



WWF

报告

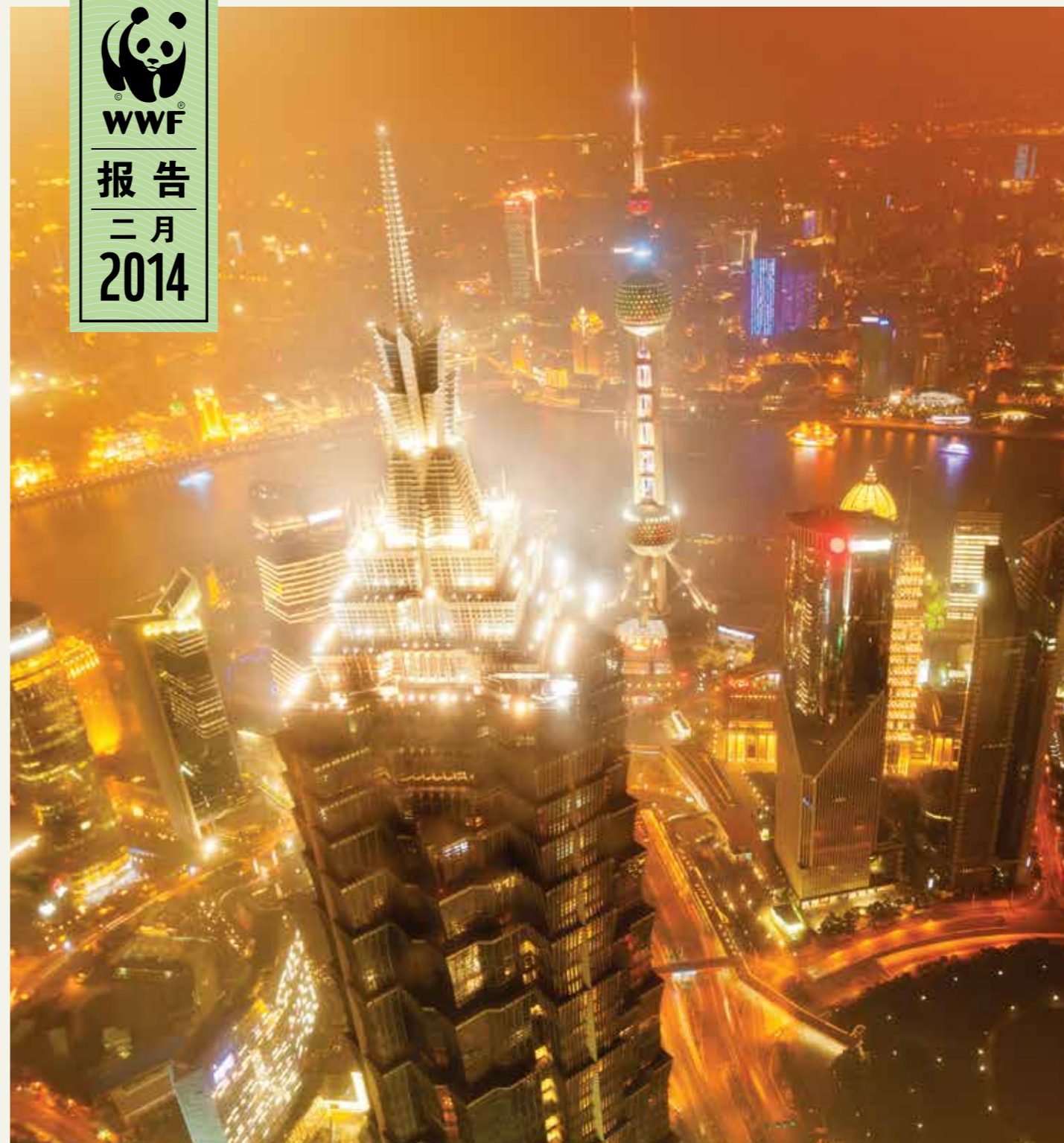
二月

2014

WWF · 中国的未来发电：2050年中国可再生能源发电的最大潜力评估

中国

WWW.PANDA.ORG/CLIMATE



# 中国的未来发电

## 2050年中国可再生能源发电的最大潜力评估

William CHANDLER 陈世平 Holly GWIN 林若思达 王彦佳

100%  
再造纸



80%

2050年，中国可再生能源发电占比的最大潜力可以高达80%以上。

### 去煤

中国可以在2020年后不再新建煤电，并且到2040年时勇于实现电力体系“去煤”。



90%

高比例可再生能源情景中电力部门的碳排在2050年能够减少90%。

### 总成本低

2011至2050年，以可再生能源电力为主的电力体系，其总成本低于以煤电为主的情景。



我们致力于

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。

[www.panda.org/climate](http://www.panda.org/climate)





#### 关于 WWF

世界自然基金会（WWF）是全球领先的环境保护组织。WWF在100多个国家开展工作，并在全球拥有将近500万名资助者。WWF以其独特的工作方式，将科学紧密联系到其涉足的全球领域、参与从地方到全球的各个层面的环保行动、并且确保提供创新性的解决方案，从而满足人与自然的需要。

#### WWF的贡献人员

- Brad Schallert
- 邓梁春
- Stephan Singer
- Rhys Gerholdt
- Rafael Senga
- 卢思骋
- 卢伦燕
- 高 辉
- Lindsay Bass
- 朱 力
- 胡 涛
- Jian hua Meng
- 李利锋
- Bryn Baker
- Donna Choi
- Keya Chatterjee
- Nick Sundt
- Lynn Englum

## Entri

#### 关于 ENTRI

Entri是2010年创立于美国的一家非盈利（501(c)(3)）公司，其创建有赖于其缔造者数十年来在研究、体制建设和技术应用领域的经验。该机构也是一些来自关键国家的能源和气候专家共同参与开展国际合作的产物。

#### 关于报告的作者们

William Chandler是Entri（Energy Transition Research Institute）的研究总监，他还共同创建了能源转型（Transition Energy）这一在中国开展能效投资的公司。此前，他是美国西北太平洋国家实验室（Pacific Northwest National Laboratory）的资深科学家，并且牵头开展了田纳西河流域管理局（Tennessee Valley Authority）的未来电力发展研究，以及在中国、印度、韩国、南非和土耳其的类似研究。

陈世平是Entri的工作人员，也是能源转型公司的驻北京代表。之前，他在全球环境研究所（Global Environmental Institute）开展过碳排放市场相关的研究。他分别在中国科技大学和美国加州大学河滨分校获得学位。

Holly Gwin是Entri的首席运营官，并且也是能源转型公司的共同创办者。她曾在美国白宫科技政策办公室担任总顾问和主任，并且还担任过美国国会技术评估办公室的总顾问。

林若思达是Entri的访问研究工程师。她毕业于清华大学，并预计于2013年12月在密歇根大学获得工业工程硕士学位。她还于近期在加州劳伦斯伯克利国家实验室完成了一项实习研究计划。

王彦佳是清华大学的一名能源系统工程教授，研究兴趣涉及能源和环境，担任了全球环境研究所、原中国国家电力监管委员会（国家电监会，State Electricity Regulatory Commission）、中国国家发展和改革委员会（国家发改委，National Development and Reform Commission）、国际能源署（International Energy Agency）、世界银行（World Bank）以及其他众多机构的顾问。

#### 作者致谢

本研究得到世界自然基金会（World Wildlife Fund）的资金支持。作者们对Keya Chatterjee和Brad Schallert提供的支持表示感谢。

本研究运用了Entri在过去三年内开发的China 8760电网模型（China 8760 Grid Model），该模型研究得到布莱蒙基金会（the blue moon fund: [www.bluemoonfund.org](http://www.bluemoonfund.org)）的捐赠，并且国家电监会在2011至2012年也提供了进一步的支持。Entri对Diane Miller和张冀强表示感谢，他们的支持使得这一切工作成为可能。

作者们同时感谢Entri董事会成员Jeffrey Logan和Barbara Finamore给出的意见和建议，并且还感谢外部专家周大地、郁聪、姜克隽、高虎、Joanna Lewis，金嘉满和Gerry Stokes。

本报告作为系列出版物之一，给出了中国电力部门各项政策措施在成本效益方面的信息。其他的报告和数据参见：[www.etransition.org/chinasmartgrid](http://www.etransition.org/chinasmartgrid)。

Annapolis, 马里兰州

2013年12月6日



# 中国的未来发电

WWF作序并致报告前言  
Entri开展分析并撰写报告





所有人都必须勇于采取行动，做出必要改变，拯救我们的未来。 卢思骋

## 序



中国拥有全球五分之一的人口，是新兴经济体中最大且增长最快的国家，中国对全球的生态影响也呈现这一趋势。中国能否转型，走上公平且环境可持续发展道路，不仅决定了中国的未来，而且决定着整个人类星球的未来。

由此，中国政府重申，将会致力于建设“生态文明”<sup>1</sup>，使得经济发展道路与环境约束相协调，这也就显得至关重要了。

然而，转型的机会已经不多了。因循守旧，故步自封，无动于衷，皆是死胡同。每座新建的煤电厂，锁定最少三十年的碳排放和空气污染，每棵砍掉的大树，削弱森林生态系统的活力，威胁老虎、大熊猫等物种的生存。所有人都必须勇于采取行动，做出必要改变，拯救我们的未来。

减少局地空气污染、遏制全球气候变化，是中国面临的两大最为重要的挑战。这两大问题与中国电力消费引发的排放密切相关，需要中国的电力部门迅速进行颠覆性的革命，这其中就包括使得100%的电力来源于可再生能源。这一努力需要政府决策者、私人部门、非政府组织和科研机构开展合作，众志成城方能实现。

纳尔逊曼德拉曾经说过：“貌似遥不可及，原来唾手可得”。世界自然基金会正在中国开展活动，推动打造可再生能源发展的宏伟愿景，并且致力于推动构建恰当的政策法规支持体系，促进可再生能源的大规模应用。当前，虽然由可再生能源驱动的绿色中国尚显遥远；但是，本报告帮助我们认识到，这是可能的，并且成本要低于由化石燃料主导的未来。我们已经谋定了前路，迈开了步伐，正当勇往向前，停顿和后退是没有出路的。

世界自然基金会（中国）总干事  
卢思骋

<sup>1</sup> “生态文明”的概念最早成形于2007年，由时任中国共产党中央委员会总书记的胡锦涛提出。



公众逐渐意识到当前的能源决策得不偿失，已经开始呼吁采取重大行动。



## 世界自然基金会前言

尽管中国的人均碳足迹已经接近欧盟国家的水平，但是仍远低于美国、加拿大、澳大利亚、以及海湾地区石油输出国组织（OPEC）的部分成员国。然而，中国作为世界上最大的温室气体排放国，我们不能低估中国在当前和未来对于气候变化以及其他国际环境问题的贡献。

中国在过去二十多年，经济发展突飞猛进，但是发展并不总是均衡的，也并非不存在环境代价。在这个近乎14亿的人口大国，其主要的城市中心持续增长，诚然已是“发达国家”；但其由农业主导的乡村仍然是贫穷的发展中国家。由此，中国将会继续追求经济增长，以使得穷苦人口脱离贫困。然而，延续当下以化石燃料为主的发展路径，只会加深全球气候危机，并且造成水、土壤或者局地空气污染等。

城市灰霾笼罩，空气污染深重，这几乎成为2013年中国人挥之不去的记忆。重度污染天的红色警报、众多航班取消、学校大量关闭，这些都清晰地凸显出中国的环境危机。城市居民将空气净化器和口罩抢购一空，公众逐渐意识到当前的能源决策得不偿失，已经开始呼吁采取重大行动。煤炭消耗是中国空气污染的罪魁祸首，影响中国居民的预期寿命，也是导致气候变化的最大碳排放源。

问题很明确：中国的居民、企业、和政府官员都意识到，这一切必须改变。从某种意义上而言，重大转变正在萌发。2012年，在可再生能源发电总装机、以及风电装机容量和太阳能热水器安装量方面，中国引领世界，独占鳌头。2012年，中国在新增可再生能源装机容量的投资上，也是众多国家里的领头羊。

尽管已是可再生能源发展的领导者，中国的电力生产仍然大量依赖燃煤发电。中国的煤炭消费连续13年保持增长，当前几乎消耗着全球一半的用煤量。中国几乎有80%的电力都来自燃煤发电。

传统观念认为，随着中国大量的能源需求在未来数年继续增长，中国不可能戒除煤炭之瘾。众多专家也指出，能源经济朝着可再生能源（而不是煤炭）主导的模式转型，这在可预见的未来都不可能实现。

本报告则表明，传统观念是错误的。即便保守地假定可再生能源的未来成

<sup>2</sup> 参见Renewables Global Status Report 2013, REN21.





本与创新潜能，可再生能源发电的未来也是可以实现的。即便预期能源需求显著增长，2050年中国的能源格局有可能以可再生能源为主导，而煤炭则可以被完全淘汰出国家的电力体系。实现上述愿景，付出的花费其实比由化石能源主导的能源未来要更低。

世界自然基金会（WWF）委托Entri（Energy Transition Research Institute）组织了一个包括中美专家的团队，研究中国能够有多接近2050年实现100%可再生能源发电的远景。分析表明：若采用“成熟技术”<sup>3</sup>，如果中国立即实施雄心勃勃的措施改善能效，降低能源密集型产业在整体经济中的比重并增加服务业，以此作为经济可持续发展的基础，那么到2050年，中国约有80%的电力都可以由可再生能源发电满足。Entri发现，如果采取恰当的法律法规、或者实施明显的碳定价措施，煤炭可以在2040年就被淘汰出中国的电力体系。同样鼓舞人心的是，报告还表明，比起那些并不优先发展可再生能源或者改善能源效率的情景，高比例可再生能源情景更具有成本有效性。上述结论甚至还没有计算社会和环境层面相应的外部成本，否则结论很可能更加有利于可再生能源。电力部门要实现可再生能源发电有效且持续地增长，一大关键前提是需要制定强有力的节能和能效法规，通过对各种用电设备制定强制性的能效标准。

## 清洁能源革命势在必行

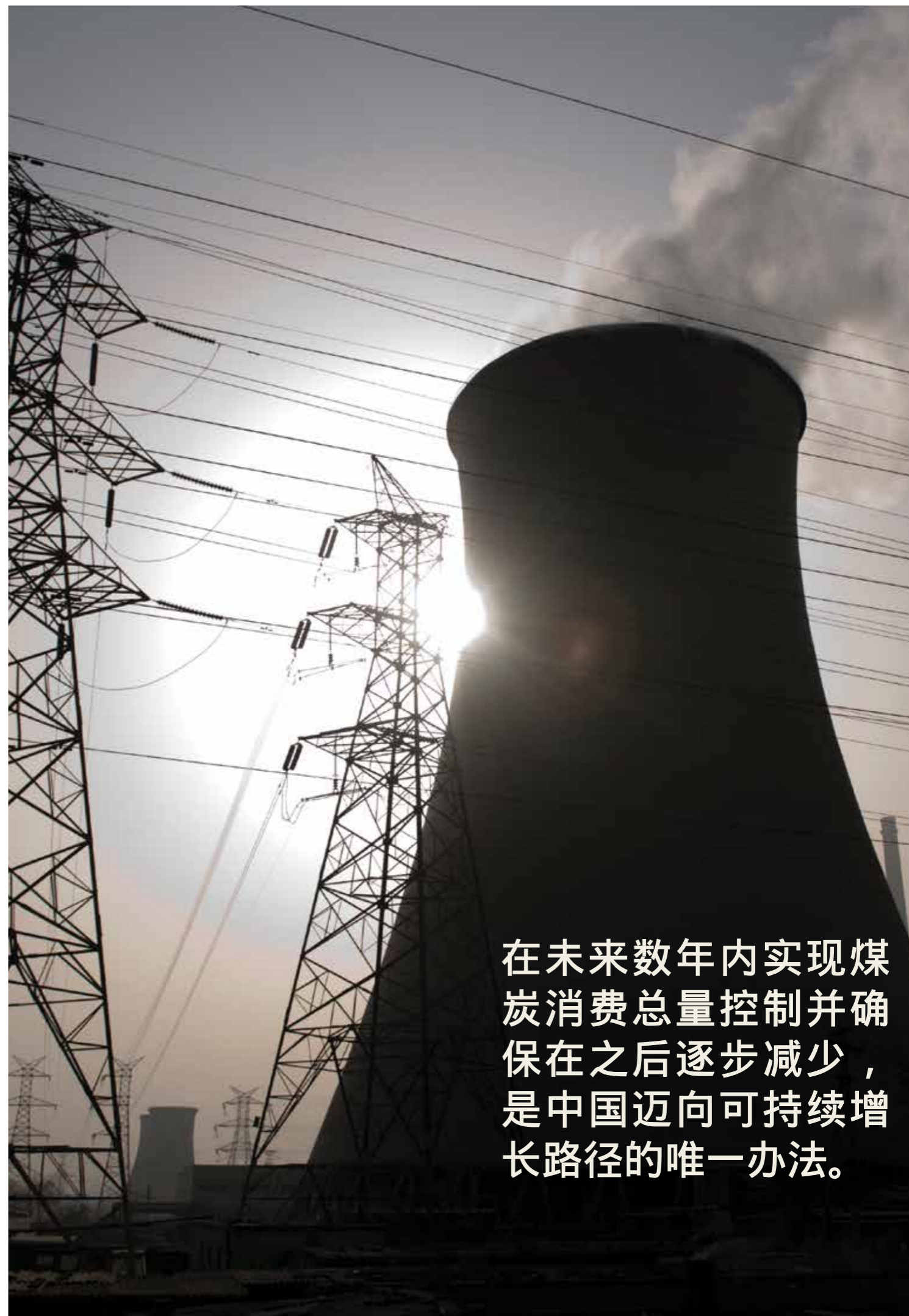
作为世界上人口最多且经济快速增长的国家，中国当前的煤炭消费量大约是美国的两倍，印度的四倍。在未来数年内实现煤炭消费总量控制并确保在之后逐步减少，是中国迈向可持续增长路径的唯一办法。延续当前路径，对生态系统和公众健康的影响实在是过于沉重。

中国东部城市近期以细颗粒物为主的空气污染，将这一影响体现得明白无误。在某些情况下，污染水平甚至超过世界卫生组织划定“安全值”的多达三四十倍<sup>4</sup>。尽管城市居民的严正抗议目前集中于空气污染，但是如果中国的碳排放不能很快得到遏制，公众也将会更多关注气候变化的影响。科学界指出，海平面上升以及强台风增多，都可能使得中国东部城市付出高昂的代价，而气温平均上升2℃可能影响到中国依靠雨水滋养的水稻，使其产量减少5%至12%<sup>5</sup>。

<sup>3</sup>能源转型研究所将“成熟技术”定义为合理运行维护能够产生高效的普遍运用的技术。中国8760电网模型不采用任何不成熟的技术，不假定出现任何重大的技术突破（比如，储能技术等），也不假定碳捕集与封存得以应用。


<sup>4</sup>参见：[http://usa.chinadaily.com.cn/epaper/2013-10/22/content\\_17050715.htm](http://usa.chinadaily.com.cn/epaper/2013-10/22/content_17050715.htm)，获取更多信息。

<sup>5</sup>参见：IPCC Working Group II Fourth Assessment Report (2007) at [http://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/ar4/wg2/en/ch10.html](http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg2/en/ch10.html)。



在未来数年内实现煤炭消费总量控制并确保在之后逐步减少，是中国迈向可持续增长路径的唯一办法。





2011年至2050年间，以可再生能源为主导的电力体系相比煤炭主导的体系而言，其总成本会更低。

## 中国可再生能源发电的（可能的）未来

根据Entri的模型，本报告专门考察了中国复杂的电力部门，并提出问题：中国作为全球人口最多且耗能很高的国家，到2050年到底能够有多接近实现100%可再生能源发电的愿景。在仅仅纳入了技术适度进步的假设之后，本报告发现：

- 如果采取恰当的政策措施，包括并且取决于是否大力改善了能源效率，中国约有80%的电力可以由可再生能源来满足。
- 2040年可以将煤炭淘汰出中国的电力组成，但这需要相当大的政治勇气，也需要实施促成性的政策措施，合理地管控电力部门的碳排放量或为碳排放制定合理的价格。尽管碳定价存在包括国家碳排放交易体系或者碳税等各种方法，Entri的研究指出，碳排放绩效标准（每度电的二氧化碳排放量）有可能最有效地解决中国电力部门碳排放的全成本问题。
- 余下17%的电力将来自燃气电站，在不稳定的可再生能源电力增加之后，这些电站主要作为备用电源。
- 2011年至2050年间，以可再生能源为主导的电力体系相比煤炭主导的体系而言，其总成本会更低。

在简述了中国当前的电力体系之后，Entri利用中国8760电网模型设计了未来的几大情景，报告中呈现了其中四种：

### 基准情景

除了现有政策之外，中国并未采取特定的清洁能源或改善能效的政策，并且经济结构也未经历重大变化，中国没有转向更高比例的服务业。

### 高效情景

中国成功地实施了改善能效的强有力的政策法规，并且经济显著转型，不再依靠能源密集型制造业作为其经济增长的基础。要实现相对较低的电力需求，只能充分实施改善能效的措施，这也是打造负担得起的低碳电力体系的先决条件。本情景中对于用电需求的预测同时也是高比例可再生能源情景和低碳混合情景的基本假设。

