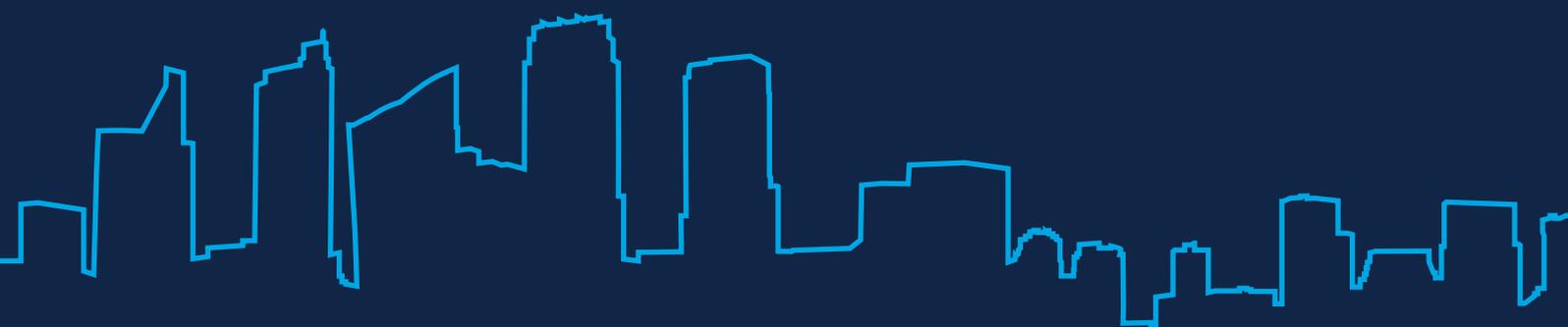


气候变化与煤炭消费总量控制

国家应对气候变化战略研究和国际合作中心



中国煤炭消费总量控制方案和政策研究（中国煤控项目）

中国是世界煤炭生产和消费第一大国。以煤炭为主的能源结构支撑了中国经济的高速发展，但同时也对生态环境造成了严重的破坏。尤其是 2012 年以来反复出现的全国性大面积重度雾霾，严重威胁了公众的身体健康。为了应对气候变化、保护环境和减少空气污染，国际环保机构自然资源保护协会 (Natural Resources Defense Council, NRDC) 作为课题协调单位，与包括政府智库、科研院所和行业协会等 20 多家有影响力的机构合作，于 2013 年 10 月共同启动了“中国煤炭消费总量控制方案和政策研究”项目（中国煤控项目），为设定全国煤炭消费总量控制目标、实施路线图和行动计划提供政策建议和可操作措施，促使煤炭消费量在 2020 年前达到峰值，帮助中国实现资源节约、环境保护、气候变化与经济可持续发展的多重目标。了解更多详情，请登录 www.nrdc.cn/coalcap。

系列报告

- 《建筑领域煤炭（电力）消费总量控制研究》
- 《基于煤炭消费总量控制的煤炭行业可持续发展研究》
- 《中国能源转型和煤炭消费总量控制下的金融政策研究》
- 《煤炭消费减量化对公众健康的影响和可避免成本》
- 《煤炭消费总量控制的就业影响》
- 《煤炭消费总量控制的财税政策研究》
- 《水泥行业煤炭消费总量控制方案及政策研究》
- 《电力行业煤炭消费总量控制方案和政策研究》
- 《中国能源统计系统改革的几点建议》
- 《2012 煤炭的真实成本》
- 《中国 2012 年能流图和煤流图编制及能源系统效率研究》
- 《煤炭使用对中国大气污染的贡献》

请前往中国煤控项目网站下载



自然资源保护协会（NRDC）是一家国际非营利非政府环保机构，拥有逾 140 万会员及支持者。自 1970 年成立以来，以环境律师、科学家及环保专家为主力的 NRDC 员工们一直为保护自然资源、公共健康及环境而进行不懈努力。NRDC 在美国、中国、加拿大、墨西哥、智利、哥斯达黎加、欧盟、印度等国家及地区开展工作。请登录网站了解更多详情 www.nrdc.cn。

本报告与 WWF 合作完成：



世界自然基金会（WWF）是在全球享有盛誉的、最大的独立性非政府环保组织之一。拥有全世界将近 500 万支持者和一个在一百多个国家活跃着的网络。WWF 的使命是遏止地球自然环境的恶化，创造人类与自然和谐相处的美好未来。为此我们致力于：保护世界生物多样性；确保可再生自然资源的可持续利用；推动降低污染和减少浪费性消费的行动。

目 录

碳排放控制与煤炭消费总量控制的约束及相互影响 3

应对气候变化的国际与国内形势分析

两度温升控制目标下的全球和中国碳排放空间约束

省域温室气体总量控制与煤炭总量控制 21

碳排放控制目标和煤炭消费总量控制目标纳入地区规划的情况

地区碳排放控制目标对煤炭消费总量控制目标影响机制

省级煤炭消费总量控制目标应该考虑的碳约束因素

结论和建议



本报告旨在基于国际与国内应对气候变化形势和需求，以自上而下的方式量化评估了两度温升目标下我国的碳排放空间，并按照实现两度温升目标的可能性从高到低提出了强、高、中三种控排路径。此外，报告还分析了煤炭消费总量控制对我国温室气体排放特别是碳排放控制工作的意义和减排潜力，并提出了我国未来强化碳排放控制的主要思路。

报告的基本结论如下：

1. 从实现全球两度温升目标的要求出发，在 2100 年前全球人均碳排放相等的假设条件下，我国的剩余碳排放空间已经十分有限。即使充分考虑 CCUS 的发展潜力，我国二氧化碳排放也需在 2030 年左右达到峰值并在 2050 年左右回落至 2010 年水平碳排放水平，并争取向 2025 年达峰并在 2050 年回落至 2000-05 年水平的排放路径努力。

2. 相较于节能情景，在煤炭消费总量控制情景下，2050 年我国温室气体减排量将达到 38.6 亿吨二氧化碳当量，2010-2050 年累计温室气体减排量将达到 842 亿吨二氧化碳当量，并将带来可观的社会经济效益。

3. 建议“十三五”期间在当前节能强度目标和碳排放强度目标两个强度目标控制基础上，适时启动实行碳排放总量控制和化石能源（煤炭）消费总量控制制度，从制度上形成对能源消费总量特别是煤炭消费总量的强约束。建议 2020 年的全国一次能源消费总量控制在 48 亿吨标煤以内，其中煤炭消费量控制在 40 亿吨以下，煤炭在一次能源消费中比重下降至 57% 左右，非化石能源占比提高至 15% 以上；2030 年的全国一次能源消费总量控制在 55 亿吨标煤以内，煤炭在一次能源消费中比重下降至 45% 左右，非化石能源占比提高至 20% 以上。



碳排放控制与煤炭 消费总量控制的约 束及相互影响



应对气候变化的国际与国内形势分析

(1) 全球应对气候变化的背景和两度温升控制目标的提出

全球气候变化是当前人类面临的一项重大挑战

政府间气候变化专门委员会（IPCC）最新发布的第五次评估报告明确指出，气候系统的变暖是毋庸置疑的。最近的三个十年比 1850 年以来其他任何十年都更热，1983 年 -2012 年则很有可能是北半球过去 1400 年来最热的三十年。目前观测到的气候变化影响和风险已经越来越广泛并具有实质性，气候变化已对所有大陆和海洋的自然和人类系统产生了影响。受气候变暖的影响，自十九世纪中叶以来的海平面上升速率大于过去两千年内的平均上升速率，全球范围内冰川继续退缩，海平面上升速率不断提高，极端气候事件发生频率也在攀升。气候变化已经对全球自然生态系统和人类社会产生了严重影响。

导致全球气候变化的主要原因来自于人类活动温室气体排放，其中二氧化碳排放是最主要的温室气体

IPCC 历次评估报告对于人类活动是导致气候变化的主要原因这一结论的可信度不断加强，最新发布的 IPCC 第五次评估报告指出，“极有可能的是，观测到的 1951-2010 年全球平均地表温度升高的一半以上是由温室气体浓度的人为增加和其他人为强迫共同导致的”。如果没有额外的减少温室气体排放的努力，全球 2100 年的平均表面温度相对工业化前（1850-1900 年）将升高约 4°C（3.7-4.8°C），这会给全球带来巨大的系统性风险，包括大量物种的灭绝、全球和地区的粮食安全问题、高温和潮湿对人类正常活动严重影响等，以及由此带来的局部冲突等社会问题。从这些科学研究结论中可以看出，积极应对气候变化、控制温室气体排放，已经成为全球各国需共同面对的紧迫任务。

积极应对气候变化、控制温室气体排放，已经成为全球各国需共同面对的紧迫任务

从维护人类发展权益和保护全球气候安全的角度出发，坚持将温升控制在较工业化前升高 2°C

全球对控制气候变化的长期目标已初步达成共识

考虑到气候变化对于全球生态安全的重大影响，《联合国气候变化框架公约》（简称：《公约》）第二条指出“公约及其相关法律条文的最终目标是将大气中温室气体的浓度稳定在一定水平上，以防止对气候系统产生危险的人为干扰，使生态系统有足够的时间自然地适应气候变化，确保粮食生产不受威胁，经济得到可持续发展”。尽管《公约》只是在宏观上要求稳定大气中的温室气体浓度，但没有明确到底应该把浓度控制在哪种水平上，而基于当前最佳认知水平的半量化评估显示，如果能本世纪末温升控制在较工业化前升高 2°C 甚至更低时，气候变化对包括气候变化脆弱地区和人群、全球经济和地球生物多样性、生态系统和文化的风险将相对缓和，而该种风险将随着温升的增加而显著增加，因此，从维护人类发展权益和保护全球气候安全的角度出发，坚持将温升控制在较工业化前升高 2°C 目标具有非常重要的意义。全球各国在 2009 年哥本哈根气候变化大会上已经就两度温升目标达成了政治共识（大致对应于 450ppm 的大气二氧化碳平衡浓度的目标），并围绕此目标展开了全球气候体制的磋商。

全球长期温升控制目标的实现面临着极大的挑战

根据 IPCC 第五次评估报告，在很可能（90%）实现 2°C 温升目标情景下的成本最优排放路径则要求：到 2030 年，全球温室气体排放应同在 2010 年水平的 60%~100%；到本世纪中叶，全球温室气体需减少至 2010 年水平的 40%~70%，到本世纪末减至近零。这就全球强化减缓气候变化的行动，通过能源革命等方式尽早实现碳排放峰值并实现碳排放的快速下降，重视土地利用变化和林业温室气体排放，加强对二氧化碳移除技术（CDR）等技术手段的研究并尽早部署和实施。根据联合国对于人口的预测，全球人口在本世纪中叶前仍将保持增长并主要集中于经济和产业发展较为落后的发展中国家。考虑到绝大多数发展中国家仍面临着消除国内贫困、提高人民生活水平等切实需求，上述全球碳排放仍将在未来控制全球碳排放的形势仍然十分严峻。

(2) 我国应对气候变化和控制碳排放的形势

我国也是遭受气候变化不利影响最为严重的国家之一

根据国家气象局相关观测数据，1961 年到 2010 年我国地表平均温度、平均最高和最低温度均呈现较为明显的上升趋势，各个地区均不同程



度的受到气候变化带来的不利影响。素有“亚洲水塔”之称的青藏高原地区 85% 至 90% 的冰川均出现萎缩；受到海平面升高等因素影响近年来长江三角洲地区出现海水入侵现象并威胁到流域内居民的生产生活；2009 年末以来我国云南、贵州、广西、重庆、四川等地均出现严重的持续干旱；包括高温、暴雨、低温雨雪冰冻等极端气候和天气灾害的频繁出现在给气候脆弱地区带来严重经济损失。

