



电力扩容建模、分析与可视化： 选定的高再生能源建模经验汇总

Nate Blair、Ella Zhou 和 Dan Getman

国家可再生能源实验室

Douglas J. Arent

战略能源分析联合研究所

这项工作是电网低碳未来计划的一部分，由英国儿童投资基金会资助。

国家可再生能源实验室是美国能源部
能源效率和可再生能源局的国家实验室
由可持续能源联盟运营

本报告可从国家可再生能源实验室网站
www.nrel.gov/publications 免费获取。

技术报告
NREL/TP-6A20-66727
2015 年 10 月

合同编号 DE-AC36-08GO28308

电力扩容建模、分析与可视化： 选定的高再生能源建模经验汇总

Nate Blair、Ella Zhou 和 Dan Getman

国家可再生能源实验室

Douglas J. Arent

战略能源分析联合研究所

依 Task No. ACTC.1310 编制

国家可再生能源实验室是美国能源部
能源效率和可再生能源局的国家实验室
由可持续能源联盟运营

本报告可从国家可再生能源实验室网站
www.nrel.gov/publications 免费获取。

技术报告
NREL/TP-6A20-66727
2015 年 10 月

合同编号 DE-AC36-08GO28308

声明

本报告是作为美国政府机构赞助的一项工作而编制。对于披露的任何信息、设备、产品或过程的准确性、完整性或有效性，无论是美国政府或其任何机构，还是其任何雇员都不作任何明示或暗示保证，或承担任何法律责任或责任，或表示其使用不会侵犯私人拥有的权利。本文提及的商品名、商标、制造商的任何特定商品、过程或服务或其他项目不一定构成或暗示由美国政府或其任何机构背书、推荐或赞成。本文作者的观点和意见不一定陈述或反映美国政府或其任何机构的观点和意见。

本报告可从国家可再生能源实验室网站
www.nrel.gov/publications 免费获取。

电子版可在 SciTech Connect <http://www.osti.gov/scitech> 获取

向美国能源部及其承包商支付一定加工费用，
可以从以下地点获得纸质版：

美国能源部
科学和技术信息办公室
P.O. Box 62
Oak Ridge, TN 37831-0062
OSTI <http://www.osti.gov>
电话： 865.576.8401
传真： 865.576.5728
电子邮件：reports@osti.gov

可向公众出售纸质版，地点：

美国商务部
国家技术信息局
5301 Shawnee Road
Alexandria, VA 22312
NTIS <http://www.ntis.gov>
电话： 800.553.6847 或 703.605.6000
传真： 703.605.6900
电子邮件：orders@ntis.gov

封面照片由 Dennis Schroeder 拍摄：（从左至右）NREL 26173、NREL 18302、NREL 19758、NREL 29642、NREL 19795。

国家可再生能源实验室采用含再生材料的纸张印制。

前言

目前，中国每年的可再生能源电力装机容量多于世界其他国家。中国的可再生能源发电以波动性可再生能源电力为主，尤其是风能和太阳能发电。如何在发电过程中增加波动可再生能源电力的比重，是全世界关心的课题。中国对于此项课题的积极贡献主要体现在两方面：一方面是迅速扩大可再生能源电力的全国性布局，另一方面是认真学习和借鉴其他国家已有的经验。

本报告是阐述美国国家可再生能源实验室（National Renewable Energy Laboratory, NREL）、中国国家可再生能源中心及中国其他主要研究机构，以及丹麦能源署之间技术合作的系列报告的部分项目。这几方的合作主要致力于分享高比例可再生能源电网系统的规划、部署和运营此项为期五年的合作获得了英国儿童投资基金会的资助。

第一年的核心任务是由专家主导在中国开展一系列工作，分享下述四个关键方面的技术知识和实践经验：

1. 综合能源情景设计与建模
2. 可再生能源友好的电网发展
3. 电力系统灵活性
4. 促进可再生能源分布式发电的发展

这些工作建立在并显著扩展了丹麦能源署和中国国家可再生能源中心专家之间的已有的合作。

本报告总结了上述四个方面当中第一项内容的相关合作项目的若干议题内容。报告侧重于美国 NREL 在既定的美国背景下进行扩容建模方面的经验。后续的项目将探讨美国经验是否能为中国能源规划提供启示以及如何提供启示，并将受益于本报告所提供的知识基础。我们相信本报告中所展示的首阶段合作，已经成功地开启了相互理解的过程，藉此帮助中国研究人员开始评估如何将所学的其他国家的经验应用于中国独特的地理、经济、社会和政治环境。我们期待着此项合作已经初步获得的成功在未来的四年里得以延续。

致谢

编者想感谢 Lars Møllenbach Bregnbæk 和中国国家可再生能源中心的陶冶提供有关中国可再生能源分析模型——电力和区域供热优化 (CREAM-EDO) 模型的数据并进行草案审阅。编者还想感谢以下 NREL 同事进行审阅和提供意见：Jeffrey Logan、Trieu Mai、Changgui Dong、Wesley Cole 和 John Barnett。这项工作是电网未来计划的一部分，由英国儿童投资基金会资助。

缩略词

ATB	Annual Technology Baseline 年度技术基线
CNREC	China National Renewable Energy Center 中国国家可再生能源中心
CREAM-EDO	China Renewable Energy Analysis Model—Electricity and District Heating Optimization 中国可再生能源分析模型——电力和区域供热优化
CSP	concentrating solar power 聚光太阳能
DOE	U.S. Department of Energy 美国能源部
EIA	U.S. Energy Information Administration 美国能源信息管理局
GW	gigawatt 千兆瓦
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change 政府间气候变化专门委员会
kW	kilowatt 千瓦
LCOE	levelized cost of energy 平准化能源成本
MARKAL	Market Allocation model 市场分配模型
NEMS	National Energy Modeling System 国家能源建模系统
NREL	National Renewable Energy Laboratory 国家可再生能源实验室
O&M	operations and maintenance 运营和维护
PV	photovoltaics 光伏
RE	renewable energy 可再生能源
ReEDS	Regional Energy Deployment System model 区域能源部署系统模型
REF	Renewable Electricity Futures study 可再生能源电力未来研究
RMB	Renminbi (Chinese currency) 人民币 (中国货币)

目录

简介	1
问题一：使用扩容模型可回答哪些分析问题？	4
问题二：可再生能源发电扩容建模和表示的关键输入信息。	9
输电线路.....	10
燃料价格.....	10
技术成本简介.....	11
年度技术参考.....	11
技术成本和性能数据的经验教训	17
问题三：电网运行操作原理和规则在 ReEDS 中的表示	19
ReEDS 中的技术约束	19
区域性	20
问题四：模型结果的有效可视化.....	22
NREL 研究可视化.....	22
结论	26
参考	27
附录 A. 政策制定者的十大情景和建模教益	30
附录 B. 标准情景中的储备.....	32
附录 C. 可再生能源电力未来研究浏览器的制作.....	35

图目录

图 1. 可再生能源电力未来研究情景	6
图 2. 高比例情景中的装机容量	7
图 3. 年度技术基线数据输入表截图	13
图 4. 陆上风能的当前和未来平准化能源成本（年度技术基线）	15
图 5. 太阳能光伏的当前和未来平准化能源成本（年度技术基线）	15
图 6. 聚光太阳能的当前和未来平准化能源成本（年度技术基线）	16
图 7. 透明成本数据库在交互式浏览器中呈现数百个成本和性能数据点，并允许用户探索每一个具体的数据点	17
图 8. NREL 年度技术基线中线情况至 2050 年的平准化能源成本预测比较	17
图 9. 2015 年《风能发电展望报告》中的 2050 年风电产业预计增长.....	22
图 10. 可再生能源电力未来研究可视化视频截图.....	23
图 11. 可再生能源电力未来研究情景浏览器截图，初始页面	24
图 12. 可再生能源电力未来研究情景浏览器截图，80% 可再生能源，先进技术改进情景.....	25
对于内部审查和验证，ReEDS 团队使用一组自动生成可以为所有模拟查看的图表的 R 脚本。 .	25

图 B-1. 区域风电和光伏百分率预测误差要求的平均值和五分之一值的图形表示34

表目录

表 1. 输电线路和并网条件假设 10

表 2. 年度技术基础情景和 CREAM-EDO 的技术成本比较 14

表 B-1. 整个情景时间跨度强加于 ReEDS 的储备余量要求.....33

表 B-2. 按技术分的旋压储备百分率和快速启动百分率——ReEDS 输入34

简介

数学和计算模型被广泛用于物理和金融系统的分析和设计。电网建模之所以对中国尤为重要，主要有以下三个原因：第一，电力行业的资产昂贵、使用寿命长，且对任何国家的发展都至关重要。按预计，中国的电力负荷、输电和其他能源相关的基础设施会继续快速增长；因此，了解和协助规划这些资产在未来的运作至关重要（国家发展和改革委员会能源研究所，2015）。第二，中国已大规模地开发可再生能源，并且预计在未来的几十年里继续进一步加速这种发展趋势。因此，需要对实现大量可再生能源并网发电所涉及的各个方面（技术、经济、社会和政治）都进行仔细的规划和评估。第三，企业对于如何参与到中国正在发展的电力市场中，需要制定战略的工具，以实现企业向未来高效和高可再生能源的合理转型。

本建模和情景分析报告是规划和运营中国高比例可再生能源电力未来系列报告的第一份报告。五年合作计划——中国电网低碳未来计划——由中国国家可再生能源中心、美国国家可再生能源实验室（National Renewable Energy Laboratory, NREL）和丹麦能源署合作进行，由英国儿童投资基金会资助。该计划旨在帮助实施中国的能源革命——从目前以化石燃料为主的能源系统过渡到一个可再生能源比例和能源效率更高的系统。第一年的活动分为四个任务领域：建模和情景分析、可再生能源便利电网发展、电力系统灵活性以及分布式可再生能源发电。在该计划的开篇之年，三方合作机构参加了为期一周的议程紧凑的讨论会议，内容涉及每一项课题领域。美国的任务是编制由四份技术报告组成的一系列报告，总结美国的经验和最佳做法，同时考虑中国在这些领域所面临的主要挑战。

建模与情景分析任务旨在利用严格的统计建模和分析，考虑中国能源消耗总量的持续增长和化石燃料发电的发展，阐明可再生能源作为一种可行的、具有经济吸引力的能源供应的可能性。本报告中所述的建模方法以及从美国借鉴的相关经验教训，可作为中国国家可再生能源中心和更广泛的能源系统建模学界建模的参考来源。其模型的改善将有助于树立对建模和情景分析所起作用的信心，继而树立对中国高比例可再生能源的憧憬的信心。另外，该报告还可以使那些负责评估建模结果的政策制定者和其他利益相关者在做出决策时，获取深刻的洞见。

本报告侧重于 NREL 的经验，主要使用扩容的区域能源部署系统模型 (Regional Energy Deployment System, ReEDS)。固然，对于美国和其他国家以及全球电力系统还有许多其他的扩容模型，但本报告中强调的是 ReEDS：在中国国家可再生能源中心于 2015 年

年初举办的为期一周的建模工作会议间期间，参会人员所提出的若干项中国背景条件下的问题和挑战均依靠 NREL 利用此模型方面的经验而得以解决。当解决任何模型中的可再生能源开发时，总是会持续提出本报告中讨论的问题。值得调查的其他模型和情景报告包括：

美国能源信息管理局 (Energy Information Administration, EIA) 发表的《年度能源展望》(EIA , 2015)，依托其扩容模型——国家能源建模系统 (National Energy Modeling System, NEMS) (EIA , 2009)。NEMS 模型涵盖整个经济体范围，包含的领域比 ReEDS 更广泛。例如，它包括天然气和煤炭供应市场的建模以及一个电力负荷模型。ReEDS 通常是从每年的《年度能源展望》中摘取燃料价格和负荷轨迹，以作为输入数据。

政府间气候变化专门委员会 (Intergovernmental Panel on Climate Change) 最近在一份报告中强调了全球大约 170 个潜在扩容方案，总结了二氧化碳和其他环境结果，并讨论了不同的模型对未来得出不同观点的原因 (Edenhofer 等 , 2012)。¹