### 高比例可再生能源情景

以高效情景为基础，在存在可利用资源的情况下，均以可再生能源来满足电力需求。

### 低碳混合情景

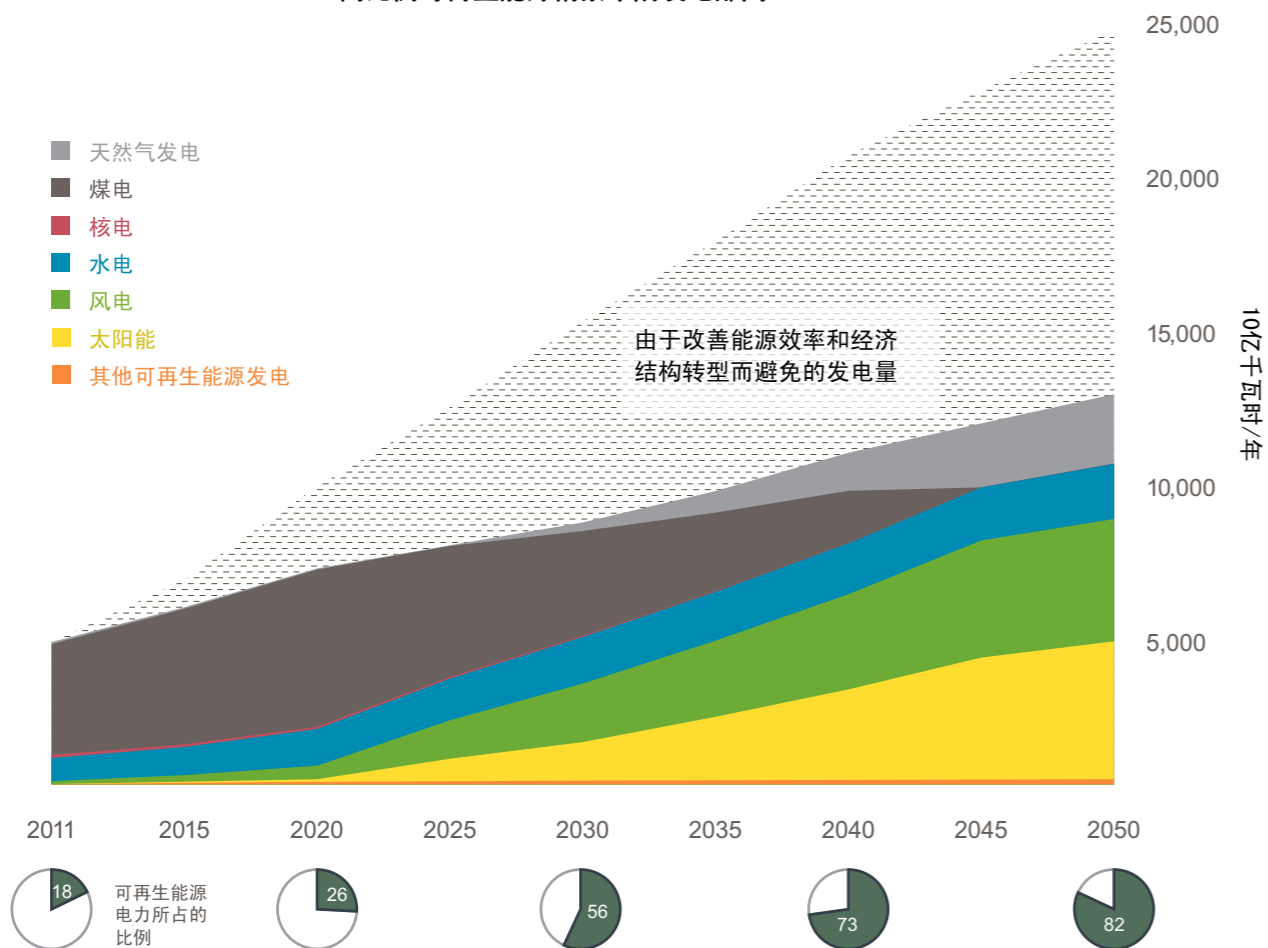
以高效情景为基础，中国的电力需求由多种可利用的低碳能源来满足，包括可再生能源发电、核电和燃气发电。



### 世界自然基金会关于高比例可再生能源情景的见解

高比例可再生能源情景（见下图）是WWF最期望的情景，这是由于该情景实现了最低的碳排放量，在各个情景中成本也最低。可再生能源有时会因为“过于昂贵”而被弃置，但是Entri发现：在趋势照旧的基准情景中，电力体系的成本要大于高比例可再生能源情景，后者在2050年有约80%的电力都来自可再生能源。淘汰掉煤炭还具有气候和地区环境方面的重大效益，这在情景中并未计算。然而，各种发电电源的建设和运行都必须小心避免其对环境潜在的负面影响，这其中也包括可再生能源。

高比例可再生能源情景下的发电部门



#### 能源效率与节约能源

若要到2050年实现100%可再生能源电力的愿景，中国必须推出前所未有的政策措施，促成提高能源效率和节约能源。中国还需要制定更广泛的经济政策，使得经济能够转向用能效率更高的服务业。经过这样的转型，2050年中国的用电需求相比预期水平可能会降低49%，才有可能使得可再生能源满足中国未来的电力需求。



高比例可再生能源情景是WWF最期望的情景，这是由于该情景实现了最低的碳排放量，在各个情景中成本也最低。





## 风能、太阳能、以及其他（非水能）可再生能源

高比例可再生能源情景假定，非水能可再生能源发电技术的成本会有降低。该情景中，中国8760电网模型所定义的具有经济性的陆上和海上风能均被利用，而由于广袤的屋顶面积和西部干旱地区都能安装光伏电板，太阳能利用的唯一局限在于其成本。到2050年，预计所有电力产出中约有三分之二都来自太阳能发电和风力发电。在所有情景中，由于地热资源仅仅限于像四川省这样的地区，因此地热发电在中国扮演的角色也很小。高比例可再生能源情景并未纳入较多的生物质能，这是由于中国禁止以农业用地生产生物燃油，Entri也未分析放松这一管制所可能产生的风险与收益。

## 水能

为了替代煤炭、燃气、或者核能发出的电力，高比例可再生能源情景假定，水电扩张到用掉所有经济上可行的水能资源。然而，如果中国的水电扩张并未按照环境和社会友好的方式进行，那么受到水电项目影响的淡水生态系统有可能会崩溃，以此为生的人民也可能受到负面影响。由于大坝可能对人和生物的长期可持续性产生重大影响，建设水电项目之前的先决条件，是必须采用重大的环境社会防护措施和评估工具（比如水电可持续性评价规范<sup>6</sup>，以及全流域水电可持续性快速评估工具<sup>7</sup>）。大坝选址必须考虑大坝自身产生的影响；受影响的大坝上下游地区；以及梯级水坝的任何潜在的和切实的累积性影响。在应用最佳实践的标准之后，中国方可确保建坝存在正确的理由，并且仅仅将正确的大坝修建在正确的地方。

## 煤炭

高比例可再生能源情景存在最引人注目的特点，也即煤炭在2040年被完全淘汰掉了。为了实现这一目标，中国8760电网模型假定，2020年后不再新建燃煤电厂，并且2040年后禁止燃煤发电。考虑到煤炭存在显著的负面影响、并且转向可再生能源存在众多效益，逐渐淘汰煤炭是中国的最佳选择，从而开创一个真正可持续的经济，确保其民众和整个地球的健康。

## 燃气

高比例可再生能源情景假定中国政府扩大燃气的目标未能完全实现，并且在燃气显著增长之前，其价格在一段时间内仍然相对昂贵。该情景下，2050年燃气在中国电力组成中被限制在17%，且仅被用以满足高峰时期的电力需求。如果

<sup>6</sup>参见：<http://www.hydrosustainability.org> for more information.

<sup>7</sup>参见：[http://awsassets.panda.org/downloads/rsat\\_summary\\_2013\\_edition\\_may\\_.pdf](http://awsassets.panda.org/downloads/rsat_summary_2013_edition_may_.pdf), 获取更多信息。



该情景中所有的燃气都来自中国国内，那么这也意味着中国需要依靠非常规燃气资源（比如页岩气以及/或者煤层气）。

必须承认，该情景纳入燃气应当引发关注。燃气发电的碳排在燃烧终端要比燃煤更低，然而，甲烷逸散排放的不确定性、以及尤其与之相关的开采和输送阶段的排放，这些因素对燃气的（尤其是短期的）气候效益提出了众多疑问。考虑到联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）最近修改了甲烷的增温潜力水平（在100年的时期内比二氧化碳高34倍）<sup>8</sup>，对逸散排放的关注更是有增无减。如果逸散性排放得不到有力控制，则其气候效应就完全消失，燃气可能就跟煤炭一样会破坏气候，甚至更为有害。

## 核能

高比例可再生能源情景与政府的官方目标<sup>9</sup>不同，避免了新建任何核电。中国的电力需求快速增长，虽然会吸引中国重新评估核电扩张，但是核电不应该成为长期可持续能源体系的一部分。这是由于核电内生的各种风险、高毒性的核废料的处置问题、较高的整体经济成本。同时，在不稳定的可再生能源电力逐渐增多以及“智能”电网解决方案和提高能源效率的大背景下，核电负荷缺乏灵活性，难以进行平稳调节。高比例可再生能源情景表明，中国不必将自身置于核电带来的风险之中，就能够迎接一个更低碳的未来。

## 政策建议

Entri提出以下几点，建议中国领导者加快变革步伐，充分应对全球气候变化和中国的地区污染问题。

### 1 将能源效率翻倍

- 适时制定以强制技术推广为主的工业生产过程的能效标准
- 要求中国的电网企业在用户层面实现较高的能源效率
- 从奥林匹克半岛项目中学习经验
- 为电网企业明确规则，补偿其实施需求侧管理的成本

### 2 优先开展低碳供电的有关投资

- 采取诸如碳排放标准等政策，大规模减少燃煤发电

<sup>8</sup>在20年的时间范围内，甲烷的升温潜力要高86倍。参见：Intergovernmental Panel on Climate Change (2013) at [http://www.climatechange2013.org/images/uploads/WGIAR5\\_WGI-12Doc2b\\_FinalDraft\\_All.pdf](http://www.climatechange2013.org/images/uploads/WGIAR5_WGI-12Doc2b_FinalDraft_All.pdf)。

<sup>9</sup>包括《能源发展十二五规划》（2015年装机容量达4000万千瓦）、《大气污染防治行动计划》（2017年达5000万千瓦）、以及最近修改的《核电中长期发展规划》（2020年达到7000至8000万千瓦）。

- 鼓励利用尽到以负责任方式开采的燃气，而不是煤炭
- 使得电力体系具有灵活性，并且有助于促进可再生能源上网
- 调整针对可再生能源发电的补贴政策，使输送可再生能源电力服务更加有效

### 3 允许价格反映服务的成本

- 考虑对商业和居民用户征收容量电费
- 重新设计电力质量示范项目

### 4 搜集、出版和分析有用的数据

- 提高机构能力，使得可再生能源电力项目能得以运行并且监测其绩效
- 搜集和共享可再生能源项目环境影响方面的合理数据
- 以电力服务实际输送量（千瓦时）而不是电力装机容量（千瓦）来测算成功与否

## 结论：中国迈向100%可再生能源电力

在推进可再生能源开发并且成为太阳能和风能的全球主要制造商的过程中，中国政府非常重要。中国政府采取的各项措施，既有助于降低能源强度，同时又将中国民众的健康排在更加优先的地位。但是，政府当前的政策还不能促进中国实现迫切需要的能源转型。在一些情况下，发展可再生能源、控制空气污染、以及应对气候变化的政策还缺乏必要的雄心，或者存在其他的设计缺陷，解决一个问题的同时制造了另一个更麻烦的问题<sup>10</sup>。

正如本报告的详细分析所示，一个由可再生能源驱动的资源高效的新产业经济在中国并不虚幻，而是能够实现的一大契机。抓住这一机遇可能并不会立马实现。中国是全球当前最大的温室气体排放国，而温室气体推高着气候危机。世界自然基金会认为，中国已经具有众多受过良好教育的工程师和其他具有各种专业技能的专家，目前正面临着前所未有的机遇，解决当下的环境和公共健康的危机，推动世界迈向气候更为安全的未来，并且在未来数十年引领世界打造更为可持续的经济。随着2015年达成全球气候协议的期限迅速临近，中国迫切需要采取诸如控制煤炭消费总量在内的新的国内行动。本报告表明，这一行动是可行的，并且也符合中国的利益。

<sup>10</sup> 比如，《大气污染防治行动计划》（2013年9月出台）虽然限制在中国东部大部分地区新建电厂，中国西部和北部仍然允许。燃煤电站大量耗水，将进一步加剧本已稀缺的水资源矛盾。



# 中国的未来发电

## 2050年中国可再生能源发电的最大潜力评估

William CHANDLER 陈世平 Holly GWIN 林若思达 王彦佳

Entri

© 2014 Energy Transition Research Institute, 安纳波利斯, 马里兰州  
版权所有。若无发布单位的书面允许, 不得对本报告进行重新制作、在检索系统中保存、或是以电子或其他任何方式进行传递。





本研究的目的在于评估中国可再生能源发电的最大潜力<sup>1</sup>。我们采用中国8760电网模型<sup>2</sup>，分析了在满足2050年中国电力需求的情况下，低碳电力、尤其是可再生能源发电的潜力。我们发现，采用并实施强有力的节能政策和法规、并且积极应用提高能源效率和需求侧管理的技术，就有可能以可再生能源发电满足中国大部分的电力需求。对高效率的能源体系进行投资，才使得众多低碳电力的情景具有成本有效性。我们作出结论认为，中国有可能打造一个电力体系，到2050年可再生能源电力供应满足约80%的电力需求。同时，相应的成本较为合理。尽管大部分可再生能源具有不稳定性，但有理由相信发电装机和用电需求有可能实现平衡<sup>3</sup>。

这一结果也能通过对比丹麦、爱尔兰、葡萄牙和西班牙等国而得到印证，目前这些国家风电占年发电总量的比重达到15-30%<sup>4</sup>。众多机构对未来可再生能源发电的潜力做出过预测，包括国家可再生能源实验室（National Renewable Energy Laboratory）的研究探索高比例可再生能源电力的未来。这些预测也使我们更好地了解了庞大的电力系统要实现迅速和根本的转变所面临的各种挑战<sup>5</sup>。

在我们对中国电力体系的评估中，比起成本或者资源可用程度而言，电网的可靠性更加制约着可再生能源发电的潜力。（要了解Entri如何整合气候数据、概率分析、以及对未来技术特征和表现的假设等，请参考附件四。）而考虑到这一制约，我们也探讨了多种途径以实现较低二氧化碳排放（高比例可再生能源电力系统的主要效益之一），并且对电网运行和可靠性等因素扰动较少。本报告主要展现了经济成本和减少碳排放方面的模型评估结果，而全面比较高比例可再生能源系统和其他低碳体系的环境成本和效益尚缺乏数据。这将是数据收集和未来分析的一大重要议题。

本报告还总结了我們使用的方法，包括对中国经济未来数十年的增长、以及模型如何处理数据可得性等各个问题的关键假设。报告描述了三大技术情景的经济成本和对碳排放的影响，以及随着煤炭的主力电源地位被取代后所产生的环境问题。最后，报告还对如何促进未来低碳发展给出建议，包括与可再生能源发电相关的政策。



## 模型介绍

中国8760电网模型是计量经济和工程学相结合的模式。Entri开发了这一模型，用于评估一年中8760个小时的电力供需。模型能够分析成本、碳排放、土地利用影响、以及与满足电力需求相关的输电线路要求，包括由于每天及四季可再生能源发电的多变性而对系统提出的要求。模型还加入了人的行为（比如对涨价的响应）、成熟技术的成本降低预期、以及对资源可利用水平的已知上限。模型用户可以通过改变各项假设（比如各项技术的预计成本）或者施加各种限制（比如要求加入一定类型的发电电源），从而得到未来电力供需的不同情景<sup>7</sup>。

本模型的各项假设得益于各种历史数据，包括对新兴经济体用电需求增长的历史趋势，以及对过去几十年用电需求增长的观测数据。用电需求很好地反应出其对于收入、经济结构以及电力价格的变化，我们对于用电需求的预测就基于这些最基本的关系。我们相信，中国有可能有别于历史趋势，并且我们纳入了各终端能效改善潜力的详细评估。然而，实现上述能效改进所需要的政治意愿将可谓史无前例。过去十年，中国的用电需求增速比其国内生产总值（GDP）增速大约高15%。如果这一趋势在未来40年持续下去，那么随着中国的生活水平向欧洲和北美靠拢，用电需求以及发电相关的成本和污染将增长五倍或者更多（见图1）。

模型适用于依靠不稳定的多种资源的电力系统来平衡用电需求的挑战。模型可以估算用电负荷（千瓦）和用电量（千瓦时）每天的和季节性的需求涨落，并且采用气象数据和概率模拟方法来测试太阳能、风能和水能的各种组合是否足以满足未来四十年每天每一小时的用电供需，模型还确定了多项补充性的备用技术<sup>8</sup>。

## 今日中国

模型以2011年作为初始年，并且各项数据都采用2011-2012年可获得的实际数据。对于诸如人口数据、汇率、贴现率等各类假设，我们采用了标准的各项参照值。这些细节以及模型如何运作等更多信息，可从Entri附件四“中国8760电网模型：方法与概述”获得（也可参见附件一至附件三，以及下面文本框1）<sup>9</sup>。

中国目前的发电装机容量达11.48亿千瓦，其中各常规电源包括8.37亿千瓦的煤电、2.23亿千瓦的水电、以及1500万千瓦的核电。陆上风电装机容量为5000万千瓦，是非常规电源中最大的。

电力价格并非由市场来决定，而是受到管制。中国居民支付的电价水平相当低，而工业用户却要支付比其美国同行稍高的费率。与世界上大多数地方一

样，价格体系都不是采用发电的边际成本定价的，电价也不对用电需求做出反馈，成本最高发电方的电价与其实际成本也相差颇多。同样地，中国也补贴着整个经济的化石燃料消费<sup>10</sup>，这毫无疑问会扭曲电力价格。

中国的年人均GDP达8000美元<sup>11</sup>，人均用电量为3100千瓦时。工业用电占到中国电力消费的75%，并创造了47%的GDP。服务业对于GDP的贡献达45%，与之相关的建筑用电是电力消费增长最快的部分。

## 制定电力发展情景

从中国当前电力体系的要求出发，我们采用中国8760电网模型制定出未来的各种情景。在本报告中，我们展示出四大情景：

**基准情景：**未来中国不采取除已有政策外的特别的清洁能源或能效政策，并且其经济体系也不发生根本性的改变。

**高能效情景：**未来中国成功实施能源效率显著提高的措施，并且实现了显著的经济转型，不再以能源密集型制造业作为其经济增长的基础。只有通过全面承诺改善效率，才可能实现相对较低的用电需求，同时这也是打造一个负担得起的低碳电力体系的必要条件。该情景所展现的电力需求也是后面两个情景所依托的基准。

**高比例可再生能源情景：**该情景基于高能效情景所展现的用电需求，并且要求模型以可获得的可再生能源加以满足。

**低碳混合情景：**该情景基于高能效情景所展现的用电需求，并且要求模型以各种低碳电力来源加以满足，如可再生能源发电、燃气发电和核电。

我们对于各个情景所做出的假设，包括中国的经济增长、以及需求和供给的各种技术，在以下进行讨论。

## 对经济增长的假设

中国经济发展的步伐和道路将会影响中国未来的用电需求。随着中国经济逐渐从开发资源获取收益转向提供服务获取收益，从能源密集型工业生产实现转型，这一结构性转变将会改变用电模式。自2005年起，中国的经济规划者就制定了每5年服务业占经济比重提高4个百分点的目标，但实际的变动幅度仅有约一半<sup>12</sup>。

结构转型会提高经济的电力使用效率，这是通过提升高附加值和能源强度更低的服务业在经济中的比重而实现的。同时，更高附加值和更低能源强度的制造业相对于高物料投入的工业而言，其产出的比例也会增加。



另一方面，结构转型有可能推动更高的长期经济增长，并且也会抵消一部分结构调整所带来的减排效应。此外，服务业在经济中比重的提升也会影响电网，这是由于服务业与居民部门比较相似，对于电力体系将带来更高的峰值用电需求和更低的低谷用电需求。

表1给出了我们构造各个情景时所采用的两组GDP的假设。对于基准情景（下文详述），我们认为服务业对于新增GDP的贡献不到30%，由此我们给出了低服务业比重和低GDP增长率。而对于高能效情景、高比例可再生能源情景和低碳混合情景（下文详述），我们认为服务业增长占到新增GDP的50%，并且对应高服务业比重和高GDP增长率<sup>13</sup>。表2和表3中给出了2011年的实际数值，同时展示了其他的一些关键的假设。

表1: 经济增长速度（每年）

中国8760电网模型中的GDP假设	2010-2015	2015-2020	2020-2030	2030-2040	2040-2050
基准情景: 低服务业比重, 低增长速度	7%	7%	4%	3%	2%
高能效情景、高比例可再生能源情景 和低碳混合情景: 高服务业比重, 高增长速度	7%	6%	4%	4%	3%

注: 经济中服务业的比重将会从2012年占GDP不到45%，到2050年在基准情景中增加到60%，在其他技术情景中增加到75%

来源: Entri

表2: 高能效情景、高比例可再生能源情景和低碳混合情景的重要假设

	2011	2050
人口 <sup>14</sup> (亿)	1,347	1,300
城市化率 <sup>15</sup>	50%	79%
人均GDP (2013年美元不变价 <sup>16</sup> )	5,725	28,040
服务业在经济中的比重	43%	75%
电力需求对GDP的弹性系数 <sup>17</sup>	1.23	1.23
电力需求的价格弹性系数 <sup>18</sup>	-0.21	-0.21

来源: Entri

## 用电技术

我们基准情景所展示出的电力需求，是不采取有力的新措施减少用电量或碳排放的情形下的未来电力需求。该情景将已确定的能源强度目标和能源发展比例目标推行实施至2020年，同时假定成本最低的供电措施会主导未来的电力供应。该情景还展示出，用电需求会从当前人均每年4000千瓦时增加到2050年超过17000千瓦时。类似地，发电部门产生的二氧化碳排放将从每年30亿吨，到2050年增至140亿吨或者更高。

表3: 各个情景的核心内容

情景	改革经济结构	强制改善能效	强制发展可再生能源	扩张核电	管制碳排放
基准情景	✗	✗	✗	✗	✗
高能效情景	✓	✓	✗	✗	✗
高比例可再生能源情景	✓	✓	✓	✗	✓
低碳混合情景	✓	✓	✓	✓	✓

用电需求照此增长，各种低碳能源都将难以满足，同时还会持续威胁中国人的健康和全球的大气环境。因此，我们在高能效情景中调整了需求的各个假设。我们认为结构调整的幅度会更大（如上所述），并且更重要的是，对于居民用电的空调、照明、热水，以及服务业部门的空调和照明、各个工业领域以及发电部门的能源转化等等，我们假设都采用了最先进的高能效技术。我们还考虑到，随着未来需求增加和资源约束加大，供电成本会被推高，由此电力消费也会对价格做出反应。中国在2050年能否以可再生能源来生产其大部分的电力，最为关键的是推动应用这些技术的相关政策能够有多成功。如果不全面推行能效改善，可再生能源供应（基于当前测算的经济上可开采的资源）将跟不上用电需求的增长<sup>20</sup>。即便加上用电需求收入弹性的假设，我们测算高能效情景的人均用电需求到2050年将达大约9000千瓦时。