我国已经成为全球碳排放总量和人均碳排放大国

根据最新发布在《自然 - 地球科学》的论文《持续增长的二氧化碳排放总量对达成气候造成影响》相关数据，2013 年全球的二氧化碳排放量¹再创历史新高，达到 361 亿吨左右，其中中国排放二氧化碳 100 亿吨（仅能源活动排放的二氧化碳排也接近 90 亿吨），占全球总排放的比例达 28%；2013 年我国人均碳排放不仅超过了世界平均水平，更是超过了欧盟的平均水平。从碳排放增量角度，当前我国年碳排放增量超过全球年碳排放增量的一半，成为推动全球碳排放持续走高的主导因素。由此可以判断，全球碳排放峰值的出现很大程度上要依赖于我国碳排放峰值的出现。考虑到经济的稳步增长和城镇化的不断推进等因素，未来较长时间内我国碳排放仍将呈现上升趋势，若我国碳排放过快增长的势头不能有效缓解，我国乃至全球碳排放的控制形势均将更加严峻，在国内碳排放持续增长的背景下我国面临的国际减排压力也将与日俱增。我国作为一个排放大国和一个负责任大国，在排放空间约束下和国际减排义务要求下，只有走低碳发展之路，才能兑现我国“为全球生态安全作出贡献”的承诺。

2013 年我国人均碳排放不仅超过了世界平均水平，更是超过了欧盟的平均水平

控制碳排放已成为我国自身可持续发展的内在要求

中国经历了近三十多年的快速经济增长，经济社会发展水平得到全面提升，但与此同时，长期以来延续的高度依赖资源消耗、粗放式、高碳式的发展方式，在带来高碳排放的同时，也使压缩型、复合型的环境问题愈加尖锐。大气环境方面，空气污染呈现由局地向区域蔓延，90% 以上的城市空气质量不能达标，细颗粒物和臭氧等新型污染物。水环境方面，全国大部分途径城市的河段水体污染严重，华北等地区地下水也遭受污染；生态环境方面，全国水土流失面积占国土总面积的 37%，荒漠化土地面积占国土总面积的 27%，全国 90% 的草原出现退化，生态系统面临严重衰退甚至崩溃的风险。对我国来说，传统污染物排放造成的环境污染和温室气体排放造成的气候影响基本上同根、同源，主要都来自于大量的能源消费、

1. 包括能源活动和水泥生产过程产生的碳排放。

高碳的能源结构和粗放式的能源利用方式，如北京的PM_{2.5}成份中，2/3来自煤炭和石油的使用，而中国的温室气体排放总量中，以化石能源为源的也占到3/4以上。因此，传统的发展方式如不加以改变，不仅会导致生态环境污染进一步恶性加剧，还会致使我国碳排放进一步增高，更会严重影响人民的生态健康和生活质量。通过控制碳排放和推动低碳发展，能够促进绿色发展并推动经济转型，减少由化石能源消费所产生的资源破坏和环境污染问题，获得显著的协同效益。

控制碳排放和实现低碳发展是我国融入国际发展潮流的切实要求

一方面，绿色、低碳、可持续发展已经成为全球发展的大势所趋，发展低碳经济已成为金融危机后的全球动向。美国、欧盟等发达国家纷纷将发展低碳产业、提升低碳技术作为驱动经济增长的主要推动力，不仅实施了众多推动低碳发展的政策措施，在很多低碳相关的领域也取得了重大进展和突破，这即为我国控制碳排放和推动低碳发展提供了很好的经验和借鉴，同时也给我国相关产业的发展提出了更高的要求，我国若不能及时更紧当前的发展形势、大力发展低碳经济，将会在未来的全球竞争中处于被动地位，驱动经济发展的动力将会被严重削弱。另一方面，碳排放已经成为制约我国产业发展和市场扩展的重要因素之一，过去十几年来，低碳排放已经成为国际贸易中竞争力的重要体现，发达国家正逐步建立以碳排放为衡量标准的约束指标体系，并在全球范围推行低碳环保型技术标准和国际贸易规则，以构建全新的绿色低碳一体化发展格局。我国企业如不能及时应对、有效控制碳排放，在发展过程中将会面临严峻的环境壁垒，不仅会导致国际竞争力的下降，甚至会形成难以走出去的困境。因此，实现低碳发展既是我国产业和企业跟上世界低碳发展潮流的重要机遇，也是提高我国行业和企业国际竞争力的迫切要求。

(3) 全球和我国应对气候变化的承诺

能源活动是支撑发达国家完成现代工业化进程的关键因素，也是推动发展中国家未来的工业化和城镇化的重要保障因素，因此各国对于碳排放控制也会在很大程度上左右世界各国的经济发展的潜力和空间。但考虑到各国政治体制的差异和各国发展的需求，从当前来看，在UNFCCC框架下自上而下的确定各国具有法律约束力的减排目标已经难以切实推行。

2013华沙气候大会就推动德班平台下一步工作达成共识，其中最为重要的一项是邀请各国开始准备各自“预期的国家自主决定的贡献”(Intended

而中国的温室气体排放总量中，以化石能源为源的也占到3/4以上



Nationally Determined Contribution) 并尽早通报各方，同时授权德班平台工作组于 2014 年识别提交相关“贡献”时所需的信息。这一决定启动了“国内准备工作”这一关键环节，德班平台进程已按照相应的时间和路线图真正进入实施阶段，自此“自下而上”的“自主承诺加审评”减排模式基本形成。

2013 年华沙会议后，各国一直围绕着贡献的力度、贡献的审评以及与 2015 年协议的关系等具体议题进行激烈的争论，当前已有欧盟、美国、瑞士、挪威、俄罗斯、墨西哥等国家提出了其国家自主贡献的行动目标和相应草案，其中行动目标是国家自主贡献的核心内容，也一直是气候变化谈判的焦点，甚至在很多发达国家看来，行动目标是国家自主贡献的唯一内容。

2014 年利马气候变化大会前夕，欧洲理事委批准通过了欧盟 2030 年的行动目标，中美共同宣布 2020 年后行动目标意味着占全球碳排放近一半的经济体完成了国家自主贡献核心内容的准备工作。就欧盟来说，作为应对气候变化领域的领头羊，其 2012 年温室气体排放量较 1990 年下降约 18.8%，基本实现 2020 年将温室气体排放量在 1990 年基础上减少 20% 的目标。在此基础上，2014 年欧盟正式通过欧委会提出的 2030 年在 1990 年基础上减排 40% 的约束性目标，但上述目标与欧盟之前提出的 2050 年在 1990 年基础上减排 80% 的目标仍存在较大的减排差距。就美国来说，其通过页岩气革命、积极制订发电、交通、建筑等领域相关标准等务实的行动，2012 年能源活动碳排放量较 2005 年下降了 12%，但与 1990 年相比仍然上升了 5%。2014 年 11 月中美在北京签署《中美气候变化联合声明》，美国正式宣布了 2025 年在 2005 年基础上减排 26%-28% 的全经济范围减排目标。美国若实现上述目标，相当于其在完成 2020 年 17% 减排目标的基础上，到 2025 年时排放量比 2020 年进一步下降 11%~13%，相比 1990 年则要下降 14%~16%。

考虑到应对气候变化对于维护生态安全的重大意义，控制碳排放是我国作为一个负责大国参与国际生态治理的重要方面，也是我国实现国内经济、社会、能源可持续发展的必然要求。中国政府高度重视应对气候变化工作，将其作为建设生态文明和美丽中国的重要组成部分，纳入国家发展规划，开展了大量适应和自主减缓行动。中国政府已宣布到 2020 年单位 GDP 二氧化碳排放比 2005 年下降 40%~45%，非化石能源占一次能源消费比例达到 15% 左右，森林面积比 2005 年增加 4000 万公顷，森林蓄积量比 2005 年增加 13 亿立方米等约束性指标。在此基础上，习近平主席在 2013 年 APEC 峰会上做出了“为应对全球气候变化作出新的贡献”的庄

中国政府已宣布到 2020 年单位 GDP 二氧化碳排放比 2005 年下降 40%~45%，非化石能源占一次能源消费比例达到 15% 左右

《中美气候变化联合声明》首次正式提出计划于2030年左右达到碳排放峰值和2030年非化石能源占一次能源消费比重提高到20%左右的强化目标

严承诺，并强调应对气候变化“不是别人要我们做，而是我们自己要做”。继2020年碳排放强度比2005年下降40%-45%的控制目标后，我国又先后于13年底和14年9月出台《国家适应气候变化战略》和《国家应对气候变化规划（2014-2020年）》，提出了我国应对气候变化工作的指导思想、目标要求、政策导向、重点任务及保障措施。2014年11月中美在北京签署《中美气候变化联合声明》，首次正式提出计划于2030年左右达到碳排放峰值和2030年非化石能源占一次能源消费比重提高到20%左右的强化目标。我国若在2030年左右实现二氧化碳排放峰值，意味着我国单位GDP碳排放下降率需大于GDP年均增长率，即在2030年左右，如果GDP保持5%左右的增速，则CO₂强度的下降率要高于2005~2020年的3.3%~4%，甚至超过5%。同时，中国到2030年实现20%左右的非化石能源目标，意味着中国非化石能源需以年均6%左右的速度增长，需新增8~10亿千瓦的核能、太阳能、风能和其他可再生能源装机，相当于中国当前的煤电装机总和。上述目标的提出，意味着我国必须综合运用转变经济发展模式、促进产业转型升级、提高能效和大力发展非化石能源等多种手段，开创一条符合我国国情的、创新式低碳发展道路。

两度温升控制目标下的全球和中国碳排放空间约束

(1) 两度温升控制目标下的全球碳排放空间约束

作为最主要的温室气体，二氧化碳排放的快速上升也是导致全球温室气体浓度快速上升、影响气候系统变化的主要原因。因此二氧化碳是本报告主要研究的温室气体。根据相关模型的研究，在未来几十年内，虽然我们仍可以允许大气二氧化碳浓度出现短暂过冲，但浓度过冲的幅度和持续时间都需有所限制，而且过冲后需采取更强有力的深度减排才能确保两度控制目标的实现。根据世界气象组织（WMO）2012年温室气体公报公布

的数据，2012 年全球大气中的二氧化碳浓度增加到 393.1ppm，距离与实现 2 度温控目标情景所对应的二氧化碳浓度值（450ppm）已为时不远，形势十分严峻，因此，从全球范围来看，迫切需要大幅度和持续地控制并减少人为活动引起的温室气体、特别是二氧化碳的排放。

根据 IPCC 第五次评估第三工作组的研究结果，在 66% 概率实现 2°C 温控目标的情景（即大气二氧化碳当量浓度为 450ppm 所对应的情景，也称为 RCP2.6 情景）下，全球 2011-2100 年的累积 CO₂ 排放空间为 6300-11800 亿吨 CO₂；若将可能性降低到 50%，则同期全球累积 CO₂ 排放空间可提升到 6300-14300 亿吨 CO₂。而按照 IPCC 第五次评估第一工作组的研究结果，如基于 CMIP5 地球系统模式模拟，则与 RCP2.6 情景相对应的 2012-2100 年间的累积 CO₂ 排放空间为 5100-15050 亿吨 CO₂（平均值为 9900 亿吨 CO₂，且未考虑土地利用变化）。综合两个工作组的研究结果看，尽管有些差异，但数量大致可比，即从 2011-2100 年的全球累积 CO₂ 排放空间，大致在 10000 亿吨 CO₂ 左右，仅可支持全球按照当前的排放水平排放不到 27 年（2012 年全球 CO₂ 排放量约为 376 亿吨 CO₂）。这一分析表明，从现在到本世纪末，全球的碳排放容量空间已经十分有限，正在成为日益稀缺的战略资源和未来发展的约束。

从现在到本世纪末，全球的碳排放容量空间已经十分有限，正在成为日益稀缺的战略资源和未来发展的约束

(2) 全球两度温升控制情景下中国可能面临的碳排放约束

就全球碳排放空间的分配而言，各国从自身发展角度出发提出了多种维度的责任分担或减排方案。本研究在“人年均二氧化碳排放相等”的假设条件下分配各国的碳排放空间，其涵义是将研究时段内碳排放量之和平均分配给被该时间段内各年的人口数之和（见下公式）。

$$\text{人年均碳排放} = \frac{\text{碳排放空间}}{\sum_{\text{起始年}}^{\text{终止年}} \text{人口}}$$

是否考虑碳排放的历史责任会对碳排放空间分配的计算产生很大影响，为此，本研究分别将 1870 年和 1990 年作为考察碳排放历史责任的起点（其区别在于是否追究各国 1870~1989 年间碳排放量的历史责任），形成了考虑历史责任和不考虑历史责任两类方案。