市场分配模型是另一种广泛使用的模型。市场分配模型是 market allocation 的简称，是一个促进战略能源规划的动态优化模型。通过整合能源、环境、经济因素，市场分配模型提供源系统解决方案，以支持国家规划和政策决定。市场分配模型最初由美国能源部 (U.S. Department of Energy, DOE) 和国际能源署 (International Energy Agency) 资助，于上世纪 70 年代末在 Brookhaven National Laboratory 开发，用于能源系统建模和分析。该模型目前在国际上已经得到了广泛的认可：40 多个国家使用它来分析能源规划和环境政策制定方面的广泛问题。目前的应用包括，分析环境政策、预测温室气体排放清单和评估区域合作的价值。国际上定期举行有关其使用的研讨会 (ETSAP , 2015)。

电网建模的困难在于规模、复杂性、时间尺度和许多基本特征的不确定性。仅以美国东部互连为例，就有近 180,000 英里的输电线路和 436 千兆瓦的装机量 (Kirsch 等 , 2012)。虽然中国的装机量比美国大，但中国的输电里程却较少，当然这一数量有望显著增长。因此，建模的困难是模型中将这种复杂性降低到易于处理的程度。例如，NREL 的 ReEDS (NREL , 2015a) 结合一组考虑了负荷、储备和运行储备的复杂统计计算，利用一个含 134 个美国边界连接点的缩小网络 (每个表示的平衡区域对应一个连接点)，以及约 300 条连接连续平衡区的聚集线路 (Short 等 , 2011)，对 2006 年到 2050 年期间每两年进

1 有关全球可再生能源部署情景的讨论，请参见 Edenhofer 等第 10 章。

行一次成本最小化。非线性、离散决策和非凸性，正如需求、供应和价格的不确定性一样，增加了建模任务的复杂性。所有模型都无法尽善尽美展示现实情况中的电网、负荷、输电系统、电力市场和政策，因此，相关的权衡无法回避：是增加复杂度并获得效果略好的电网展示？还是创建一个伴随细节增加，需要投入越来越多的时间完成单一迭代的工具？

此外，有必要强调模型（特别是像本报告中讨论的那些扩容技术经济模型）的设计是为了洞察合理的途径，技术的创新、输电的扩展、需求的变化和电力系统的政策。这些模型并非特意设计用来“预测未来”。最后，情景建模的过程可能令人望而生畏，特别是处理中国国家可再生能源中心的系统等这样大型的系统时。这就需要利益相关者在各个阶段的参与，特别是与情景设计、输入假设和建模方法相关的阶段的参与。在未来情景中进行了多项技术特定的综合研究后，NREL 的经验显示，在整个过程中让利益相关者和观众有效参与至关重要，包括对中间结果进行评论。最坏的情况是，一个重大项目历时数年，仅由于建模团队独力工作而忽视了一个误差，最后被利益相关者驳回。NREL 此前公布了一份有关与利益相关者讨论建模结果的经验教训的报告；该报告的要点见附录 A。

本报告的目的在于，详细解决 NREL 方法在可变可再生能源水平显著的背景范围内，对未来扩容进行建模时出现的几个（但不是所有）关键问题。这些问题是根据其对情景建模的重要程度，以及其特定于中国国家可再生能源中心的重要性而选定，以期为模型和情景分析的改进提供信息。这些关键问题涉及的主题包括技术成本和性能、关键电网运行问题的建模、情景建模（包括地域性和可视化）等。

问题一：使用扩容模型可回答哪些分析问题？

NREL 使用扩容模型示例

NREL 自 2001 年已开始着手进行电网扩容建模，并开始建立 WinDS 模型 (Blair 等, 2008)，其随时间的推移已经发展成为 ReEDS (NREL, 2015a)。ReEDS 已被广泛用于检验美国电力系统的研究情景，以及技术创新影响和政策情景。在下面列出的一系列重点研究的基础上，NREL 还进行了其他研究，来分析解答焦点问题。使用扩容建模进行分析的一些关键例子包括：

到 2030 年风能发电占 20% (能源效率和可再生能源局, 2008)：此 WinDS 模型用于构建 2030 年 20% 发电来自陆上和海上风电的情景。WinDS 评估在这种情况下的风能最佳分布格局，并评估和报告了这一水平下风点电对电网的影响。

评估实施联邦 20% 可再生能源配额 (RPS) 提议 (Logan 等, 2009)：本报告的编制是用于调查当时尚在考虑中的联邦可再生能源配额的影响。该政策要求全国 20% 电力来自可再生能源，这个约束条件在 ReEDS 中比较容易考虑。Logan 等专家使用 ReEDS 进行了各种敏感性分析，探讨对不同可再生能源配额目标效果产生影响的因素。其中决定如何表示模型中地理区域的要件之一是确立政策分析的类型。

- *SunShot Vision 研究 (DOE, 2012)*：这项研究评估了大型光伏电站造价下降到 1 美元/瓦的影响，同时也分析了住宅和商业建筑用光伏以及聚光光伏成本达到同样降幅的影响。在该项目中，我们再次使用 **ReEDS** 来评估这些光伏降成本战略与其他可再生能源和传统发电技术相比，可实现多大的潜在容量增长和能源贡献率。
- *总统 2020 年美国可再生能源发电目标的 ReEDS 建模 (Zinaman 等, 2014)*：此项分析的独特性在于评估周期为近期 (从现在至 2020 年期间)。许多扩容模型的重点是试图获得正确的远期情景，而不会特别注重获得准确的近期电网详细信息。由于这一分析仅关注到 2020 年，需要重新审视现有的传统发电机组及发电厂的特点。
- *新《风能发电展望报告》 (DOE, 2015a)*：此项报告对 *截至 2030 年风能发电占 20% (能源效率和可再生能源局, 2008)* 的阐述所进行的更新包括对风电技术成本和性能的更新，对电网的更新以及对 ReEDS 范围内所显现的改进。在 *截至 2030 年风能发电占 20% (能源效率和可再生能源局, 2008)* 报告中，风能在美国中部地区获得了重大发展，相应地需要使用新的输电线路将电力传输到东部各州。新版报告中考虑了新推出的低风速风机和性能提升的高风速风区机型。分析结果表明，开发低风速地区

的经济性比开发中部高风速资源区的经济性更好，因为离用电负荷较劲不需要建设新的输电线路。

- **2015 标准情景** (Sullivan 等 , 2015) : 本报告阐述了到 2050 年美国电力部门发展的 19 个标准情景，以及当前模型的算法和假设。中间情景 (默认情景) 采用了 ReEDS v. 2015.1 版本的默认设定，用电负荷持续增长直到 2050 年，而发电设备自 2010 年开始出现退役。情景假设涉及到不同参数变量包括燃料价格、需求增长率、技术进步和现役机组退役计划等。对于标准情景中测试的每一个参数，根据中心情景中的基准假设，对一组两个场景进行双向分析，例如对高燃料价格的情景和低燃料价格的情景的分析。此外，研究人员选择单独定义的情景以呈现其不同于核心情景所展望的未来，如碳政策。

可再生能源电力未来研究——高比例可再生能源电力未来的探索 (Renewable Energy Futures Study) (Hand 等 , 2012) : 这项研究分析了 30 多个不同的情景，包含可再生能源发电比例从 20% 至 90% 不等的，以及到 2050 年不同技术形式的进步水平。这种复杂的情景安排 (如图 1 所示) 允许作者更深入地比较研究各情景的结果，并在假定参数范围内得出结论。对于中国的情景构建，要求在需求增长假设上考虑更大的变化幅度 (低、中、高增长的情景) ，同时还要考虑技术进步的不确定性，造成这一不确定性的原因主要是由于未来中国的电力系统要求整个市场快速增长。

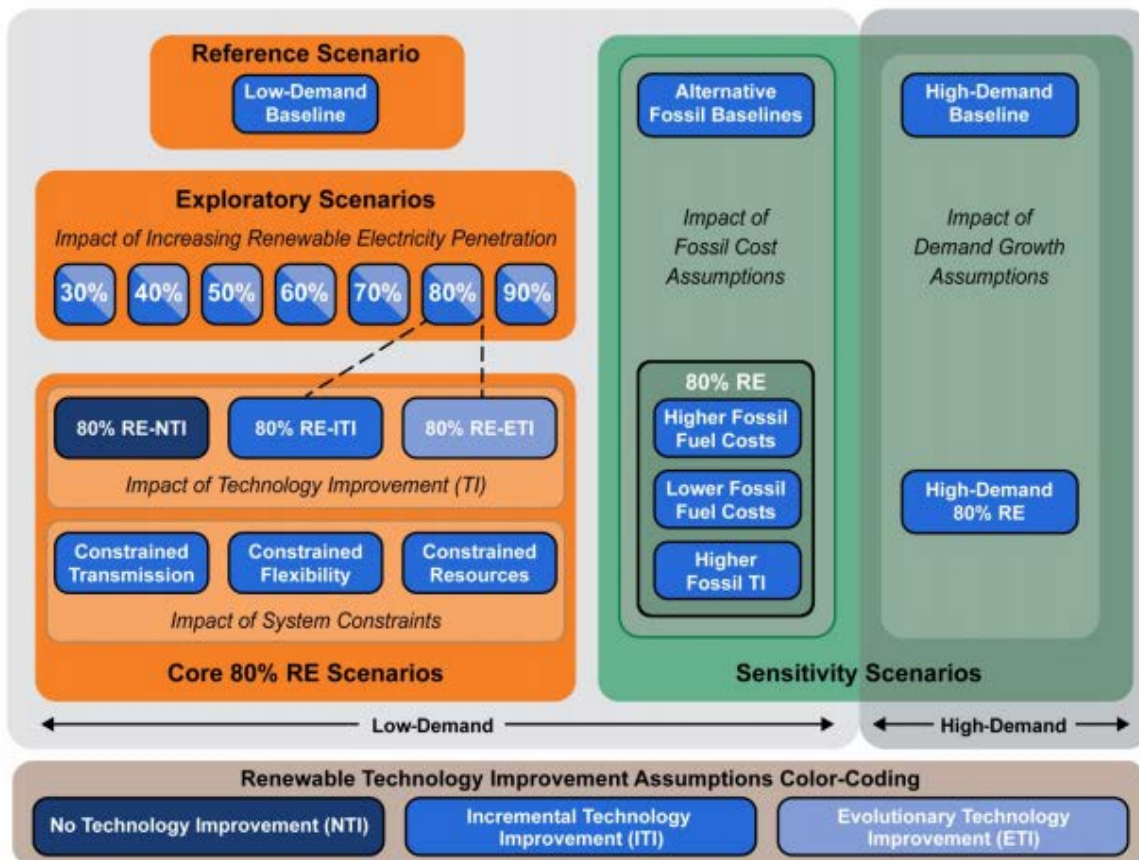


图 1. 可再生能源电力未来研究情景

来源：Hand 等，2012

可再生能源电力研究的另一关键和比较独特的方面是，一旦 ReEDS 生成 2050 年 80% 情景，得出的容量（结果）则通过代入到一个电力生产成本模型（例中为 GridView），并基于小时级别分辨率进行分析。这项活动旨在验证，可再生能源达到 80% 比例时，电网运营和调度将可在全国各地在小时级别满足负荷可靠性。其他研究也在继续探寻如何展示高比例可再生能源的运营影响。可再生能源电力未来研究对于最近公布的中国 2050 高比例可再生能源研究是一个有益的参考。2015 年 4 月，国家发展和改革委员会能源研究所（中国）发起了一项中国 2050 年高比例可再生能源情景的研究（国家发展和改革委员会能源研究所，2015）。本报告中表示高可再生能源比例情景的关键图形如下方图 2 所示。