图1和图2中，我们把对中国的测算与当前其他国家的经济增长和能源消费水平进行了对比。

高效率情景是本报告中最重要技术情景。如果用电需求不在能效措施的有力保障下得到控制，煤炭仍然会成为未来电力开发中不可或缺的组成。我们建议应当强调减少需求的政策措施，才能实现高比例可再生能源的未来或者其他低碳的未来。



图1: 中国人均用电量

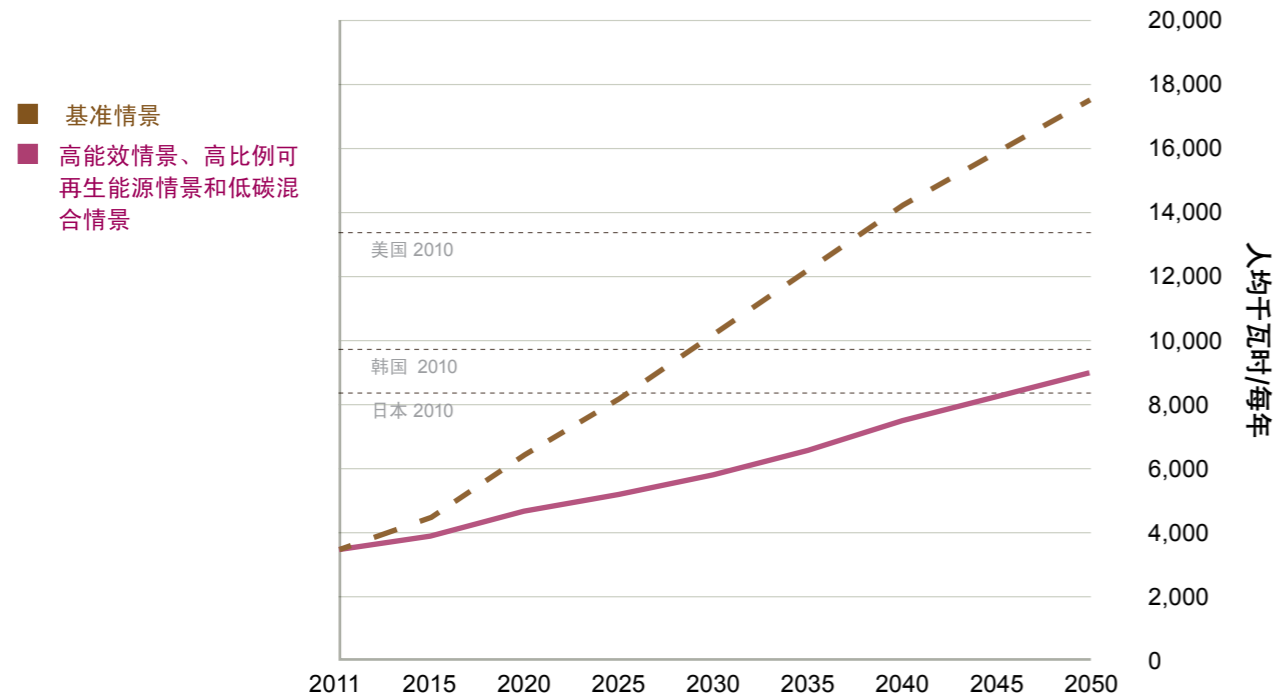
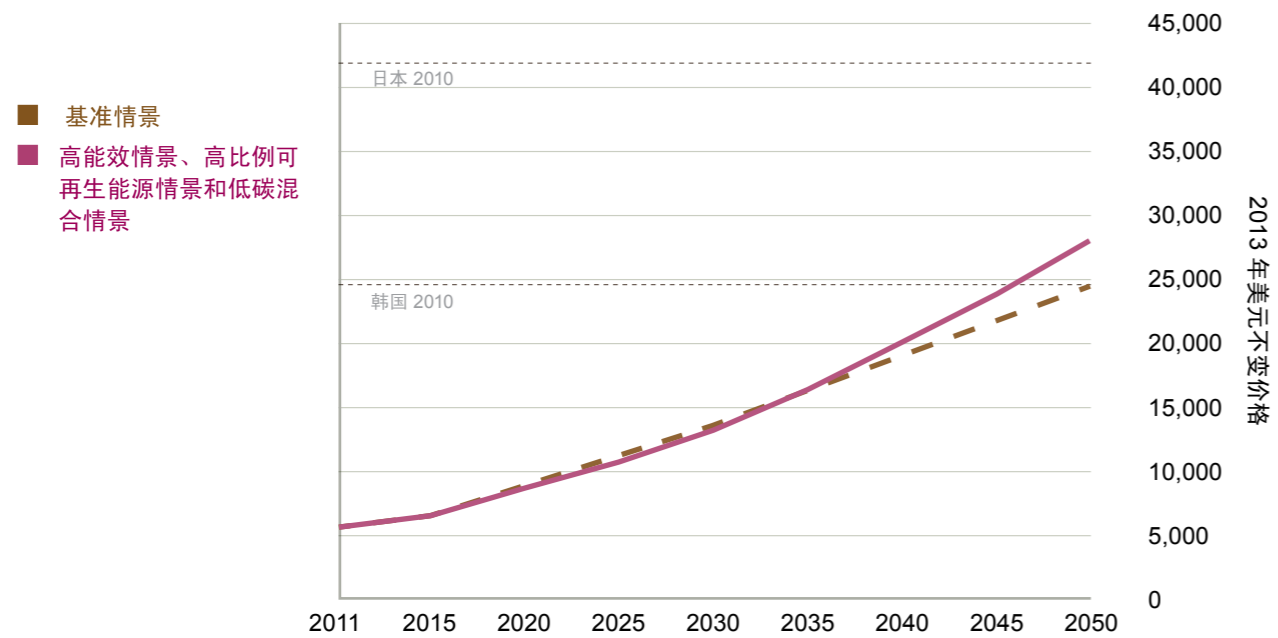


图2: 人均GDP



## 发电技术

中国8760电网模型包括化石能源（煤炭、石油，天然气）和非化石能源（核能、风能、太阳能、水能、地热能、生物质能）的发电数据。模型用户可在过程导向的子模型中选择电源来源，方法有三：命令控制型（配额标准或比例要求）；根据最低成本而进行竞争性选择；或者采取碳定价和碳排放控制结合的措施，比如鼓励使用非煤炭资源。

模型采用经过贴现之后的平准化成本进行分析，测算模型中包含的所有发电系统的经济成本。贴现率作为资金的机会成本，本研究采用的实际贴现率为10%，也即通胀水平外加10%的“利率”水平<sup>21</sup>。资源可得性方面的数据确定了某些可再生能源技术的发展上限，而核电选址问题制约着能够上马的核电总量。本次模型计算没有量化各种能源的环境成本，而是在下文加以描述。

**煤。**中国当前的电力有四分之三都基于煤炭，燃煤发电对于人体健康存在重大影响<sup>22</sup>。若采用国际的致病比率，中国的燃煤发电引发的相关致死案例每年可能超过7.5万人，在基准情景中2050年将会超过35万人<sup>23</sup>。在模型的时间跨度内，煤炭一直储量丰富且价格不高，基准情景和高能效情景中都显著地包含着煤电。模型的使用者可以通过特殊的规定来削减新建燃煤火电，这也是我们在高比例可再生能源情景和低碳混合情景所采用的（下文详述）。

**天然气。**我们假定中国的天然气在一段时间内仍然开发滞后，成本约为每千兆焦10美元（合每千立方米260美元）。由于价格昂贵，模型中新建电力装机仅在模型使用者发出特殊指示时才会选择燃气发电。一些专家认为，中国可能拥有世界上最大的非常规气供应，尤其是煤层气。如果中国的燃气价格能够降至成本约为每千兆焦5美元（合每千立方米130美元），那么在模型中，天然气将会比包括煤炭在内的所有其他发电方式都更低价，这将会意外地改变中国的电力生产<sup>24</sup>。如果中国选择大力开发其国内燃气供应，那么需要加强环境方面的管制以避免各种问题，包括逸散性排放、地下水污染、以及为了钻探和基础设施兴建而必然对土地产生竞争性使用需求。若不加以管制，这些社会和环境成本将超过燃气转型带来的经济效益，同时还引发燃气在低碳未来中所起作用的众多问题。

**核能。**核电目前供应了中国电力的约2%。虽然自日本福岛事故之后，公众对于核电的观点显著恶化，然而可选厂址的局限才是模型中核电上马的主要制约。基于中国众多专家对中国发达且人口稠密的北部和东部地区可选核电厂址的估计，我们把2050年的核电规模限制在4亿千瓦<sup>25</sup>（基准情景和高能效情景只上马了四分之一的规模，而高比例可再生能源情景不采用任何核电）。资金成本的估算也是一个问题。中国对核电成本的估算仅有每千瓦1600美元，远远低于美



国南部新近批准建设的Vogtle核电站高达每千瓦7000美元的估算成本。我们在本报告评估的情景中采取了每千瓦4000美元的中间值<sup>26</sup>。高比例可再生能源情景在2013年后不再新增核电，而低碳混合情景则纳入了全部的4亿千瓦核电。

**可再生能源。**模型中采用了水电、风电和太阳能发电技术，同时还包括了生物质发电和地热发电，但仅仅限于当前已建和待建的较小规模。2011年中国的电力装机容量中，包含了300万千瓦的太阳能发电、4800万千瓦的风电、以及2.15亿千瓦的水电，生物质发电和地热发电总共有200万千瓦。根据公开发布的资源调查数据，陆上风电、海上风电以及水电的装机容量能分别达到25亿千瓦、2亿千瓦和4亿千瓦，模型中新增装机也以此为限。例外的是，根据众多中国可再生能源专家的建议，陆上风电的上限定在了15亿千瓦<sup>27</sup>。在各个情景中，我们对光伏发电的装机容量不加限制，这是由于市场发展水平还远低于已有的屋顶、硬化地面上的顶篷、以及西部荒漠所能提供的空间。我们还不考虑进口电力，这可能包括来自东南亚的水电以及来自蒙古的风电和火电。

首先，我们采用容量系数并反映对技术进步的预期：水电为40%，风电则逐渐从20%提高到29%，太阳能发电则从15%提高到20%。相比之下，煤电和核电的容量系数目前分别为60%和90%。然而，风电、水电和太阳能发电的容量系数还与其所开发资源的质量和数量有关系，随着季节发生变化，太阳能发电还与每天所处的时段相关。我们根据公开发布的数据来源，采用了一年当中风速和降水等典型的气象数据。水电可利用规模根据每个月的数据进行估算，而每个月内水电的配送则允许做到按需分配。风电可利用规模根据标准的韦伯概率分布作为风资源质量的函数来进行估算。我们采用随机数量的发电机组相对于变化的风速（作为测算出的概率分布的函数）进行模拟，得出以小时为基础的资源可利用规模，从而解决风电不稳定的资源属性。

虽然“可再生能源”这一术语通常都让人想起风力发电，而包括中国在内的大部分国家的可再生能源发电都是以大规模水坝水力发电为主的。中国的电网体系中，每年都将新增约2000万千瓦的风力发电装机，但是中国当前水电装机容量比风电要多7倍。即使到2020年，预计水力实际的发电量仍然是风电的至少5倍。

我们想提请注意的是，可再生能源并不总是意味着对环境友好。如果修建大坝并未考虑到对人类和物种长期可持续性的影响，那么极度依赖大规模水电将会完全改变中国的河流生态系统。虽然专家们对各种影响结果评估仍各持意见，风电和太阳能发电对土地利用的影响也应加以考虑。我们认为对于风电而言，有可能需要利用大量的相对来说尚未开发的土地，这一扰动可能导致野生动物栖息地的大规模缩减。





## 文本框1: 为什么不能100%可再生能源?

本研究的目的在于用模型模拟2050年中国的电力电网体系，估算可再生能源发电可能达到的最高比例。我们对于供电和用电的模型模拟制定了以下规则：

1. 技术必须是“成熟的”（参见尾注6）；
2. 用电供需应当时时平衡，并且不会出现超过当前电力需求负荷10%的缺口，或者不能在每年中有超过100个小时的负荷缺口达到1亿千瓦；
3. 供电方案必须通过标准概率测试评估其资源可利用规模。

例如，每小时的风力发电会根据实际的风速数据来模拟，在资源充沛地区利用风力资源来满足用电需求。这就涉及到要利用“韦伯分布”来测算风资源的可利用水平，并且基于风速及其变化、并通过随机过程来避免对时时发电数值的偏差，从而确定每小时的分布状况。

读者们可能想问我们，是否也对可再生能源做出了某些过于悲观或保守的假定。我们力求使得各个假定的理由都尽量透明。比如，我们这一研究中的风力发电的可利用规模（容量系数），要比最佳风场里最高风塔采用最新式风机所得到的要低。由于我们的可再生能源情景利用了所有的风资源估算值，而非仅仅是那些最佳的风场，由此我们也对容量系数进行了相应调整。单是陆上风电就可能达到14亿千瓦的发电装机容量，这比中国当前已有的发电总装机量还多出20%以上。由于有了容量系数的假定，使得模型必然得出一个更大的总装机容量，但这并不对风能的利用形成制约。

我们还进一步力促应用成熟技术，利用1.75亿千瓦的海上风电。类似地，我们纳入了中国预计可用的所有的水力发电装机容量，而不管其存在的环境后果。模型并未纳入大量的生物质能，这是由于中国禁止以农业用地来生产生物燃料。我们也并未分析放宽上述限制所带来的风险或收益。

低成本且清洁的储能体系，还不满足我们对成熟技术的认定条件。2030年前若能在储能系统方面实现突破，将会从根本上改变电力规划。我们并不假定存在某一解决方案、可以很大规模地应用，但是我们仍然假定有1亿千瓦的储能容量，这远远超过了中国抽水蓄能的可开发规模。

即便是假定采取了大量的节能措施，满足中国未来电力需求仍是一项巨大的挑战，这也恰恰是中国当前电力规划的现实。要赢得这一挑战，并在环境上可被接受，不管发电的资源是否是来自可再生能源，中国未来电力所应用的各项技术都需要更多地关注科学以及环境保护的价值。

本报告中各个情景的细节呈现在附件一和附件二中。附件四还总结了Entri的方法论，详细的方法论报告在其网站上能够获得：[www.etransition.org](http://www.etransition.org)。更多关于如何应用中国8760电网模型的信息请联系Entri。

## 输电和储能

本报告假定中国的输配电企业的经营模式实现成功转型，从销售电力获利转向以最为成本有效的方式提供能源服务。模型纳入众多智能电网技术，使得中国的输配电企业能够控制用电需求、并从整体上减少用电需求，从而适应可用电力的波动。这些技术使得电网企业能够采取众多措施，诸如关闭热水器或者控制空调开启时间等，对用电高峰或电力短缺做出响应。模型还纳入定价策略和合同协议等工具，使得输电企业能够对供电的变化提前规划和做出响应。这些工具鼓励用户改变其用电行为，使得电力体系能够适应供电的各种变化。比如，让居民能够在一天里电价较低的时候清洗衣服，或者让大工业用户接受一定的断电计划，以享受较低的电价。转向“可调度负荷”<sup>28</sup>以及可调度发电，这样的商业模式并非已成定论，还需要像我们报告建议的那样，进行政策推动。

模型还纳入各项发电技术的发电容量和发电量，从而推导出建设输电设施及其成本的信息。这些成本可以根据某一公式进行计算，涉及到供电方案的选址、地区用电需求及大致供电距离，由此就能算出相应输电线路的投资成本。可再生能源发电往往选址偏远，尤其是中国西南各个待建的大型水电项目距离用电负荷中心非常遥远，从而要求大规模投资修建高压输电工程，以通达中国北部和东部人口密集的中心区域。

如果中国实现其25亿千瓦的风力资源开发上限，那么这一两百万个24层高的风塔有可能占地颇多，占据多达四川省或半个内蒙古大小的地域<sup>29</sup>。因此，我们根据中国多位风电专家的意见，将风电开发的规模更切实地限制在15亿千瓦。即便如此，50万到100万个的风塔仍将占地达内蒙古面积的三分之一。风力发电机的实际影响很大程度上都取决于选址，但不幸的是，像内蒙古这样风力资源丰富的省份，其环境较为敏感的地区恰巧也具有最好的风资源<sup>30</sup>。牺牲一部分经济效率，将风力发电机组安装于荒漠是可能的，但是我们在模型中并未做此选择。模型目前还没有考虑风电场、太阳能发电站或者输电线路所占土地的成本。（附件一给出了模型的各个假设。附件二给出了模型对装机容量、发电量、排放量以及土地占用情况的模拟结果。附件四概述了本研究所用的方法论。）

模型还纳入了储能技术，将用电低谷时段的电力存储起来，并在用电高峰时段将电力重新供应回电网，以平衡电力供需。储能成本包括资金成本、双向效率损失、以及运行维护成本。抽水蓄能、电池、以及压缩空气等都有纳入模型，但是其总量以1亿千瓦为限，这是基于对抽水蓄能之外其他技术的商业化应用规模的判断。即便是我们所设定的相对较小的储能量，也几乎是当前全球储



能容量的规模，而这几乎都是抽水蓄能。我们也注意到，中国抽水蓄能的建设场地是有限的，远远低于上述储能容量的规模。

评估中国汽车大规模电力驱动的影响，这并不在本次研究的范围内。中国政府制定了2020年上路200万辆纯电动汽车的官方目标，我们不认为这一额外的电力需求会导致问题<sup>31</sup>。然而，即便在我们模型所模拟的技术进步的步伐下，2020年的中国电网可能尚且不具备先进的通讯控制（智能电网）技术，无法让电动汽车来消纳可再生能源电力的余额。此外，电动汽车虽然没有从排气管中产生碳排放，但由于其置身于煤炭主导的电力市场，其碳排放仍然是巨大的。至于电动汽车的储能潜力问题，我们认为汽车电池必须要与电网规模的储能水平相匹配，且总成本处于可比水平<sup>32</sup>。

根据前国家电监会提供的国家层面数据、以及一些学术期刊上所公布的省级和区域负荷研究<sup>33</sup>，我们得出了历史负荷曲线，并得到了各小时层面的负荷水平。高峰负荷出现在每年用电高峰月份高峰日的最大电力需求，一般出现在夏季后期。模型中的假定都是根据国家电力系统的均值而做出的。峰谷负荷比值是由高峰负荷除以年均用电需求得出，以瓦计。低谷并非电力系统的最低负荷，而是年均电力需求。需要注意的是，模型还需要反映出长期的调控政策，这就要求装机容量必须达到年负荷需求最大值的1.2倍<sup>34</sup>。

建筑部门的用电需求比重增加，有可能带来高峰负荷与平均负荷的差值扩大，这是由于这类用电需求存在每日的用电峰谷，并且受到季节因素的影响，相比而言，工业部门的负荷要稳定得多，但是模型对此并未加以模拟，并且也没有充分的数据来模拟这一趋势。我们做出假定（但并未加以测试），认为中国电网有能力管理好高比例可再生能源电力情景下电能质量（电压-电流电抗性）。目前，可再生能源电力在供电比例中超过30%、且实现电力质量管理的技术案例还不多，同时应用规模也很有限，难以进行评估。随着电网公司更多应用管理和平衡电力负荷的技术，上述问题才能够经得起模型模拟。

### 模型的结果

我们测试了多个情景，研究各种不同的技术单独地或者组合在一起应用后，会对2050年中国电力供应体系的成本以及/或者碳减排产生怎样的影响。我们选取了与高能效情景成本近似的两大情景：高比例可再生能源情景和低碳混合情景，并更进一步将碳减排的效应呈现如下。

图3展现了高能效情景、高比例可再生能源情景和低碳混合情景下电力系统的总成本。

图3: 2011至2050年电力系统的总成本

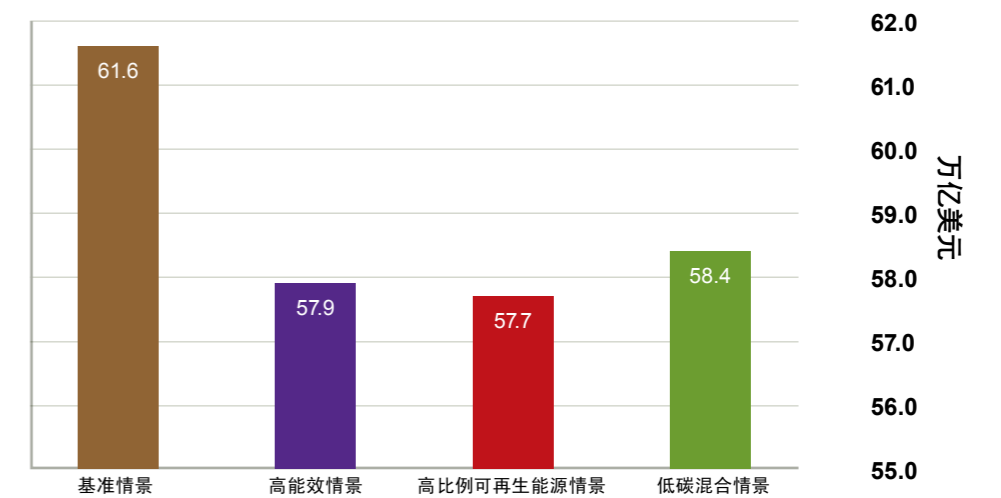
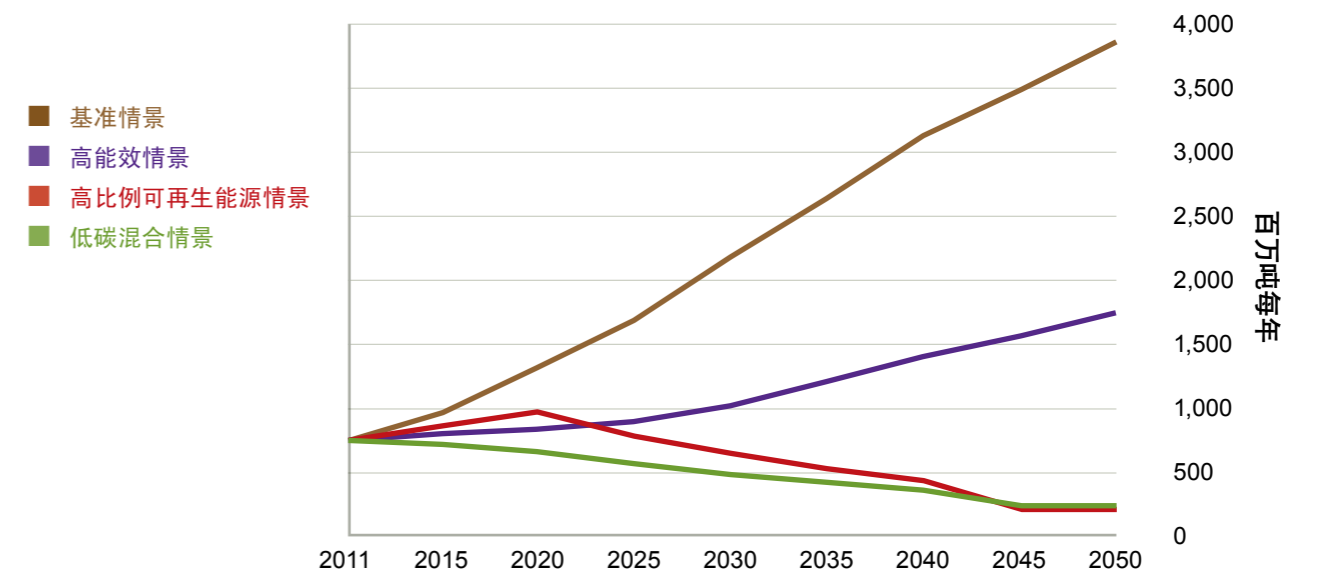