方案一：考虑 1870~1989 年间碳排放历史排放责任时，碳排放历史责任的起点均为 1870 年，2100 年前每人均有排放人年均碳排放量的权利，在该种方案下人年均碳排放量的计算公式为：

$$\text{人年均碳排放量} = \frac{\text{两度目标下全球累计碳排放空间}}{\sum_{1870}^{2100} \text{全球人口}}$$

某国家 i 在 1870 年 ~2100 年允许的碳排放空间为：

$$\text{碳排放空间}_i = \sum_{1870}^{2100} \text{国家人口}_i \times \text{人年均碳排放量}$$

方案二：在不考虑 1870~1989 年间碳排放历史排放责任时，不追溯发达国家于 1870~1989 年间碳排放的历史责任，在该情景下各国 1870~2100 年间允许的碳排放空间为 1990~2100 年间按人年均碳排放量计算得到的碳排放量与 1870~1989 年间不追溯历史责任的碳排放量之和。

人年均碳排放量

$$= \frac{\text{两度目标下全球累计碳排放空间} - \sum_{1870}^{1989} \text{全球年碳排放量}}{\sum_{1990}^{2100} \text{全球人口}}$$

某国家 I 在 1870 年 ~2100 年允许的碳排放空间为：

碳排放空间_i

$$= \sum_{1990}^{2100} \text{国家人口}_i \times \text{人年均碳排放量} + \sum_{1870}^{1989} \text{CO2 排放量}$$



考虑到 RCP2.6 和 RCP4.5 情景对应的排放空间均是一个较大的变化范围，而 RCP2.6 情景下实现 2 度温升控制目标的概率更高，因此本研究分别以 RCP2.6 情景下全球排放空间的中值、高值以及 RCP4.5 情景下全球排放空间的中值作为全球碳排放空间总量，并在考虑 / 不考虑 1870~1989 年间历史排放责任两种方案下，考察了我国 2012-2100 年间的剩余碳排放空间。计算结果显示，中国从 2012-2100 年的剩余碳排放空间范围为 1363-5732 亿吨 CO₂（见表 1）。

表 1 不同概率实现 2°C 温升目标条件下以人年均碳排放相等原则计算得到的 2012~2100 年我国的剩余碳排放空间（单位：亿吨 CO₂）

情景	2012-2100 年中国剩余碳排放空间	
	追究各国 1870-1989 年历史排放责任	不追究各国 1990 年前历史排放责任
RCP2.6(中值)	2570	1363
RCP2.6(高值)	3624	2283
RCP4.5(中值)	5732	4077

(3) 碳排放空间约束下的我国可能碳排放路径

在上述碳排放空间计算的基础上，本研究根据碳排放达峰年、峰值水平、2050 年排放水平、2100 年排放水平和是否采用 CCUS 等约束条件，分析研究了我国未来可能的排放路径。

在特定碳排放空间下，本报告根据碳排放达峰年、峰值水平、2050 年排放水平、2100 年排放水平和是否采用 CCUS 等约束条件，利用曲线拟合的方法，对 2012-2100 年我国碳排放路径进行了分析。假设未来碳排放曲线为 f(x)，那么 f(x) 应当满足以下条件：

其中，ES 为我国在不同方案下的碳排放空间；CCUS 为 2100 年前我国未来可能的碳捕捉和埋存总量，主要参考相关文献基础上获得；E₂₀₁₂、E₂₀₅₀ 和 E₂₁₀₀ 分别为我国 2012、2050 和 2100 年的碳排放量，其中 2012 年碳排放量根据统计年鉴能源活动水平和对工业过程碳排放的初步评估数

$$\int_{2012}^{2100} f(x)dx = ES + CCUS$$

$$f(2012) = E_{2012}$$

$$f(2050) = E_{2050}$$

$$f(2100) = E_{2100}$$

$$df(\text{峰值年}) / d^2x = 0$$

据计算得到²，2050年假设排放量分别回到接近2010、2005年前、1990年排放水平，2100年碳排放量分别假设回到接近0、10亿吨以下和25亿吨以下。

根据上述分析方法，按照实现两度温升目标的概率差异对表1中不同碳排放空间条件下的未来碳排放路径进行了分析研究，并按照实现两度温升目标可能性由高到低，分为强控排路径、高控排路径和中控排路径（依次用蓝、绿、红三种颜色表示），如图1所示。三类排放路径的具体描述如下：

强控排路径：从碳排放总量角度，在该路径下，即便充分考虑CCUS等低碳技术的高的应用潜力，中国碳排放也需在2020年前达峰，碳排放峰值维持在当前水平，且需在达峰后实现碳排放快速下降，2050年回落至1990年水平而后全社会碳排放快速向近零排放靠近。从单位GDP碳强度角度，该路径下我国2020年单位GDP碳排放水平较2005年下降约52%，大幅超额完成哥本哈根减排承诺，2030年和2050年单位GDP碳排放分别在2005年基础上下降约75%和95%。总体而言，强控排路径对我国的能源和产业的低碳转型都是一个非常巨大的挑战，实现难度较大。

高控排路径：在该路径下，从排放总量上看，我国的碳排放需在2025年左右实现碳排放达峰，到2050年回落至2000~2005年水平³，而后碳排放继续保持快速下降趋势，但下降速率较强控排路径有所减缓。从单位GDP碳强度角度，该路径下2020年单位GDP碳排放水平较2005年下降约48%，超额完成哥本哈根减排承诺，2050年单位GDP碳排放需在2005年基础上下降约70%和90%，与OECD国家2010年水平基本相当。

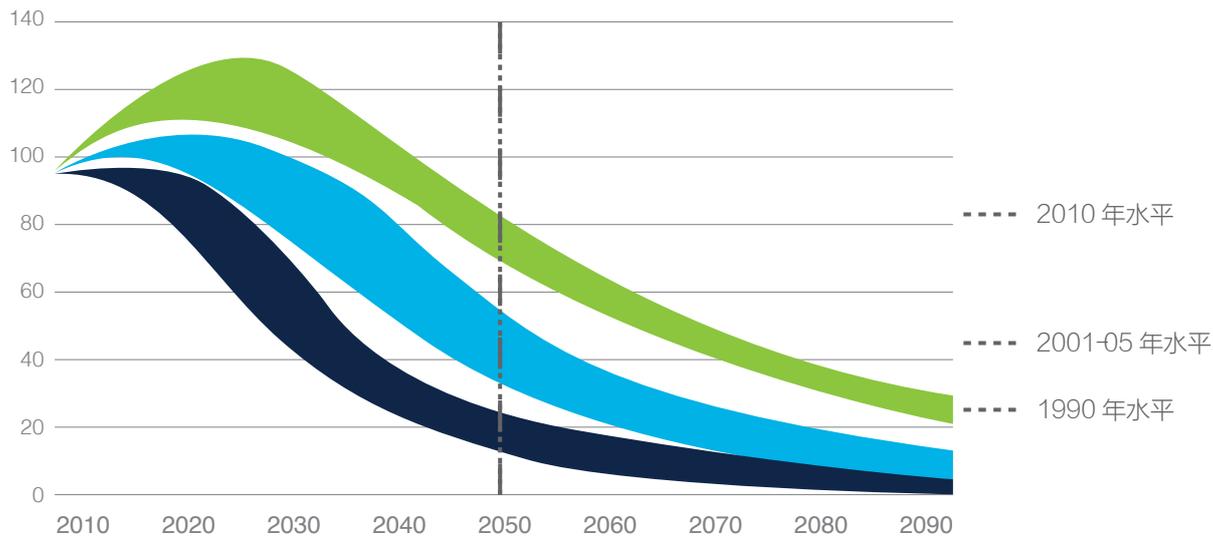
中控排路径：在该路径下，从总量上看，我国碳排放需要在2030年左右达到峰值并将峰值控制在120亿吨以下，并使2050年碳排放回落至2010年水平，相应的碳排放量下降速率与强控排路径和高控排路径相比较为宽松，但也需要付出较大的减排努力。从单位GDP碳强度角度，在顺利完成2009年哥本哈根大会提出2020年单位国内生产总值二氧化碳排放比2005年下降40%-45%的碳强度控制目标的基础上，2030年和2050年单位GDP碳排放需在2005年基础上下降约65%和85%。

2. 本报告关于我国历史碳排放量的计算仍参考2013年前的相关年鉴数据计算得到，未考虑历年能源数据未来可能进行的调整。

3. 根据《第二次国家信息通报》公布的2005年国家温室气体清单，我国2005年能源活动二氧化碳排放约54亿吨，全行业二氧化碳排放接近60亿吨。



图 1 我国碳排放约束条件下的三类排放路径约束（单位：亿吨）



总体来看，我国已提出的减排承诺目标与中控排路径区间相对吻合。在哥本哈根气候变化大会提出的碳强度下降 40-45% 的承诺的基础上，2014 年我国在《中美气候变化联合声明》提出了将在 2030 年左右二氧化碳排放达到峰值且将努力早日达峰的目标，这一目标是比当前的碳强度减排更为严格的总量控制目标。上述目标与中控排路径区间的上限要求基本一致，也是基于我国的国情条件下，在三种可能的排放路径中最可能实现的一种碳排放控制情景方案。

强控排路径要求我国基本按照 IPCC 成本最优排放路径同样的减排力度进行减排。即使充分考虑未来 CCUS 应用的可能性，我国也需在 5-10 年间尽早达峰并且使峰值基本维持在现有水平，而后实现碳排放快速下降，在 2050 年左右回落至 1990 年水平，这无疑对我国的能源和产业的低碳转型的要求极为严格，也将会对我国未来的经济发展形成较大的外部约束，从我国当前城镇化进程和产业、技术的发展阶段看能实现的困难极大。

高控排路径下，我国的碳排放需在 2020-2025 年间实现碳排放达峰，碳排放量需控制在 100 亿吨左右的水平甚至更低，并在 2050 年回落至 2000~2005 年水平。相较于强控排路径，高控排路径对于国内经济发展和人民生活水平的提升的约束限制作用有所减弱，但也对我国的碳排放控制提出了非常严格的要求。这一情景的实现意味着中国必须在充分利用技术

后发优势的基础上，进一步努力加快工业产业转型升级、加大各行业的节能减排力度，居民生活和消费也必须向更为低碳、集约的方式转变。另一方面，考虑到碳排放控制工作的推进对大气、水等环境保护领域也将带来巨大的协同环境效益，积极推动低碳发展是满足国内人民对于“绿水青山”的美好的内在要求，我国也将会在努力兑现 2030 年左右碳排放总量达峰这一目标的基础上，尽可能在更早的时间和低的排放水平实现碳排放达峰，使我国的碳排放路径尽可能的向高控排路径靠近。

煤炭消费总量控制对温室气体控制的^{意义和潜力分析}

煤炭消费带来的碳排放占我国能源活动碳排放比例长期维持在 70% 左右，占我国温室气体排放比例在 55%-60% 之间

我国的能源结构长期以煤为主，是世界上唯一以煤为主的能源消费大国。根据中国第二次国家信息通报，二氧化碳在温室气体排放总量中占比 80.02%，而能源活动碳排放占二氧化碳排放量的 90.4%。根据 IEA 对于中国能源活动碳排放相关分析，煤炭消费碳排放在能源活动碳排放中占比长期维持在 80% 左右。基于上述数据可以发现，煤炭消费带来的碳排放占我国能源活动碳排放比例长期维持在 70% 左右，占我国温室气体排放比例在 55%-60% 之间，是我国能源活动碳排放乃至温室气体排放的主体。若考虑到煤炭生产、运输和消费过程中的其他温室气体排放，煤炭在全生命周期的碳排放将会更高。

根据相关能源和碳排放模型研究预测，2020、2030 年一次能源需求将分别达到约 50 亿吨标煤和约 60 亿吨标煤的水平，煤炭在 2030 年前在能源结构中占比仍然将维持在 50% 左右的水平，其在能源消费和碳排放中的主体地位不会得到根本性改变。在此背景下，从控制碳排放、实现低碳发展的内在要求出发，实施煤炭消费总量控制，推动煤炭比重将持续下降并尽快达到国家煤炭消费总量的峰值，并进而实现煤炭消费总量的逐步下降，是抑制我国碳排放过快上升趋势、实现 2020 年哥本哈根碳强度下降目标和 2030 年碳排放达峰目标的关键，也是实现我国未来碳排放路径