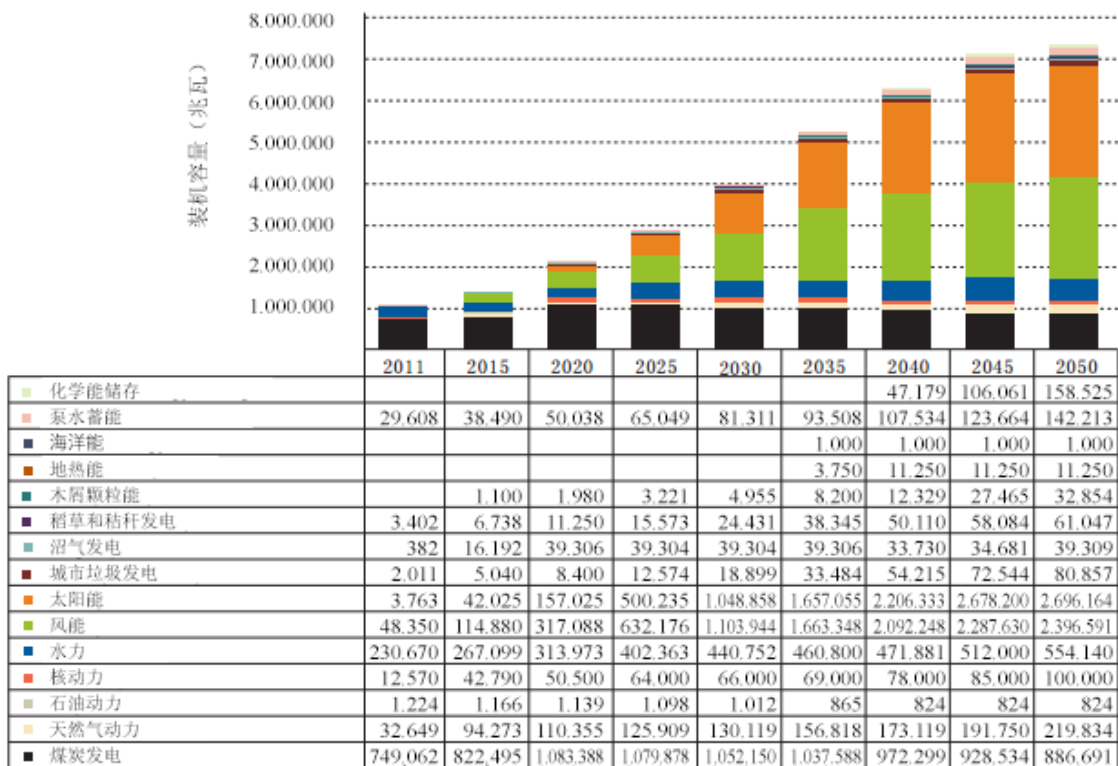


图 2. 高比例情景中的装机容量

来源：国家发展和改革委员会能源研究所，2015

图 2 显示了中国可再生能源分析模型——电力和区域供热优化模型（China Renewable Energy Analysis Model—Electricity and District Heating Optimization, CREAM-EDO）的结果。在高比例可再生能源情景下，中国电力系统中多种电源出现了强劲增长。特别是风能和太阳能，到 2040 年左右，预计均会超过 20 亿千瓦的容量。到 2050 年，地热、水电、海洋能和储能的预测水平都高于 ReEDS 中对于美国 2050 年的假设水平。这些技术的市场增长将影响这些技术在全球的成本水平，进而提升这些技术在世界其他地区应用的潜力。通过优化完善情景假设和补充输入信息方面，CREAM-EDO 的稳定性将继续得到提升。尽管目前中国和美国电力系统差异很大，但二者都可能向更高比例的可再生能源发展，电力系统建模的原则仍对两个国家都适用。

前述的 NREL 项目已经带来了对 ReEDS 的一些改进。首先，ReEDS 有必要做一些优化，包括新技术、以及解决某些具体问题的细节设定。其次，资源、成本和性能指标方面也已更新。最后，包括模型、分析和结果在内的内容都已经过关键利益相关者广泛审查，以确保对关键信息输入和方法进行专业的验证。所有这些优化使得基础模型随着每一项主要研

究的进行而变得更强大。NREL 目前正在进行两项主要研究，这两项主要研究将进一步提高该模型对新增技术的处理能力，包括水力发电和地热发电。

问题二：可再生能源发电扩容建模和表示的关键输入信息

这里审查的扩容模型（NREL 的 ReEDS 和中国国家可再生能源中心的 CREAM-EDO）需要几千条输入信息。本节将专注于成本和性能数据输入，并探索一些经验教训。

负荷数据

ReEDS 使用 EIA 年度能源展望报告（EIA，2015）中的历史负荷数据（按地区和时间段）。然而，负荷轨迹随着时间的推移并不是固定的：它们随着 ReEDS 中计算的电力价格和预期电力价格之间的偏离程度的变化而进行调整。每次优化后，一个区域电价变量在 ReEDS 中生成，并用于调整随后几年的负荷增长预测（Short 等，2011）。

中国的负荷数据有所不同，可能比美国更具动态变化性。尽管过去两年中国的电力需求增长放缓，但在未来 10 年，由于城市化推进，中国的总体负荷增长预计比美国或欧洲要快得多。然而，因为经济结构转型，中国的中长期负荷增长轨迹具有高度不确定性。国家发展和改革委员会能源研究所、国际能源署和劳伦斯伯克利国家实验室的研究显示了截然不同的未来能源消费曲线（Zhou 等，2013；国家发展和改革委员会能源研究所，2015）。这种增长的不确定性对中国建模的大部分最终结果有重大影响。图 2 显示，如果 2015 年至 2050 年电力负荷增长平稳，则不需要新增大量的风能和太阳能。该负荷数据的假设应再三斟酌，且需要通过情景法考察验证一系列值。

可再生资源数据

掌握理解一个地区或国家的可再生资源数据（例如太阳能、风能、地热和水力等）的详细信息，对于模型能否取得准确、详尽的规划结果至关重要。美国建模机构具有可获取公开的年均太阳能数据集的优势。尽管需要克服不小的困难，但在美国还是能有效地完成风资源数据的获取。国际陆上资源数据是从各种现有数据拼凑而来。这带来了一个关键问题，就是大规模的基于地理分布的平均计算方式会将使非常好的资源与普通资源难以区分，进而难以首先聚焦于经济效益最好的地区（见 Sullivan 等，2014）。详细的可再生资源数据将使模型选择最具成本效益的位置进行部署，从而促进产业发展和经济增长，但边际成本降低。在 ReEDS 中，有 356 个美国郡县级别的风能/聚光太阳能资源数据。基于这样的数据，才可以判断是否应新建风能或聚光光伏或有资源条件限制（Short 等，2011）。

将资源数据与其他土地数据集相结合，以确定不可开发区域（例如，公用事业规模太阳能发电厂不能在黄石公园的中间建造），从而获取太阳能可开发成本供应曲线。在中国，中

国气象局的风能和太阳能资源中心拥有两组可再生资源数据。一组根据卫星数据计算并利用来自全国各地 96 个观测站的观测数据进行校准而得来；另一组则是全国各地 2,000 多个气象观测站的日照时数采集数据与观测数据的结合数据。中国可用资源数据分辨率通常是 45 千米 x 45 千米。2014 年，中国气象局通过应用统计调整将风资源数据缩放到更高的分辨率（1 千米 x 1 千米）（中国气象局，2014）。

输电线路

当前传输线路精确定位是 NREL 执行的美国分析中的一个关键数据设定。这些数据对于确定电力潮流走向，以及如何优化系统将风能发电、太阳能发电、燃气发电和其他形式的发电增加到现有传输系统都至关重要。然而，由于情景预测更关注未来，所以建设新的输电线路（包括输电成本价格）。表 1 包括 ReEDS 模型中的新输电线路和线路连接有关的主要假设，其他详细信息可在 Short 等 (2011) 中获得。对于风能、聚光太阳能和光伏技术，由于它们的资本成本（造价）假设包括场变（电站）、短支线和变电站的相关升级，所以没有额外的并网成本（Sullivan 等，2015）。

表 1. 输电线路和并网条件假设

类别	范围
平衡区之间线路成本（美元/兆瓦-英里）	800 美元 – 7,580 美元
变电站成本（美元/兆瓦）	11,800 美元 – 28,600 美元
联络线 (AC-DC-AC) 成本（美元/兆瓦）	250,000 美元
平衡区内线路成本（美元/兆瓦-英里）	2,400 美元 – 10,680 美元
输电损耗	每 100 英里 1%

由于美国电力负荷预计不会出现像中国电力系统的大幅增长，在未来几十年，美国的输电基础设施将保持当前状况基本不变。相反地，在中国，因为在未来的几十年里该系统预计将迅速增长，所以输电建设的精确建模对于评估未来情景来说非常重要。

燃料价格

至于负荷预测，NREL 使用 EIA 《年度能源展望》（EIA，2015）对于天然气、煤和核燃料的价格趋势走向的预测，并内置了一些区域变化和弹性选项。这减少了建模的负担，但没有在 ReEDS 模型中得到有关燃料价格真正有效的反馈，并可能忽略一些围绕天然气或煤炭分布的详细区域分布问题。在某些 ReEDS 情景中，煤炭发电量急剧下降会推低 ReEDS 中的煤的价格。ReEDS 利用多个基于 NEMS 的情景提供的煤和天然气价格弹性

信息解决这个问题。ReEDS 团队还开始将模型与其他组织建立的更详细的天然气市场模型关联。

由于一些中国的情景预计所有形式的能源供应（包括化石燃料）急剧增长，天然气和煤炭供应方面的建模值得关注。

技术成本简介

如简介中所述，NREL 已经从事各种技术具体分析工作超过十年。在此期间，可再生能源技术的成本和性能发生了显著变化，主要体现在成本更低，性能更好、更可靠。因此，采集最新的成本价格数据并确保分析过程稳定可靠对于预测未来成本和性能数据非常重要。如上所述，中国的成本问题非常复杂，因为中国预期增长水平远高于其他国家，以至于中国市场可能会具有自己的动态特性，并可能会显著影响一些技术的全球市场价格（例如，太阳能光伏 [Gan 和 Li，2015；国际能源署，2014]）。因此，规模经济（成本削减）效应是中国这一分析的关键部分。在美国，即使基于美国市场状况的技术成本反映了全球动态，但规模经济效应对最终结果并不具有像中国那样的影响力，这是因为通常分析的比例不会像中国的部署在某些情景中那样带动整个全球市场，如中国国家可再生能源中心正在建模的那些情景。

年度技术参考

NREL 年度技术基础情景总结了成本和性能数据，以及至 2050 年的成本预测数据（NREL，2015b）。所报告的数据体现了在提供持续技术成本和性能数据，以及定义一种概念化、持续的情景模式用于未来分析等方面所作出的努力。这工作的长期目标是在考虑特定能源系统问题的情况下，确定美国未来电力发展的一系列情景。年度技术参考 (1) 定义了一组包含关键技术、市场和政策假设的未来情景并 (2) 在 NREL 的市场模型中评估了这些情景，以了解所产生的结果的范围，包括能源技术的规划部署和生产、能源价格和二氧化碳排放量。初步的具体成果包括：

年度技术基线工作手册，记录了可再生能源和传统技术的详细成本和性能数据（当前和预计的数据）。

PowerPoint 格式的年度技术基线总结陈述，描述了每一种技术并为其在工作手册中的处理提供额外的背景。

目前年度技术参考包括以下技术：

陆上风力发电

海上风力发电

大型光伏电站

聚光太阳能发电

地热发电：闪蒸双工质有机朗肯循环

水力发电：升级到现有设施、供电到无动力的大坝和新河流发展

传统发电：煤（若干形式）、天然气发电机组、天然气联合循环、生物能源、核能和具有碳捕获和封存选项的多种能源。

从这个列表可以看出，NREL 和其他机构（不包含中国国家可再生能源中心）在针对中国建模时包含的几种技术，如海洋能技术。NREL 目前没有足够的关于这些成本的数据或研究，以在年度技术基础情景构建中将它们有效地表示出来。此外，无论是地热技术，还是水电技术，目前都不包括未来成本预测——虽然正在规划着在其他方面着手来对未来进行预测。

对于每一项技术，资本成本、运营和维护以及性能都体现了实际和未来的情况。这些数据被编入一个电子表格中，如图 3 所示。为实现可视化，这个电子表格是本着可访问、易于理解且易于操控等特点来设计的。

