念的论证方面,控制CO₂排放还没有形成一套完整的理论体系,对CO₂排放控制的潜力以及控制途径的认识也并不全面,更难以对制定我国控制CO₂排放的技术路线起到足够的指导作用。

综合上述国内外的相关研究,我们可以看出:从技术层面来说,目前已经有实现商业化的碳捕捉和埋存技术存在,但是通过这些现有的技术进行CO₂控制会很大程度地影响中国经济的发展,因此,找出一条经济发展、CO₂控制最佳结合路线是非常关键的方面,这可以通过建立一个综合性的评估系统,来对我国的CO₂减排进行宏观的战略指导。

3 从能源系统层次看中国控制CO₂排放

对我国而言,虽然不宜过早减排CO₂,但考虑全球气候变化的迫切性和我国CO₂排放的巨大总量,为避免将来因被动减排而付出的更大经济成本,还应及早制定一个面向长期的控制CO₂排放的技术路线,指导和促进相关技术、理论的研究。但是,CO₂减排问题本身是一个涉及政治,经济,环境,能源等各个方面的系统问题,需要一个能够从系统层面进行评估的体系来指导CO₂减排的进行。而能源系统与CO₂减排之间的关系最为直接,本文试图从能源系统的角度,讨论建立这样一个评估体系应该考虑的因素。

3.1 从能源系统外部边界看中国的CO₂排放控制

由于我国经济动态增长,基础建设尚未完成,未来能源需求总量巨大并具有较大不确定性^[1]。从近中期来看,节能、能源供应和环境保护是能源发展的主旋律,此外,我国能源安全的主要问题是液体燃料短缺引起的石油安全忧虑,也已经显得很为迫切。相对而言,控制二氧化碳排放则是更为远期的目标。

但是,我国的这些多重能源战略目标并不是完全一致的,甚至是相互矛盾的。下面是我们对2030年我国减少能源消耗、能源安全和控制CO₂排放等三重矛盾目标的能源困局的预测。如图1所示,假设保障能源安全的主要手段是煤制液体燃料,控制CO₂排放的主要手段是发展核电、水电、风电等相对成熟的非化石燃料发电技术,以及与煤电结合的碳捕捉和埋存技术(CCS)。则,在2030年化石燃料发电仅占15%、没有煤液化的情况下(图中菱形点连线),2030年石油

对外依存度会达到 75%，安全风险较大。虽然可以通过发展煤制液体燃料来降低石油对外依存度，但必然会引起化石燃料消耗和 CO₂ 排放的大量增长；在化石燃料发电提高到 30% 的情况下(正方形点连线)，化石能源消耗和 CO₂ 排放可大幅减少；如果进一步在 30% 的煤电中应用 CCS(三角形点联系)，碳排放会加倍减少，但由于煤炭消耗大量增加，反而又会引起煤炭安全问题——根据 MIT 的研究^[11]，以整体煤气化联合循环电站(IGCC)为例，如果采用燃烧后脱碳，则电站的热效率大概下降 9% 左右，如果采用燃烧前脱碳，则电站热效率大概下降 7% 左右，同时会增加大概 40% 的设备投资。

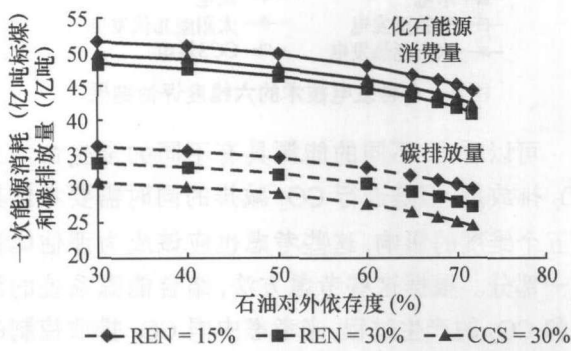


图 1 减少能源消耗、能源安全和 CO₂ 减排等宏观目标的综合评估结果

(图中, NF 代表发电中非化石燃料的比例; CCS 代表煤电中应用 CCS 技术的比例; 石油对外依存度 OI 的降低主要通过发展煤制液体燃料来实现)