由中控排路径向高控排路径转型的最大潜力所在。另一方面，煤炭消费总量控制在减少消费侧碳排放的同时，也将带来煤炭生产和消费全生命周期中其他温室气体减排和大气、水、健康方面的巨大环境效益，因此尽快推动实施煤炭消费总量控制对于推动我国经济社会的可持续发展具有重大的现实意义。

本报告着重对煤炭消费总量控制带来的包括二氧化碳在内的温室气体及黑碳减排的环境效益进行了研究分析，主要思路包括：首先，煤炭消费量控制带来的煤炭生产需求的下降，将减少煤炭开采过程中甲烷的排放；其次，煤炭消费量控制将降低煤炭的长距离运输需求，从而减少煤炭运输过程中燃料消耗，减少运输过程二氧化碳的排放；第三，终端用户侧煤炭消费量的控制，将直接减少煤炭终端消费的二氧化碳和黑碳两类温室气体的排放。其中，生产、运输和消费过程中温室气体减排量分别由煤炭生产、运输或消费过程中活动水平下降幅度、单位活动水平对应的排放因子、单位温室气体的全球增温潜势⁴相乘得到。

根据本报告的测算，一吨煤炭生产、运输和消费全周期的温室气体排放约 2 吨二氧化碳当量，其中约 96% 发生在消费环节，主要是由于煤炭直接燃烧量下降带来的二氧化碳排放量的下降，如表 2 所示。

一吨煤炭生产、运输和消费全周期的温室气体排放约 2 吨二氧化碳当量，其中约 96% 发生在消费环节

表 2 单位煤炭消费的温室气体排放量

	煤炭生产	煤炭运输	煤炭消费	总量
温室气体排放量 (kg 实物量)	CH ₄ 3.42	CO ₂ 13.6	CO ₂ 1890 黑碳 0.14	
折合二氧化碳当量 (kg CO ₂ e)	67.4	13.6	1915.9	1996.9

本研究对中国煤控项目下三种情景（即节能（基准）情景、煤控情景和两度情景）进行了分析，通过比较三种情景下的温室气体排放量的变化，比较得到煤炭消费控制对温室气体排放控制的贡献，如图 2 和图 3 所示。

4. 全球增温潜势是某一给定物质在一定时间积分范围内与二氧化碳相比而得到的相对辐射影响值。



图 2 基础、煤控和两度情景下温室气体排放量⁵

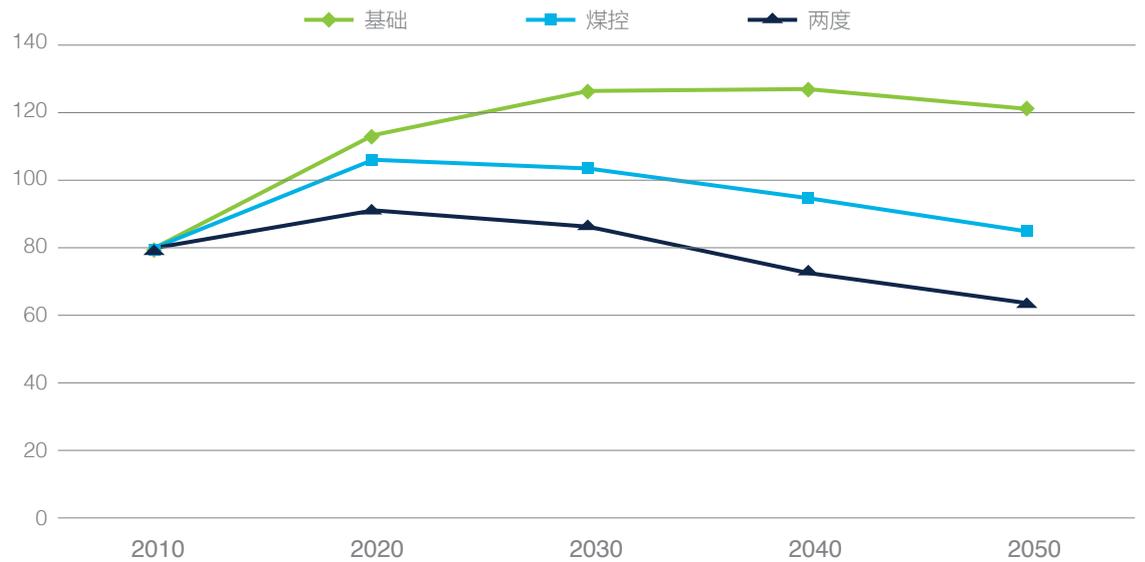
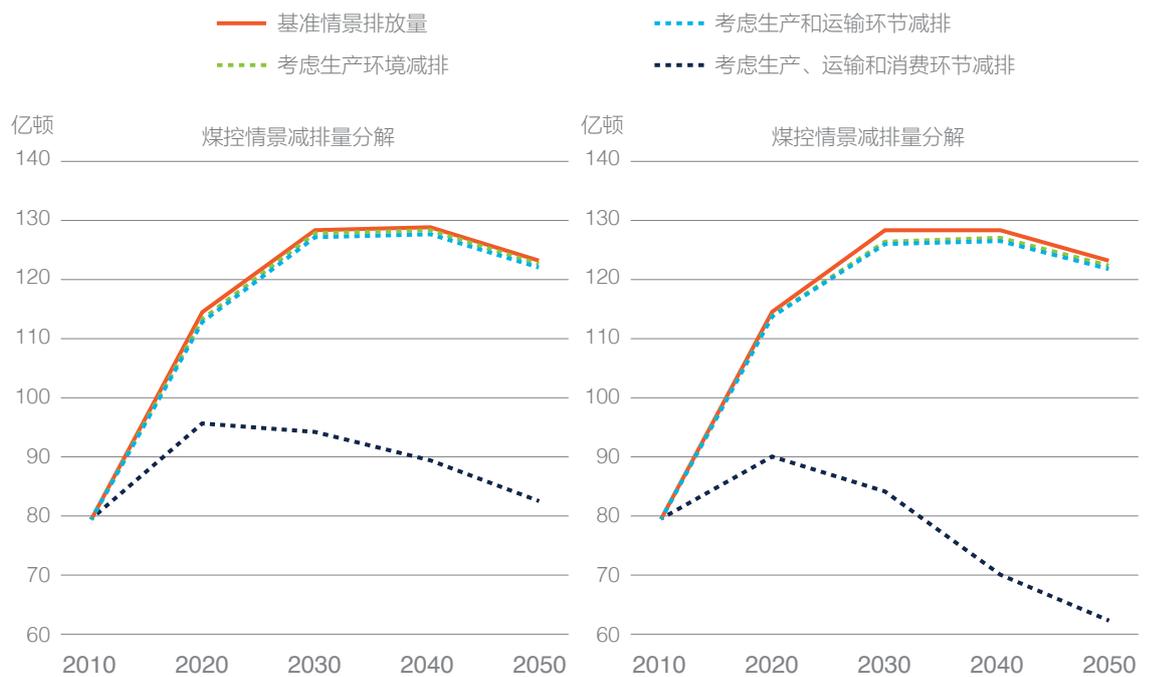


图 3 煤控情景和两度情景的减排量分解



5. 除考虑能源活动二氧化碳排放外，还包括煤炭生产、运输和消费过程中的其他温室气体排放

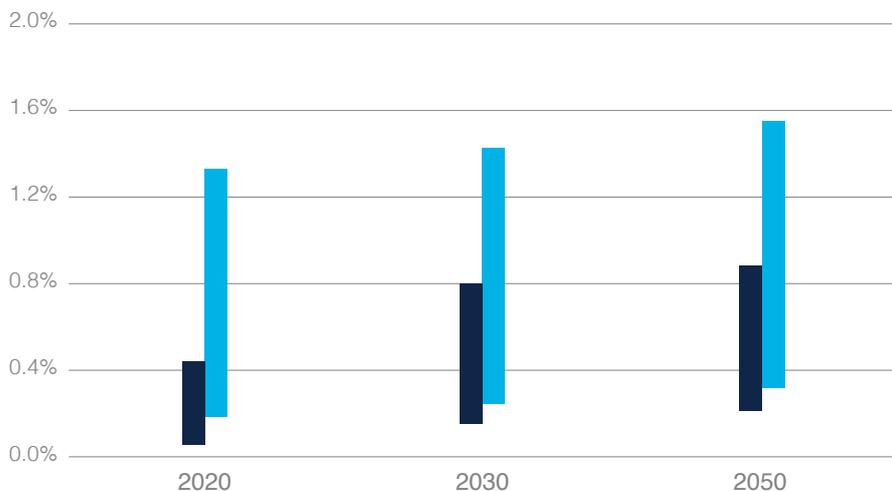


相较于节能情景，煤控和两度情景下 2020 年当年温室气体分别减排 7.7 和 23.3 亿吨，带来的社会经济效益分别为 0.07-0.36 万亿、0.20-1.11 万亿（2012 年人民币不变价），相当于 2020 年 GDP 总量的 0.07-0.37%、0.21-1.13%。随着 2030 年至 2050 年之间煤炭消费量控制效果的逐渐显现，温室气体减排的效果进一步加强，2030 年当年煤控和两度情景的温室气体减排量分别达到 24.2 和 42.1 亿吨 CO₂e，带来的社会经济效益分别在 0.28-1.34 万亿、和 0.49-2.34 万亿元，相当于 2030 年 GDP 总量的 0.14-0.67%、0.25-1.17%；2050 年当年煤控和两度情景的温室气体减排量上升至 38.6 和 60.9 亿吨 CO₂e，带来的社会经济效益分别上升至 0.76-2.77 万亿和 1.20-4.37 万亿元，相当于 2050 年 GDP 总量的 0.20-0.72% 和 0.31-1.14%（如图 4 所示），减排的社会经济效益十分巨大。2010-2050 年煤控情景和两度情景下累积温室气体减排量分别达到 823 亿吨 CO₂e 和 1475 亿吨 CO₂e，相当于 2005 年我国温室气体排放量的 11 倍和 20 倍。

与此同时，要注意到，煤炭消费控制除带来温室气体和黑碳的减排效益远不止于减少气候变化的影响，还包括减少煤矿事故、维护北极和高原地区生态等协同效应，这对于我国乃至全球经济社会的可持续发展同样有着不可估量的巨大效益。

相较于节能情景，
煤控和两度情景下
2020 年当年温室
气体分别减排 7.7
和 23.3 亿吨，带
来的社会经济效益
分别为 0.07-0.36
万亿元

图 4 不同情景下温室气体减排的社会经济效益（占当年 GDP 比例）
（深蓝色、浅蓝色分别代表煤控和两度情景）



中国实现碳排放控制的主要思路

从碳排放约束的角度出发，我国需要重新审视能源发展战略，从根本上控制能源过快增长并推动我国能源结构转型

长期以来，我国能源资源利用方式粗放、生态环境承载力不断下降，2012年我国经济总量约占全球的11.5%，却消耗了全球21.3%的能源，其中全球超过50%的煤炭消费发生在中国。能源消耗过快增长，特别是煤炭消费的过快增长使我国在二氧化碳和二氧化硫、氮氧化物等污染物排放上均冠上了“世界第一排放大国”的头衔。控制碳排放的过快增长，不仅是我国作为一个负责任大国所应尽的国际义务，更是我国可持续发展的内在要求。

单纯依靠能源强度目标和碳排放强度目标将难以对我国能源消费和碳排放形成足够强的约束

通过实施碳排放强度和碳排放总量双控，是扭转碳排放放量快速上升势头的重要手段

“十一五”和“十二五”以来，我国分别制订实施了能源强度控制目标和碳排放强度控制目标，尽管能源强度和碳强度控制目标完成情况良好，但能源消费和碳排放快速增长的趋势还未发生显著改变。这说明，单纯依靠能源强度目标和碳排放强度目标将难以对我国能源消费和碳排放形成足够强的约束。从时间上来看，十三五时期是我国实现哥本哈根减排承诺的关键时期，也是大力推进生态文明建设、促进绿色低碳发展的重要战略机遇期。本报告建议在当前的能源强度目标和碳排放强度目标控制基础上，加快实施碳排放强度和碳排放总量双控制度，以强化倒逼经济和能源的低碳转型。