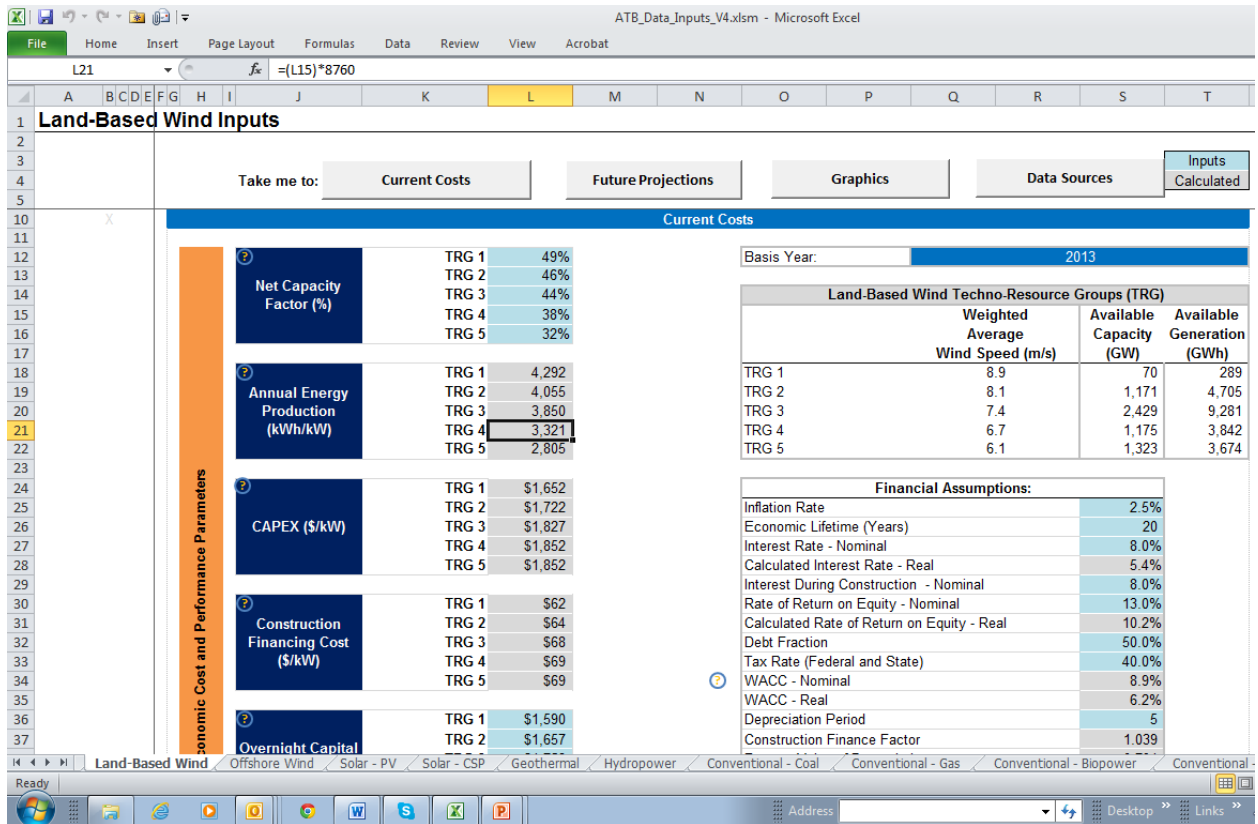


图 3. 年度技术基线数据输入表截图

NREL 在 ReEDS 中与中国国家可再生能源中心在 CREAM-EDO 中采用的 2014 年技术成本数据的比较，显示二者在资本成本和一些年度运营和维护的固定成本方面有显著差异（见表 2）。年度技术基线数据用当前值表示了美国 2014 年的技术成本，并在 ReEDS 中里采用未来成本轨迹；CREAM-EDO 数据代表了中国预计在 2010 年到 2019 年之间所需的技术成本，以 2011 年的人民币计，在表中按照 2014 年的平均人民币/美元汇率转换为美元。因为 CREAM-EDO 还没有施行成本随时间的变化，所以该表有效地将 2014 年模拟中所使用的技术数据在 2 种模型中进行了比较。如表 2 所示，一般而言，美国资本成本数据远高于中国。这不仅是相同技术条件下不同国家的成本差异的结果——包括土建和结构成本、机械设备的供应和安装、电气仪表和控制、项目间接成本等——而且也表明，对于特定类型的发电，由于政策环境不同，在中国与美国可能会运用不同的技术。例如，中国煤炭厂长期以来已在成熟技术条件下实现了成本控制的突破且较少在环境整治方面进行投入因而中国煤炭发电厂的资本成本远低于美国的新煤炭发电厂。

表 2. 年度技术基础情景和CREAM-EDO的技术成本比较

类型	资本支出 (美元/千瓦)		固定的年运营和维护 (美元/千瓦)		可变运营和维护 (美元/兆瓦时)	
	年度技术基线	电力和区域供热优化	年度技术基线	电力和区域供热优化	年度技术基线	电力和区域供热优化
风能——陆上	1,827.00	1,381.94	51.00	10.88	0.00	0.00
风能——海上	6,340.00	2,343.29	132.00	17.41	0.00	0.00
太阳能——光伏	2,647.00	1,299.12	18.00	26.79	0.00	0.00
燃气——联合循环	1,021.00	3,57.26	14.00	7.37	3.00	0.06
煤炭——新	3,446.00	1,266.65	32.00	29.36	5.00	3.70
生物质能	4,278.00	1,688.86	107.00	29.94	5.00	2.68
核动力	6,482.00	2,101.33	95.00	133.16	2.00	4.71

通过年度技术基线，这些技术的成本和性能可以通过简单的平准化能源成本计算进行比较。² 下面三个图表示陆上风能、太阳能光伏和聚光太阳能的当前和未来平准化能源成本计算结果。

² 有关平准化能源成本计算方法的更多信息，请参见 Hand 等 (2012) 区域能源部署系统模型扩容决策不直接依赖于平准化能源成本；图 4 至图 6 所示的平准化能源成本仅供说明之用。

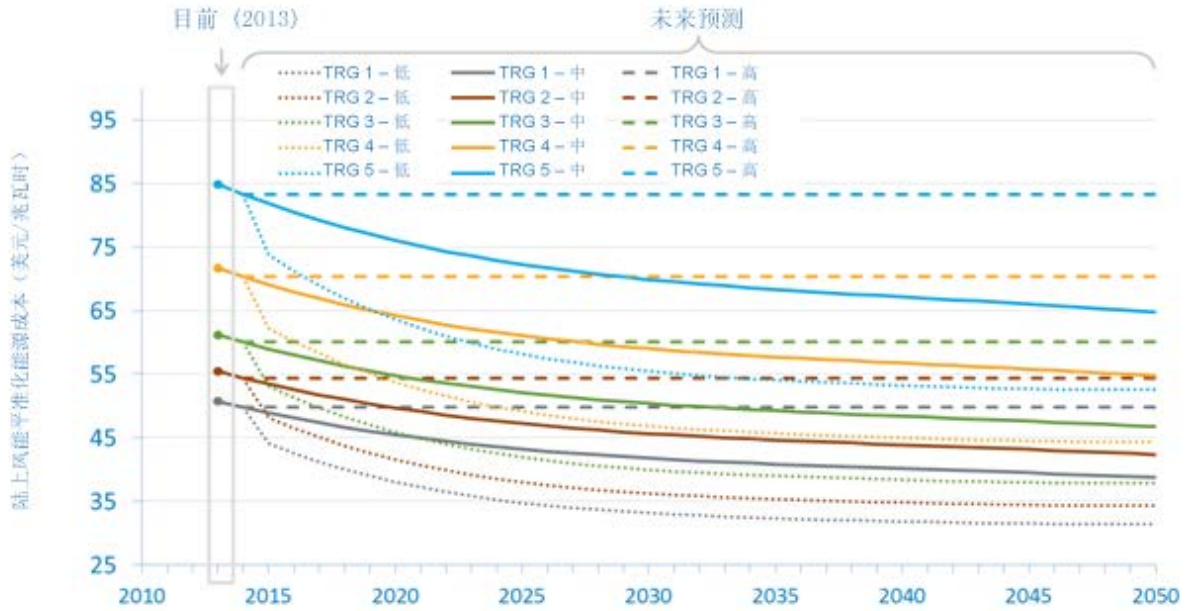


图 4. 陆上风能的当前和未来平准化能源成本 (年度技术基线)³

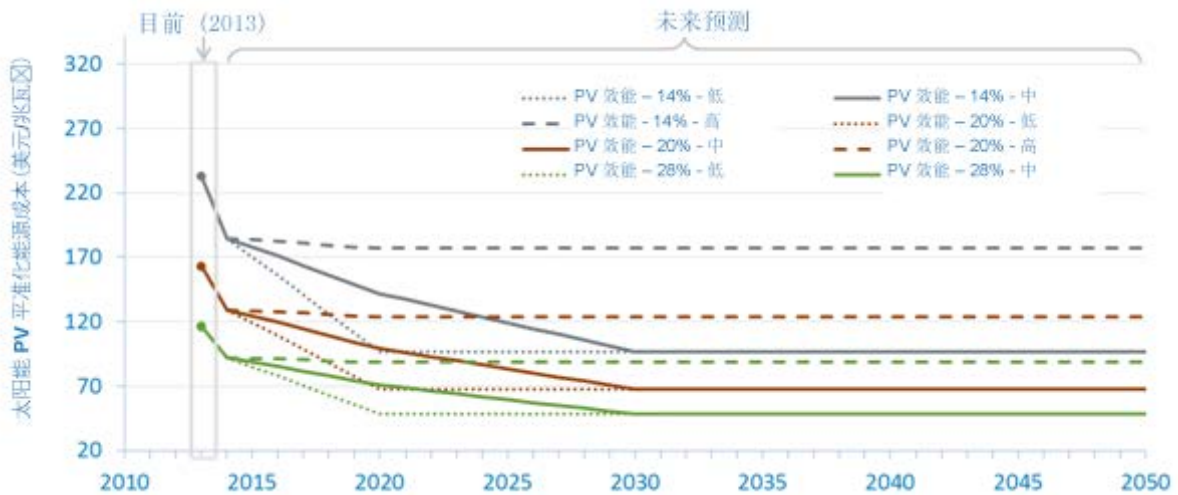


图 5. 太阳能光伏的当前和未来平准化能源成本 (年度技术基线)

3 科技资源组 1 至 5 表示最佳风力资源类 (1) 到不太理想的风力资源类 (5)。

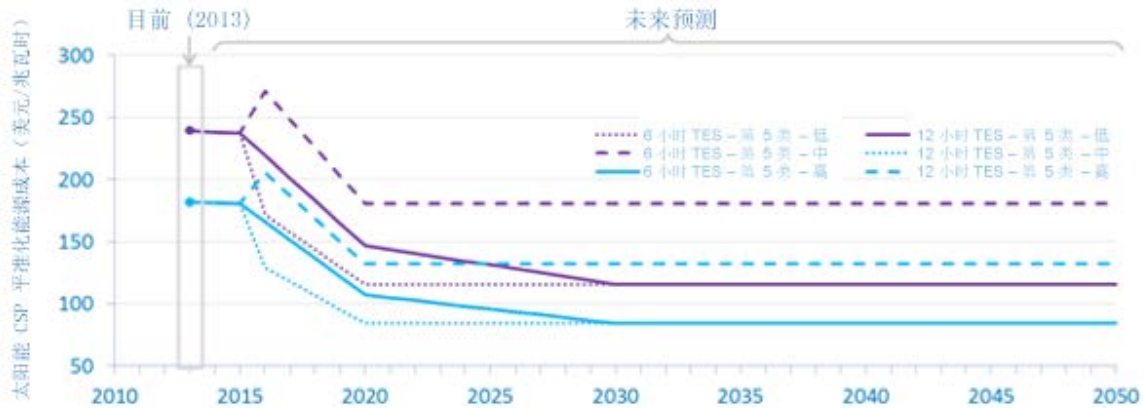


图 6. 聚光太阳能的当前和未来平准化能源成本 (年度技术基线)⁴

根据这些图表可以得出几个与中国问题相关的关键结论。第一，特定发电厂的平准化能源成本是受到本地资源、资本成本、运营和维护、燃料和性能（例如，容量因素）所决定的一个函数。因此，以特定成本可获得的资源是一个关键输入数据。资源数据是资源地理分布的一个函数，因此宜采用更高的资源分辨率，以确保不会错过高资源矿囊。第二，预计在未来的几十年中，这三项关键技术的成本都将继续下降。NREL 透明成本数据库 (NREL, 2015c) 如图 7 所示，包含源自几十个报告（包括年度技术基线）针对每种技术的广泛成本和性能数据估计，这些报告得到 DOE 和外部数据源的支持。