图4展现了各个情景的碳排放总量。请注意，可再生能源情景（相比高能效情景）里2020年碳排放曲线上的“凸起”，主要是由于该情景下少用了核电和燃气发电<sup>35</sup>。高能效情景假定政府到2020年核电和气电（以及可再生能源发电）的各项既定目标均会实现，而高比例可再生能源情景和低碳混合情景则假定核电和气电目标不必实现。请注意，高能效情景在2020年（当前的各项强制规定到期）之后采用最低成本的方法，这意味着2020年之后会上马更多煤电来满足新增电力需求。

图4: 碳排放量





所有三大情景的总成本都比较接近，但是其碳排放却存在重大差别。这两个主要原因。首先，我们认为光伏发电（PV）和风力发电的成本到2035年前还会显著降低，直到其相对于常规电源更加便宜之后成本会稳定下来。其次，尽管在低碳混合情景中，发电技术的成本要高于高比例可再生能源情景，但是燃气发电和核电更高的容量系数会减少所需的装机容量，从而弥补其较高的资金投入。也就是说，光伏和风电每千瓦装机成本更低，但是需要更多千瓦的装机容量，以便提高其可靠性来满足用电需求。

基准情景中2050年的碳排放比高能效情景的两倍还多，并且如前文所述，高比例可再生能源情景和低碳混合情景也都完全采用了各项提高效率的技术。基于上述结果，我们建议中国政府，为了打造一个未来可持续的电力体系，目前最应当采用的重要措施就是控制电力需求的增长。除非中国能够将电力增长幅度降低到GDP增速的一半左右，否则中国电网体系中可再生能源发电的比例不可能超过50%<sup>36</sup>。

### 高比例可再生能源情景

我们发现到2050年，如果政府提出要求，风电、水电和太阳能发电有可能供应中国电力需求的约80%，而若交给市场则达不到，但这并不意味着可再生能源的未来会成本极高。事实上，如果可再生能源发电的资金成本按照预期持续降低，经济上的成本是负担得起的（参见附件一）。

图5（32至33页）展示出高比例可再生能源情景以及基准情景、高能效情景和低碳混合情景的发电结构。

可再生能源发电在国家电网体系内实现无缝对接将会充满挑战。发电量时时都在波动，可利用的发电装机容量也变化不定，难以管理。即便风电、水电、光电能在中国疆土范围内广泛分布，由此更可能保证资源的可利用水平，但是波动性仍然会难以管理。用光伏发电（基本仅在上午11点至下午4点之间可以利用）和风电（即便利用的是中国最好的风力资源，其加权平均容量系数也仅为35%）来满足以往用电需求的每日变化水平，可以预见是相当困难的。在高比例可再生能源情景中，仅当我们加入一些非可再生能源供电以确保系统的可靠性时，模型才不会出现过度的电力短缺状况（参见文本框1，26页）。这一供电可以采用煤炭、天然气或者核能。我们在报告给出的情景中采用了天然气，这是因为燃气发电厂的发电调节计划可与可再生能源电力供应的多变特征配合得最好。请参见附件三中采取煤电进行平衡的另一情景。

在模型的高比例可再生能源情景中，我们还采取了两项“准政策”类型的指示。首先，只要资源是可获得的，我们都要求模型以可再生能源发电来满足新

增发电装机容量（模型接着选取成本最低的可再生能源技术）。接着，我们规定2020年后禁止以煤电作为新增电力装机，并在2040年后（在电力部门）禁止一切煤电项目<sup>37</sup>。

对煤电项目的禁令会过早淘汰掉大约3.3亿千瓦的燃煤电站，平均提前10年关闭，摊销的资金成本约为每千瓦250美元。总的经济损失约750亿美元，或者十年内每年损失75亿美元。如果将这一成本补偿给发电企业，并且分摊给电力用户，那么在十年间可能使每度电的电价提高约0.001美分。（这一成本在29页图3中我们对总成本的测算时并不包含，文中其它段落也不包括。）

对碳排放进行总量控制，将会要求电网在很短的时间内，对发电装机进行的调整涉及到大约5000亿美元的资产。而比成本因素更为重要的事实在于，这要求那些预计有三分之二时间可以运行并且能够按照预期运行的电力装机将被替换掉。如果用可再生能源加以替换，其最多可运行三分之一的时段，而且这些时段内能够按计划运行的时段还要低于需要备用电源入网的时段（也即1小时到4小时）。为了确保电力产出的相对稳定，还必须建设数倍于煤电或者气电名义装机数的发电容量，且系统不稳定因素仍然存在。

### 低碳混合情景

低碳混合情景采用与高比例可再生能源情景一样的煤炭政策，但是重新引入了核电，发展规模达到中国政府制定的4亿千瓦目标。

低碳混合情景与高比例可再生能源情景相比，碳减排的成本相近。中国部分政策制定者将核电视作水电的替代选择<sup>38</sup>。



图 5a 基准情景的发电量

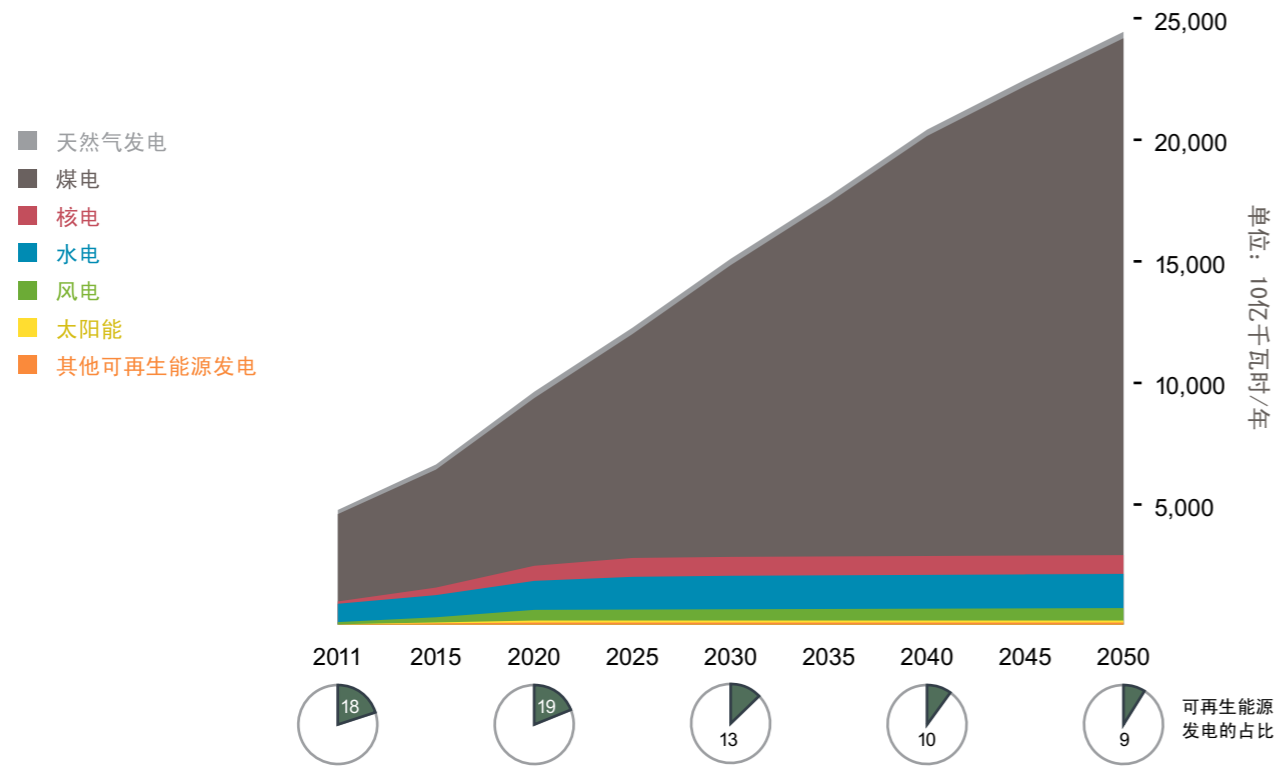


图 5c 高效情景的发电量

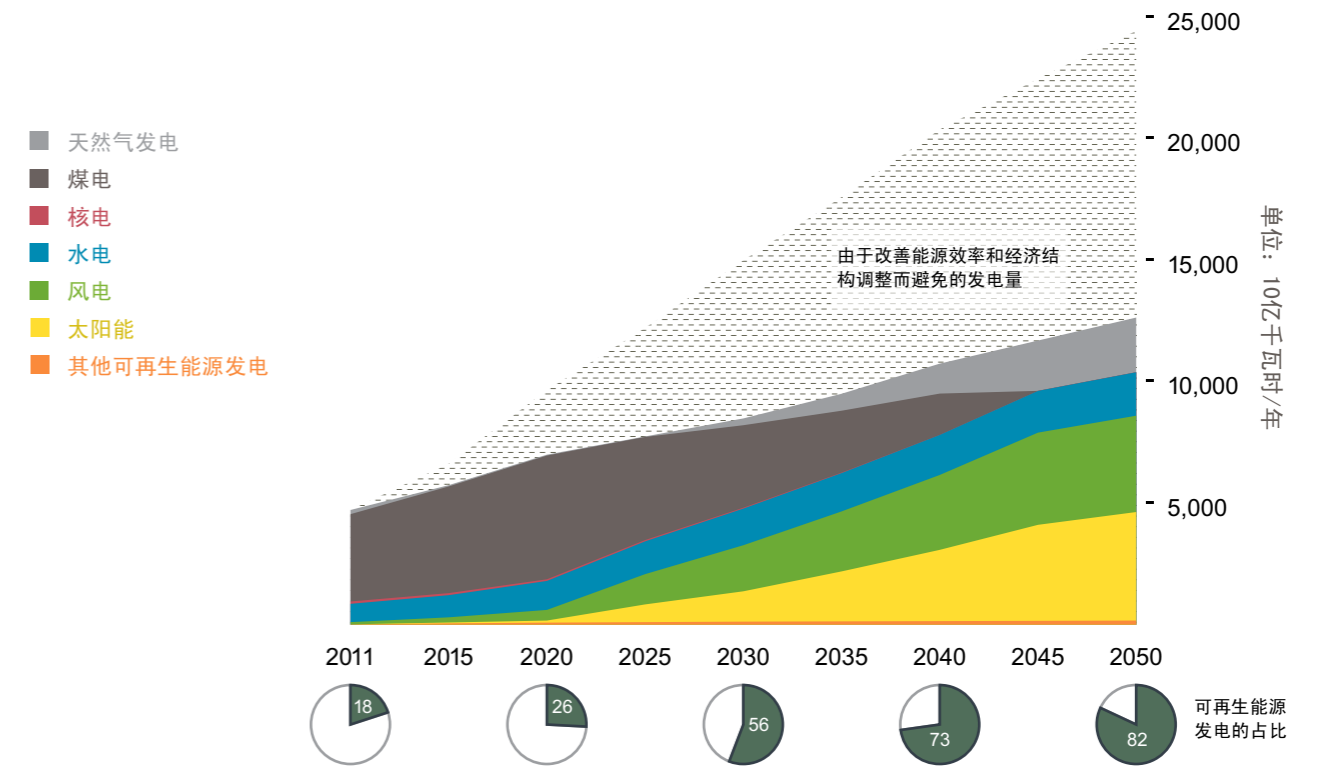


图 5b 高比例可再生能源情景的发电量

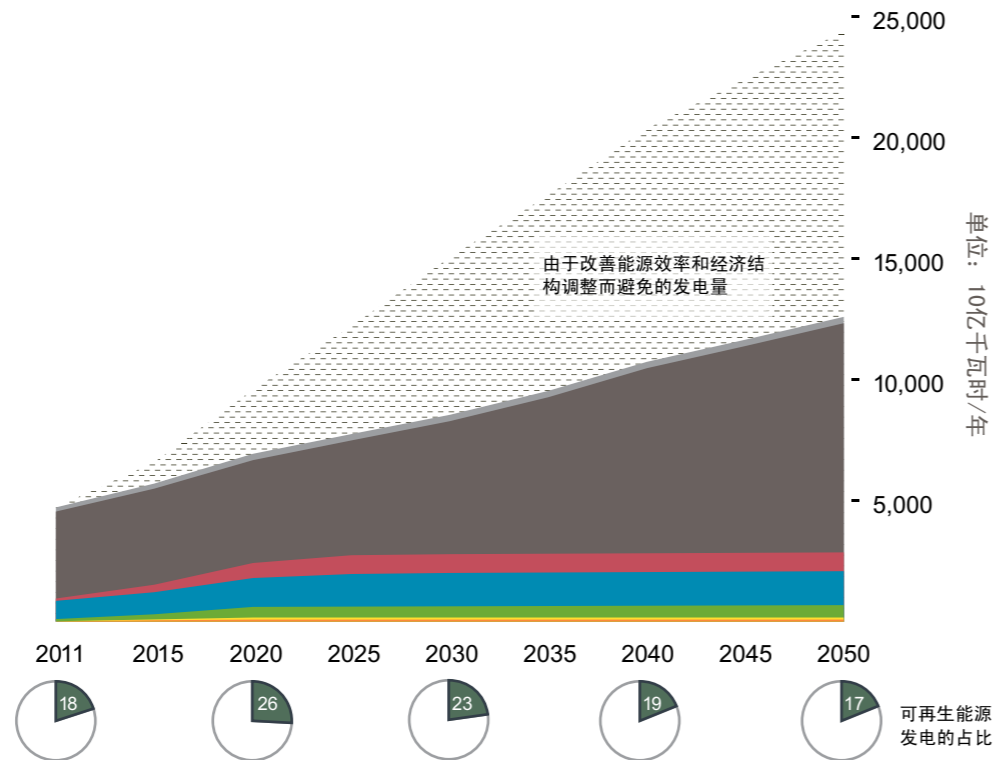
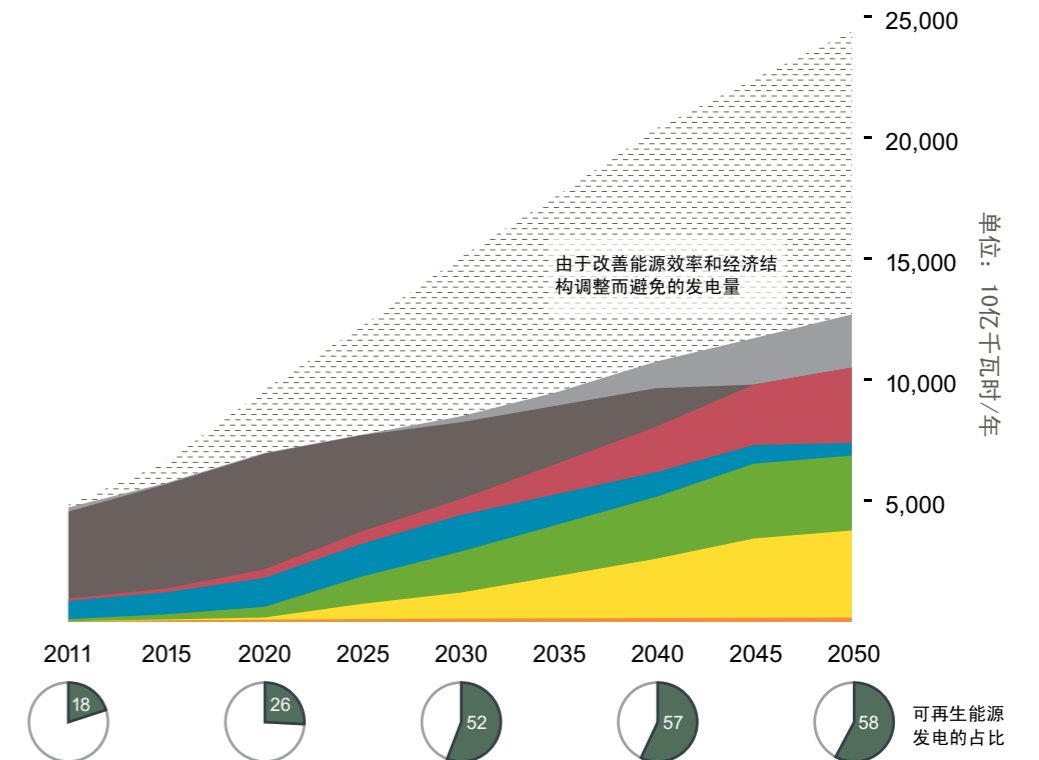


图 5d 低碳混合情景的发电量





## 中国转向低碳电力

在趋势照旧或者仅仅依靠市场力量时，低碳电力转型是不会发生的，诸多障碍包括：

- 发电、输电和配电的功能分割并不完全，会导致垄断行为。
- 电价并不反映发电和输电的完全成本。
- 发电和输电缺乏清晰的规则，并且现有规则的管理与实施也缺乏效率。
- 中国一系列针对燃料和发电技术的政策激励，要么互不一致，要么与提出的碳减排目标构成冲突。

从某些角度来看，中国政府表现出向未来实现低碳电力转型的真切意图，这包括对改善能源效率和可再生能源发电的导向。另一方面，中国政府也忽略了可能不利于实现这些意图的众多问题。

### 良好意图的体现

中国政府雄心勃勃地提出了提高整体能源效率和减少能源需求的目标。中国的“十二五”（2011至2015年）规划制定了能源强度比2010年降低16%的目标，同期碳强度也要降低17%。这一高层目标也作用于中国的电力部门，促进出台了一些实施方案来放缓电力需求的增长。

例如，中国国务院发布了各个行业和各个省份能源效率目标的详细行动方案<sup>39</sup>。政府在2010年还发布了需求侧管理（demand-side management, DSM）的法规，要求电网企业完成特定的节能目标，并且促进工厂、企业和居民开展能效投资<sup>40</sup>。法规还具体要求开展资源综合规划，确定开展能效投资的资金潜在来源，并且鼓励对节能进行监测和核证。需求侧管理的框架作为一种跳板，可以促进更多改善能效的激进措施，这对于实现可再生能源的未来是必要的。

几大碳排放交易的试点项目在十二五期间会开始运行，为2015年开启国家层面的交易做准备<sup>41</sup>。根据试点项目实施方式的不同，有可能显著增加投资、减少整个工业领域的用电需求，发电企业也可能加大投入，减少煤炭消耗<sup>42</sup>。

中国的目标与法规也促进了电力部门应用可再生能源技术。中国政府制定了2020年可再生能源（非化石能源）在一次能源消费比重中达到15%的目标，并且对于各项成熟的和研发中的可再生能源发电技术，中国还提出了装机容量增长的特定目标<sup>43</sup>。中国的可再生能源法<sup>44</sup>还促进出台了一些管理办法，包括特许权招标、上网电价、强制收购、以及近期所讨论的类似于可再生能源配额标准（比例目标）的机制等等，为非水电类可再生能源发电企业打造了稳定

的市场。中国政府还采取了投资补贴和税收优惠的政策，鼓励可再生能源技术的国内生产以及可再生能源发电技术的应用<sup>45</sup>。

2007年，中国政府开始考虑电力的“节能”调度，以促进可再生能源发电的并网<sup>46</sup>。这一规定（制定并试行）对电网企业做出要求，在可再生能源电力能够满足系统需求时首先加以利用，并且之后才能利用非可再生能源发出的电力。一方面，这一规定应当能够鼓励高效的可再生能源发电技术迅速并入电网；另一方面，这一规定对于大量投资于常规电力负荷的发电企业存在经济影响，使其难以落实<sup>47</sup>。

### 前路困难的体现

快速的经济增长伴随着快速增长的能源消费，使得中国政府有需要也有相应的资金来展示出不寻常的前瞻力，制定了降低能源强度并逐渐远离煤炭的计划。中国的电力体系具有集中和突出的特征，影响着实现改善能效或者低碳供电的进程，而增长迅速也使得中国的领导者们管理起来更加困难。

众多国有企业（state-owned enterprises, SOEs）掌握着中国所有的输配电业务、以及大部分的发电业务，运行起来有如不受管控的垄断企业<sup>48</sup>。国企领导们都是由中央政府任命的，但其业务运行却是在省级和地方层面。他们还逐渐与地方掌控的大部分非国有发电部门的政治领袖们联合起来，寻求诸多理由来应对中央政府的指令。中央政府缺乏独立的监管机构，监管国企行为并引导其实现国家的而非企业的目标<sup>49</sup>。