图中揭示的关系可以概括为, 在采用可以商业化的技术替代石油进口和减少 CO₂ 排放的情况下: (1) 降低石油对外依存度会引起化石燃料消耗和

CO₂ 排放的增长; (2) 从降低化石燃料消耗和 CO₂ 排放角度, 非化石燃料(核能和可再生能源)越多越好; (3) CCS 可进一步降低 CO₂ 排放, 但会引起化石燃料多耗, 并引起能源的长期不安全。

正是由于我国的 CO₂ 减排涉及到我国的经济发展和能源安全等各个方面, 使得我国 CO₂ 控制不再只是一个技术路线选择的问题。我国的 CO₂ 宏观战略和技术路线的制定必须考虑到 CO₂ 减排与能源系统之外的经济、政治、环境的复杂关系。

3.2 从能源系统本身看中国的 CO₂ 排放控制

从能源系统来说, 来看弄清处 CO₂ 的来龙去脉以及各个能源利用子系统的 CO₂ 排放比重, 必然对中国的 CO₂ 排放有着至关重要的作用。我们认为, 对于各种能源 CO₂ 排放需要考虑的不只是能源转换过程中的 CO₂ 排放, 也不能只考虑 CO₂ 的绝对值, 需要从全生命周期和多维的角度来考虑 CO₂ 的排放。

对于每个能源技术或技术路线而言, 关键在于生命周期 CO₂ 排放评价 (Life Cycle Assessment, LCA)。一般会把整个“生命周期”分为原料开采、生产, 原料运输, 设施建设, 产品制造、加工, 产品运输、销售, 产品使用、消费, 产品再生循环利用, 产品废弃处理等八个阶段(子系统), 但具体分法随行业、产品不同而略有差异。LCA 中 CO₂ 排放一般分三种: (1) 每个子系统中的直接排放, (2) 每个子系统中包含在所使用原料中的排放, (3) 每个子系统中设备所对应的排放。总的 CO₂ 排放是以上三项的总和。

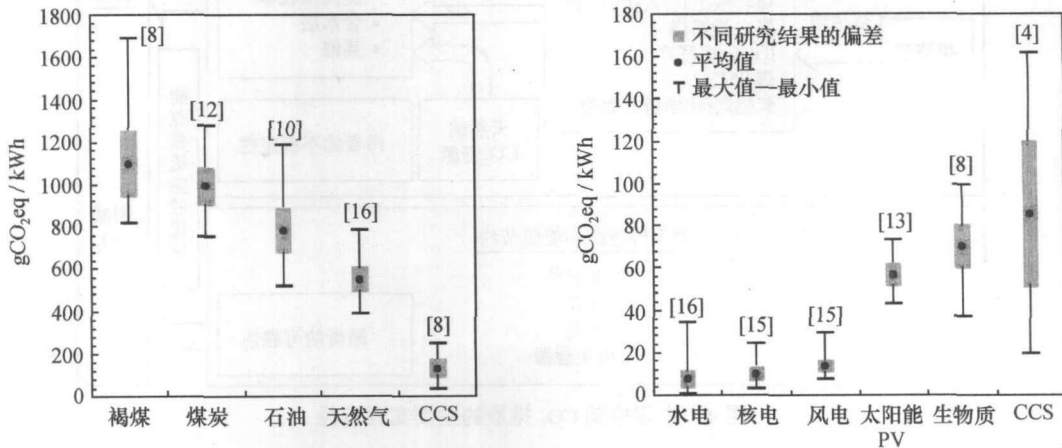


图 2 各种发电技术的 CO₂ 排放 LCA 分析结果

关于各种能源技术的 CO₂ 排放 LCA 分析, 国内外已经开展了大量研究。例如, IEA 综合有关研究结果, 对各种发电技术路线的全生命周期温室气体

排放进行了一个比较, 如图 2 所示。其结果表明, 石油、天然气发电的全生命周期 CO₂ 排放低于煤电, 但集成 CCS 的煤基氢能电站的全生命周期 CO₂

能得到显著降低;在可再生能源发电中,水电的全生命周期 CO₂ 排放最低,其次是核电、风电、太阳能光伏发电、生物质能发电。CCS 氢能发电的全生命周期 CO₂ 排放仅略高于生物质发电。