4 TES 代表热能储存。此图显示了在低、中、高成本的情况下储存量不同（6 小时和 12 小时）的相同资源类的聚光太阳能发电厂的成本轨迹。

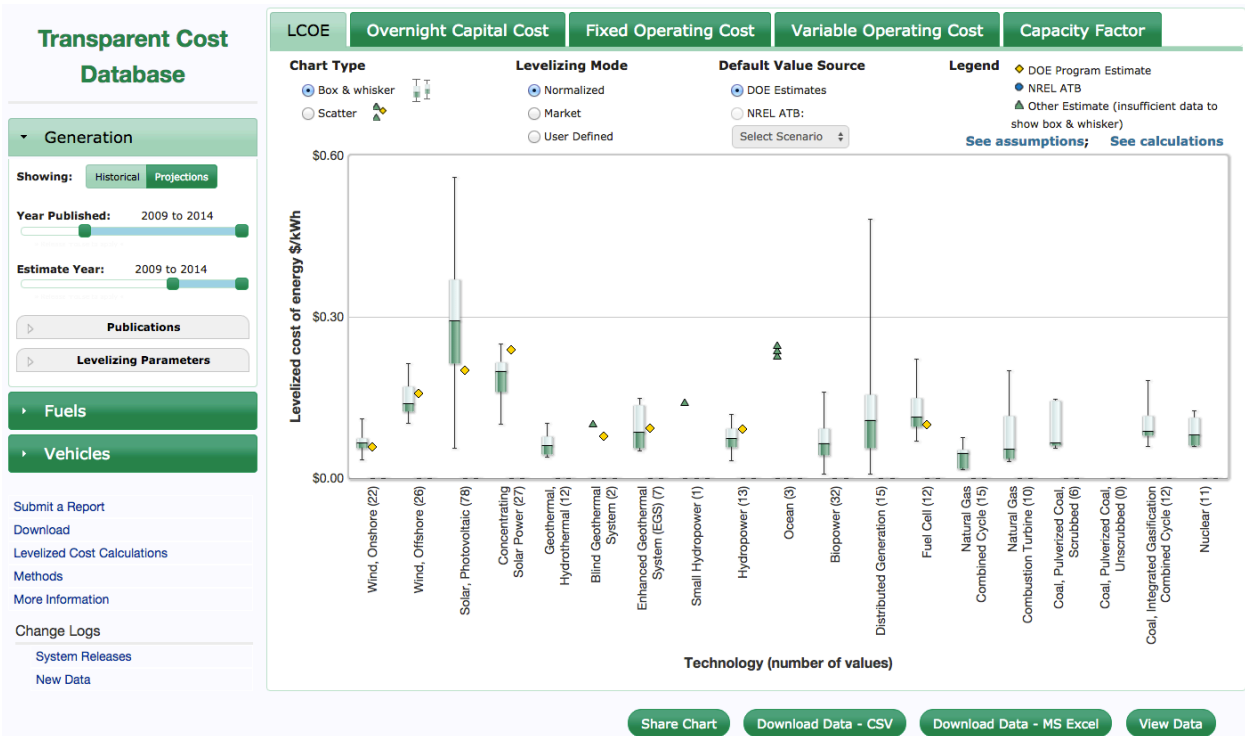


图 7. 透明成本数据库在交互式浏览器中呈现数百个成本和性能数据点，并允许用户探索每一个具体的数据点

技术成本和性能数据的经验教训

首先，数据的来源对期望结果的达成至关重要。图 8 显示了年度技术基础情景范围内不同技术间的平准化能源成本（度电成本）比较。每种可再生能源技术的成本以一个范围显示，对应美国的不同资源区域；相比其他地方，一些地区拥有更好的太阳能或风能资源。水电站有众多的特定地点，也可以在这些地点部署。另一方面，传统技术在全国各地的成本变化非常微小，导致每种技术由一个单一的点表示。燃料价格和安装成本在全国各地有所不同，但与资本成本和国家平均燃料价格相比，这些都是微小的。

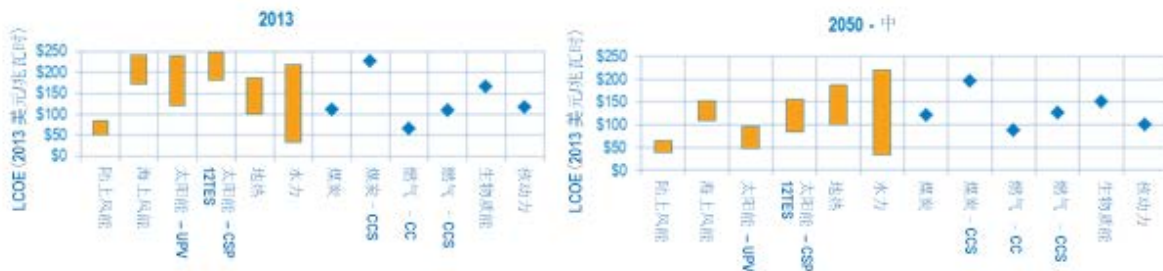


图 8. NREL 年度技术基线中线情况至 2050 年的平准化能源成本预测比较

第二，哪种技术在该国某一地区最便宜并不是显而易见的；成本取决于地点和技术进步的假定途径。此外，2050 年的值或任何未来值的不确定性一直非常高。例如，1970 年代的美国核能比例估计显著高于今天的实际比例，且在 EIA 参考情景中，风力发电容量的增长一直被低估（Semenov 等，1989；EIA，2005）。因此，为了评估可能的未来配置，在复杂情景建模工具如 ReEDS 或 CREAM-EDO 中使用一系列的输入数据非常重要。了解各种技术成本和性能数据背后的方法和假设很关键：特定技术的任何系统性偏差都可能极不恰当地改变情景结果。例如，如果认为地热未来预测发生的可能性只有 30%，而风能未来预测则是 90% 以上可能实现，那么这些轨迹不应该给予相等的权重。此外，在不同的研究和用于计算平准化能源成本或其他度量的算法之间，术语的定义（如“隔夜资金成本”）甚至也可能有所不同（即，定义中包括或不包括什么项目）。由于方法和假设的差异，某些组织试图从同一实体获得技术成本和性能数据，以便这些成本估计使用一致的方法。NREL 此前将此工作转包给咨询公司，由其提供一组所有技术都一致的成本和性能数据。这些主要报告的一些利益相关者发现这些数据有效，但不完全透明，这是因为这些公司需要保护一些原始的机密源数据。因此，NREL 和 DOE 电力行业项目已经转向了一种更倾向于逐个技术具体分析的方法。年度技术基础和其他相关工作试图证实 (1) 术语的定义是特定的且一致的，以及 (2) 平准化能源成本等度量的计算得到一致的应用。这些努力得到了技术专家团队的支持，深入了解风能技术的团队将估计当前和未来风力发电成本，而太阳能、生物质能和水电技术专家将分别对他们各自的专业技术领域进行类似的工作。

问题三：电网运行操作原理和规则在 ReEDS 中的表示

ReEDS 中的技术约束

ReEDS 在寻求最低成本的解决方案的同时提供了各种各样的约束。其中一些约束是物理约束（即负荷约束），一些是当下电网运行的典型约束（即储备余量），而有些则是政策驱动的约束（即州级可再生能源组合标准约束）。本节列出了 ReEDS 中表示的一些关键约束。

- **负荷约束**：这个约束要求发电侧在所有时间与负荷匹配。负荷约束也要求，在每个时间片产生足够的电力并在当地使用或通过传输可供使用。在 ReEDS 中，每个季节选取四个代表日，每天各有四个时间片（例如，冬天的早晨），总共 16 个时间片，加上一个额外的“超级峰值”时间片。
- **备用容量裕度**：这个约束意味着备用容量（在一个平衡区域内或通过跨边界的贸易）能够满足峰值负荷，并具有剩余的余量。在实践中，法律要求服务供应商具有的可靠容量超过预期峰值负荷一定比例，称为“备用容量裕度”。在美国，备用容量裕度要求通常为 15%。
- **备用容量**：ReEDS 要求日常运行储备要求得到满足。发电机和储能技术的灵活性取决于发电厂改变其输出的能力及其必要的时间尺度。给定启动时间和升降速率，对不同技术进行归类，以能够提供不同的旋压储备或快速启动储备。旋压储备可以通过以低于最大容量运行的发电和储存技术提供。为满足要求而可计入的容量取决于可以快速提升的量。快速启动储备可以通过能够快速（如少于 10 分钟）从冷态开始发电的技术提供。例如，天然气燃烧涡轮机可以提供快速启动储备。此外，需求侧可中断负荷也有助于满足储备要求。所有运行储备要求必须在所有时间片中的每个储备共享组中得到满足。以下运行储备要求在 ReEDS 中予以考虑：
- **应急储备要求**：这些要求可在发电机或输电线路运行状态由于不可预见的中断等情况而发生不可预料的变化时，确保不会导致电力终端用户的长时间断电。在 ReEDS 中，应急储备要求设置为每个时间片需求的 6%。此要求至少有一半必须用旋压储备或可中断负荷满足；另一半可以用快速启动装置满足。

- 频率调节储备要求：这些要求确保需求和发电量之间的一分钟内偏差最小化。由于涉及的时间短，只有旋压储备可以满足频率调节要求。在 ReEDS 中，该要求设置为每个时间片平均需求的 1.5%。
- 可变可再生能源预测误差储备要求：这些要求可确保系统的稳定性，尽管风力和太阳能光伏预测存在不确定性。一般情况下，预测误差储备要求随着风力和光伏比例的增长而增加。

虽然这些约束都是基于提供可靠性的物理需要，但所设定的实际水平是基于可靠性与成本决定的。迄今在美国，成本已被吸收，以保持非常高的可靠性。虽然 ReEDS 有一个有限的方法基于整年 17 个时间片进行调度（没有详细升降率相互作用的小时内评估等），可再生能源电力未来研究在 GridView 中运行了相同的情况，以验证 ReEDS 含 80% 可再生能源发电的发电组合可以满足小时级的需求，且正在用另一个生产成本模型 PLEXOS 进行工作，以检验高比例可再生能源发电的运营影响。迄今为止，在可再生能源电力未来研究报告中，重要可再生能源发电的存在通常需要更多的电力传输、更大的控制区域用于电力运营，还可能需要在面临高比例可再生资源的低需求时期削减可再生能源发电。例如，阳光明媚的春天，不是很温暖（低冷却负荷要求），同时也有风，这通常会导致存在多余的太阳能和风力发电。结合最小上升水平和常规发电厂的运行时间，这可能导致削减可再生能源发电。

为了按中国国家可再生能源中心要求提供这些储备的其他例子，附录 B 介绍了三组得自最近的标准情景研究的中心情景的数值。这种情景到 2050 年在美国电力行业达到约 45% 的可再生能源发电（包括水力发电）。这三个数据集是储备余量数据（表 B-1）、按技术分的快速启动和旋压储备（表 B-2）以及风能和太阳能的预测误差（适用于 2015 中心标准情景）（图 B-1）。

区域性

扩容模型的地域性通常表明几个空间层次分解中的其中一个层次。理想的情况下，最准确的答案来自以尽可能小的地理规模并结合适当的政策和监管决策进行的建模。这提供了可再生能源资源、政策决策和成本决定以及其他各种因素（包括人口统计）的最佳表示。然而，精细的空间分辨率可能产生的大量数据将需要 (1) 大量的计算资源来管理数据和解决模型，以及 (2) 大量工作来分析输出、维护模型、检查错误，并收集和维持数据。这种张

力要求建模者注意回答所提出的问题所必要的空间分辨率水平。2007年，NREL撰写了一份关于空间分辨率的报告，比较了几种模型，并对空间分辨率的相关问题进行了深入探讨。下面讨论的一些概念是从该报告中摘录出来的 (Short 2007)。

一个模型 (或一般模型的特定分析) 中特定空间分辨率水平的必要性由多种因素驱动。主要因素是建模工作要回答的研究问题。确定问题在性质上是在国家层面还是特定于某区域，这通常会推动应进行建模的地理等级。其他关键因素包括区域市场差异、区域间的能源运输和贸易，以及对可再生资源的适当表示。例如，全球模型往往受到其平均风力和太阳能资源数据的限制：特别有吸引力的位置可能会由于其数据被均摊而被掩盖。在线性优化模型中包含大量区域的优点是，可允许更自然的市场反应，而不是“一刀切”类型的反应。例如，对于单个国家区域，一旦某种技术 (如陆上风能) 变得具有成本效益，它就会在整个国家大量发展。然而，在现实中，在某些地区该技术很快就具有成本效益，而在其他地区则要迟一些，导致在技术变得更具广泛的成本效益之前就存在早期采用。

中国有几个地理特征类似于美国。在较高水平上，最好的风能和太阳能资源在地理上远离人口集中的沿海地区。因此，随着中国和美国努力了解实现高可再生能源比例的最佳策略，在更好的资源、更多的传输和可变容量分散之间权衡以减少传输需求，将是关键的关注领域。这些分析问题需要在任何扩容模型中对地域性进行深入审查，并认识到模型必须正确表示从西部到东部的传输和部署能力问题。在 ReEDS 中，考虑了将负荷囊从风能和太阳能资源最佳的区域中分离，这样该模型就可以用来确定独立于其输送使用地点的建立容量的地点。