中国国家发改委肩负着中央政府管理电力体系的职能。国家发改委颁布能源政策、批准使用新技术、并制定技术和质量标准。其下设的国家能源局制定电力部门的政策、规划并且批复所有的电力投资项目；价格司管理电力价格。原国家电监会设立时间不长，曾经肩负多项责任但权力有限，其原有的众多职能，包括批准市场准入、设定服务责任和标准、实施相关法律、平衡区域电力、以及监管电力安全等，已经新近并入国家发改委。上述冗长的职能仅仅是国家发改委整个经济规划职能中的一小部分。在一个通常以寻求共识而非依靠规则运行的机构中执行某些决定，各种相互竞争的利益诉求最终往往掩盖了对于电力部门而言非常重要的问题。

我们的结论认为，这一机构困境会阻碍中国朝着低碳未来迈进，使得中国的电力部门无法朝着建立一个独立监管机构的方向改革，而这一改革却是倡导提高经济效率和环境可持续性的支持者所广泛认同的。充满竞争的电力市场最有可能纳入各种新的技术方案，但是如果不存在明确的规则、并且预期这些规则能够公平实施，那么就无法建立起这样的竞争性电力市场<sup>50</sup>。



近期，中国国务院和环境保护部发布了一项新的计划，以减少中国的空气污染水平。这一行动计划中包含的各项措施可能会增加、或者减少中国经济的碳强度<sup>51</sup>。关键的措施包括：

1. 将燃煤电站搬迁至中国的西部地区；
2. 除了山东省以及采用热电联产技术之外，中国东部地区禁止新建燃煤电站；
3. 以煤制气，作为天然气的替代燃料；
4. 除了应对高峰负荷和分布式发电模式外，禁止新建燃气电站；
5. 加快核电开发。

上述第一项和第三项措施，有可能掩盖了其它措施所实现的碳减排效益，并由此拉高中国一次能源和电力市场的整体碳强度水平。

## 政策建议

中国的领导者们似乎超乎寻常地关注包括电力政策在内的能源政策，看重其在打造可持续经济方面的作用。然而，引领人民过上更好生活所面临的诸多挑战，有可能使得这一诉求难以付诸实施。全球环境领域希望减缓气候变化的领袖们需要帮助中国的领导者维系上述诉求，并通过与之相匹配的强有力的行动来促进改善能源效率并发展低碳能源。强化电力体系的各项目标及其治理体系应当成为优先事项，我们提出如下一些建议。

### 将能源效率翻倍

关于可再生能源发电在电力供应中的作用，大部分乐观的预期都假定电力体系应用了所有成本有效的需求控制措施<sup>52</sup>，我们的高比例可再生能源情景也不例外。要实现这一目标，需要电力管理部门、供电商和电力用户开展前所未有的合作与协调，并且需要在多个领域采取行动。

中国的管理部门应当适时制定行业层面的强制技术标准。我们从模型中发现，从环境和经济的角度来看，中国未来电力体系少数的合理情景都依赖于落实强有力的节能政策法规，并且大力推行改善能效的技术和需求侧管理技术。要实现可再生能源或其它低碳的未来，任何合理的定价措施或激励机制都无法实现显著的效率水平改善，必须通过制定标准来实现<sup>53</sup>。（参见下文42页“让价格反映服务的成本”，并参见42页文本框2）

中央政府计划在2013年内为家电和设备制造商们出台更严格的标准，并一直延续到2020年。工业生产过程也可能颁布和更新众多标准，包括各类用电标准。这些标准需要尽可能地经常进行评估和修订，以便与国际最佳实践保持同

## 文本框2：必须以严格的标准来管理中国的电力需求

除非中国实施各项新的严格的设备标准，中国到2050年的电力消费可能增至4倍。即便标准实施，需求很可能翻倍或增长三倍。根据经济中各行业对于电力需求的比例，我们的高能效情景、高比例可再生能源情景以及低碳混合情景均做出如下预测：

行业	2010年	2050年
工业	69%	55%
商业	15%	28%
居民	13%	16%
其他	2%	1%

在高能效情景、高比例可再生能源情景以及低碳混合情景中，我们对三大情景制定以下原则：

- 工业能效标准至关重要，因为即便到2050年，工业仍然主导着用电需求。为了加以应对，我们的模型要求工业生产过程的用电效率必须每年提高3%。
- 电热水器的应用受到限制，使其为居民供应热水的比例不能超过15%。到2040年前，仅允许采用热水热泵，且“能源系数”必须达到2.35，而当前标准的电热水器的能源系数仅有0.86。对高峰用电需求的管理也部分源于将热水负荷能力限制在1.5千瓦，而美国目前的平均水平高达4千瓦。
- 居民和商业部门的空调也被要求提高“季节能效比”，从目前的14在2040年前提高到30。
- 居民照明在2040年的能效水平，需要达到当前最好的LED照明的水平，每个灯泡只有5瓦就相当于60瓦产生的流明。而相比之下，当前中国所采用的紧凑型荧光灯，其开启时能耗大约为15瓦。

步（甚至超越）。政府和供电单位必须把目光放到2050年，确定家电和设备在实现高效未来的过程中所需要做出的贡献，并与制造商们一起来开发、测试和应用这些产品，并且达到上述标准。



中国的领导者们应当指导国家电网公司和中国南方电网公司，将提升终端效率作为其服务的义务，摆在与系统可靠程度和安全性同样的地位。中国8760电网模型采用了众多改善能效的技术，在未来40年内省下了205万亿千瓦时的电力。根据中国当前的需求侧管理法规，这要求以电力销售量计的效率水平每年需要提高0.3%，最大负荷的效率提高也要达到0.3%。我们在模型中发现，上述政策设定的路径下，仅仅激励电网企业挖掘出10%的能效潜力。我们得出结论，认为中国需要每年将电力效率提高3%，并且应当把更多责任划分给电网企业。

在电力部门内，中国的电网企业应当复制应用“奥林匹克半岛项目”中的基本要素（见本文框3）。电网企业的智能电网专家们目前都强调投资长距离输电的重要性<sup>54</sup>，而对于有助于用户了解和控制用能需求的“智能电网”信息技术关注不够。“智能电网”信息技术有助于用户了解和控制用能需求，应当获得更多的关注。如果智能电网通讯和控制不能得到充分利用，从而管理和调平用电负荷的摇摆不定，那么未来中国经济所必要的结构调整将对电网带来额外的压力。

中央政府应当明确电网企业的各项规则，补偿其实施需求侧管理的成本。中国颁布的需求侧管理措施允许电网企业收回其相应的合理成本，但是尚未发布成本回收的管理规则。NDRC需要将其作为最优先的事项，这是由于供电单位负责人往往以没有明确的成本回收规则为理由，成为实施需求侧管理的一大障碍。NDRC应当认真考虑把成本回收原则与电网企业收入上限原则结合起来，使其增加电力销售量的激励能够转向通过降低成本来改善利润水平<sup>55</sup>。

### 在供电投资方面将减少碳排放作为最高的标准

向可再生能源为基础的电力体系转型需要从规划到运行的各个方面都有所转变。这一转型在任何国家都将是一大难以应对的挑战，但在中国这个近些年来以系统扩张为最优先事项的国家，可能尤其困难。

中国中央政府应当采取诸如碳排放标准等政策，大规模减少燃煤发电，从而使其以煤电为基础的供电体系能转向低碳的体系。为了鼓励电力生产商和用户以低碳能源发电并且减少电力生产消费总量，政府所能做的也就是几大事项。这包括了开展研发、价格改革、激励投资（包括对清洁能源减免税收和对高碳能源征收税收）、制定法律法规等。我们的模型指出，对碳排放制定40美元一吨的碳税能够使得新建燃煤电站在2025年左右不再具有竞争力，但是不大可能使得众多现有的燃煤电厂得以关闭<sup>56</sup>。

## 文本框3: 奥林匹克半岛智能电网示范项目

美国西北部多个供电单位、配电商以及研究机构结成联盟，与居民、商业、市政、甚至是分布式发电用户一起，测试了电力负荷的转换。他们发现，采用现有技术和创新性的激励政策，就可以“轻易地”并且可预见地减少20%的电力负荷。

针对居民用户，他们采用了分时电表、采暖和制冷体系的恒温调节器、电热水器开关、以及衣物烘干机开关，所有这些设备都内置了与当地供电单位保持通讯、并对信号做出响应的装置。这一技术同时还要求家中装有宽带网络服务。

这一技术按照用户的偏好，为其提前选择的恒温调节器和各种开关等设备设定了程序，使其能够通过合同约定的某种方式，对供电单位发出的信号做出响应。比如，一个空调恒温装置可被设定能够对信号做出响应，以便为用户赢得最大利益，或者也可被设定为忽略供电单位的任何节电要求。即一个家庭恒温器能够对供电单位的负荷调节信号做出响应，允许温度提高几度，或者仅允许提高一度，或者也能不做出任何响应。如果电网遇到了用电高峰负荷，电脑将会对恒温调节器发出信息，询问其是否愿意以及愿意节省多少用电。而恒温器做出的反应也就决定了该用户能够从供电单位“获得”多大的收益。

这一激励方案根据供电单位和用户间的合同而实施，供电单位每月会向用户的银行账户支付费用。在每个月的月初，奥林匹克半岛项目将会把150美元存入每个参与项目的居民用户的账户。电网能够呼吁其用户将他或她的用电调整至另一时段，上述资金激励就反映出这对于电网企业的价值。如果被选到的用户不对电网公司的电脑问询做出调整其空调恒温器的反馈，那么用户账户就会被扣减掉一笔事先约定的费用。那些绝不希望其空调设备受到影响的用户就比那些更加灵活的用户获取的收益要少，而灵活的用户们可能当天都不在家中。此外，希望完全掌握空调设备的用户们仍然能够省钱，只需采取诸如改变烘干衣物、或者清洗餐具的时间段等措施即可。

给整个系统提供相应支持对于项目取得成功是很重要的，比如对于用户的宣传教育和市场营销措施。一直跟踪关注这一项目的研究人员注意到，许多用户甚至不知道家中热水到底是用电还是用天然气加热的，一些用户不知道他们用的是宽带上网服务还是拨号上网服务。由此，用户参与该项目基本是根据其参与负荷调节项目的信息宣贯，以及供电单位代表的家庭访问而确定的。此外，所有的设备都由供电单位免费提供。

该项目有效地建立起一个各种信号与反馈每隔5分钟就进行“交互”的基本自动化的市场。更积极的参与意味着能够获得大量的资金收益，也就是在负荷调整中有更活跃的互动。

该项目的成功，部分原因在于激励方案的设计利用了最新的一项行为科学的验证事实，即比起要省下同样数量的金钱而言，人们更有动力去避免失去到手的金钱。在最初把钱交给用户并让其意识到这是他们有可能会失掉的钱，用户们就变得更有动力参与项目了。项目的评估员们认为用户们“热切地接受并参与了对价格做出反馈的合同选项”。

一些城市政府、供电单位、甚至是分布式发电系统也对商业建筑的供热、制冷、照明负荷等开发了类似项目，甚至包括对气泵或者其他大型的和灵活的电力负荷。

来源: D. J. Hammerstrom, et al, "Pacific Northwest Gridwise Testbed Demonstration Projects, Part I: Olympic Peninsula Project," Pacific Northwest National Laboratory, October 2007.





两大观察支持着我们得出上述结论。首先电力需求的收入弹性系数相当高，即电力消费的增幅接近一个国家的GDP增速。其次，现实世界中存在难以克服的一种作用力，依靠（或者至少单靠）价格改革或激励机制都无法克服<sup>57</sup>，也即：相对较高的需求增长将会掩盖掉相对较低的需求价格弹性，除非碳税使得电力价格翻倍或涨至三倍。

我们建议中国国务院制定与美国清洁空气法案相似的标准<sup>58</sup>。为了避免建设高碳排放的新电源，制定明确且能够落实的标准有可能是最有效的，不管这一标准被打造成对煤电的禁令、对清洁能源的激励政策、还是某种人体健康的标准。

附件三另外给出了另外一种情景，以煤炭而不是天然气作为可再生能源发电的备用电源。在该情景中，碳排放显著增加，总成本也提高了约1000亿美元。这一情景（以中国当下的政策为基础）假定，煤制气被用作替代电源的发电燃料。同时，采用碳捕集和封存技术有可能减少碳排放，但是即便技术证明有效，仍然有可能使得总成本增加数千亿美元。

国家发改委应当制定规划，大力开发天然气。国务院最近决定，在污染严重的众多城市，不再以天然气作为基础负荷，而是用做解决高峰负荷和区域供热的方案<sup>59</sup>。我们的情景分析指出，化石能源在数十年内还会提供中国大部分的电力，而天然气相比煤炭有两大优点：是碳排放更低的化石燃料；且在用电高峰期能够有效供电，因此能够对可再生能源发电的不稳定性做出很好的响应。国家发改委需要同电网企业和发电企业一道，鼓励使用天然气；并且确保中国的天然气基础设施得到改善，同时支持对中国的常规和非常规气源的研究。我们的情景分析表明，中国未来以可再生能源为主导的电力体系，需要像天然气发电这样的可调度电源。我们同时强调，在中国开发非常规气并不一定意指采用“压裂”技术或开发页岩气，中国可能拥有1500万亿焦耳的“煤层气”资源，足以支撑整个电力行业运行数十年<sup>60</sup>。

国家发改委应当把系统灵活性作为智能电网发展的一大优先考虑因素。电网企业在长距离输电线路建设上表现出浓厚的兴趣，使得偏远地区也能通过长距离输送而获得电力服务。他们在可再生能源电力并网等其他各关键问题上的兴趣就不那么明确了，比如以电网连接起邻近的和偏远的地区；对风能和太阳能进行更好的资源预报；更好地利用各储能方案等等。电网企业需要同时敏锐地关注电力服务的供给与需求，国家发改委需要与电网企业密切合作，确保在制定输电规划时，积极主动地考虑到未来电力体系将以可再生能源为主导。



中央政府应当调整针对可再生能源发电的补贴政策，使其更加有效。中国在可再生能源发电补贴上的做法存在两大缺陷：一是鼓励了项目建设，但未鼓励项目运行；二是补贴未能及时发放到发电企业。

“弃风”或者“限制风电并网”就体现出第一个问题。风场的建造者根据其装机容量和发电量获得补贴，而不是仅仅基于其实际向电网输送的电量。一旦与电网单位协调不畅，风力发电就经常被浪费掉。在内蒙古东部，多达30%的风力发电可能都被浪费掉了，而中国限制风电并网的平均比例达到发电量的17%，算下来在2012年就有200亿千瓦时<sup>61</sup>。需要重新设计补贴，使其至少部分以有效输送到位的实际电量为依据。与此同时，必须监管好电网企业，确保其不得以供电变化大为由，这对于未来利用可再生能源发电是非常必要的。

在中国，对太阳能光伏发电商及时支付补贴，尤其成为一大问题<sup>62</sup>。该补贴数额的制定依据，虽然是发电千瓦时数而非装机千瓦量，但是发电商有时要等上两年多才能得到其赖以确保项目融资的补贴。一些企业由于等待补贴来兑现其法律责任，甚至走向了破产。国家发改委、财政部以及地方政府之间进行确切的测算和协调，对于解决这一问题是有必要的。

### 让价格反映服务的成本

国家发改委应当考虑对商业和居民用户征收容量电费<sup>63</sup>。为了实现中国的长期环境目标，工商业和居民都应当意识到、并且支付电力服务的完全成本。中国的工业用电户已经需要支付“容量电费”，这一费用是根据一段时间内（通常为一年或一个月）向电网体系需要的最大用电负荷（或者千瓦数）来确定的，并且是每千瓦时用电量价格之外的费用。

电网承担着确保系统可靠的责任，因此要求电网企业具备最大的电源容量水平，以满足某些瞬间的用电需求，比如在每年最热的时期，所有居民空调都开启，加上各个工厂仍然繁忙倒班运行。中国的用电高峰，通常都出现在每年七八月份工作日的下午4点钟左右。在过去10年里，电网的平均用电负荷大约只有所有发电装机能力的一半左右，即便是高峰负荷平均也只占到潜在负荷总量的75%。随着高比例用电需求逐渐转型，从相对稳定的工业用电转向“峰值明显”的民用和商业用电之后，这些比率还可能下降，反映出整个社会每日的生活习惯。容量电费鼓励居民用户和商业用户更好地管理其用电需求，或者能

为供电单位提供资金，使其应用智能电网技术，减少电网负荷曲线上峰谷间的振幅<sup>64</sup>。

我们估计通过价格改革和用电高峰管理，2050年商业和居民的电力装机需求可能分别减少6000万千瓦和2000万千瓦以上。这一数量等于当前高峰负荷需求的10%，单是省下的资金成本就至少高达800亿美元<sup>65</sup>。

中央政府应当重新设计其竞争性电力批发市场<sup>66</sup>。中国早先对于竞争性电力批发市场的试验未能成功，原因很多，包括试验地区发电企业所有权过度集中、过度依赖单一的电力来源（煤炭）、以及电力价格不能出现任何波动。新近强调以可再生能源发电，尤其解决了电源多样性的问题。输电系统的扩大，可能有助于解决省内发电企业所有权过度集中的问题。中国似乎适时需要在更多关注已知问题的情况下，重新设计相关的试验示范。比较理想的情况下，这些试验示范可能扩展到包含多项市场创新，尤其是促进改善能源效率和可再生能源发电。这类创新措施可能还包括：鼓励竞争性地提供基础负荷中的负瓦\*、亦或是高峰时段可调峰的负荷，以及扩展直购电的用户规模，允许他们从发电商直接购买电力服务。

### 搜集、出版和分析有用的数据

中国政府掌握且并未公开大部分电力资源和系统资产方面的数据，这些数据对于有效分析系统能力和成本有效性是非常必要的。此外，政府还没有收集（或至少没有发布）有关迈向可再生能源未来进程的系统性数据。中国政府更加公开透明将促进开展更多的内外分析，有助于打造一个更加可持续的电力体系。

中国的电网企业应当提高其机构能力，使得可再生能源电力项目能得以运行并且监测其绩效。电网企业从其最初的可再生能源电力试验项目中学到的越多，他们就更能避免重复失败的试验和浪费稀缺的资源。诸如近期对建筑一体化太阳能技术<sup>67</sup>的评估等措施，应当在整个电力部门加以鼓励。国务院应当鼓励中国的学校和企业培养需要的人力资源，以期获得长期成果。

中央政府需要搜集和发布必要的的数据，以便严格开展环境影响评价。所有的能源供应方案都存在环境成本，即便是可再生能源。在中国，政府圈子以外很少能得到评估这些成本所必要的的数据，更不用说这些数据是否有所搜集。中国

\* 一种理论上的对避免用能或者节能量的度量（以瓦计）

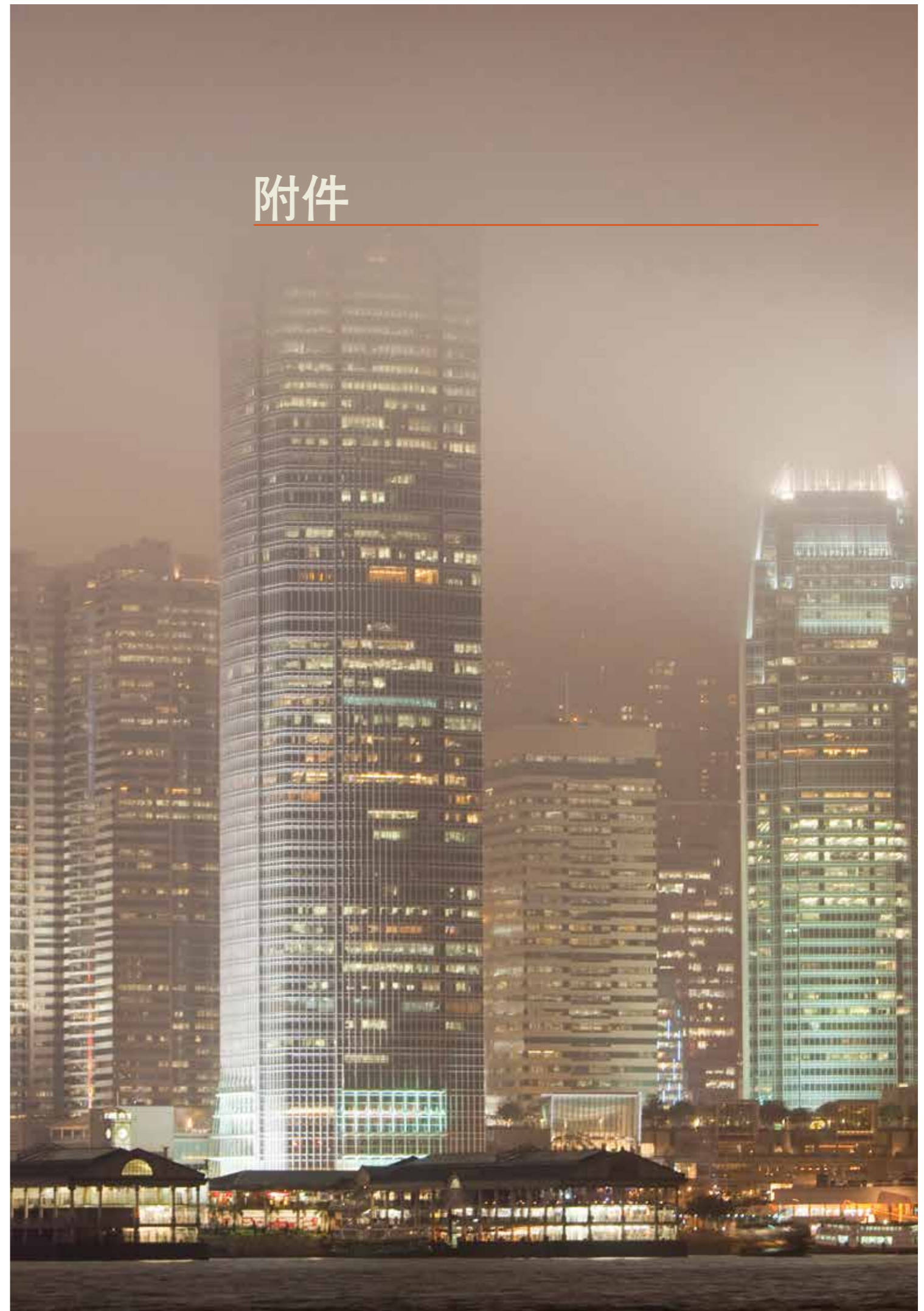


的非政府组织存在推动减少碳排放的动力，但是不应该使其掩盖了众多低碳能源供给方案所带来的其他真切的威胁。政府和非政府组织应当通力合作，加大数据搜集和发布。

官方选择要搜集数据的过程同样需要改善。如果没有考虑和报告出可以减缓特定项目环境成本的技术替代方案，中国的环境影响评价也就轻视了项目的环境成本<sup>68</sup>。这一轻视在水电的案例中尤其糟糕，而水电也是中国在近期和远期完成其低碳能源目标的最主要措施。尽管水电会产生极大的国内和国际环境影响，中国的水电项目仅仅只进行了非常仓促粗略的环境评估<sup>69</sup>。我们的情景分析指出，在中国整体规划的大背景以及对特定建设项目进行评估以后，存在一些成本有效并且能够替代水电的项目，值得加以考虑。中国应当利用现有的框架，对于所有能源相关的建设项目，更严格地执行环境影响评估的各项规定。