然而,仅靠 LCA 评价并不足以确定技术的发展前景。由于能源技术的投入应用与资源禀赋、经济成本、社会福利以及政策等方面都有密切的联系。本文提倡一种六维度的技术评价方法。除最直接相关的生命周期的 CO₂ 排放外,还应评价资源维度的生命周期资源消耗,不仅是能源资源,还应该包括水和土地等我国相对稀缺资源的消耗;经济维度的能源服务成本,既包括直接能源生产成本,也包括间接的能源基础设施成本;社会维度对公众健康和福利的影响,包括区域性的常规污染在内;技术维度的技术创新全过程的风险评估;管理维度的和宏观政策的一致性,这与能源战略层面的评估有密切联系。由于涉及的维度较多,定量评价较为困难,这里仅采用专家打分的方法,举一个发电技术的六维度评估结果,如图 3 的雷达图所示。曲线越向外扩张,表示各种技术的六维度综合特性越好。

结果表明,核电、水电、风电的六维度特性明显好于常规煤电,应该大力提倡发展。太阳能发电(光伏发电和热发电)虽然减排潜力大,但技术、管理、经济维度特性较差,是更长期的技术选择。生物质发电综合来看,不应提倡大力发展。而 CCS 煤电属于一个极端,虽然可以大量减少煤电的 CO₂ 排放,但总体来看,仍属于最后的选择。

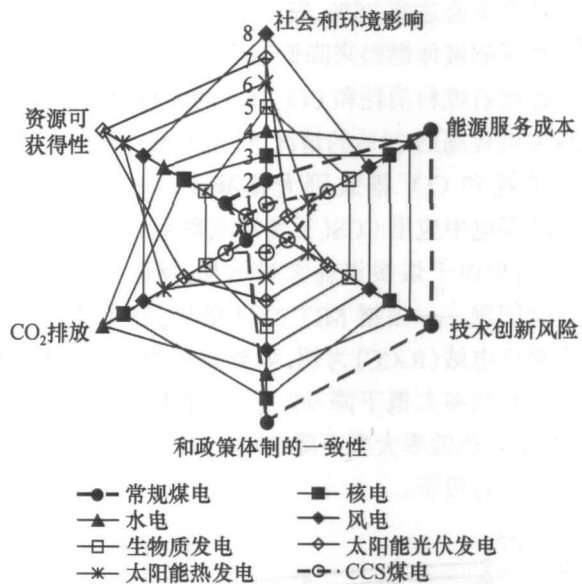


图 3 各种发电技术的六维度评估结果

可以看出,不同的能源具有不同的全生命周期 CO₂ 排放量,但是进行 CO₂ 减排的同时需要考虑其他五个维度的影响,这些考虑也应该成为评估体系的一部分。根据这些考虑方法,结合能源系统的演变和 CO₂ 的产生过程,来考虑中国 CO₂ 排放控制的主要途径:1) 终端节能和提高能源供应效率;2) 发展低碳替代能源,不断优化能源结构;3) 碳捕或和埋存(CCS);4) 能源系统集成和优化。下面分别详细说明:

(1) 终端节能和提高能源供应效率

2001 年以后我国能源消耗和 CO₂ 排放的迅速增

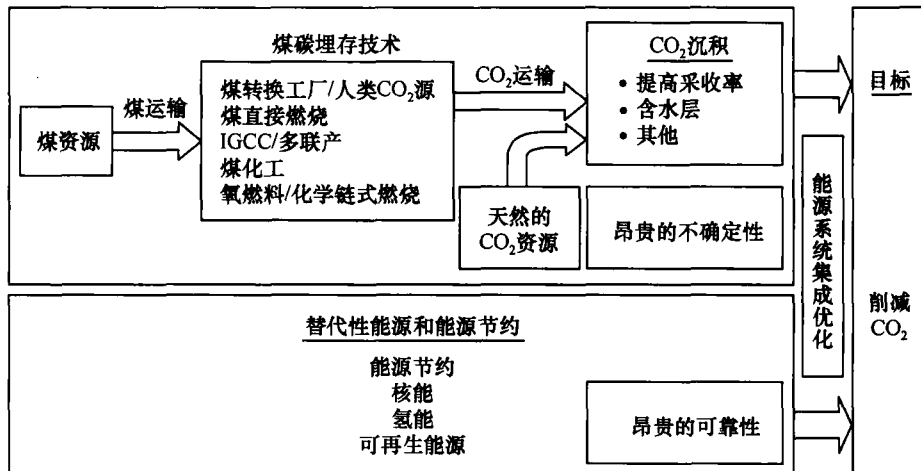


图 4 中国控制 CO₂ 排放的主要实现途径

长,虽然有经济发展阶段的客观原因,与粗放式增长导致的奢侈浪费现象和低能源效率也有密切的关系。考虑中国人口众多、资源和环境容量十分有限的现实,对终端能源消费应该有更严格的总量控制。应鼓

励自律式的、节俭的消费方式和生活方式,而不能盲目追求西方发达国家的高能源消费和高生活水平。

2005 年,中国能源效率(包括中间环节和终端利用,不包括能源开采)仅为 36.3%。火电供电煤耗比

国际先进水平高 18.6%，钢铁、水泥、乙烯的综合能耗比国际先进水平高 17%、20.5% 和 56.7%^[12]。中国能源供应和利用技术的一个显著特点是先进技术与落后技术并存的“二元”结构，提高能源效率在减少 CO₂ 排放方面具有相当大的潜力。

(2) 发展低碳替代能源，不断优化能源结构

2005 年中国一次能源消费占全世界的 15.2%，但 CO₂ 排放占到了 18.8%。主要原因就在于中国以煤为主的能源结构。据估算，煤炭燃烧单位热量的 CO₂ 排放比原油高 28.3%，比天然气高 68.6%^[13]。考虑油气供应方面的制约，我国应大力发展核能和可再生能源来替代煤炭，通过优化能源结构控制 CO₂ 排放。在已经制定的发展核能和可再生能源的 2020 年规划和法规基础上，对低碳替代能源的发展还应进一步加大支持力度。

(3) 碳捕和或埋存(CCS)

通过 CCS，可以将化石能源转化过程或燃烧过程集中排放的 CO₂ 进行回收，并运输到合适的地点进行加工、埋存或强化石油、煤层气的开采(EOR、ECBMR)。考虑到能耗和经济性方面的代价，应提倡强调 CO₂ 利用的 CCUS(碳捕获、利用和埋存)。例如，第一步，可以考虑利用生产天然气分离出的 CO₂，用于强化石油开采，成本最低；第二步，可以考虑从煤化工项目捕捉成本较低的 CO₂，进行利用和埋存；第三步再考虑从煤电厂捕捉 CO₂，优先考虑 IGCC，进行运输、利用和埋存，成本最高。在 CCS 的每个发展阶段，都应该有包括财政补贴、优惠政策、碳税在内的立法框架进行支持。

(4) 能源系统集成和优化

除了单个的技术，在整体能源系统集成和优化

方面，也有巨大的提高能源效率和减少 CO₂ 的潜力。以空调用电为例——用高热值化石燃料以 1400℃ 的高温产生电力，用于解决 10—20℃ 室内温度调节的问题(冬季 20℃，夏季 5—10℃)，是巨大的能源浪费！先进的超超临界机组效率可以达到 47%，再提高 1% 都非常困难，而一年真正运行的时间不到 65%。而以煤气化为核心的能源、化工、液体燃料多联产系统，通过系统耦合和集成，可以将总体效率提高 15%—20%。