问题四：模型结果的有效可视化

NREL 研究可视化

广泛的利益相关者对本报告中所描述的详细电力系统分析有相当大的兴趣，其中很多不是电力工程师、经济学家或分析师。问题产生了：如何以不过度“假精确”且简单明了的方式，与非建模者进行有关详细模拟结果的有效沟通？在理想情况下，用户可以理解关键结果，并能够检查其中一些最重要的附加数据，同时不会得出与该模型的不确定性相违背的结论。例如，最近的 2015 年《风能发电展望报告》（截图如图 9 所示）的州级结果可视化可以按时间段浏览（DOE，2015b）。然而，用户不应该假设截至 2050 年在亚利桑那州将建设精准的 2.19 千兆瓦，而是理解为，研究表明了未来在德克萨斯和中西部各州将进行大量风能发电部署。请注意，这就是后处理可视化。

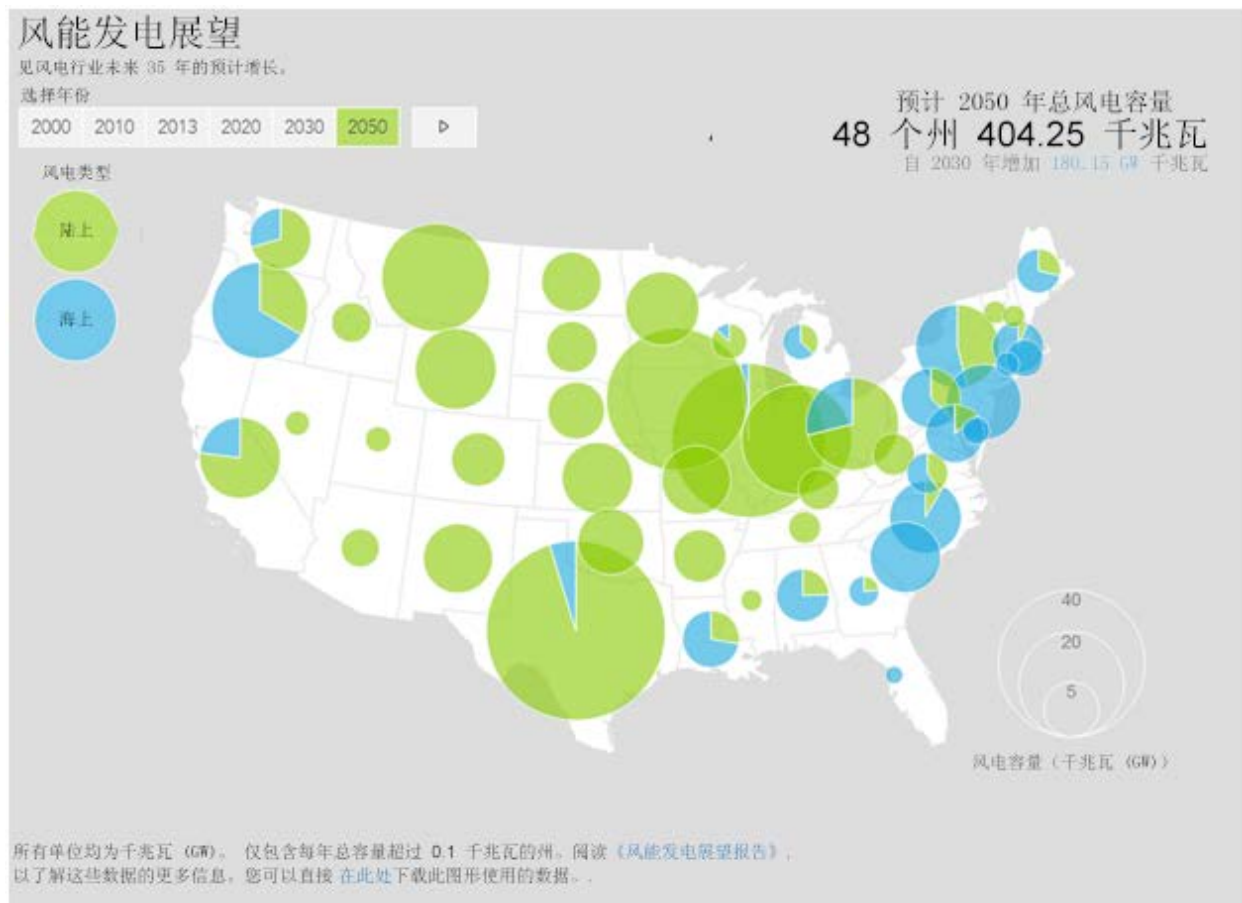
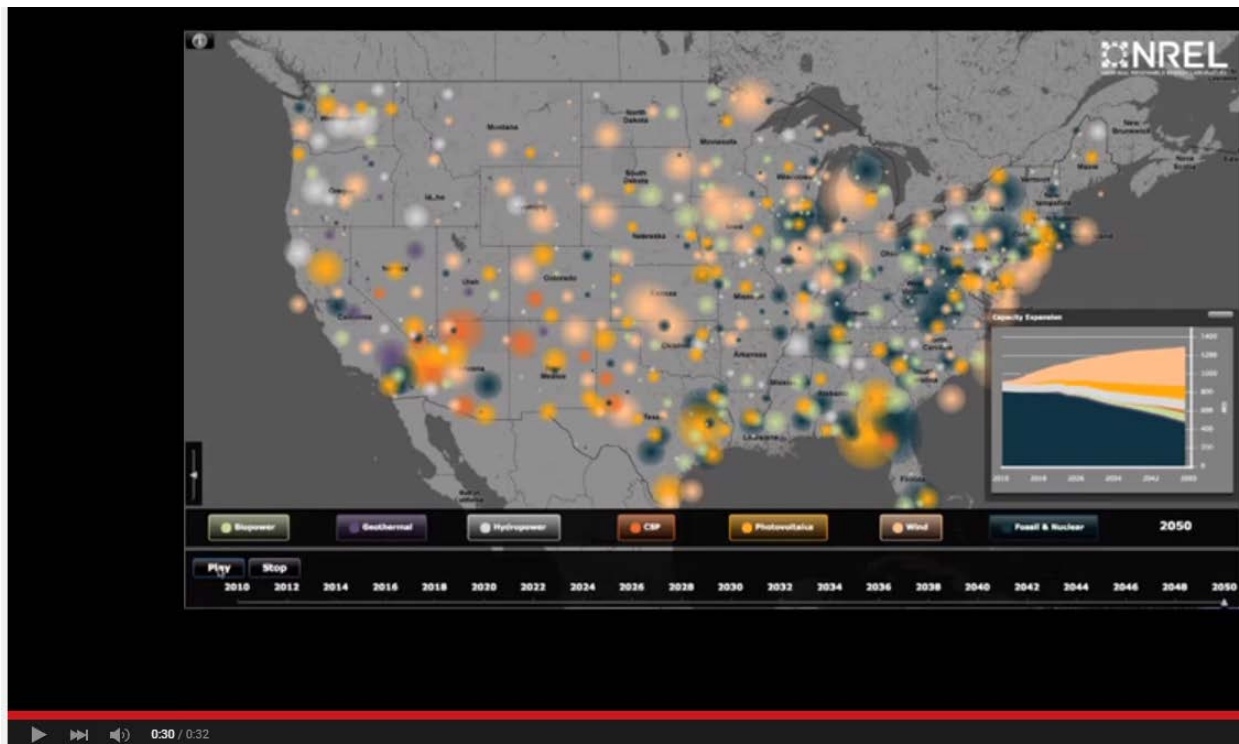


图 9. 2015 年《风能发电展望报告》中的 2050 年风电产业预计增长

有几个其他的具有启发性的动态可视化的例子，经证明是有效的沟通工具，允许用户探索以回答具体问题。在可再生能源电力未来研究中采用了一些开创性的可视化技术。⁵ 用于扩容目的的关键可视化（截图如图 10 所示）以图的形式（右下角）显示了整体的国家容量增长，以及全国各地容量随时间增长的对应位置。原始的交互式可视化允许用户选择自己感兴趣的技术。我们发现，利益相关者往往只专注于某一种特定的技术（风能、太阳能等）。



RE Futures Visualizations - Capacity Expansion High RE sm

图 10. 可再生能源电力未来研究可视化视频截图

有一组新可视化功能采用同样的方式进行可再生能源电力未来研究，但它允许与用户进行更多的互动。这是可再生能源电力未来研究情景浏览器，位于 NREL 网站 (www.nrel.gov)，其初始页面如图 11 所示 (NREL, 2015d)。这种可视化技术可以很容易地适应美国任何未来情景结果。结果可以很容易地添加到浏览器当前所示的一组情景中。

5 见 YouTube。“RE Futures Visualizations - Capacity Expansion High RE sm.” <https://www.youtube.com/watch?v=j2oDtcSkV38>; “RE Futures Visualizations - Dispatch Aug sm2.” <https://www.youtube.com/watch?v=fQl7PS243Dg>; “RE Futures Visualizations - Transmission Flow Aug sm.” <https://www.youtube.com/watch?v=79JAg3lBBeQ>. 访问于 2015 年 7 月 16 日。

(可再生能源电力未来研究情景浏览器的制作如附录 C 所述。) 如图 11 所示，各州的数据在地图上显示，而技术随时间的结果在右侧显示。价格和排放数据独立于所选的技术，在底部显示。用户可以在顶部选择一个情景，用鼠标在单个州上移动，以获得这些州的特定值，并来回滑动年份控件，以查看未来各点的情况。