**政府部门的各项政策和报告中，应当反映出发电量和输电量（千瓦时）的数据，而非仅仅提及装机容量（千瓦）的数据。**政府往往采用可再生能源发电的装机容量（千瓦）的数据，以此反映其制定的目标和取得的成果。这种关注助长了诸多众所周知的问题，诸如一些风电装机从未与电网连接起来；同时一些新的问题也浮现出来，比如随着可再生能源电力上网的增加，一些能确保系统安全可靠的技术存在投资不足的现象。可再生能源电力的发电量和输送到用户的实际电量之间存在差距，公布这一差距对于系统改进可能起到有益的影响。与此同时，电网企业有可能以需要开展更多工作为理由，拒绝并网多变的电力电源，这些理由包括需要制定调度计划、预测发电状况和整合各类资源等等。因此，监管电网企业也是必不可少的。

## 附件





来源: Entri为中国8760电网模型而编整

基年——2011年	
人口与经济的各项假设	
人口 (百万)	1,347
人口增长率	
2011-2015	0.004
2016-2020	0.003
2021-2025	0.001
2026-2030	-0.003
2031-2040	-0.003
2041-2050	-0.003
居民户数 (百万)	404
城镇居民户比例	
2011-2015	0.5
2016-2020	0.63
2021-2030	0.7
2031-2040	0.74
2041-2050	0.79
经济领域的各个假定	
汇率	6.25
现率	0.1

### 各项技术参数

各项技术参数 2011	转化效率 (比率)	容量系数的历史数值 (比率)	燃料成本 (人民币元/兆焦耳)	运行维护成本 (人民币元/千瓦时)	使用寿命 (年)	燃料碳含量 (千克碳/兆焦耳)	自用电比例 (%)
光伏发电 (3000千瓦)	0.15	0.17	N/A	0.19	20	0	0.8
太阳能集热发电	0.15	0.6	N/A	0.19	20	0	0.8
陆上风电	1	0.22	N/A	0.07	20	0	0.8
海上风电	1	0.22	N/A	0.12	20	0	0.8
大规模水电	1	0.4	N/A	0.06	30	0	1.5
小规模水电	1	0.4	N/A	0.06	30	0	1.5
地热发电	1	0.5	N/A	0.34	20	0	6
生物质发电	0.2	0.46	21	0.11	30	20	17.8
亚临界煤电	0.38	0.6	28	0.05	30	25	7
掺烧生物质的亚临界煤电	0.38	0.6	38	0.05	30	20	7
超临界煤电	0.44	0.6	28	0.03	30	25	5.2
超临界煤电	0.44	0.6	28	0.04	30	25	6.3
整体煤气化联合循环发电外加碳捕集与封存技术	0.39	0.6	28	0.09	20	25	30
核电	0.33	0.89	15	0.09	30	0	6.8
燃气发电, 调峰负荷	0.49	0.23	62	0.08	20	14	2
燃气发电, 基础负荷	0.49	0.6	62	0.04	20	14	2

### 各项技术展望 (每年的变化幅度)

各项技术展望	转化效率 (年度变化幅度)	资金投入成本 (年度变化幅度)	燃料成本 (年度变化幅度)	运行维护成本 (年度变化幅度)
光伏发电 (3000千瓦)	0.004	-0.031	N/A	-0.033
太阳能集热发电 (3万千瓦)	0.01	-0.021	N/A	-0.017
陆上风电 (3万千瓦规模)	0	-0.007	N/A	-0.007
海上风电 (3万千瓦规模)	0	-0.009	N/A	-0.009
大规模水电	0	0.02	N/A	0
小规模水电	0	0.02	N/A	0
地热发电	0.01	-0.008	N/A	-0.012
生物质发电 (2.5万千瓦)	0.01	-0.006	0.02	-0.005
亚临界煤电	0	0	0.02	0.02
掺烧生物质的亚临界煤电	0	0.01	0.02	0.02
超临界煤电 (100万千瓦)	0.01	0.01	0.02	0.02
超临界煤电 (60万千瓦)	0.01	0.01	0.02	0.02
整体煤气化联合循环发电外加碳捕集与封存技术 (100万千瓦)	0.01	0	0.02	0.02
核电	0	-0.003	0.02	-0.003
燃气发电, 调峰负荷	0.01	0.01	0.02	0.02
燃气发电, 基础负荷	0.01	0.01	0.02	0.02



## 各项节电技术的各种假设

居民部门基本数据	
2050年的城市化水平	0.79
2040年城镇家庭户规模	2.55 人/户
2040年城镇家庭户规模	3.2 人/户
城镇家庭每户住房面积每年增长幅度, 达到120平米之前	0.02
城镇家庭每户住房面积每年增长幅度, 达到120平米之后	0.01
农村家庭每户住房面积每年增长幅度, 达到200平米之前	0.02
农村家庭每户住房面积每年增长幅度, 达到200平米之后	0.01
居民热水	
资金投入成本	300 美元/户
使用寿命	10 年
电热水器的平均功率	1.5 千瓦/台
2040年城镇中电热水器的市场份额	0.3
2040年农村中电热水器的市场份额	0.3
2040年城镇中居民户热水的基本用量	70 升/户/日
2040年农村中居民户热水的基本用量	70 升/户/日
2040年政策情景中电热水器的能源系数	2.35
2011年城镇中高峰时段省电措施的普及率	0.2
城镇中高峰省电措施的增长率	0.1
2011年农村中高峰时段省电措施的普及率	0.2
农村中高峰省电措施的增长率	0.1
高峰时段省电措施的成本	100 美元/台
居民空调	
资金投入成本	160 美元/台
使用寿命	15 年
2040年基准情景下的平均功率	2 千瓦/台
2040年政策情景下的平均功率	1.5 千瓦/台
2040年基准情景下的SEER (季节能效比)	15
2040年政策情景下的SEER	30
2040年的运行小时数	1,080 小时/年
高峰时段省电措施的资金投入成本	100 美元/台
2010年采用开关调节的比例	0.1
开关调节省电措施的年增长率	0.05

## 各项节电技术的各种假设 (续)

居民照明	
LED照明的资金投入成本	5 美元/台
使用寿命	20 年
2040年的运行小时数	1,825 小时/台/年
每个居民户灯泡数量的增长率	0.01
紧凑型荧光灯的功率	0.015 美元/台
LED照明的功率	0.005 美元/台
LED照明成本的降低	0
2010年LED照明的替代率	0.1
LED照明的增长率	0.2
商业照明	
资金投入成本	19 美元/台
使用寿命	20 年
2040年照明的电力消费量	36 千瓦时/平方米/年
2040年的运行小时数	3,500 小时/台/年
2040年政策情景的平均功率	0.01 千瓦/台
商业空调	
资金投入成本	308 美元/台
使用寿命	20 年
2040年电力消费量	42 千瓦时/平方米/年
2040年的运行小时数	3,500 小时/台/年
2040年基准情景下的SEER	13
2040年政策情景下的SEER	30
高峰时段省电措施的资金投入成本	20 美元/台
2010年采用开关调节的比例	0.1
开关调节省电措施的年增长率	0.05
工业	
每年的能效改善幅度	0.03
在某些效率水平下的节能成本	
效率水平	
<0.1	0.1 元每千瓦时
0.1-0.2	0.2 元每千瓦时
0.2-0.3	0.3 元每千瓦时
0.3-0.4	0.4 元每千瓦时
0.4-0.5	0.5 元每千瓦时
0.5-0.6	0.6 元每千瓦时
0.6-0.7	0.7 元每千瓦时



## 基准情景

	2011 <sup>70</sup>	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	加总
电力总需求 (10亿千瓦时/年)	4,693	6,155	8,952	11,413	14,063	16,466	19,028	20,950	22,788	622,538
装机容量 (百万千瓦)	1,019	1,429	2,097	2,616	3,174	3,679	4,216	4,619	5,004	139,269
发电总成本 (10亿元人民币)	1,708	2,689	4,197	5,548	7,241	9,090	11,328	13,525	15,989	356,577
输电总成本 (10亿元人民币/年)	115	194	287	360	441	516	595	655	712	19,377
采取减少电力需求/负荷措施的成本 (10亿元人民币/年)	N/A	0	0	0	0	0	0	0	0	0
储电的成本 (10亿元人民币/年)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
所有措施的总成本 (10亿元人民币/年)	1,824	2,883	4,484	5,908	7,682	9,606	11,924	14,180	16,701	375,953.9
人口 (百万)	1,347	1,369	1,386	1,393	1,374	1,355	1,337	1,319	1,300	N/A
人均国内生产总值 (以2010年美元计价)	5,549	6,308	8,737	10,880	13,420	15,927	18,720	21,160	23,687	N/A
人均用电需求 (千瓦时)	3,484	4,497	6,459	8,192	10,234	12,149	14,234	15,889	17,523	N/A
二氧化碳排放量 (百万吨/年)	2,766	3,638	4,915	6,254	8,087	9,767	11,560	12,901	14,183	370,347.0
电力需求增长速度和GDP增长速度的比率	1.00	1.00	1.04	1.06	1.07	1.07	1.07	1.05	1.04	N/A
<b>发电装机容量 (百万千瓦)</b>										
太阳能光伏发电 (3兆瓦)	3	20	47	47	47	47	47	47	47	N/A
太阳能集热发电 (3万千瓦)	0	1	3	3	3	3	3	3	3	N/A
陆上风电 (3万千瓦规模)	48	95	170	170	170	170	170	170	170	N/A
海上风电 (3万千瓦规模)	0	5	30	30	30	30	30	30	30	N/A
大规模水电	157	192	265	300	300	300	300	300	300	N/A
小规模水电	58	68	75	84	93	95	97	98	100	N/A
地热发电	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N/A
生物质发电 (2.5万千瓦)	2	13	20	20	20	20	20	20	20	N/A
亚临界煤电	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N/A
掺烧生物质的亚临界煤电	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N/A
超临界煤电 (100万千瓦)	707	955	1,357	1,812	2,361	2,864	3,399	3,801	4,184	N/A
超临界煤电 (60万千瓦)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N/A
整体煤气化联合循环发电外加碳捕集与封存技术 (100万千瓦)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N/A
核电	13	40	80	100	100	100	100	100	100	N/A
燃气发电, 调峰负荷	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N/A
燃气发电, 基础负荷	33	40	50	50	50	50	50	50	50	N/A
总量	1,019	1,429	2,097	2,616	3,174	3,679	4,216	4,619	5,004	N/A
<b>各种发电装机 (发电量, 10亿千瓦时)</b>										
太阳能光伏发电 (3兆瓦)	4	30	70	70	70	70	70	70	70	524
太阳能集热发电 (3万千瓦)	0	5	16	16	16	16	16	16	16	116
陆上风电 (3万千瓦规模)	91	202	373	383	393	404	414	424	435	3,120
海上风电 (3万千瓦规模)	0	11	66	68	69	71	73	75	77	509
大规模水电	549	671	929	1,051	1,051	1,051	1,051	1,051	1,051	8,456
小规模水电	203	240	263	294	326	332	338	344	350	2,691
地热发电	0	0	1	1	1	1	1	1	1	7
生物质发电 (2.5万千瓦)	7	52	80	80	80	80	80	80	80	619
亚临界煤电	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
掺烧生物质的亚临界煤电	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
超临界煤电 (100万千瓦)	3,590	4,852	6,896	9,206	11,997	14,549	17,272	19,310	21,258	108,930
超临界煤电 (60万千瓦)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
整体煤气化联合循环发电外加碳捕集与封存技术 (100万千瓦)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
核电	98	311	622	777	777	777	777	777	777	5,693
燃气发电, 调峰负荷	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
燃气发电, 基础负荷	172	210	263	263	263	263	263	263	263	2,221
可再生能源发电量比例	0.18	0.18	0.19	0.16	0.13	0.11	0.10	0.09	0.09	N/A
总量	4,714	6,584	9,577	12,209	15,043	17,614	20,355	22,411	24,377	132,886

## 高效情景

	2011	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	加总
电力总需求 (10亿千瓦时/年)	4,693	5,329	6,476	7,238	7,982	8,907	10,028	10,883	11,766	366,510
装机容量 (百万千瓦)	1,019	1,255	1,576	1,737	1,894	2,087	2,321	2,499	2,683	85,363
发电总成本 (10亿元人民币)	1,708	2,362	3,163	3,693	4,293	5,087	6,120	7,158	8,365	209,754
输电总成本 (10亿元人民币/年)	115	169	211	232	254	283	318	345	373	11,505
采取减少电力需求/负荷措施的成本 (10亿元人民币/年)	N/A	171	558	1,188	2,112	3,427	4,597	6,498	7,841	131,967.9
储电的成本 (10亿元人民币/年)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
所有措施的总成本 (10亿元人民币/年)	1,824	2,702	3,932	5,113	6,659	8,798	11,036	14,001	16,580	353,226
人口 (百万)	1,347	1,369	1,386	1,393	1,374	1,355	1,337	1,319	1,300	N/A
人均国内生产总值 (以2010年美元计价)	5,549	6,308	8,415	10,381	12,805	15,795	19,484	23,123	27,178	N/A
人均用电需求 (千瓦时)	3,484	3,894	4,673	5,195	5,809	6,572	7,501	8,254	9,047	N/A
二氧化碳排放量 (百万吨/年)	2,766	3,001	3,099	3,306	3,794	4,430	5,205	5,793	6,400	188,973.1
电力需求增长速度和GDP增长速度的比率	1.00	0.87	0.78	0.70	0.64	0.58	0.54	0.50	0.47	N/A
<b>发电装机容量 (百万千瓦)</b>										
太阳能光伏发电 (3兆瓦)	3	20	47	47	47	47	47	47	47	N/A
太阳能集热发电 (3万千瓦)	0	1	3	3	3	3	3	3	3	N/A
陆上风电 (3万千瓦规模)	48	95	170	170	170	170	170	170	170	N/A
海上风电 (3万千瓦规模)	0	5	30	30	30	30	30	30	30	N/A
大规模水电	157	192	265	300	300	300	300	300	300	N/A
小规模水电	58	68	75	84	93	95	97	98	100	N/A
地热发电	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N/A
生物质发电 (2.5万千瓦)	2	13	20	20	20	20	20	20	20	N/A
亚临界煤电	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N/A
掺烧生物质的亚临界煤电	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N/A
超临界煤电 (100万千瓦)	707	781	836	933	1,081	1,272	1,504	1,681	1,863	N/A
超临界煤电 (60万千瓦)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N/A
整体煤气化联合循环发电外加碳捕集与封存技术 (100万千瓦)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N/A
核电	13	40	80	100	100	100	100	100	100	N/A
燃气发电, 调峰负荷	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N/A
燃气发电, 基础负荷	33	40	50	50	50	50	50	50	50	N/A
总量	1,019	1,255	1,576	1,737	1,894	2,087	2,321	2,499	2,683	N/A
<b>各种发电装机 (发电量, 10亿千瓦时)</b>										
太阳能光伏发电 (3兆瓦)	4	30	70	70	70	70	70	70	70	524
太阳能集热发电 (3万千瓦)	0	5	16	16	16	16	16	16	16	116
陆上风电 (3万千瓦规模)	91	202	373	383	393	404	414	424	435	3,120
海上风电 (3万千瓦规模)	0	11	66	68	69	71	73	75	77	509
大规模水电	549	671	929	1,051	1,051	1,051	1,051	1,051	1,051	8,456
小规模水电	203	240	263	294	326	332	338	344	350	2,691
地热发电	0	0	1	1	1	1	1	1	1	7
生物质发电 (2.5万千瓦)	7	52	80	80	80	80	80	80	80	619
亚临界煤电	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
掺烧生物质的亚临界煤电	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
超临界煤电 (100万千瓦)	3,590	3,968	4,247	4,740	5,493	6,464	7,644	8,540	9,466	54,153
超临界煤电 (60万千瓦)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
整体煤气化联合循环发电外加碳捕集与封存技术 (100万千瓦)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
核电	98	311	622	777	777	777	777	777	777	5,693
燃气发电, 调峰负荷	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
燃气发电, 基础负荷	172	210	263	263	263	263	263	263	263	2,221
可再生能源发电量比例	0.18	0.21	0.26	0.25	0.23	0.21	0.19	0.18	0.17	N/A
总量	4,714	5,701	6,928	7,743	8,539	9,529	10,727	11,642	12,586	78,109



## 高比例可再生能源情景

	2011	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	加总
电力总需求 (10亿千瓦时/年)	4,693	5,361	6,534	7,232	7,926	8,874	10,034	10,921	11,804	366,900
装机容量 (百万千瓦)	1,019	1,295	1,639	2,121	2,607	3,230	3,948	4,740	5,063	128,299
发电总成本 (10亿元人民币)	1,708	2,284	2,991	3,810	4,544	5,441	6,391	7,392	8,176	213,419
输电总成本 (10亿元人民币/年)	115	179	231	336	420	519	629	739	786	19,774
采取减少电力需求/负荷措施的成本 (10亿元人民币/年)	N/A	173	571	1,184	2,021	3,249	4,364	6,251	7,684	127,492.3
储电的成本 (10亿元人民币/年)	0	0	0	0	7	7	13	17	18	302.6
所有措施的总成本 (10亿元人民币/年)	1,824	2,636	3,793	5,331	6,992	9,216	11,397	14,399	16,664	360,987.7
人口 (百万)	1,347	1,369	1,386	1,393	1,374	1,355	1,337	1,319	1,300	N/A
人均国内生产总值 (以2010年美元计价)	5,549	6,308	8,415	10,381	12,805	15,795	19,484	23,123	27,178	N/A
人均用电需求 (千瓦时)	3,484	3,917	4,714	5,191	5,768	6,548	7,506	8,283	9,077	N/A
二氧化碳排放量 (百万吨/年)	2,766	3,247	3,598	2,920	2,456	2,029	1,638	778	836	101,143.8
电力需求增长速度和GDP增长速度的比率	1.00	0.87	0.79	0.70	0.63	0.58	0.54	0.50	0.47	N/A
发电装机容量 (百万千瓦)										
太阳能光伏发电 (3兆瓦)	3	20	47	235	388	649	932	1,263	1,377	N/A
太阳能集热发电 (3万千瓦)	0	1	3	72	128	207	293	394	459	N/A
陆上风电 (3万千瓦规模)	48	95	170	507	759	950	1,147	1,373	1,374	N/A
海上风电 (3万千瓦规模)	0	5	30	45	60	89	118	146	175	N/A
大规模水电	157	192	265	301	337	355	374	392	410	N/A
小规模水电	58	68	75	84	93	95	97	98	100	N/A
地热发电	0	0	0	0	1	1	1	1	2	N/A
生物质发电 (2.5万千瓦)	2	13	20	25	30	33	35	38	40	N/A
亚临界煤电	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N/A
掺烧生物质的亚临界煤电	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N/A
超临界煤电 (100万千瓦)	707	863	1,002	835	668	501	334	0	0	N/A
超临界煤电 (60万千瓦)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N/A
整体煤气化联合循环发电外加热捕集与封存技术 (100万千瓦)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N/A
核电	13	11	9	7	5	3	0	0	0	N/A
燃气发电, 调峰负荷	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N/A
燃气发电, 基础负荷	33	26	18	10	140	349	617	1,036	1,126	N/A
总量	1,019	1,295	1,639	2,121	2,607	3,230	3,948	4,740	5,063	N/A
储能	0	0	0	0	9	9	17	22	23	N/A
各种发电装机 (发电量, 10亿千瓦时)										
太阳能光伏发电 (3兆瓦)	4	30	70	350	578	966	1,388	1,880	2,051	7,317
太阳能集热发电 (3万千瓦)	0	5	16	379	670	1,089	1,542	2,068	2,412	8,183
陆上风电 (3万千瓦规模)	91	202	373	1,143	1,756	2,256	2,794	3,427	3,514	15,557
海上风电 (3万千瓦规模)	0	11	66	101	139	211	286	365	448	1,626
大规模水电	549	671	929	1,055	1,181	1,245	1,309	1,373	1,437	9,747
小规模水电	203	240	263	294	326	332	338	344	350	2,691
地热发电	0	0	1	2	2	3	4	5	7	25
生物质发电 (2.5万千瓦)	7	52	80	100	120	130	140	150	160	939
亚临界煤电	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
掺烧生物质的亚临界煤电	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
超临界煤电 (100万千瓦)	3,590	4,387	5,089	4,241	3,392	2,544	1,696	0	0	24,940
超临界煤电 (60万千瓦)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
整体煤气化联合循环发电外加热捕集与封存技术 (100万千瓦)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
核电	98	85	68	52	36	20	3	0	0	361
燃气发电, 调峰负荷	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
燃气发电, 基础负荷	172	52	36	20	279	697	1,232	2,069	2,249	6,699
可再生能源发电量比例	0.18	0.21	0.26	0.44	0.56	0.66	0.73	0.82	0.82	N/A
总量	4,714	5,735	6,989	7,737	8,479	9,493	10,734	11,682	12,627	78,086