除了能源利用网络的集成和优化，基础设施的正确规划和能源供应链的优化也非常关键，正确的技术组合和基础设施规划可以避免人力、物力的额外耗费，从而减少全生命周期的 CO₂ 排放。

以上仅是初步论述了控制 CO₂ 排放的主要途径，而从制定技术路线的角度，还应有一个集成整体能源系统的模型，来对各类主要途径的减排潜力，效益和代价进行综合评估，确定最合适的实施组合和时间路线。

目前煤电大概占我国 CO₂ 排放总量的 40% 左右，发电部门是控制 CO₂ 首先应关注的领域。本文就以发电部门的 CO₂ 减排为例，对终端节能、能源供应效率、替代能源等减排 CO₂ 途径的潜力进行了案例分析。结果如图 5 所示。如果全部采用现有技术水平的煤电来满足基准情景下的电力需求，则 2050 年发电部门的 CO₂ 排放将达到 101.8 亿吨。若考虑促进终端节能，由于电力需求减少，可减少 17.3 亿吨 CO₂ 排放；进一步考虑促进发电技术进步，由于供电效率提高，可进一步减少 16.9 亿吨 CO₂ 排放；进一步考虑大力发展水电、核电、风电和其他低碳电力，2030 年后发电部门的 CO₂ 排放总量就可以趋于稳定，2050 年的 CO₂ 排放总量可控制在 40 亿吨左右。

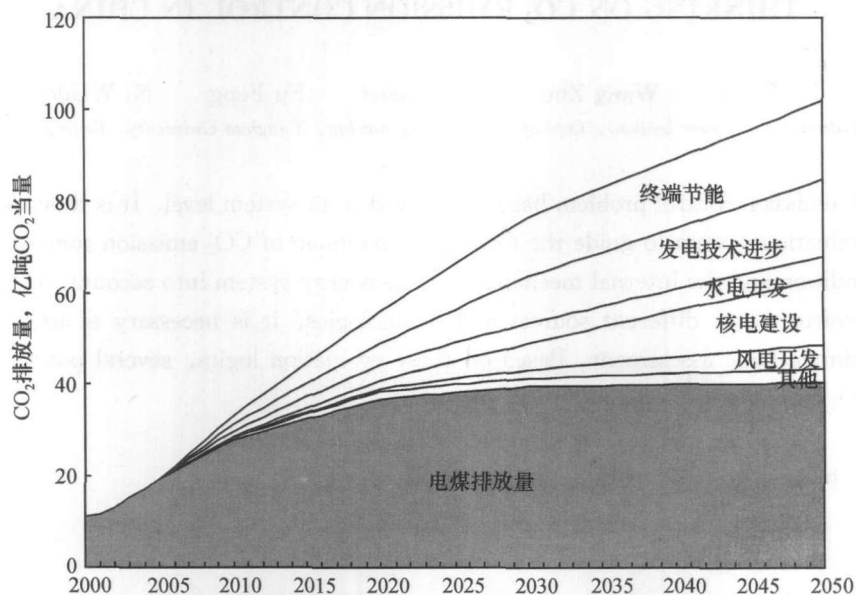


图5 发电部门减少 CO₂ 排放的潜力分析

从该案例分析可以得出一个初步的结论,即使在终端节能、提高拱电效率和低碳电力得到充分发展的情况下,2030年前我国发电部门的CO₂排放还将迅速增长。在2030年以后,电力系统CO₂的排放将基本维持在38亿吨左右。以此类推,其他行业的CO₂排放也会随着技术进步和节能减排的进行而渐趋稳定。也就是说,中国的CO₂排放量不会无限制上升。在这种情况下,知道中国CO₂的排放总量和能够排放的CO₂量就显得尤为重要,这决定了中国CO₂技术路线的选择和CO₂控制的强度。如果届时的CO₂排放总量仍难以满足控制目标,作为战略储备的CCS就是最后的手段。因此,CCS作为控制CO₂排放的重要战略技术,还应加强研发和示范,需要为大规模推广的做好准备。