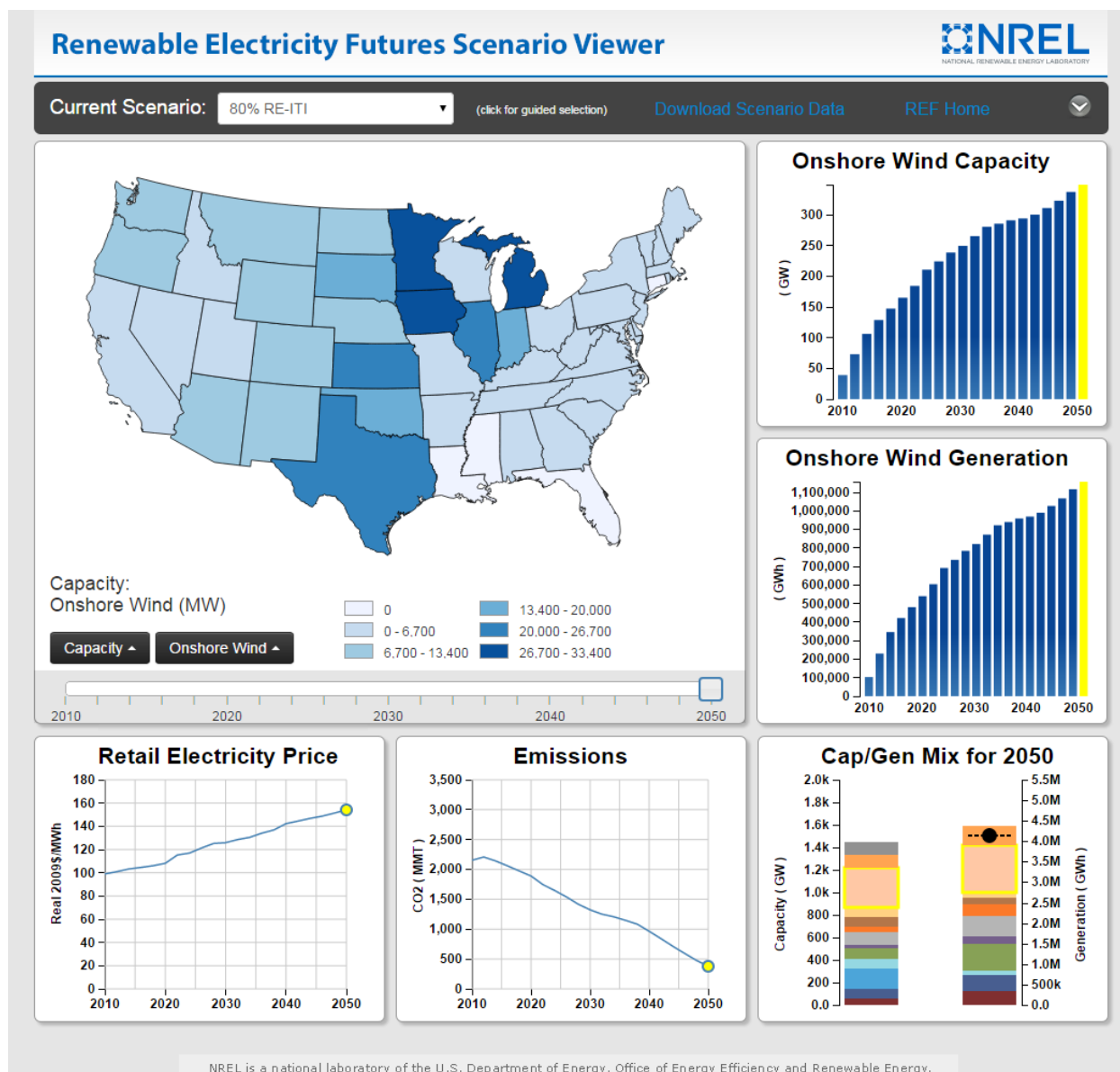


图 11. 可再生能源电力未来研究情景浏览器截图，初始页面

图 12 显示了可再生能源电力未来研究情景浏览器的不同视图。这一次，选择的是光伏效能以及一个不同的情景。各州数据不同，意味着该情景中，大量的公用事业规模光伏发电

将在美国南部和东部建成。鼠标悬停在科罗拉多州，以显示相关信息。该情景采用先进的技术改进，且整个国家公用事业规模光伏发电达 400 千兆瓦。

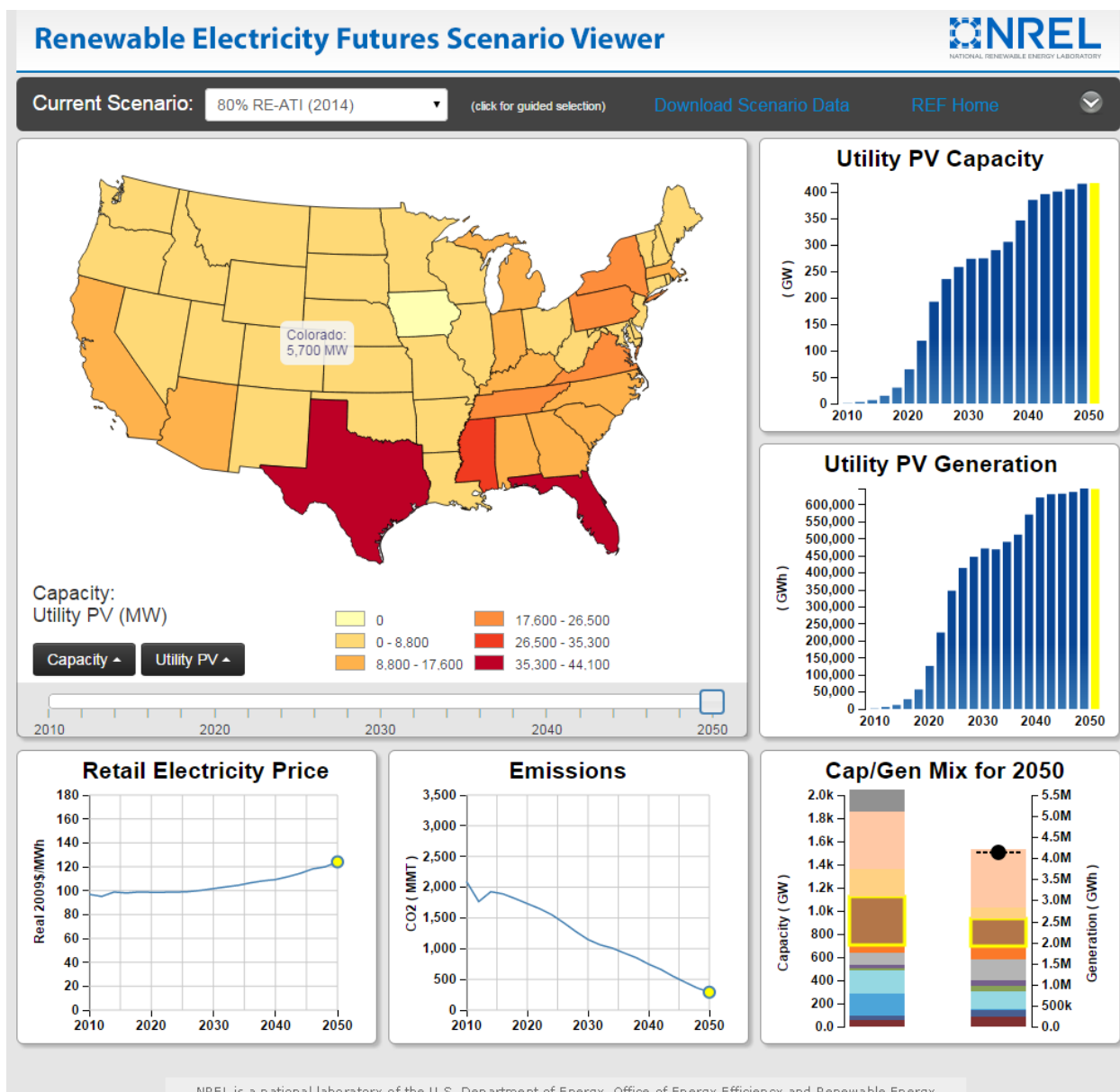


图 12. 可再生能源电力未来研究情景浏览器截图，80% 可再生能源，先进技术改进情景

对于内部审查和验证，ReEDS 团队使用一组自动生成可以为所有模拟查看的图表的 R 脚本。⁶

事实上，团队努力确保对一组广泛的结果进行审查，而并非仅对感兴趣的小范围数据点（例如排放量）进行审查，以确保大量的情景结果适合于假设，且模型不会在其他地方引致错误输出（例如，没有正在建设的可再生能源发电）。这是建模的标准质量保证做法。

6 R 是进行统计分析的一种语言和环境。更多内容见 <https://www.r-project.org/>。

结论

发展与完善电网技术模型是一个长期的、持续的过程。电力系统建模已被证明有助于为有关政策、投资和规划的重要决策提供信息，如 NREL 的几个美国主要电网建模项目，这些项目说明了可以通过电力扩容建模回答的问题类型。NREL 使用的技术成本和性能数据与中国国家可再生能源中心在 CREAM-EDO 中使用的技术成本和性能数据实现了分析和比较。更重要的是，还对数据来源和处理未来成本不确定性的关键经验教训进行了讨论。在情景建模时，加入关键技术约束和适当的地理空间和时间分辨率，已被证明对提高分析的保真度和提供建模稳健性的证据具有价值。在扩容模型中实现更高的空间分辨率的优缺点是在可用数据、模型处理、结果的稳健性和利益相关者收益相关的一系列需要考虑的因素。描述了几个结果可视化的例子，在可视化中可以通过吸引人的、互动的和信息丰富的网络界面满足用户兴趣。

通过 NREL 在电力扩容建模方面的经验，有效的建模工作的几个关键属性包括：

1. 建模过程从一个特定的问题开始。根据这一问题，可以确定适当的模型、适当的空间和时间分辨率和合适的约束。缺乏明确的问题，即便可以构建无数的情景，也无法得出可靠的结论。
2. 唯一可确定的是不确定性。例如，能源行业和电力系统中许多意想不到的转变（例如，美国页岩气生产快速扩张和天然气价格低）是非常难以预测或模型化的。然而，通过比较情景和敏感性分析，模型可以为电力行业的许多问题提供有价值的见解。
3. 输入数据对结果至关重要。数据需要来源一致，注意技术分类一致、度量（如资本成本和性能数据）计算一致。在中国的情况下，应特别关注表示技术成本由于规模经济而下降的数据。
4. 地域性问题应当在扩容模型中仔细审查。例如，在可再生能源资源区域远离负荷中心的国家，将高资源囊与负荷分离的做法值得考虑。
5. 结果的展示需要考虑受众特点，还要找到沟通微妙信息和不确定性之间的平衡点，并让非技术受众也可以不费力理解结论。

参考文件

- Blair, Nate, Maureen Hand, Walter Short, and Patrick Sullivan. 2008. *Modeling Sensitivities to the 20% Wind Scenario Report with the WinDS Model*. CP-670-43511. Paper presented at the American Wind Energy Association (AWEA) WindPower Conference, Houston, Texas, June 1–4. Accessed July 16, 2015. <http://www.nrel.gov/docs/fy08osti/43511.pdf>.
- 中国气象局 CMA (China Meteorological Administration). 2014. *China Wind and Solar Energy Resources Bulletin*. Beijing, China : CMA Wind and Solar Energy Resources Center.
- DOE (U.S. Department of Energy). 2012. *SunShot Vision Study*. DOE/GO-102012-3037. Washington, D.C. : U.S. Department of Energy. Accessed July 16, 2015. <http://www1.eere.energy.gov/solar/pdfs/47927.pdf>.
- . 2015a. *Wind Vision : A New Era for Wind Power in the United States*. DOE/GO-102015-4557. Washington, D.C. : U.S. Department of Energy.
- . 2015b. “New Interactive Map Shows Big Potential for America’s Wind Energy Future.” March 31. <http://www.energy.gov/articles/new-interactive-map-shows-big-potential-america-s-wind-energy-future>.
- Edenhofer, Ottmar, Ramón Pichs-Madruga, Youba Sokona, Kristin Seyboth, Patrick Matschoss, Susanne Kadner, Timm Zwickel, Patrick Eickemeier, Gerrit Hansen, Steffen Schlömer, and Christoph von Stechow, eds. 2012. *Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation : Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom : Cambridge University Press.
- EERE (U.S. Department of Energy Office of Energy Efficiency and Renewable Energy). 2008. *20% Wind Energy by 2030 : Increasing Wind Energy’s Contribution to U.S. Electricity Supply*. DOE/GO-102008-2567. Golden, CO : National Renewable Energy Laboratory. Accessed July 16, 2015. <http://www.nrel.gov/docs/fy08osti/41869.pdf>.
- EIA (U.S. Energy Information Administration). 2009. *The National Energy Modeling System : An Overview 2009*. DOE/EIA-0581(2009), Washington, D.C. : U.S. Energy Information Administration. Accessed July 16, 2015. [http://www.eia.gov/forecasts/aeo/overview/pdf/0581\(2009\).pdf](http://www.eia.gov/forecasts/aeo/overview/pdf/0581(2009).pdf).
- . 2015. *Annual Energy Outlook 2015*. Washington, D.C. : U.S. Energy Information Administration. DOE/EIA-0383(2015). Accessed July 16, 2015. <http://www.eia.gov/forecasts/aeo/pdf/0383%282015%29.pdf>.
- . 2005. *Annual Energy Outlook 2005*. Washington, D.C. : U.S. Energy Information Administration. DOE/EIA-0383(2005). Accessed July 16, 2015. <http://www.eia.gov/oiaf/archive/aeo05/>.

- ETSAP (Energy Technology Systems Analysis Program). 2015. "MARKAL." Accessed July 19. <http://www.etsap.org/Tools/MARKAL.htm>.
- Gan, Peck Yean and Zhidong Li. 2015. "Quantitative Study on Long Term Global Solar Photovoltaic Market." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 46:88–99.
- Hand, M.M., S. Baldwin, E. DeMeo, J.M. Reilly, T. Mai, D. Arent, G. Porro, M. Meshek, and D. Sandor, eds. 2012. *Renewable Electricity Futures Study*. TP-6A20-52409. Golden, CO : National Renewable Energy Laboratory.
- IEA (International Energy Agency). 2014. *World Energy Outlook 2014*. Paris : IEA.
- Kirsch, Laurence D., Mathew J. Morey, Mithuna Srinivasan, Brad P. Wagner, and Bruce Edelston. 2012. *Market Structures and Transmission Planning Process in the Eastern Interconnection*. Prepared for the Eastern Interconnection States' Planning Council. Washington, D.C. : National Association of Regulatory Utility Commissioners. Accessed July 16, 2015. http://www.naruc.org/grants/Documents/EISPC%20Market%20Structures%20Whitepaper_6_15_12.pdf.
- Logan, Jeffrey, Patrick Sullivan, Walter Short, Lori Bird, Ted L. James, and Monisha R. Shah. 2009. *Evaluating a Proposed 20% National Renewable Portfolio Standard*. TP-6A2-45161. Golden, CO : National Renewable Energy Laboratory. Accessed July 16, 2015. <http://www.nrel.gov/docs/fy09osti/45161.pdf>.
- Mai, Trieu, Jeffrey Logan, Nate Blair, Patrick Sullivan, and Morgan Bazilian. 2013. *RE-ASSUME : A Decision Maker's Guide to Evaluating Energy Scenarios, Modeling, and Assumptions*. Utrecht, Netherlands : IEA – Renewable Energy Technology Deployment.
- 国家发展和改革委员会能源研究所 NDRC ERI (Energy Research Institute, National Development and Reform Commission). 2015. *China 2050 High Renewable Energy Penetration Scenario and Roadmap Study*. Beijing : Energy Foundation China. Accessed July 16, 2015. <http://www.efchina.org/Reports-en/china-2050-high-renewable-energy-penetration-scenario-and-roadmap-study-en>.
- NERC (North American Electric Reliability Corporation). 2011. *2011 Long-Term Reliability Assessment*. Atlanta : North American Electric Reliability Corporation. Accessed July 15, 2015. http://www.nerc.com/files/2011ltra_final.pdf.
- NREL (National Renewable Energy Laboratory). 2015a. "ReEDS (Regional Energy Deployment System)." Accessed July 16. <http://www.nrel.gov/analysis/reeds/>.
- . 2015b. "Annual Technology Baseline and Standard Scenarios." Accessed July 16. http://www.nrel.gov/analysis/data_tech_baseline.html.
- . 2015c. "Transparent Cost Database." Accessed July 16. <http://en.openei.org/tcdb>.
- . 2015d. "Renewable Electricity Futures Scenario Viewer." Accessed July 16. http://www.nrel.gov/analysis/re_futures/data_viewer/.