以碳排放控制为抓手，形成对能源消费总量特别是煤炭消费总量的强约束

考虑到近期我国能源结构以煤为主的特征难以得到根本性改变，为推动我国碳排放在2030年左右尽早达到峰值，我国必须尽快达到煤炭消费峰值，才可以为其他低碳能源的发展留出空间。结合目前国家的相关规划



目标，建议 2020 年的全国一次能源消费总量控制在 48 亿吨标煤以内，其中煤炭消费量控制在 40 亿吨以下，煤炭在一次能源消费中比重下降至 57% 左右，非化石能源占比提高至 15% 以上；2030 年的全国一次能源消费总量控制在 55 亿吨标煤以内，煤炭在一次能源消费中比重下降至 45% 左右，非化石能源占比提高至 20% 以上。

从具体措施来看，一是实现煤炭由分散式到集中式利用的转变

首先，在控制煤炭消费总量的基础上提高发电用煤的比例。一方面将输煤、用煤转变为输电、用电，在大型煤炭基地和大型矿区，建设大型坑口电厂和低热值煤电厂，推进煤电一体化和煤电联营，同时完善特高压输电网络等煤炭生产基地到消费市场的输电线路等基础设施。2020 年使发电用煤占煤炭消费比重提高至 60%、此后该比例进一步提升并向经合组织超过 80% 的比例乃至美澳等国 90% 的比例接近。

二是以标准制订为主要抓手减少重点行业煤炭的使用和碳排放

以建立排放标准为抓手，参考美国对国内电厂碳排放的治理方法，分阶段、分步骤出台对重点行业和技术强制性碳排放标准，并制定具体的执行和管理办法。有关部门和机构组织研究和建立碳排放相关的标准体系，在煤炭清洁高效发电方面，设置新建燃煤发电厂的二氧化碳排放标准；在煤炭生产方面，制定煤炭洁配度指标体系，设置进入流通市场的煤炭洁配度准入标准，低于标准的煤炭禁止长途运输及在市场上流通，并严禁工业锅炉采用低于标准的煤炭。

三是积极开展煤炭低碳利用核心技术工程示范

中央财政和省级地方财政安排专项资金，支持部门和行业就重点、难点煤炭低碳发展技术开展工程示范，包括 700°C 超超临界、IGCC、工业余热发电技术、CCUS、煤基多联产、煤电 / 煤化工 +CCUS 等技术和项目的试验示范工作。

四是推动耗煤行业企业积极参与碳排放权交易

依托已有碳排放权交易试点，以及未来的全国碳排放权交易市场，将耗煤行业企业强制纳入碳排放权交易中。通过碳排放权交易管理办法、碳排放权交易市场的具体实施细则、配额分配方法等碳排放交易的相关规定，对煤炭利用进行约束。

建议 2020 年的全国煤炭消费量控制在 40 亿吨以下，煤炭在一次能源消费中比重下降至 57% 左右，非化石能源占比提高至 15% 以上

2

省域温室气体总量控制
与煤炭总量控制
相互作用分析



本项目在调研省级温室气体排放控制与煤炭总量控制实施现状和可行性分析的基础上，研究二者之间的相互影响和作用。

本项目首先调研省市将碳排放控制目标和煤炭消费总量控制目标纳入本地区“十二五”规划以及年度计划的情况，辨析存在的问题和挑战，并结合省市提出的本地区碳强度目标、节能目标、可再生能源发展目标等，以及已开展的单位 GDP 二氧化碳排放降低目标试评价考核和省级温室气体排放清单编制等工作所取得的相关结论，分析在碳排放约束背景下将地区煤炭消费总量控制目标纳入本地区“十三五”规划的必要性和可行性。在此基础上，本项目重点研究地区碳排放控制目标和煤炭消费总量控制目标之间相互影响机制，分析地区二氧化碳排放量与煤炭消费量之间的关系及分析实施地区碳排放控制目标对煤炭消费总量的影响和实施煤炭消费总量目标对地区碳排放量的影响。

基于碳排放控制目标对煤炭消费量产生的约束作用，本项目还通过“自下而上”的方法进行了地区碳排放控制目标分解，为各地区煤炭消费总量提供碳排放控制约束。结果显示，碳排放试点地区在 2020 年前后基本达到峰值后开始下降；东中部发达地区在 2020 年后碳排放不再增长，到 2025 年基本达到峰值。中西部中等发达地区在 2015 年到 2020 年间将经历碳排放快速增长期，在 2020 年后排放量增长有放缓趋势，到 2025 年达到平台期，在 2030 年后碳排放开始下降。西部欠发达地区由于发展相对落后，2025 年后开始受到相应的碳强度约束，那么，国家是有可能在 2030 年左右甚至更早实现碳排放达到峰值的。

碳排放控制目标和煤炭消费总量控制目标纳入地区规划的情况

北京市制定了到2017年全市燃煤总量比2012年削减1300万吨，控制在1000万吨以内的目标

(1) 碳排放控制目标纳入地区规划的情况

我国地区碳排放控制目标采取了“自上而下”和“自下而上”相结合的方式。“自上而下”，指的是全国二氧化碳下降指标分解到各省，要求各省到2015年完成各自的二氧化碳下降目标。除了各省碳强度减排目标，全国还有6省36市参与了国家发改委开展的低碳省区和低碳城市试点工作，“自下而上”指的是我国低碳试点地区在其实施方案提出的碳排放控制目标。低碳试点省区和城市要编制低碳发展规划，积极探索具有本地区特色的低碳发展模式，率先形成有利于低碳发展的政策体系和体制机制。大部分低碳试点省市在实施方案中明确提出了峰值目标或总量控制目标，以此加快推动产业结构调整 and 能源结构低碳转型，提出控制高耗能行业产能总量、化石能源消费总量、煤炭消费总量等目标。从对各省市碳排放情况的考核情况来看，试点省市均较好地完成了碳强度下降目标任务，碳强度下降显著高于全国平均碳强度降幅。

(2) 煤炭消费总量纳入地区规划的情况

确定绝对量削减目标

北京、天津、河北、山东提出了未来相比2012年煤炭消费总量绝对量削减的目标。北京市作为全国第一个提出煤炭消费总量削减的地区，在《北京市2013-2017年清洁空气行动计划》，制定了到2017年全市燃煤总量比2012年削减1300万吨，控制在1000万吨以内的目标。天津、河北、山东等地区最初制定了本地区煤炭消费总量增量控制目标，但随着国家要求的出台，也纷纷调整为绝对量削减目标。

确定相对量削减目标或峰值年份

重庆、湖南、福建、甘肃均提出了相对量削减目标。“长三角”周边的上海、江苏、浙江在其大气污染防治计划中提出到 2017 年煤炭消费总量要达到峰值，实现逆增长。陕西计划从 2015 年起，将全省煤炭消费总量控制在 1.275 亿吨以内，到 2020 年，力争实现零增长。新疆则提出乌鲁木齐城市群（乌鲁木齐、昌吉、阜康、五家渠共 1 个地级及以上城市和三个县级市）实现煤炭消费总量零增长。

控制煤炭消费总量增量

广东省在“十二五”主要污染物总量减排实施方案中提出要在“珠三角”地区试点建立煤炭消费总量控制制度，新上燃煤项目试点实施煤炭总量平衡和等量替代、减量替代制度，要求“十二五”期间全省新增电煤控制在 4000 万吨标准煤以内。山西同样提出了到“十二五”期间，全省新增煤炭消费量控制在 8200 万吨以内的目标。

(3) 煤炭消费总量控制目标纳入地区“十三五”规划的必要性和可行性

结合各区域现有煤炭总量控制目标及治理大气污染的需要，各地区应量力而行地制定“十三五”期间区域煤炭总量控制目标。对于京津冀、长三角、珠三角等污染较为严重的地区，空气质量是其煤炭消费总量的硬约束，有必要设定煤炭绝对量削减目标。对于辽宁中部、山东、武汉及其周边、长株潭、成渝、海峡西岸、山西中北部、陕西关中、甘宁、乌鲁木齐等试点城市群，可根据自身经济发展和环境保护的实际情况设定煤炭相对量削减或增量控制目标并提出峰值年份。对于云南、广西、贵州、宁夏等欠发达地区以及东北地区，大气污染还不是最重要的约束条件，二氧化碳减排目标可能将成为其调整能源结构的重要约束指标，因此在以上地区可设定煤炭增量控制目标，确保煤炭消费量不超过生态红线。各地区“十三五”期间煤炭消费总量纳入地区规划的目标划分归纳见表 3。

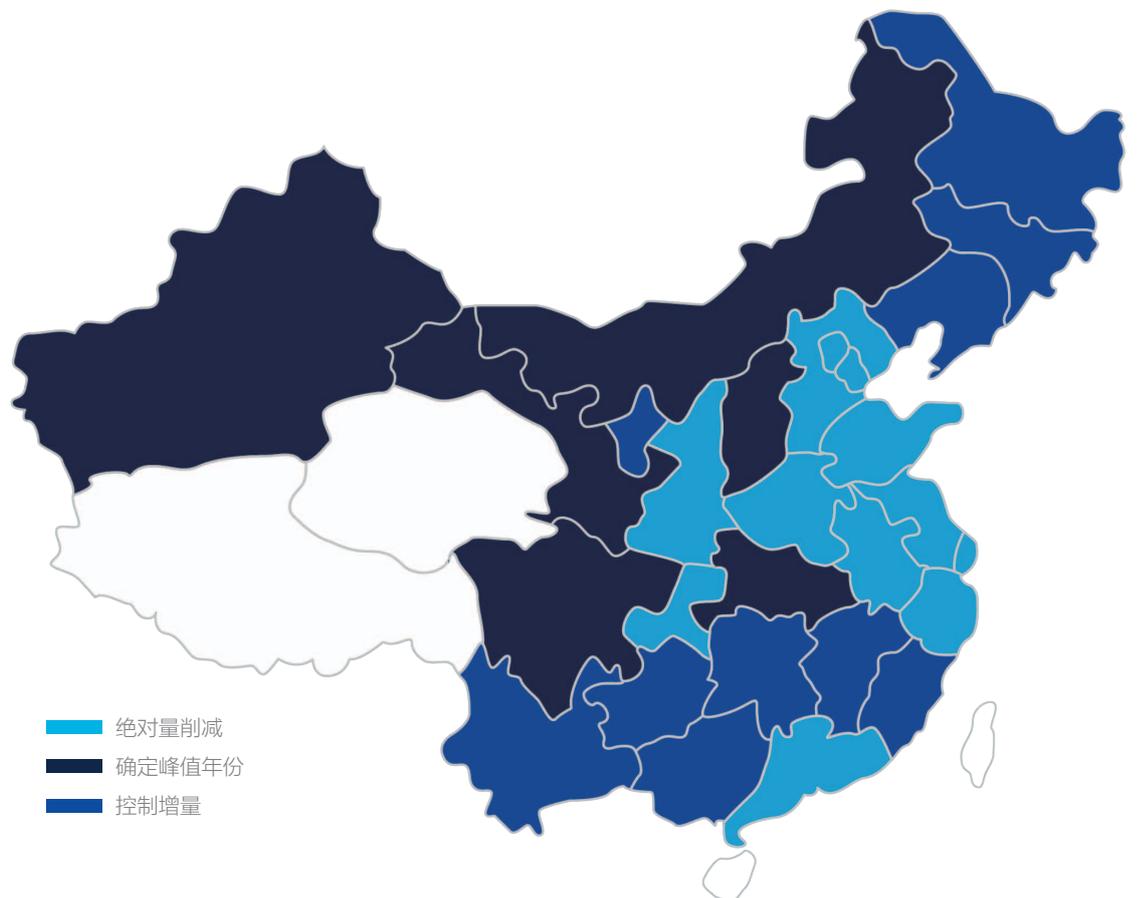
根据表 3 的目标划分，“十三五”期间各地区煤炭消费总量目标分类见图 5。

结合各区域现有煤炭总量控制目标及治理大气污染的需要,各地区应量力而行地制定“十三五”期间区域煤炭总量控制目标

表 3 “十三五”期间煤炭消费总量纳入地区规划的可能方案

地区	“十三五”规划煤炭总量控制目标类型
京津冀、长三角、珠三角等煤炭总量控制试点地区	设定煤炭绝对量削减目标 确定 2020 年相对 2015 年煤炭削减量
辽宁中部、山东、武汉及其周边、长株潭、成渝、 海峡西岸、山西中北部、陕西关中、甘宁、乌鲁木 齐城市群	煤炭相对量削减或增量控制目标 提出峰值年份，争取在“十三五”期间实现煤炭峰值
云南、广西、贵州、宁夏等欠发达地区；东北各省	煤炭增量控制目标 确保煤炭消费量不超过生态红线