4 总结

本文简单概括了国内外对于我国控制CO₂排放的相关研究成果,指出一个适合国情的综合的评估系统将是指导制定我国控制CO₂排放技术路线的关键之一。摸清中国的排放和减排潜力这个家底,从全生命周期和多维度来评估具体的能源技术,是这个评估体系应当考虑的思想方法。本文还讨论了中国能源系统CO₂减排的几条重要出路:我国应大力促进终端节能、提高能源供应效率和发展低碳替代能源。能源系统集成和优化在控制CO₂上也具有相当大的潜力,当前还应加强研发。虽然由于CCS会影响我国经济的发展,但是CCS仍是控制CO₂排放的最后手段,应当作为重要的战略储备技

术加强研发。需要补充说明的是:本文提出的CO₂多层次综合评估系统还只是是一个初步的框架和设想,要形成一个可实际应用的系统还有许多工作要做,需要大量基础性研究的支撑。

参 考 文 献

- [1] IPCC 政府间气候变化专家委员会. Climate change 2007, synthesis report. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007.
- [2] OECD/IEA. Key world energy statistics. *Stedimedia, Paris*, 2007.
- [3] IEA. World energy outlook. 2006.
- [4] 贺菊煌, 沈可挺, 徐嵩龄. 碳税与二氧化碳减排的CGE模型. 数量经济技术经济研究, 2002, 10: 39—47.
- [5] 陈文颖, 高鹏飞, 何建坤. 二氧化碳减排对中国未来GDP增长的影响. 清华大学学报(自然科学版), 2004, 44(6): 744—747.
- [6] 唐明亮, 沈晓冬, 黄弘, 钟白茜. 中国水泥工业二氧化碳减排潜力分析. 中国建材, 2006, 5.
- [7] 欧阳君山. 气候挑战: 中国软崛起的契机. 民主与科学, 2007(04): 35—37.
- [8] 汤志强, 王璐. 节能减排: 钢铁业的新机遇. 世界环境, 2007(3): 42—45.
- [9] 王铮, 梨华群, 张焕波, 龚轶. 中美减排二氧化碳的GDP溢出模拟. 生态学报, 2007, 27(9): 3718—3726.
- [10] 金红光, 张筱松. 控制温室气体的革新技术-能源与环境相容协调的系统集成创新. 前沿科学, 2007, 2: 27—36.
- [11] MIT. The future of coal. 77 massachusetts avenue, cambridge, MA 02139-4307, USA, 2007.
- [12] 李政, 麻林巍, 潘克西等. 产业发展与能源的协调问题研究——国际经验及对我国的启示. 中国能源, 2006, 28(10): 5—11.
- [13] 徐国泉, 刘则渊, 姜照华. 中国碳排放的因素分析模型及实证分析: 1995—2004. 中国人口资源与环境, 2006, 16(6): 158—161.

THINKING ON CO₂ EMISSION CONTROL IN CHINA

Li Zheng Wang Zhe Ma Linwei Fu Feng Ni Weidou

(State Key Laboratory of Power Systems, Dept of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract The CO₂ emission control problem has to be solved from system level. It is thought that a critical issue is to build up an evaluation system to guide the technology roadmap of CO₂ emission control which takes the external boundary condition and the internal mechanism of the energy system into account. It is pointed out that to evaluate the CO₂ emitted from different sources and technologies, it is necessary to use life cycle assessment (LCA) and multi-dimensional assessment. Based on these evaluation logics, several potential solutions are discussed to reduce CO₂ emission of China.

Key words CO₂, emission control, energy system