- Semenov, B., P. Dastidar, J. Kupitz, and A. Goodjohn. (1989). "Growth Projections and Development Trends for Nuclear Power." *IAEA Bulletin*. Vienna, Austria : International Atomic Energy Agency (IAEA).
- Short, Walter. 2007. *Regions in Energy Market Models*. TP-620-40506. Golden, CO : National Renewable Energy Laboratory.
- Short, Walter, Patrick Sullivan, Trieu Mai, Matthew Mowers, Caroline Uriarte, Nate Blair, Donna Heimiller, and Andrew Martinez. 2011. *Regional Energy Deployment System (ReEDS)*. TP-6A20-46534. Golden, CO : National Renewable Energy Laboratory. Accessed July 16, 2015.
http://www.nrel.gov/analysis/reeds/pdfs/reeds_documentation.pdf.
- Sullivan, Patrick, Kelly Eurek, and Robert Margolis. 2014. *Advanced Methods for Incorporating Solar Energy Technologies into Electric Sector Capacity-expansion Models : Literature Review and Analysis*. Golden, CO : National Renewable Energy Laboratory. Accessed July 15, 2015.
<http://www.nrel.gov/docs/fy14osti/61185.pdf>.
- Sullivan, Patrick, Wesley Cole, Nate Blair, Eric Lantz, Venkat Krishnan, Trieu Mai, David Mulcahy, and Gian Porro. 2015. *2015 Standard Scenarios Annual Report : U.S. Electric Sector Scenario Exploration*. TP-6A20-64072. Golden, CO : National Renewable Energy Laboratory. Accessed July 15, 2015.
<http://www.nrel.gov/docs/fy15osti/64072.pdf>.
- Zhou, Nan, David Fridley, Nina Zheng Khanna, Jing Ke, Michael McNeil, and Mark Levine. 2013. "China's Energy and Emissions Outlook to 2050 : Perspectives from Bottom-Up Energy End-Use Model." *Energy Policy* 53:51–62.
- Zinaman, Owen, Trieu Mai, Eric Lantz, Rachel Gelman, and Gian Porro. 2014. "ReEDS Modeling of the President's 2020 U.S. Renewable Electricity Generation Goal." Presentation PR-6A20-62077. Golden, CO : National Renewable Energy Laboratory. Accessed July 15, 2015.
<http://www.nrel.gov/docs/fy14osti/62077.pdf>.

附录 A. 政策制定者的十大情景和建模教益

NREL 在 2013 年制定了一份国际能源署可再生能源技术部署的报告，总结了关于如何进行和解释情景建模的指导（Mai 等，2013）。前十个主要结论是：

1. 不要指望一个模型或能源情景来预测未来。一个能源情景展望越来越远，就会引入越多的不确定性。单一情景很少是有用的，必须在更大范围的策略性工作中将其与多样化的替代选择结合和比较。
2. 将模型与问题匹配。能源模型的类型几乎和关于我们的能源未来的问题一样多。确保您想回答的问题是适当的，然后选择能够最佳地解决该问题的正确模型类型。
3. 假设和计算框架要透明。模型需要成千上万的，往往是数百万的输入数据。这些数据的含义要能被所有人清楚地理解。
4. 了解人类行为的表示方式的局限性。典型的能源模型基于整体系统的平衡（供应和需求的匹配）或最小成本点找到解决方案。然而，现实世界的生产者和消费者往往发现他们脱离平衡，且极少能够达成有关系统最佳点的一致意见。
5. 使用不同的工具和方法来解决不确定性。未来的不确定性有不同的形式。有些是“可以特征化的”，而其他则不可以（已知的未知和未知的未知）。
6. 考虑如何对可再生能源的独特特征建模。需要更高的分辨率来对许多可再生能源的位点特异性、变量和不确定性建模。受到计算极限的约束，建模者被迫在减少他们的地理和时间分辨率与简化能源经济的其他方面之间取舍。
7. 有效、恰当地沟通。能源建模是一项高度专业化的工作。建模者认为的“结果”可能并非决策者认为有用的信息。
8. 对偏差要有预期并学会确定它的特点。所有建模方法都无意或有意地包含偏差。能源情景的消费者可以学习确定情景、数据和模型主观性，并采取措施确保适当的解释。
9. 考虑有限建模或无建模的能源情景。作为建模前的第一步，能源情景的管理者应考虑广泛的利益相关者参与，并专注于假设和期望结果的“上游”讨论。

10. 进行回顾性分析，以更好地了解能源情景命中率和未命中率。很多时候，能源利益相关者不会去重新审视为什么某些能源情景与目标相去甚远，或为什么它们提供了意想不到的有价值的信息。

附录 B. 标准情景中的储备

为了按中国国家可再生能源中心要求提供这些储备的其他例子，本附录包括三组来自最近的标准情景中心情景的数值。这种情景到 2050 年在美国电力行业达到约 45% 的可再生能源发电（包括水力发电）。这三个数据集是储备余量数据（表 B-1）、按技术分的快速启动和旋压储备（表 B-2）以及风能和太阳能的必要预测误差（适用于 2015 中心标准情景）（图 B-1）。预测误差储备要求可确保系统的稳定性，尽管风力和太阳能光伏预测存在不确定性。一般情况下，预测误差储备要求随着风力和光伏比例的增长而增加。

ReEDS 中风力和光伏预测误差储备要求被假定为每个储备共享组中各自总预测误差的 2 个标准偏差（Zavadil 等，2004）。储备要求全年保持不变。

表 B-1. 整个情景时间跨度强加于ReEDS的储备余量要求

北美电力可靠性公	
司可靠性区域	储备余量
NORW	17.2%
BASN	12.6%
ROCK	12.5%
CALN	14.2%
CALS	14.9%
MEXW	11.9%
DSW	13.5%
德州电力可靠性委	
员会	13.8%
MAPP	15.0%
SPP	13.6%
MISO-US	15.0%
SERC-W	15.0%
SERC-SE	15.0%
FRCC	15.0%
SERC-E	15.0%
SERC-N	15.0%
宾夕法尼亚州-新泽	
西州-马里兰州互连	15.0%
纽约独立系统运营	
商	15.5%
新英格兰独立系统	
运营商	15.0%
BC	12.3%
AESO	12.3%
SaskPower	13.0%
Manitoba Hydro	12.0%
IESO	21.3%
魁北克	9.7%
Maritimes	20.0%

来源：北美电力可靠性公司，2011

表 B-2. 按技术分的旋压储备百分率和快速启动百分率——ReEDS输入

技术	快速启动	
	旋压储备百分率	百分率
水力	0.5	0.50
燃气轮机	0.833	1.00
燃气联合循环	0.5	0.35
碳捕集和封存燃气联合循环	0.5	0.35
老煤电厂（有些用生物质同烧）	0.2	0.00
新煤电厂	0.2	0.00
煤炭综合气化联合循环	0.5	0.00
碳捕集和封存新煤	0.5	0.00
油-燃气-蒸汽	0.15	0.00
核动力	0.1	0.00
地热	0.15	0.00
生物质能	0.063	0.00

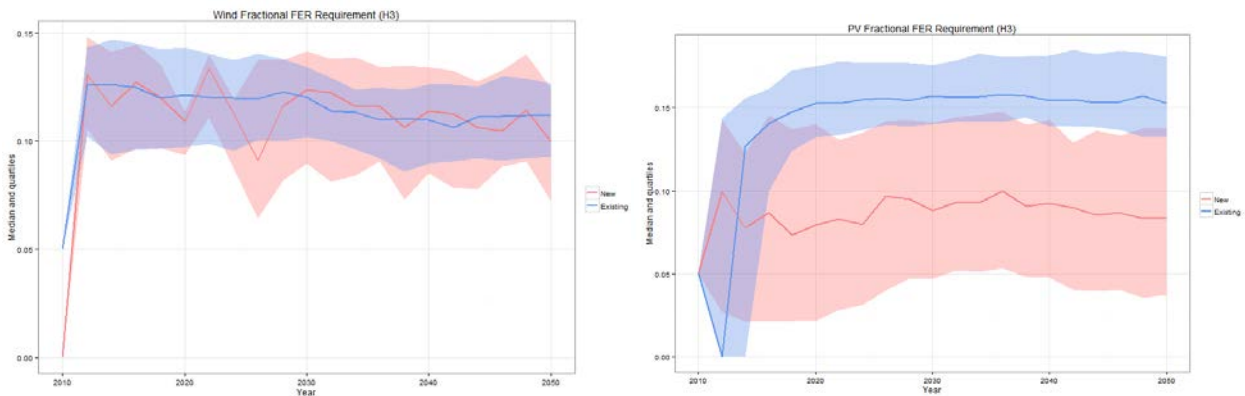


图 B-1. 区域风电和光伏百分率预测误差要求的平均值和五分之一值的图形表示

请注意，对于新风力发电和现有风力发电容量，风力发电通常是在 0.15 和 0.10 之间，而新容量光伏发电通常不到 0.10，现有容量光伏发电则超过 0.15。

附录 C. 可再生能源电力未来研究浏览器的制作

地理空间数据在网络上的可视化或表示相当普遍。在许多应用的实例中，用户可以探索空间数据集、查询数据，并从网络下载数据集。这些工具在 NREL（及其他地方）常常用于这些目的。当数据集非常大或复杂时，提供数据访问变得更加复杂，现有工具开始变得不那么有用。

支持数据在网络上可视化的技术的广泛使用让上述工具的开发成为可能；然而，本研究的数据复杂性使得无法使用先前存在的工具。可再生能源电力未来研究结果包括 33 个情景，表示了 40 多年来 14 种技术在 48 个州的容量和发电。这些数据可以用来生成超过 36,000 个单独映射，更不必说相关的图表和其他可视化。由于这需要开发专门的应用程序，且其他研究生成了类似格式的数据，建设可再生能源电力未来研究浏览器被当作开发支持时空数据可视化的框架的一个起点。

创建此可视化时有意采用了简明易懂的技术，且应用程序本身被设计为可根据其他用途/数据集进行定制。该应用程序是完全由客户端控制；没有网络服务或服务器端代码，它采用常用的开源 JavaScript 库进行设计。库包括 D3（用于映射和图表）、Backbone（用于应用程序中的数据管理）和 jQuery（用于支持界面的交互性质）。通过采用常用的库，我们在支持框架的工作中减少了对高度专业化开发人员的需要。

目前正在对可再生能源电力未来研究浏览器的代码进行改进，以达到可以支持结构上类似于可再生能源电力未来研究结果的其他数据集的框架目标。这个框架目前正用于支持风能发电展望研究，用于该研究的初步浏览器在以下网址提供：

http://en.openei.org/apps/wv_viewer/。在未来几个月内，这一可视化将得到加强，以支持情景的比较。

很显然，在开发这个功能时，需要在提供大量的工具用于操作界面与支持可能访问该工具的各种用户之间达到一种平衡。如果界面太复杂，就会让没有此领域丰富经验的用户远离该工具。如果工具过于简单，经验丰富的分析师就不会使用它。最终，可再生能源电力未来研究浏览器尝试找到一个平衡点，这样有经验的分析师可以用它来生成在进行研究相关沟通时想使用的数据视图，而经验不足的用户仍然可以浏览数据，以更好地理解研究的结果。