## 低碳混合情景

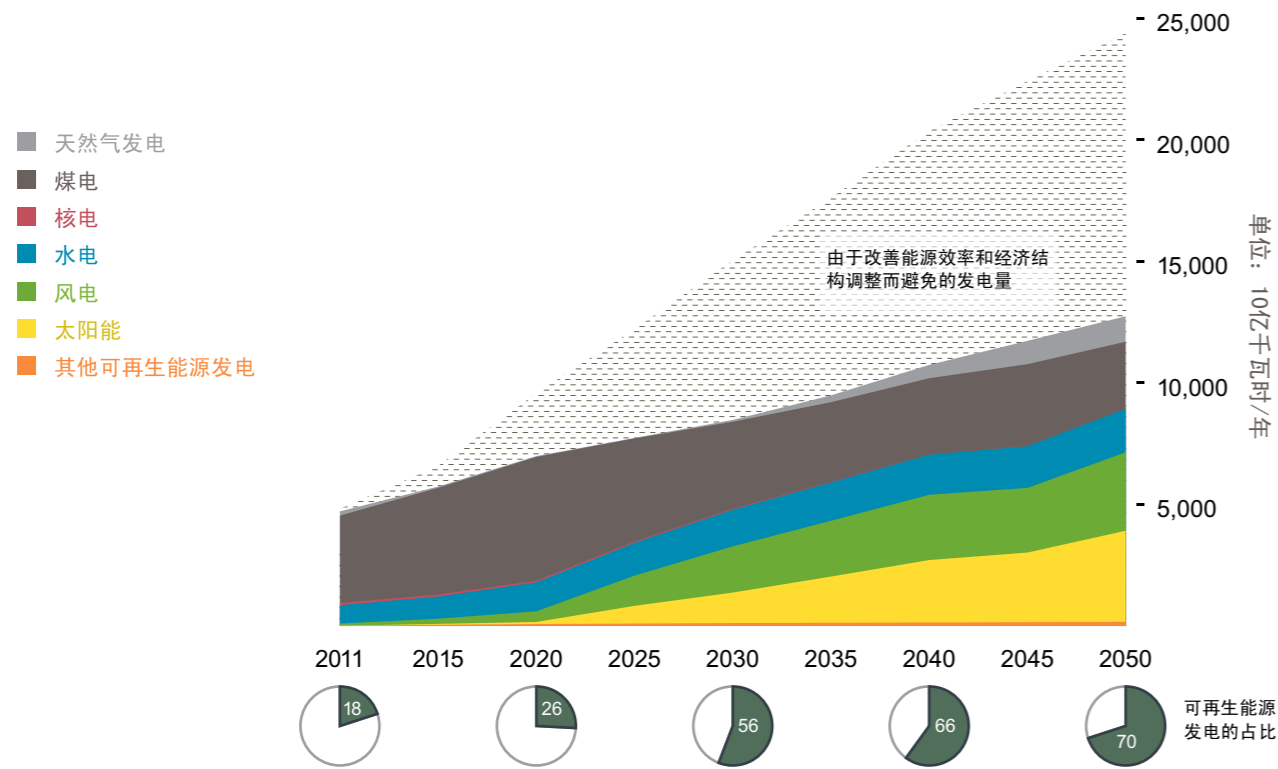
	2011	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	加总
电力总需求 (10亿千瓦时/年)	4,693	5,353	6,510	7,216	7,919	8,869	10,037	10,942	11,858	366,981
装机容量 (百万千瓦)	1,019	1,288	1,613	2,039	2,468	2,936	3,512	4,161	4,400	117,178
发电总成本 (10亿元人民币)	1,708	2,299	3,059	3,869	4,617	5,591	6,685	7,824	8,841	222,199
输电总成本 (10亿元人民币/年)	115	177	223	312	383	453	527	602	623	17,073
采取减少电力需求/负荷措施的成本 (10亿元人民币/年)	N/A	173	566	1,174	2,011	3,220	4,301	6,116	7,464	125,121.9
储电的成本 (10亿元人民币/年)	0	0	0	0	17	17	0	0	0	169.5
所有措施的总成本 (10亿元人民币/年)	1,824	2,649	3,848	5,355	7,028	9,281	11,513	14,542	16,927	364,563.3
人口 (百万)	1,347	1,369	1,386	1,393	1,374	1,355	1,337	1,319	1,300	N/A
人均国内生产总值 (以2010年美元计价)	5,549	6,308	8,415	10,381	12,805	15,795	19,484	23,123	27,178	N/A
人均用电需求 (千瓦时)	3,484	3,911	4,697	5,179	5,763	6,544	7,508	8,298	9,118	N/A
二氧化碳排放量 (百万吨/年)	2,766	3,189	3,378	2,743	2,304	1,880	1,526	732	820	96,485.6
电力需求增长速度和GDP增长速度的比率	1.00	0.87	0.78	0.70	0.63	0.58	0.54	0.50	0.47	N/A
发电装机容量 (百万千瓦)										
太阳能光伏发电 (3兆瓦)	3	20	47	207	336	560	790	1,062	1,138	N/A
太阳能集热发电 (3万千瓦)	0	1	3	62	108	175	242	322	362	N/A
陆上风电 (3万千瓦规模)	48	95	170	457	671	806	931	1,091	1,033	N/A
海上风电 (3万千瓦规模)	0	5	30	45	60	89	118	146	175	N/A
大规模水电	157	192	265	301	337	278	219	159	100	N/A
小规模水电	58	68	75	84	93	82	72	61	50	N/A
地热发电	0	0	0	0	1	1	1	1	2	N/A
生物质发电 (2.5万千瓦)	2	13	20	25	30	33	35	38	40	N/A
亚临界煤电	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N/A
掺烧生物质的亚临界煤电	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N/A
超临界煤电 (100万千瓦)	707	848	938	782	625	469	313	0	0	N/A
超临界煤电 (60万千瓦)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N/A
整体煤气化联合循环发电外加热捕集与封存技术 (100万千瓦)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N/A
核电	13	20	47	66	85	164	243	321	400	N/A
燃气发电, 调峰负荷	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N/A
燃气发电, 基础负荷	33	26	18	10	122	280	550	960	1,100	N/A
总量	1,019	1,288	1,613	2,039	2,468	2,936	3,512	4,161	4,400	N/A
储能	0	0	0	0	24	23	0	0	0	N/A
各种发电装机 (发电量, 10亿千瓦时)										
太阳能光伏发电 (3兆瓦)	4	30	70	308	501	834	1,177	1,581	1,695	6,199
太阳能集热发电 (3万千瓦)	0	5	16	324	570	918	1,272	1,694	1,902	6,702
陆上风电 (3万千瓦规模)	91	202	373	1,030	1,552	1,915	2,269	2,723	2,643	12,798
海上风电 (3万千瓦规模)	0	11	66	101	139	211	286	365	448	1,626
大规模水电	549	671	929	1,055	1,181	973	766	558	350	7,031
小规模水电	203	240	263	294	326	288	251	213	175	2,253
地热发电	0	0	1	2	2	3	4	5	7	25
生物质发电 (2.5万千瓦)	7	52	80	100	120	130	140	150	160	939
亚临界煤电	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
掺烧生物质的亚临界煤电	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
超临界煤电 (100万千瓦)	3,590	4,307	4,767	3,972	3,178	2,383	1,589	0	0	23,787
超临界煤电 (60万千瓦)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
整体煤气化联合循环发电外加热捕集与封存技术 (100万千瓦)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
核电	98	155	365	513	661	1,273	1,885	2,497	3,109	10,555
燃气发电, 调峰负荷	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
燃气发电, 基础负荷	172	52	36	20	243	559	1,099	1,917	2,197	6,188
可再生能源发电量比例	0.18	0.21	0.26	0.42	0.52	0.56	0.57	0.62	0.58	N/A
总量	4,714	5,726	6,965	7,719	8,472	9,488	10,737	11,705	12,685	78,103



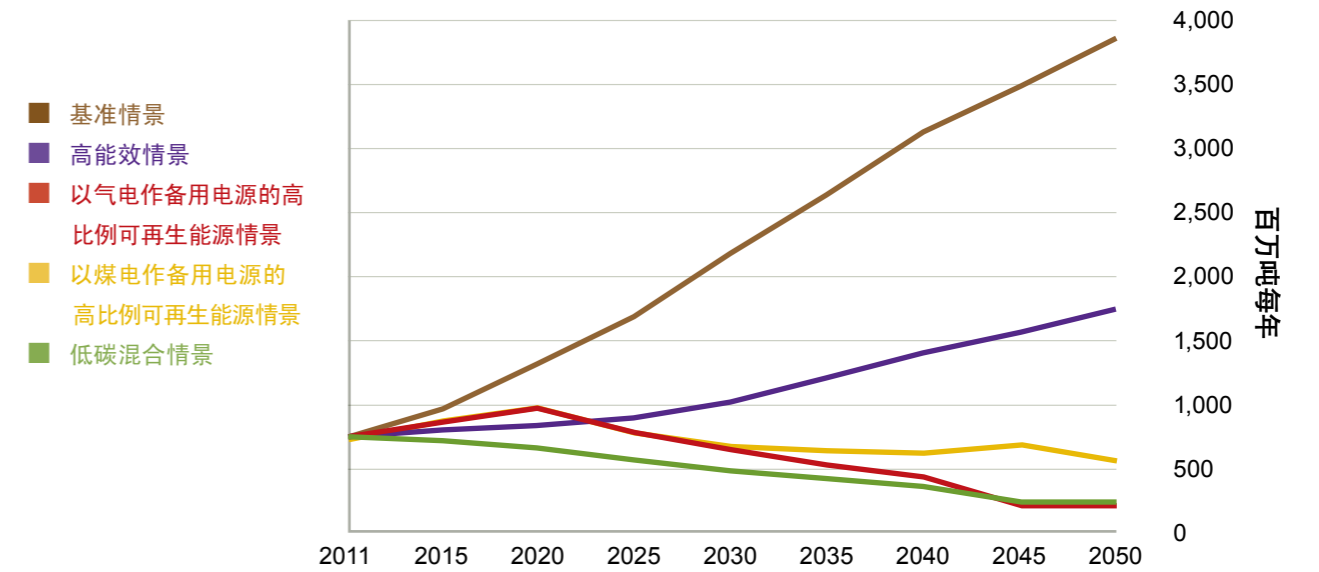
### 高比例可再生能源情景的另一替代方案 以煤炭代替天然气作为可再生能源发电的备用电源装机容量

这里的数据描绘了80%可再生能源电力的另外一种情景，与报告正文中高比例可再生能源情景有两大关键区别。第一点不同在于，假定煤炭在2040年后并不被逐渐关停，而是允许3.3亿千瓦的燃煤电站运行至其计划的30年工作期限。第二点在于，不同于以天然气作为可再生能源电力的备用灵活电源，而是将其中一半以天然气发电、另一半以煤制气作为天然气的替代品进行发电，提供接近20%的电力。这实质上与假定一半的备用电源采取整体煤气化联合循环发电（IGCC）是一样的。但是，我们并不假定采取了碳捕集与封存技术，因为成本太高，并且中国还缺乏这一概念（或完整规模）的成熟示范。其结果就是，对于高比例可再生能源情景中全部采用天然气作为备用电源，如果换成燃气和燃煤平摊备用电源，那么2050年发电部门的碳排放量从每年约2.5亿吨翻增加到每年5亿吨以上。

图三.1: 以煤电作为备用电源的高比例可再生能源情景



图三.2: 碳排放量





## 中国8760电网模型方法学和概述

**请注意：**本附件仅仅是另一份介绍方法学的文章的引言部分，该文章给出了中国8760电网模型的详细方法和数学公式。2012年版的方法学已经发布了，并且在[www.etransition.org](http://www.etransition.org)可以获得。Entri也将于2013年12月发布时时版本的方法学。

### 评估未来

中国8760电网模型是一个经济学和工程学结合的模型，能够评估中国电力系统在各种不同情景下的成本效益，能够模拟从现在直到2050年每个小时的电力供需。基于对过去二十年的电力消费和经济状况的分析，该模型能够准确再现2011年实际的电力供需<sup>71</sup>。

一个合理的模型情景和成本分析，必须基于透明的方法和能重复得出的结论，而我们从中国官方和非官方的各个机构都没有拿到可用使用的模型<sup>72</sup>。于是，我们开发了自己的模型框架，以便能够对中国未来的电力体系做出一致的预测，并且考虑一些可能减少成本和二氧化碳排放的选项<sup>73</sup>。

由于中国并不公开所有相关的信息，我们也反复构建数据集合，以此建立模型。幸运的是，原国家电监会的支持使我们完成目标要容易一些，其学术顾问们提供了关键的数据、建议及其见解。我们采用自己原创性的计量经济研究，补充了官方公布的数据，尤其是电力部门需求侧行为相关的数据<sup>74</sup>。

中国8760电网模型基于一系列相互关联的数据表，其采用的形式使得广大的潜在用户和检验者都能够应用。这样，我们希望模型能够服务整个领域，对中国电力部门的政策和技术选择开展系统性和可重复的评估工作。

模型可以测试影响经济行为、调控政策、或者两者兼有的政策措施，它可以处理复杂的来自终端用能的技术细节，使得用户能够对经济和规划的各个因子采取相当多样的假设条件。对电力部门有基本了解的任何人都可以运用该模型，对每个五年的电力增长及成本进行预测直至2050年。尽管模型是一个长期预测的工具，它也可以处理每日和每年电力供需的各种变动。

### 模型概况

中国8760电网模型包括了100多个变量以及数千个函数或公式。关键变量包括：电力价格（基础负荷和高峰负荷）；用电需求的价格和弹性；GDP和收入的增长；（从工业转向服务业的）结构调整；碳税水平（若采取）；16项不同技术的供电成本；在照明、空调、热水以及工业节能领域采取改善能效措施的成本和有效性。模型还考虑了一些其他因素，包括：（16项技术方案中的每一项的）技术变化；（16项技术方案中的每一项的）容量系数；电力供需平衡；发电装机选择（过程）模型；电网输电成本；电网输电的区域；电网输电对土地利用的要求；以及调峰和智能负荷管理的各种方案。为了能够真实模拟电力部门的运作状况，我们汇编了一些没有发布过且往往无法获得的电力部门数据，并且开展了一些原创性的计量经济研究，估算电力部门的需求侧行为。对数据表和电力部门有基本了解的任何人都可以采用该模型，对电力供需进行预测，并估算直至

2050年的总成本。

模型给出了三类结果：成本、排放量以及各种供电方案的装机容量和发电量<sup>75</sup>。每个情景的结果都可以与其他情景进行对比，以便评估各个假设或者一系列假设的效果。比如，成本（电力生产和输送的总成本包括资金投入成本、运行维护成本、【若采用燃料时的】燃料成本、以及【若需要输电时的】输电成本）的模型结果是按照以下逻辑来生成的：

1. 对于作为主要推动因素的GDP增长、以及对于电力价格和服务业在GDP中的产值比例，模型采用对数线性柯布道格拉斯函数给出各项假设，从而预测电力需求的增长。各项系数决定了模型对于GDP增长、价格变动、以及服务业所占GDP比重增长等各项假设的响应程度。
2. 接着采用电力需求的增长来推动每小时电力需求负荷和发电装机容量需求的变动。各项假设和公式将会根据历史负荷曲线和随机回归，将GDP和每小时电力负荷联系起来。
3. 发电装机容量需求将推动一个从众多发电方案中进行选择的过程模型。该过程根据某个选取的情景是否要求可再生能源发电来选择技术。另外，强制要求加入或者关闭的发电装机、以及对于淘汰老旧设备的要求也纳入这一选择过程。
4. 模型接下来会检测供电能力是否能够满足每个小时的电力需求负荷。如果不能，那么就要增加供电装机以填补相应短缺的负荷（或者作为一个方案也可应用储能技术）。
5. 第3步选择的供电方案所确定的电力装机和电力生产接着会推动构建关于输电建设和成本的模块。输电线路选址与供电方式和用电需求负荷中心的选址是联系在一起的，模块接着会测算所需输电的线路和成本。
6. 根据对负荷调整方案的成本和有效性做出的假设，模型有可能会采用一系列负荷调节公式来调整高峰和基础负荷需求。比如，可能采取储能技术或高峰负荷定价，从而改变电力系统的总发电装机容量以及电力输送等。
7. 根据假设的不同，可以选择一些节能方案，用以减少整个电力需求以及高峰电力需求。这些节能方案也是由各种因素推动的，部分源自GDP的增长（与居民住房和商业建筑面积以及提供照明、制冷和热水的设备数量有关系）和总人口的变化<sup>76</sup>。
8. 在进行节能措施和采取高峰负荷管理措施调节了总的电力需求、装机和发电要求之后，就能得出总成本、排放量、装机量以及各项技术的发电量的数据列表。

中国8760电网模型中采用且相互关联的公式和运算法则，把各个变量、假设、以及其相互关系都整合起来，本篇方法学文章描述了部分细节。





## 注解和参考文献

<sup>1</sup>能源研究所的姜克隽做过一项非常优秀的评估，研究可再生能源在整个能源体系而非仅仅是电力部门中的应用。这一工作的最近更新，参见姜克隽在2013年6月19日至21日于巴黎召开的国际能源研讨会上呈现的研究“2度全球目标下中国的能源转型”（[www.internationalenergyworkshop.org](http://www.internationalenergyworkshop.org)）。中国8760模型的优势在于整合了每个小时的负荷曲线，使其能够测试多变化的电源能否实现电力供需平衡。

<sup>2</sup>Entri命名了这一模型，强调其对中国电力负荷曲线数据的整合，这也提高了模型对一年中8760个小时平衡时时电力供需的能力。

<sup>3</sup>我们对结论充满自信，因为我们确实分析了不稳定的可再生能源电力满足每日用电负荷的可能性，但是没有评估中国电网能否做好电力质量管理（电流—电压电抗性）。可再生能源电力在供电比例中超过30%且实现电力质量管理的技术案例还不多，且应用规模也很有限，难以进行评估。参见Hannele Holttinen, “Task 25: Power Systems With Large Amounts of Wind, Power,” International Energy Agency, IEA Wind, 2012 Annual Report, p. 2。

<sup>4</sup>参见Hannele Holttinen, “Task 25: Power Systems With Large Amounts of Wind, Power,” International Energy Agency, IEA Wind, 2012 Annual Report, p. 2。

<sup>5</sup>参见 Renewable Electricity Futures Study (Entire Report), National Renewable Energy Laboratory. (2012). Renewable Electricity Futures Study. Hand, M.M.; Baldwin, S.; DeMeo, E.; Reilly, J.M.; Mai, T.; Arent, D.; Porro, G.; Meshek, M.; Sandor, D. eds. 4 vols. NREL/TP-6A20-52409. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory。

<sup>6</sup>Entri将“成熟技术”定义为在合理运行维护下能够产生高效的普遍运用的技术。中国8760电网模型不采用任何不成熟的技术。

<sup>7</sup>与Entri协商后可以使用中国8760电网模型，请联系[China8760@etransition.org](mailto:China8760@etransition.org)。

<sup>8</sup>这种方法的案例参见Cristina L. Archer and Mark Z. Jacobson, “Supplying Baseload Power and Reducing Transmission Requirements by Interconnecting Wind Farms,” *Journal of Applied Meteorology and Climate*, Vol. 46, November 2007, pp. 1701-1717。

<sup>9</sup>参见William Chandler, Chen Shiping, Holly Gwin, Lin Ruosida, Wang Yanjia, “The China Electric Power Grid Model: Methodology and Overview,” Entri, draft, 1 August 2013。

<sup>10</sup>参见Energy Subsidy Reform: Lessons and Implications, International Monetary Fund, January 2013。



<sup>11</sup>该数据经过购买力平价调整。（除非在附件中有所指明）所有的美元计价数值都转成了2013年价。2013年的美元值乘以6.1换算成人民币值，这也是2013年上半年的汇率均值。

<sup>12</sup>这里给出的目标是以GDP的比重测算的，以人民币不变价计。

<sup>13</sup>我们在基准情景中假设在下一个五年计划期内，中国政府仍然希望通过刺激投资来保持GDP快速增长（每年大约7%）。但是这种增长在2020年以后不能持续，经济增速会持续下滑。我们在高能效情景中假定，较快的经济结构转型会稍微放慢经济增速，但长期则会加速经济增长。

<sup>14</sup>尽管中国人口数量庞大，模型模拟期间并不预期会出现显著增长或收缩，而且对于模型结果影响也不大。模型纳入人口数主要是为了便于比较结果的人均水平。2011年的人口数据来自国家统计局《中国统计年鉴2012》，2013年，北京；以及PRB（Population Reference Bureau）“世界人口数据表2011”，2012年，www.prb.org。为了比较到2050年的人口预测水平，多数研究认为假定延续当前趋势，总人口会出现小幅降低，参见Peng Xizhe, “China’s Demographic History and Future Challenges,” *Science*, 333, pg. 581, 2011。

<sup>15</sup>与国家发改委能源研究所姜克隽的个人沟通，2012年3月。

<sup>16</sup>采用美国劳工部经济分析局（BEA, www.bea.gov）提供的GDP平减指数，将基准年美元值（通常为2005年不变美元值）折算成2013年年中数值。在美国政府关门期间，BEA网站不能直接提供该数据，因此采用了圣路易斯联邦储备银行报告的数据（参见<http://research.stlouisfed.org>）。2013年的美元值被折算到4月数值，作为基准值。

<sup>17</sup>根据作者回归分析得出。

<sup>18</sup>根据作者回归分析得出。

<sup>19</sup>本文中所有二氧化碳排放的单位均以二氧化碳计。而将二氧化碳排放量折算为碳排放量，需要除以3.66。

<sup>20</sup>测试可再生能源发电是否能够充分满足电力需求，不仅是基于在一年中都要满足电力需求的情况，而且也需要满足各个小时的容量要求。根据2011年每日和一年的变化并将其推演至2050年每一年的各个小时，我们的测试要求可再生能源电力满足小时负荷曲线。模型也运行负荷卸载，但是如果每年超过100个小时都需要卸载每小时高于1亿千瓦的负荷，那么我们就认为“可再生能源电力”未能满足充分供电的测试。

<sup>21</sup>这里采用的贴现率表示资金的机会成本，且根据我们的最佳认知和大量的

经济研究文献而提出。比如可以参见Nicholas R. Lardy, “Financial Repression in China,” Peterson Institute for International Economics。Lardy认为近些年利率受到人为压低，使得2008年存款的真实回报水平竟达负的7%。有关资金回报和清洁能源投资的讨论，参见William Chandler, Holly Gwin, and Chen Shiping, “Financing Energy Efficiency in China: 2011 Update,” Energy Transition Research Institute, www.etransition.org, 2011。作者们指出，海外投资者对清洁能源的门槛收益率往往超过20%，而对中国的工业部门通常要求门槛收益率高达50%。