图 5 “十三五”期间煤炭消费总量纳入地区规划的可能性



地区碳排放控制目标对煤炭消费总量控制目标影响机制

本研究选定我国某一省份作为案例研究。该省份“十二五”能源、碳排放相关目标如下：（1）总量控制目标：按照“保发展、促节能、控总量、留余地”的原则，2015年案例省能源消费总量控制在9000万吨标准煤左右。（2）结构调整目标：到2015年，清洁能源消费比重达到80%以上，其中天然气比重超过20%；煤炭消费总量控制在2000万吨以内；新能源和可再生能源占能源消费的比重力争达到6%左右。（3）节能减排目标：到2015年，案例省万元GDP能耗比2010年下降17%，万元GDP二氧化碳排放强度比2010年下降18%。（4）二氧化碳排放目标：到2015年，案例省单位GDP二氧化碳排放比2010年下降18%。在以上目标约束下，案例省2015年能源结构目标如表4。

表4 案例省2015年能源消费结构表

年份	2010年			2015年		
	能源品种	实物量	标准量 (万吨标煤)	比重(%)	实物量	标准量 (万吨标煤)
煤炭(万吨)	2750	2100	30.3	2000	1500	16.8
调入电(亿千瓦时)	533	1600	23.1	710	2200	24.4
天然气(亿立方米)	75	910	13.1	180	2200	24.4
油品(万吨)	1480	2110	30.3	1680	2550	28.3
新能源和可再生能源	-	220	3.2	-	550	6.1
合计	-	6940	100	-	9000	100



(1) 实施地区碳排放控制目标对煤炭消费总量的影响机制

本研究根据案例省的能源消费特点建立碳约束优化模型。优化模型的目标是使案例省能源消费成本最低,约束条件包括社会基本能源消费保障、油气供应约束,碳排放约束和节能量约束。优化模型方程如下:

$$\begin{aligned}
& \min (C \times P_c + O \times P_o + G \times P_g) \\
& \text{s. t. } \left\{ \begin{array}{l}
C_{el} \times e_{el_c} + G_{el} \times e_{el_g} + E_{in} \geq E_l \\
C_{ht} \times H_{t_c} + G_{ht} \times H_{t_g} \geq H_t \\
C_{end} + O_{end} + G_{end} \geq E_{end} \\
O_{pro} \times eff_{gl} \geq G_l \\
O_{pro} \times eff_{ds} \geq D_s \\
O_{pro} \times eff_{kn} \geq K_n \\
G \leq G_{spl} \\
O \leq O_{spl} \\
C \times e_c + O \times e_o + G \times e_g \leq E_{CO2} \\
\frac{C + O + G}{GDP} \leq \frac{C_{base} + O_{base} + G_{base}}{GDP_{base}} \times (1 - r) \\
C = C_{el} + C_{ht} + C_{end} \\
O = O_{pro} + O_{end} \\
G = G_{el} + G_{ht} + G_{end}
\end{array} \right.
\end{aligned}$$

具体约束条件的对应解释如下:

$$\text{s. t. } \left\{ \begin{array}{l}
\text{电力供应约束} \\
\text{热力供应约束} \\
\text{终端用能约束} \\
\text{汽油产量约束} \\
\text{柴油产量约束} \\
\text{煤油产量约束} \\
\text{天然气供应约束} \\
\text{油品供应约束} \\
\text{碳排放约束} \\
\text{节能量约束/地区能源消费总量约束}
\end{array} \right.$$



将上述约束条件代入优化模型，输入不同的碳约束条件下，得出符合上述约束条件并保证全社会用能成本最低的煤炭、油品、天然气消费量。由于煤炭价格相比油品、天然气更低廉，因此模型计算结果可看作在满足碳约束条件下所能消费的煤炭最大值，余下的用能由油品和天然气消费来保障。

在碳排放约束目标情景下，天然气将作为重要的过渡能源，在未来能源结构中的比重逐渐增加

表 5 不同碳约束条件下案例省 2015 年能源消费结构

碳约束条件	煤炭（万吨）	油品（万吨）	天然气（亿 m ³ ）
<14000 万吨	2505.4	1748.3	153.85
<13000 万吨	2325.0	1748.3	161.28
<12500 万吨	1830.9	1748.3	181.63
<12000 万吨	1336.9	1748.3	201.98
<11500 万吨	842.89	1748.3	222.33

从模型的计算结果来看，碳排放约束目标与能源消费总量直接挂钩。在全社会能源消费总量确定的情况下，收紧碳排放约束目标将迫使地区调整能源结构，从用煤改为用气。从行业上来看，碳排放约束目标对电力和热力行业用煤产生影响较大，在较紧的碳排放约束情景下，电力行业将从煤电向气电转变，供热行业也将从供煤改为供气。因此，在碳排放约束目标情景下，天然气将作为重要的过渡能源，在未来能源结构中的比重逐渐增加。

(2) 实施地区煤炭消费总量控制目标对碳排放量的影响机制

为量化案例省煤炭消费总量约束对碳排放的影响机制，本研究根据案例省的能源消费特点建立煤炭消费总量约束优化模型。优化模型的目标是



使案例省能源消费成本最低，约束条件包括社会基本能源消费保障、油气供应约束，煤炭消费总量约束和节能量约束。优化模型方程如下：

$$\begin{aligned}
 & \min (C \times P_c + O \times P_o + G \times P_g) \\
 \text{s. t. } & \left\{ \begin{aligned}
 & C_{el} \times el_c + G_{el} \times el_g + El_{in} \geq El \\
 & C_{ht} \times ht_c + G_{ht} \times ht_g \geq Ht \\
 & C_{end} + O_{end} + G_{end} \geq E_{end} \\
 & O_{pro} \times eff_{gl} \geq Gl \\
 & O_{pro} \times eff_{ds} \geq Ds \\
 & O_{pro} \times eff_{kn} \geq Kn \\
 & G \leq G_{spl} \\
 & O \leq O_{spl} \\
 & C_{el} + C_{ht} + C_{end} \leq C_{constraint} \\
 & \frac{C + O + G}{GDP} \leq \frac{C_{base} + O_{base} + G_{base}}{GDP_{base}} \times (1 - r) \\
 & C = C_{el} + C_{ht} + C_{end} \\
 & O = O_{pro} + O_{end} \\
 & G = G_{el} + G_{ht} + G_{end}
 \end{aligned} \right.
 \end{aligned}$$

具体约束条件的对应解释如下：

$$\text{s. t. } \left\{ \begin{aligned}
 & \text{电力供应约束} \\
 & \text{热力供应约束} \\
 & \text{终端用能约束} \\
 & \text{汽油产量约束} \\
 & \text{柴油产量约束} \\
 & \text{煤油产量约束} \\
 & \text{天然气供应约束} \\
 & \text{油品供应约束} \\
 & \text{碳排放约束} \\
 & \text{节能量约束/地区能源消费总量约束}
 \end{aligned} \right.$$



将案例省 2015 年约束条件代入优化模型, 输入不同的煤炭约束条件下, 得出符合上述约束条件并保证全社会用能成本最低的煤炭、油品、天然气消费量。

表 6 不同煤炭约束条件下案例省 2015 年能源消费结构

煤炭约束条件	碳排放 (万吨)	油品 (万吨)	天然气 (亿 m ³)
<2200 万吨	12751	1748.3	160.7
<2000 万吨	12126	1748.3	168.9
<1500 万吨	11676	1748.3	172.2
<1200 万吨	11372	1748.3	184.5
<850 万吨	10877	1748.3	192.3

从模型计算结果可以看出, 煤炭约束目标对于碳排放下降有直接贡献。当降低全社会用煤量时, 为保障社会用能需求, 天然气消费量将上升, 由于天然气单位热值含碳量较低, 全社会碳排放量将显著下降。从省区实践来看, 设定煤炭消费总量控制目标或峰值目标的地区, 碳排放也会很快达峰。

比较两个约束模型, 碳排放约束目标对能源消费总量影响较大, 在我国用煤比例较高的阶段, 设置碳排放约束目标将显著增加天然气消费比重, 随着经济发展, 碳排放约束目标趋严, 天然气消费也将受到一定约束, 全社会用能将主要依靠可再生能源。因此, 设置碳排放约束目标将对调整能源结构、促进全社会单位用能低碳化起到显著影响。相比之下, 设定煤炭消费量目标较为直接, 对碳排放量降低也有直接影响, 但如果没有相应的能源消费总量约束, 天然气消费量将不受约束, 在天然气价格较低的情况下, 对可再生能源的发展起到一定抑制作用。

设置碳排放约束目标将对调整能源结构、促进全社会单位用能低碳化起到显著影响

省级煤炭消费总量控制目标应该考虑的碳约束因素

各地区重点排放企业排放量基本占到工业排放的 80-90%

(1) 确定地区碳约束目标的原则

主要约束对象为重点排放工业企业

分析我国碳排放现状可以看出，我国碳排放主要集中在工业领域（目前工业排放普遍占到各省排放量的 80% 以上），因此我国近期主要减排约束对象应为工业企业，尤其是重点用能企业。根据 2012 年数据的测算结果，各地区重点排放企业排放量基本占到工业排放的 80-90%，因此对“大排放单位”进行约束将有效降低各地区碳排放。

经济发达的地区承担更多的减排责任

根据人均 GDP 和碳市场政策可能实施情况，将我国分为四类地区：碳排放试点地区，东中部发达地区（人均 GDP 大于 8 万元），中西部中等发达地区（人均 GDP 为 4-8 万元），西部欠发达地区（人均 GDP 小于 4 万元）（见表 7）。以目前全国碳排放权交易试点经验来看，越是经济发达的地区纳入碳排放交易的企业门槛（年二氧化碳排放量）越低。由于四类地区经济发展水平存在显著差异，根据公平原则和地区差异性原则，对经济发展较快的地区设置更为严格的减排标准。

表 7 基于人均 GDP 的省区类型划分

类型	省份
碳排放试点地区	北京、天津、上海、湖北、广东、重庆
东中部发达地区	江苏、浙江、福建、内蒙、辽宁、山东
中西部中等地区	河北、山西、吉林、黑龙江、安徽、江西、河南、湖南、广西、海南、四川、山西
西部欠发达地区	贵州、云南、甘肃、青海、宁夏、新疆

注：由于缺乏统计数据原因，未包括西藏及港澳台等地区。



三产及生活排放根据人年均历史排放量进行分配

在三产及生活排放方面，由于东部地区历史排放较高，且能源供应严重依赖西部地区，可考虑由东部地区为西部地区未来的碳减排“买单”，在全国范围内，建立起“东部出资、西部减排”的减排模式。在分配三产及生活排放配额时应根据各地区的历史排放量和人均收入水平，给西部地区留出更多的排放空间，通过东部地区购买西部地区的碳排放配额，实现东部地区对西部地区的“碳补偿”。

根据国家总体部署尽快实现碳排放峰值

初步分析表明如果碳排放试点地区在 2020 年前达到峰值，东中部发达地区在 2025 年前达到峰值，中西部中等发达地区和西部欠发达地区也从 2025 年后开始受到相应的碳强度约束，那么，国家是有可能在 2030 年左右甚至更早实现碳排放达到峰值的。