<sup>22</sup>电力部门的数据基本上来自国家统计局《中国统计年鉴》1996-2011、国家电监会“电力监管年度报告（2010）”。对于中国天然气和电力生产的概况，参见Policy Study: Gas-fired Power Generation in China: Synthesis Report, Energy Research Institute, Beijing (undated)。对于核电技术的进展，参见John M. Deutch, Charles W. Forsberg, Andrew C. Kadak, Mujid, Kazimi, Ernest J. Moniz, John E. Parsons, Du Yangbo, Lara Pierpont, Update of the MIT 2003 Future of Nuclear Power, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, 2009。

<sup>23</sup> 燃煤电厂致病致死的数据来源于Uncertainty and Variability in Health-Related Damages from Coal-Fired Power Plants in the United States, Jonathan I. Levy, Lisa K. Baxter, and Joel Schwartz (Harvard School of Public Health), *Risk Analysis*, Vol. 29, No. 7, 2009。同时参见Kristin Aunana, Jinghua Fang, Haakon Vennemo, Kenneth Oye, Hans M. Seip, “Co-benefits of climate policy—lessons learned from a study in Shanxi, China,” *Energy Policy*, Vol. 32, p. 567-581, 2004；以及YI Honghong, HAO Jiming, Duan Lei, Li Xinghua, and Guo Xingming (Department of Environment Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing, People’s Republic of China), “Characteristics of Inhalable Particulate Matter Concentration and Size Distribution from Power Plants in China,” *J. Air & Waste Manage. Assoc.* 56:1243–1251, 2006；以及C. Arden Pope III, Richard T. Burnett, Michael J. Thun, Eugenia E. Calle, Daniel Krewski, Kazuhiko Ito, and George D. Thurston, “Lung Cancer, Cardiopulmonary Mortality, and Long-term Exposure to Fine Particulate Air Pollution,” *Journal of the American Medical Association*, 1132 to 1141, 2002；以及Sarah Penney, Jacob Bell, John Balbus, “Estimating the Health Impacts of Coal-Fired Power Plants Receiving International Financing,” Environmental Defense Fund, New York, 2009。

<sup>24</sup>对于中国天然气和电力生产的概况，参见Policy Study: Gas-fired Power Generation in China: Synthesis Report, Energy Research Institute, Beijing (undated)。

<sup>25</sup>与能源研究所姜克隽的个人沟通，2013年8月22日。



<sup>26</sup> 参见John M. Deutch, Charles W. Forsberg, Andrew C. Kadak, Mujid, Kazimi, Ernest J. Moniz, John E. Parsons, Du Yangbo, Lara Pierpont, Update of the MIT 2003 Future of Nuclear Power, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, 2009。

<sup>27</sup> 与能源研究所可再生能源中心高虎的个人沟通，2013年8月22日。

<sup>28</sup> 我们采用“可调峰负荷”来包含使得电力供应企业能够有选择和可预期地减少或者调整电力需求的一系列技术。

<sup>29</sup> 假定风机尺寸为9X-7米，叶轮平均直径80米。尽管风机并不完全覆盖掉所有的占用土地，但是这类工业机械的大规模应用所产生的“野生动植物驱离”、噪声以及视觉污染效应却是难以测试或预知的。

<sup>30</sup> 参见McElroy, op. cit。

<sup>31</sup> 2012年6月28日《国务院关于印发节能与新能源汽车产业发展规划（2012-2020）》提出了电动汽车的发展目标，参见2013年11月登录查询的网页链接：[http://www.gov.cn/zwqk/2012-07/09/content\\_2179032.htm](http://www.gov.cn/zwqk/2012-07/09/content_2179032.htm)。

<sup>32</sup> 与美国布鲁克海汶国家实验室（Brookhaven National Laboratory）可持续能源部主席Patrick Looney的个人沟通，2013年7月22日

<sup>33</sup> 与国家电监会研究室主任俞燕山的个人沟通，2012年1月7日。同时参见Zhong Lihua, Zhou Shaoyi, Li Yong and Zhang Yuping, Guangxi Electrical Network Power Load Change Characteristic and Temperature Relations and Its Forecast, Journal of Meteorological Research and Application, Vol.28 No.1; 以及Chen Wei, Zhou Feng, Han Xinyang and Shan Baoguo, "Analysis on Load Characteristics of State Grid," Electric Power Technologic Economics, Vol.20 No.4, 2008。

<sup>34</sup> 然而请注意，我们运行“负荷卸载”水平在每年100小时内不超过1亿千瓦。报告中的各个情景都没有超过这一上限。

<sup>35</sup> 低碳混合情景和高比例可再生能源情景更少采用了核电和燃气发电，这是根据我们对中国中央政府在短期内不会加大这类电源的假设。

<sup>36</sup> 我们的各个情景中得出了电力需求增长相对于GDP增长的比率，附件二中给出了这些结果。请注意，GDP弹性在作为模型基础的计量经济函数中并不自己发生变化。这一系数可被视作一种“部分弹性”，是在所有其他因素保持不变的情况下，GDP每变化一个百分点后电力需求变化的百分数。当然在整个模型中，随着外部调控政策以及内部价格效应（成本导向）和外部价格效应（比如征收碳税），需求侧以及供给侧的效率都在不断改变。下面的表格就展示了这一效应：

## 估算总的GDP弹性

仅仅由于GDP增长1%所引发的电力需求增长：+1.24 %

仅仅由于服务业GDP增长1%所引发的电力需求增长：-0.58 %

仅仅由于电价上涨1%所引发的电力需求增长：-0.21 %

2011年GDP、服务业以及价格效应的叠加效果：+1.15

于是，尽管GDP的部分弹性系数为1.24，当前整体的总的弹性系数为1.15。

请注意，本研究中中国的长期总的弹性系数仅有0.7，这是一个前所未有的低值。另外我们注意到，日本、韩国和德国近些年现有数据表明其总弹性分别为1.4、1.8和0.65，数据来源包括日本官方统计数据（[www.stat.go.jp](http://www.stat.go.jp)）、世界银行，德国数据来自<http://epp.eurostat.ec.europa.eu>。同时参见世界银行的世界发展指数。

<sup>37</sup>（工厂在其使用年限前提前关闭而产生的）“搁置成本”有可能成为该情景的一大问题。但是事实上2040年以后，所有关闭掉的燃煤电站都已经运行了至少20年，其他的燃煤电站也都运行至其预期的30年年限。我们在附件二中给出对所有主要供电体系的寿命期限假定。

<sup>38</sup> 参见Wayne J. Graham, "A Procedure for Estimating Loss of Life Caused by Dam Failure," U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Dam Safety Office, Denver, Colorado, September 1999。本文描述了发生在中国河南省的最严重的水电灾害事件。1975年8月，板桥水库由于台风暴雨而发生垮坝。根据Graham的文章，2.6万人当即淹死，而另有23万人可能死于之后的瘟疫和饥荒。大坝高度为118米。同时一些笼统信息请参见Robert E. Ebel, "Chernobyl and Its Aftermath: A Chronology of Events," The Center for Strategic & International Studies, Washington, D.C., 1994; Richard Stone, "The Explosions That Shook the World," Science Magazine, Vol. 272, 19 April 1996, pp. 352-354; Michael Balter, "Children Become the First Victims of Fallout, Special News Report," Science, Vol. 272, 19 April 1996, pp. 357; Nigel Williams, "Leukemia Studies Continue to Draw a Blank," Science, Vol. 272, 19 April 1996, pp. 358; John Bohannon, "Panel Puts Eventual Chernobyl Death Toll in Thousands," Science, Vol. 309, 9 September 2005, p. 1663。

<sup>39</sup> 参见《国务院关于印发“十二五”节能减排综合性工作方案的通知》国发〔2011〕26号文：[http://www.gov.cn/zwqk/2011-09/07/content\\_1941731.htm](http://www.gov.cn/zwqk/2011-09/07/content_1941731.htm)。

<sup>40</sup> 参见国家发展改革委等5个部门关于印发《电力需求侧管理办法》的通知，发改运行〔2010〕2643号文：<http://www.sdpc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/2010tz/>



t20101116\_380549.htm。

<sup>41</sup>参见国家发展改革委关于印发《温室气体自愿减排交易管理暂行办法》的通知，发改气候〔2012〕1668号文：<http://cdm.ccchina.gov.cn/WebSite/CDM/UpFile/File2894.pdf>。

<sup>42</sup>对于中国位于深圳的首个碳市场的最初报道并不理想。问题看起来似乎是由于为碳排放量设定的总量太高，使得市场上卖家多买家少。比如参见：China Carbon Permits Exceeding EU Prices, ClimateWire, August 22, 2013, <http://www.eenews.net/climatewire/stories/1059986303>; “The Cap Doesn’t Fit,” The Economist, June 19, 2013, <http://www.economist.com/blogs/analects/2013/06/carbon-emissions>; “China Carbon Permits Trade 22% Below Europe on Market Debut,” Bloomberg, June 18, 2013; <http://www.bloomberg.com/news/2013-06-18/china-carbon-permits-trade-22-below-europe-s-on-market-debut.html>。

<sup>43</sup>参见国家发展改革委《可再生能源中长期发展规划》，2007年9月：<http://www.chinaenvironmentallaw.com/wp-content/uploads/2008/04/medium-and-long-term-development-plan-for-renewable-energy.pdf>。

<sup>44</sup>参见2005年颁布并于2009年修订的《中华人民共和国可再生能源法》：[http://www.npc.gov.cn/englishnpc/Special/CombatingClimateChange/2009-08/25/content\\_1515301.htm](http://www.npc.gov.cn/englishnpc/Special/CombatingClimateChange/2009-08/25/content_1515301.htm)。

<sup>45</sup>对于这些政策的概述，请参见：Li Yanfang and Cao Wei, “Framework of Laws and Policies on Renewable Energy and Relevant Systems in China Under the Background of Climate Change,” Vermont Journal of Environmental Law, Vol. 13, 2012, pp. 823-863。

<sup>46</sup>参见《节能发电调度办法实施细则（试行）》：[http://www.gov.cn/zwggk/2007-08/07/content\\_708486.htm](http://www.gov.cn/zwggk/2007-08/07/content_708486.htm)。

<sup>47</sup>常规发电企业在修建电厂的时候，希望或者预期能以可以预见的水平卖出电力。而一旦存在可再生能源电力，且法规要求电网首先并入那些不稳定电源的电力、随后才能并网常规电源电力，那么后者的成本就会增加、利润就会降低。这就催生了对建设和支持不稳定电源电力的异议。在中国，常规电力的发电企业都是大型国有企业，其规模和盈利都使其具备了显著的政治影响力，这就使得那些规模更小、有时是私营的、且往往是初创的企业处于劣势。

<sup>48</sup>关于中国电力部门的概况，参见：China’s Power Sector: A Backgrounder for International Regulators and Policy Advisors, Regulatory Assistance Project, February 2008。

<sup>49</sup>2013年3月，中国宣布撤销国家电力监管委员会，参见：“Energy Mix Adjustment

Among Challenges for New Head,” China Daily, March 20, 2013。在出版本报告之时，未来中国对电力部门的监管仍不明朗。

<sup>50</sup>参见William Chandler et al., China Power: Benefits and Costs of the “Strong, Smart Grid,” Energy Transition Research Institute, May 2012; China’s Power Sector Reforms: Where to Next, International Energy Agency, 2006。

<sup>51</sup>参见《国务院关于印发大气污染防治行动计划的通知》，2013年9月9日，链接为：[http://news.xinhuanet.com/english/china/2013-09/12/c\\_132715799.htm](http://news.xinhuanet.com/english/china/2013-09/12/c_132715799.htm)。同时参见：《环保部细化京津冀鲁控煤目标火电厂西迁趋势明显》，2013年10月登录的链接为：<http://news.cnfol.com/130923/101,1277,16018241,00.shtml>（中金在线，2013年9月23日）。

<sup>52</sup>参见比如：National Renewable Energy Laboratory, Renewable Electricity Futures Study, Hand, M.M.; Baldwin, S.; DeMeo, E.; Reilly, J.M.; Mai, T.; Arent, D.; Porro, G.; Meshek, M.; Sandor, D. eds. 4 vols. NREL/TP-6A20-52409. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory; [http://www.nrel.gov/analysis/re\\_futures/](http://www.nrel.gov/analysis/re_futures/), 2012。

<sup>53</sup>我们注意到，中国与一些其他国家一样，由于非竞争性地采用某些设备标准违反了世贸组织协议，因而受到批评和被诉诸法律。然而，工业中生产过程的能效标准却并不适用世贸组织规则。然而，对用户用能设备协调好国际标准的制定，这对于避免贸易冲突是有必要的。

<sup>54</sup>国家电网公司于2009年在某个关于特高压输电的会议上，提出了建设“坚强智能电网”的目标，此后在打造“智能电网”方面几乎无一例外地强调建设特高压输电线路网络。国家电网发布的各项规划中，则几乎没有认识到用电户在电力供需链条上的潜在作用。更多细节参考Chandler op. cit., China Power: Benefits and Costs of the “Strong, Smart Grid,” 登录[www.etransition.org](http://www.etransition.org)。

<sup>55</sup>参见John Plunkett, Frederick Weston, and David Crossley, “Government Oversight of Grid Company Demand-Side Management Activities in China: Recommendations From International Experience,” Regulatory Assistance Project, September 2012。

<sup>56</sup>结论来自我们设计模型的运算，以测试不同碳税水平的效果。若要在2025年使得煤炭发电比其他电源发电更昂贵，那么碳税水平至少要达到每吨碳40美元（250元人民币）。

<sup>57</sup>我们清楚收入弹性和价格弹性都会随着收入水平和价格水平的变化而能够发生并且确实会发生变化。弹性系数绝不是某种经济规定能够固定下来的，而是会随着教育水平、公众宣传、以及闲暇时间和可支配收入增加而发生变化。然而我们却选择了以不变的弹性系数估算未来的用电需求，这一部分是由于我们不



能猜测上述行为将如何变化，更主要是在于我们希望明确行为和技术的改变能够产生巨大的用电需求差别。由此，把未来的收入和价格与用电需求和价格响应联系起来，这仅仅是估算电力需求和需求响应的第一步。这最初的一步能够首先估算出需求曲线，接着根据经济结构、技术、管理政策以及用电需求的饱和程度进行向上或向下的调整。我们在模型中进行清楚的调整，并试图在详细的方法学报告中告知模型的用户。参见William Chandler, Chen Shiping, Holly Gwin, Lin Ruosida, Wang Yanjia, "The China Electric Power Grid Model: Methodology and Overview," Entri, draft, 1 August 2013。

<sup>58</sup>有关清洁空气法案碳排放标准的细节，参见：<http://www.epa.gov/climatechange/EPAactivities/regulatory-initiatives.html>。

<sup>59</sup>参见《国务院公布大气污染防治新方案，部署能源结构调整》，于2013年9月11日发布，信息来源于：[www.sina.com](http://www.sina.com), 2013年9月12日登录。

<sup>60</sup>参见比如：Asian Development Bank, Asian Development Outlook 2013: Asia's Energy Challenge, Manila, Philippines, 2013, [www.adb.org](http://www.adb.org)。

<sup>61</sup>参见"Huge Waste of Wind-Generated Electricity in 2011, Research Finds," Caixin, April 12, 2102, [http://english.caixin.com/print/print\\_en.jsp](http://english.caixin.com/print/print_en.jsp)。

<sup>62</sup>参见比如：China Set to Subsidize Renewable Energy, China.org.cn, December 20, 2012, [http://www.china.org.cn/business/2012-12/20/content\\_27467852.htm](http://www.china.org.cn/business/2012-12/20/content_27467852.htm), China Set to Pay Renewable-Power Subsidies After Two-Year Delay, Bloomberg News, December 4, 2012, <http://www.bloomberg.com/news/print/2012-12-04/china-set-to>。

<sup>63</sup>北京市政府对此讨论了很长时间，但是从未实施过这一电价机制。

<sup>64</sup>请注意，大型工业用户已经支付了电量费。

<sup>65</sup>在中国，用电高峰时采用燃气发电或抽水蓄能发电的成本至少为每千瓦1000美元，因此总共8000万千瓦的高峰用电负荷也就意味着增加至少800亿资金投入成本。

<sup>66</sup>参见比如：Xiaochun Zhang and John E. Parsons, "Market Power and Electricity Market Reform in Northeast China," Center for Energy and Environmental Policy Research, January 2008; Russell Pitman and Vanessa Yanhua Zhang, "Electricity Restructuring in China: The Elusive Quest for Competition," Economic Analysis Group Discussion Paper, April 2008。

<sup>67</sup>参见"Smog, Poor Management, Dim Clean Energy Prospects for China's Buildings," ClimateWire, August 21, 2013, <http://www.eenews.net/climatewire/stories/1059986258>。

<sup>68</sup>参见Yuhong Zhao, "Assessing the Environmental Impact of Projects: A Critique of the EIA Legal Regime in China," Natural Resources Journal, Vol. 49, Spring 2009, pp. 485 – 524。

<sup>69</sup>参见Allison Cameron, Vermont Law School, and Luo Wei, Renmin University School of Law, "An Environmental Impact Assessment for Hydropower Development in China," 2012。

<sup>70</sup>2011年，亚临界燃煤电站装机约有2亿千瓦，但本研究中，煤电并未分类单独模拟，这种处理方法会稍微低估2011年煤电产生的碳排放，但是不影响2025年之后的排放量，模型中所有情景均照此处理。

<sup>71</sup>这篇关于中国8760电网模型方法学的文章基于之前一个给出年度结果的模型。参见William Chandler, Chen Shiping, Holly Gwin, Wang Yanjia, Energy Transition Research Institute, [www.etransition.org](http://www.etransition.org), 2012。

<sup>72</sup>然而之前确实有一些研究，其中值得一提的包括Lin Boqiang, ERD Working Paper No. 37, "Electricity Demand in the People's Republic of China: Investment Requirement and Environmental Impact," Asian Development Bank, Manila, Philippines, March 2003。

<sup>73</sup>有关智能电网技术及其影响的优秀研究，参见RG Pratt, PJ Balducci, C Gerkensmeyer, S Katipamula, MCW Kintner-Meyer, TF Sanquist, KP Schneider, and TJ Secrest, "The Smart Grid: An Estimation of the Energy and CO2 Benefits, Revision 1," Pacific Northwest National Laboratory Richland, Washington, January 2010; 以及Lisa Schwartz and Paul Sheaffer, "Is It Smart if It's Not Clean? Smart Grid, Consumer Energy Efficiency, and Distributed Generation, Part II," Regulatory Assistance Project, Montpelier, Vermont, March 2011。

<sup>74</sup>本报告也受益于一份对中国智能电网的概况研究，参见WU Jiandong, WU Jiang, YU Yanshan, "The Smart Grid in China: A Discussion Paper," Report of the Expert Policy Advisory Group, Annapolis, Maryland February 2012, in cooperation with the China Center for International Economic Exchanges, Chinese Academy of Sciences and the Policy Research Office of the State Electricity Regulatory Commission。有关行为学和用能行为方面的概述，参见Hunt Allcott and Sendhil Mullainathan, "Behavioral Science and Energy Policy," 2010, Cambridge, Massachusetts (provided on-line by Harvard University, this article is, according to the authors, "...a longer supporting version of an article in the March 5, 2010 issue of Science magazine; see Vol. 327, p. 1204, [www.sciencemag.org](http://www.sciencemag.org).)。同时参见Daniel Kahneman, "Maps of Bounded Rationality: A Perspective on Intuitive Judgement and Choice," Nobel Prize Lecture, Stockholm, December 8, 2002。



<sup>75</sup>支持者有时采用统计数据，倡导根据电力装机水平（比如兆瓦数），对风电和其他可再生能源发电提供更多的补贴，而并不提及容量系数或者可利用的资源水平（比如千千瓦时）。读者有可能弄不清楚各种发电措施装机容量的对比，而这些措施可发电量甚至会相差到6倍之多。参见比如Li Junfeng and Ma Lingjuan, Wang Shannon, Yu Wuming, Lu Fang, Qin Shiping, Liu Xin, Tong Jiandong Tong, “Recommendations for Improving the Effectiveness of Renewable Energy Policies in China,” published by REN21 Secretariat Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit GmbH and United Nations Environment Programme, October 2009.

<sup>76</sup>对中国人口的预测来自 联合国《世界人口展望（2011版）》的摘要报告，参见 [http://www.prb.org/pdf11/2011\\_population-data-sheet\\_eng.pdf](http://www.prb.org/pdf11/2011_population-data-sheet_eng.pdf)。比如，近些年也实施了一些异常有力的能源政策，参见Keith Bradsher, “In Crackdown on Energy Use, China to Shut 2,000 Factories,” New York Times, New York, 9 August 2010; 以及“China orders 2,000 firms to shut overcapacity by end-Sept,” China Daily (on-line), 8 August 2010。同时参见PENG, op. cit。

图片信息

Front Cover © istock.com/  
Ralf Hettler; Title Page ©  
istock.com/Eprom; Foreword  
© naturepl.com/Edwin  
Giesbers/WWF-Canon; Page 1  
© Huangsu-WWF China; Page  
2 © Thomas Haugersveen/  
WWF-Norway; Page 3 © Global  
Warming Images/WWF-Canon;  
Page 4 © Global Warming  
Images/WWF-Canon; Page  
5 © Thomas Haugersveen/  
WWF-Norway; Page 6 © Global  
Warming Images/WWF-Canon;  
Page 9 © istock.com/hxdbzxy;  
Page 10, (top left) © istock.com/  
Chinaface; (top right) © istock.  
com/Lnzyx; (bottom left) ©  
Global Warming Images/WWF-  
Canon; (bottom right) © Global  
Warming Images/WWF-Canon;  
Pages 14–15 © istock.com/  
George Clerk; Page 16 © istock.  
com/konmesa; Page 17 © istock.  
com/Jeff Hu; Page 25 © Tom  
Wang/istock.com; Page 40 ©  
istock.com/Alex Nikada; Page  
45 © Global Warming Images/  
WWF-Canon; Pages 58–59 ©  
istock.com/Ian D. Walker; Back  
Cover © istock.com/vincent369.