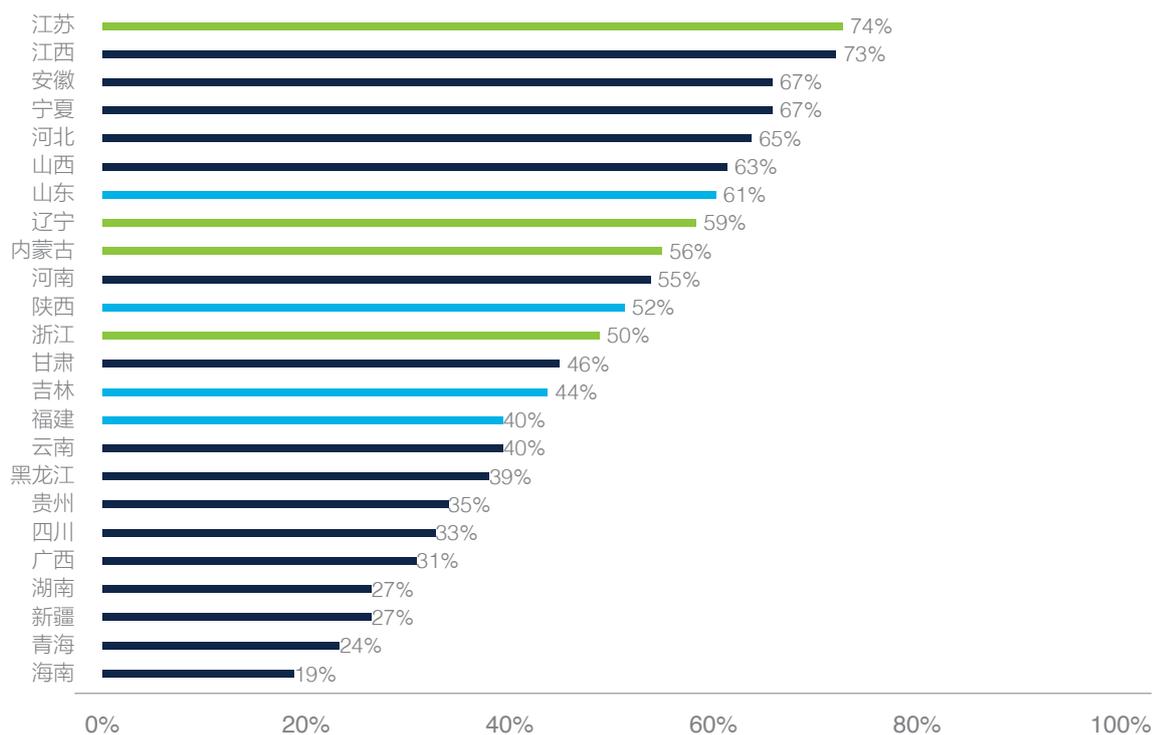
(2) 地区二氧化碳排放约束目标

各地区“大排放单位”约束目标计算。本研究根据“万家企业节能低碳行动”节能量目标对各地区 2012 年“大排放单位”能耗值进行了测算。结果如图 6 所示，各地区重点排放企业占各省总能耗比例大部分在在 30%-60% 左右。

在此基础上，根据对各地区设置的重点企业排放量约束门槛，对各地区门槛以上企业进行绝对量约束。参考碳交易试点地区门槛设置情况，人均 GDP 达 8 万的省份将年排放达 2.5 万 tCO₂（能源消费量在 1 万吨标煤左右）以上的企业承担绝对量化减排目标，人均 GDP 为 4-8 万的省份将年排放达 12 万 tCO₂（能源消费量在 5 万吨标煤左右）的企业承担绝对量化减排目标，人均 GDP 在 4 万以下的省份将年排放达 22.5 万 tCO₂（能源消费量在 10 万吨标煤左右）的企业承担绝对量化减排目标。承担绝对量化减排目标的企业要在每五年实现 10% 的减排量。同时设置“毕业机制”，即人均 GDP 达到相应标准的省份也要相应调整门槛，增加承担绝对量化减排目标的企业。在门槛以下的重点排放企业（如中部中等发达地区 2015 年前年排放量低于 22.5 万吨二氧化碳的企业）虽然不用承担绝对量化减排目标，但也要对其实行一定约束。

可考虑由东部地区为西部地区未来的碳减排“买单”，在全国范围内，建立起“东部出资、西部减排”的减排模式

图 6 各地区重点排放工业企业能耗占省总能耗比例

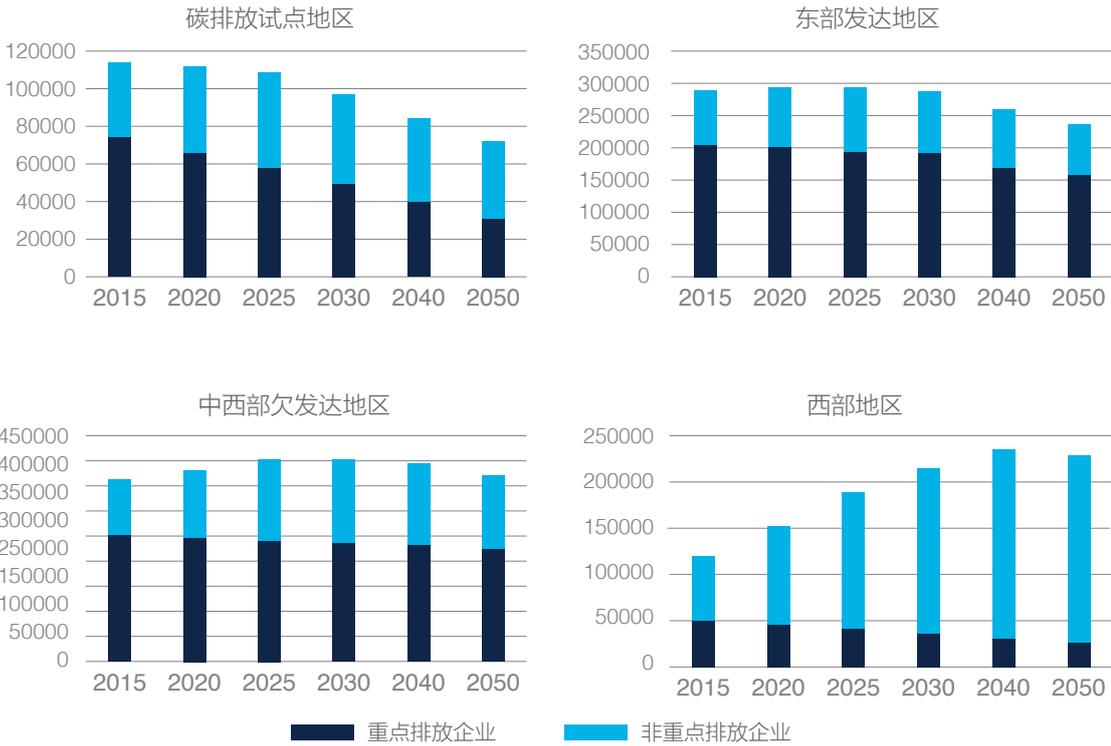


各地区非重点排放企业约束目标计算。

除重点企业外，非重点企业排放量可以在未来继续增长，尤其是应为中西部地区留出工业发展空间，因此各地区非重点行业将随 GDP 还有一定增长。但考虑到我国节能减碳的现实需要，对非重点企业也应有一定的增量约束，其碳排放强度下降应不超过全国各地区未来碳排放强度下降水平，确保工业企业率先减排，推动各地区转变经济发展方式。各地区重点和非重点排放企业约束目标如图 7 所示。



图 7 各地区工业排放约束目标



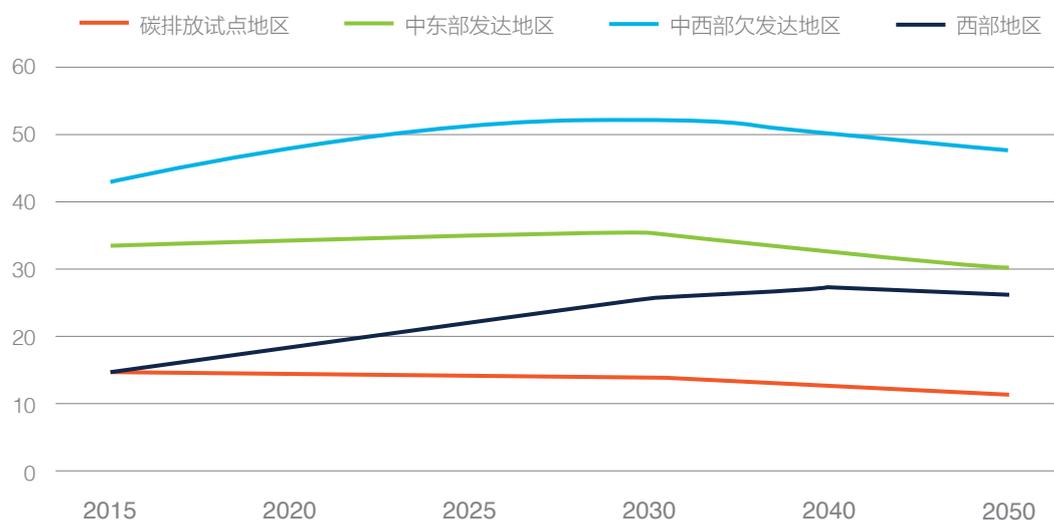
各地区三产和生活排放约束目标计算

对于工业排放以外的三产和生活排放，主要来自建筑和交通。在同一时间尺度上，东部地区由于经济发展较快，三产比例普遍较高；相比之下，西部地区三产和生活排放占比相对较低。如果从历史排放的角度看，东部地区人均建筑、交通的历史排放量相对西部地区较高，西部地区人均历史排放较低。因此，根据各地区历史排放量和经济发展水平，对三产和生活排放实现从东部地区向西部的“配额转移”，在计算各地区碳排放约束值时，根据三产和生活排放历史人年均排放量，得出东部地区高于全国的比例以及西部地区低于全国的比例，得到相应的折算系数。在计算各地区约束值时，各地区应在基准情景的基础上乘以相应的折算系数，相当于东部地区为西部地区未来的三产和生活排放留出更多空间。

各地区总排放约束目标

根据上述原则，本研究对各地区碳排放进行了约束尝试，计算得出各地区碳排放约束值如图 8 所示。

图 8 各地区碳排放约束值（单位：亿吨）



其中，碳排放试点地区在 2020 年前后基本达到峰值后开始下降；东中部发达地区在 2020 年后碳排放不再增长，到 2025 年基本达到峰值。中西部中等发达地区在 2015 年到 2020 年间将经历碳排放快速增长期，在 2020 年后排放量增长有放缓趋势，到 2025 年达到平台期，在 2030 年后碳排放开始下降。西部欠发达地区由于发展相对落后，在 2030 年前碳排放一直上升，到 2030 年后增速放缓，到 2040 年后开始下降。各地区分阶段碳排放下降目标见表 8。

表 8 各地区分阶段二氧化碳排放约束目标

	2015 年	2020 年	2025 年	2030 年
碳排放试点地区	碳强度下降 35-40%	总量控制目标	绝对量下降目标	绝对量下降目标
东中部发达地区	碳强度下降 30-35%	碳强度下降 45-55%	总量控制目标	绝对量下降目标
中西部中等发达地区	碳强度下降 25-35%	碳强度下降 40-50%	碳强度下降 50-60%	总量控制目标
西部欠发达地区	碳强度下降 20-30%	碳强度下降 35-45%	碳强度下降 45-55%	碳强度下降 55-65%
全国	碳强度下降 33.9%	碳强度下降 46.6%	总量控制目标	绝对量下降目标

注：碳强度下降目标为相比 2005 年碳排放强度下降百分比。

(3) 地区碳约束可能产生的影响

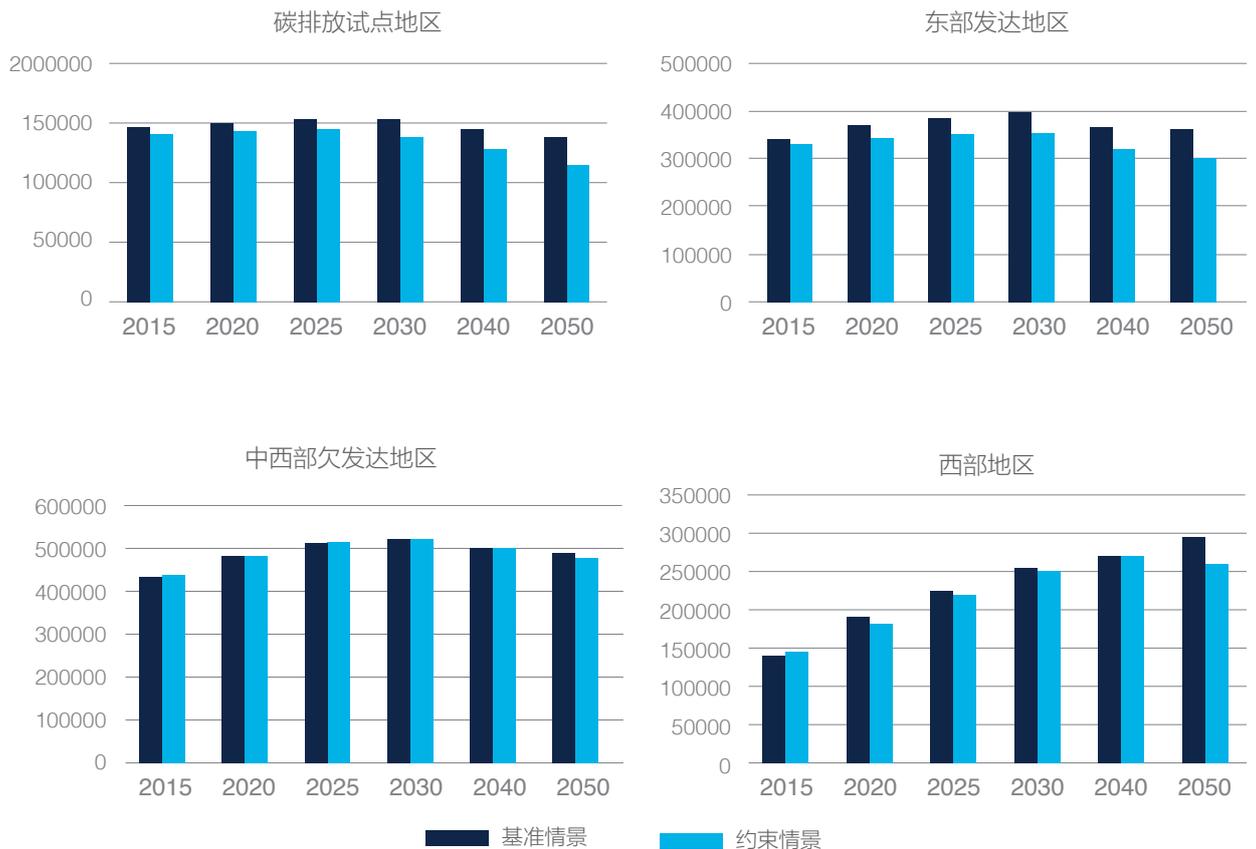
各地区碳排放基准情景与约束目标的比较见图 9。

图中蓝色为各地区基准情景排放，红色为约束情景排放。可以看出，对于碳排放试点地区和东部发达地区，碳排放约束一直存在，由于其减排成本较西部地区较高，需要从西部地区购买额外的减排配额；对于中西部中等发达地区，考虑其三产和生活的人均历史排放量较低，且减排成本较低，未来将有富裕的碳排放配额，供东部地区使用。

对于碳排放试点地区，未来工业企业的排放量增长将逐步趋缓，其原因是碳排放试点地区从 2015 年开始实现的能源结构转型及碳排放和能源消费总量双轨约束将极大降低该地区碳排放。从其排放结构来看，2012 年重点行业排放量基本不超过地区总排放量的 60%，且随着时间的推移、人口密度增大，未来二氧化碳排放主要来源为三产和生活排放。进一步收紧碳约束目标将对地区能源结构和利用效率造成较大影响，主要体现在：煤炭消费占比进一步下降，天然气和清洁能源比例进一步上升，建筑和交通用能效率需要进一步提高，人均用能效率将向欧洲和日本等低能耗国家看齐。如全国碳市场启动，可能需要从西部地区购买碳排放配额。

东部发达省份碳排放总量显著高于碳排放试点地区，且多为制造业大省，三产和生活排放占比相对较低。由于能源和产业结构调整，东部地区二氧化碳排放将在 2025 年前后达到峰值，因此受到碳排放约束的比例小

图 9 各地区基准排放情景与碳约束目标比较 (单位: 万吨 CO₂)



于碳排放试点地区。如进一步收紧碳约束目标，东部地区需要显著提高工业能效，进一步优化能源结构，大力发展清洁能源。随着城镇化率加快，东部发达地区人口将显著增加，但集中程度将低于北、上、广等超大型城市，因此在 2015 年后主要碳排放增长将来自建筑、交通等非生产类排放，要在未来 5-10 年内合理规划城镇布局，努力实现绿色城镇化，避免走美国高生活排放的老路。

中西部中等发达地区是我国未来 10-20 年碳排放总量和增量最大的地区。目前中西部地区工业排放占比普遍在 85% 左右，且以高耗能、高排放行业为主，能源结构严重依赖煤炭，第三产业、生活排放占比较小，节能减碳潜力较大。相比基准情景，工业排放需要在基准排放情景基础上减排



15%左右，但由于三产和生活人均历史排放较低，从人年均排放的角度从东部地区获取了多余的碳配额，即便如此，需在 2030 年左右达到碳排放峰值仍面临较大的减排压力。

西部欠发达地区未来碳排放增速最快，无论是生产消费还是生活消费都远高于碳排放约束值。我国西部地区目前经济发展水平相对落后，工业排放占比普遍在 80% 左右，且在未来仍有上升趋势，生活排放较低，节能降碳潜力最大。相比中西部地区，西部地区用于重点排放企业占比较高，重点排放企业受约束用能比例最大。因此有必要对西部地区的煤炭消费总量进行合理限制，鼓励采用天然气和可再生能源等更清洁的能源消费方式。

中西部中等发达地区是我国未来 10-20 年碳排放总量和增量最大的地区

结论和建议

根据自身经济发展和环境保护的实际情况设定煤炭相对量削减或增量控制目标并提出峰值年份

对于京津冀、长三角、珠三角等污染较为严重的地区，空气质量是其煤炭消费总量的硬约束，有必要设定煤炭绝对量削减目标；对于辽宁中部、山东、武汉及其周边、长株潭、成渝、海峡西岸、山西中北部、陕西关中、甘宁、乌鲁木齐等试点城市群，可根据自身经济发展和环境保护的实际情况设定煤炭相对量削减或增量控制目标并提出峰值年份；对于云南、广西、贵州、宁夏等欠发达地区以及东北地区，大气污染还不是最重要的约束条件，二氧化碳减排目标可能将成为其调整能源结构的重要约束指标，因此在以上地区可设定煤炭增量控制目标，确保煤炭消费量不超过生态红线，并通过能源结构调整实现“十三五”期末二氧化碳强度减排目标的实现。

在制定各地区煤炭约束目标或碳排放约束目标时应充分考虑该地区要解决的实际问题，明确政策目标

本研究选定我国某一省份作为案例研究，根据案例省的能源消费特点建立量化模型。通过模型结果可以看出，随着碳排放约束条件趋紧，煤炭



消费量逐渐下降，而天然气消费量逐渐上升。如果设定煤炭总量约束目标，随着煤炭消费总量约束条件趋紧，碳排放量逐渐下降，而天然气消费量逐渐上升。进一步应用该模型研究不同地区时发现，各地区由于能源消费特点和政策目标差异，模型的约束条件和运行结果也会有较大不同。因此，在设定地区煤炭消费总量目标时，应充分考虑地区能源消费特点，明确政策目标，并进行充分的费用效益分析，对设置约束目标的成本进行量化分析。

在设定地区碳排放约束目标时应充分考虑各地区经济发展情况，在“自上而下”制定碳排放约束目标的同时应“自下而上”对各地区经济、人口、产业结构、排放总量和减排成本进行预测，科学合理分配地区碳排放约束目标

从基准情景来看，未来各地区经济、人口、产业结构等基本指标均存在很大的地域差异，各地区排放总量、人均排放量、人年均历史排放量也都不尽相同。本研究尝试将全国分为四类地区，根据人均 GDP，为经济发展不同水平的地区设定不同的限排企业门槛和控排系数，对重点排放企业进行约束。考虑到东部地区三产和生活历史排放量较大，在对各地区三产和生活碳排放进行约束时考虑到人均历史排放，给西部地区留出更多的排放空间。为确保国家在 2030 年左右实现碳排放达到峰值的目标，如前分析说明，要求碳排放试点地区在 2020 年前达到峰值，东中部发达地区在 2025 年前达到峰值，中西部中等发达地区和西部欠发达地区碳排放约束相对较松，在 2030-2040 年左右达到峰值，并在 2030 年后开始受到相应的碳强度约束。



参考文献

1. IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
2. IPCC, 2014: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
3. IPCC, 2014: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
4. IEA, Technology Roadmap Carbon Capture and Storage, 2013 edition
5. P. Friedlingsten, et al, Persistent growth of CO2 emissions and implications for reaching climate targets, Nature Geosci., vol7, p710, 2014
6. IEA, world energy outlook 2014
7. 中国能源中长期（2030、2050）发展战略研究 综合卷，科学出版社，2011
8. 国家发展改革委能源所，合理控制能源消费总量研究，2013
9. 中国政府，《国民经济和社会发展第十二个五年规划纲要》[Z]，中央政府门户网站，2011/3/16
10. 中国政府，《中华人民共和国气候变化第二次国家信息通报》[Z]，中国气候变化信息网，2013/2/18
11. 国务院，《关于推进大气污染联防联控工作改善区域空气质量指导意见的通知》[Z]，国办发[2010]33号，2010/5/11
12. 环境保护部，《重点区域大气污染防治“十二五”规划》[Z]，环发[2012]130号，2012/10/29
13. 中央政府门户网站，《能源发展“十二五”规划》[Z]，国发[2013]2号，2013/1/1
14. 环境保护部，《京津冀及周边地区落实大气污染防治行动计划实施细则》[Z]，环发[2013]104号，2013/9/17
15. 北京市政务门户网站，《北京市2013-2017年清洁空气行动计划》[Z]，2013/8/23
16. 天津市人民政府，《天津市2012-2020年大气污染治理措施的通知》[Z]，津政办发[2012]87号，2012/7/26
17. 河北省人民政府，《河北省大气污染防治行动计划实施方案》[Z]，2013/9/6
18. 山东省人民政府，《山东省2013-2020年大气污染防治规划》[Z]，鲁政发[2013]12号，山东省人民政府公报2013年第17期，2013/7/17
19. 重庆市巴南区环境保护局，《重庆市蓝天行动实施方案》[Z]，2013/12/2
20. 湖南省人民政府办公厅，《湖南省落实大气污染防治行动计划实施细则》[Z]，2013/12/23
21. 福建省人民政府，《福建省大气污染防治行动计划实施细则》[Z]，闽政[2014]1号，2014/1/5
22. 甘肃省人民政府办公厅，《甘肃省人民政府关于贯彻落实国务院大气污染防治行动计划的实施意见》[Z]，甘政发[2013]93号，2013/10/9
23. 上海市政府，《上海市清洁空气行动计划（2013-2017）》[Z]，沪府发[2013]83号，2013/11/7
24. 江苏省人民政府，《江苏省大气污染防治行动计划实施方案》[Z]，苏政发[2014]1号，2014/1/6



25. 浙江省人民政府,《浙江省大气污染防治行动计划(2013—2017年)》[Z],浙政发[2013]59号,2013/12/31
26. 咸阳环保局,《陕西省人民政府关于全面改善城市空气质量的工作方案》[Z],2012/6/7
27. 新疆环保厅,《新疆维吾尔自治区“十二五”节能减排全民行动方案》[Z],2012/5/22
28. 广东省人民政府,《广东省“十二五”主要污染物总量减排实施方案》[Z],粤府函[2012]238号,2012/8/17
29. 山西省人民政府,《山西省落实大气污染防治行动计划实施方案》[Z],2013/10/16
30. 付雪等,哥本哈根会议目标下中国行业实际减排潜力研究[M],《环境经济研究》,2012年第4期
31. 国务院办公厅,《能源发展战略行动计划(2014~2020年)》[Z],国办发[2014]31号,2014/6/7

