



风光无“限”

助力京津冀可再生
能源的领军之旅

来自德国和美国德州的最佳实践



| 并网: 中国的可再生能源发电能力居全球之冠, 但并网发电仍面临严峻挑战。

风光无“限”

助力京津冀可再生能源的领军之旅

来自德国和美国德州的最佳实践

合作作者

Anders Hove (侯安德), Kevin Mo, Ph.D. (莫争春 博士)
保尔森基金会

报告外审专家

胡兆光	国网能源研究院
Fredrich (Fritz) Kahrl	睿博能源智库
Valerie Karplus (柯蔚蓝)	麻省理工学院
芦红	能源基金会 (中国)
Sandra Retzer (金彩尔)	德国国际合作机构
David Sandalow	哥伦比亚大学
Frederick Weston (魏雷克)	睿博能源智库
袁家海	华北电力大学

外审专家并不一定赞同本报告所陈述的全部观点。



关于保尔森基金会

保尔森基金会是一家无党派、非营利、“知行合一”的智库, 致力于加强中美两国关系, 推动可持续经济增长和环境保护。基金会的工作基于以下原则: 只有中美两国互补协作, 才能应对当今最紧迫的经济和环境挑战。基金会的项目侧重于通过产业转型、可持续城镇化和环境保护, 推动中美两国向更可持续的低碳经济模式转型。基金会也积极推进双边跨境投资, 以创造就业机会, 强化中美关系。基金会的智库发表的论文涉及中国当今面临的最重要的宏观经济问题。保尔森基金会由美国前任财政部长、高盛集团前首席执行官亨利·保尔森创建于2011年, 总部位于芝加哥, 并在华盛顿、旧金山和北京设有办公室。更多信息, 请访问: www.paulsoninstitute.org.cn





绿色奥运：北京市和张家口市将联合主办2022年冬奥会，中国政府表示，要结合京津冀地区发展清洁能源和改善空气质量的目标，办好这届冬奥会。

前言

尊敬的读者：

去年夏天，北京市和张家口市赢得了2022年冬季奥运会的联合主办权。随着冬奥会日期的临近，国际社会的关注将促使京津冀地区加大努力，实现宏伟的空气质量和低碳能源目标，率先探索可持续能源发展模式，为中国乃至全世界做出典范。

张家口的可再生能源资源占整个京津冀地区的一半以上，已被列为国家级可再生能源示范区。但张家口城市规模较小，能源需求并不大，这在一定程度上造成了当地可再生能源弃风率较高的现象。如何在本地丰富的可再生能源资源和较低的能源需求之间取得平衡，张家口正在考虑两套方案。一是提高当地用电量，消化多余的可再生能源电力；二是建设高压输电线路，将可再生能源电力输送到省外地区。但是，前者与提高效率以及国家设立的在2020年前达到能源消费总量上限的目标可能有冲突，而后者在需要巨量资本投入之余，输电效率还可能下降。

本报告另辟蹊径，提出了新的解决方案：将眼光放大到张家口之外，将整个京津冀地区设为“可再生能源并网试点区”。由于弃风仍是京津冀地区甚至全国实现清洁能源转型的重大困扰，报告建议将降低弃风率作为关键目标之一。京津冀地区可以向其它国家学习，通过多种政策和监管工具，来实现这些目标。本报告重点介绍德国和美国德克萨斯州的经验，表明如果能制定正确的政策，京津冀地区就有望在2022年冬奥会召开之前，在可再生能源并网领域，成为全国乃至全世界的典范。

也许不免有人会问，德国和德州与广袤多元的京津冀地区到底有多少相同之处？实际上，前两者与京津冀地区在地理条件、人口情况和能源需求方面都很接近，所以他们的经验尤其值得京津冀地区借鉴。三地都有增加可再生能源利用这个目标：对德州来说，是为了实现多元化的能源供应并利用当地充沛的风力资源；就德国而言，是为了满足欧盟的气候和能源目标。他们实现清洁能源转型的道路并不平坦，且都在政策上做出了重大调整，包括**可再生能源电力的输电线路规划、可再生能源优先调度，以及电力现货市场制度**。这些变动引发了激烈的争论，耗费不少时间和资金才得以落实。但结果不言自明：德国和德州的弃风弃光率现在都非常低。

我们希望本报告能促使大家针对可再生能源并网展开严肃讨论，并期待与决策层、业内人士和专家合作，共同应对这些关键问题。这也是保尔森基金会推动中美两国经济向更可持续的未来发展所做的努力之一。

成可黛

保尔森基金会副主席
气候和可持续城镇化

目录

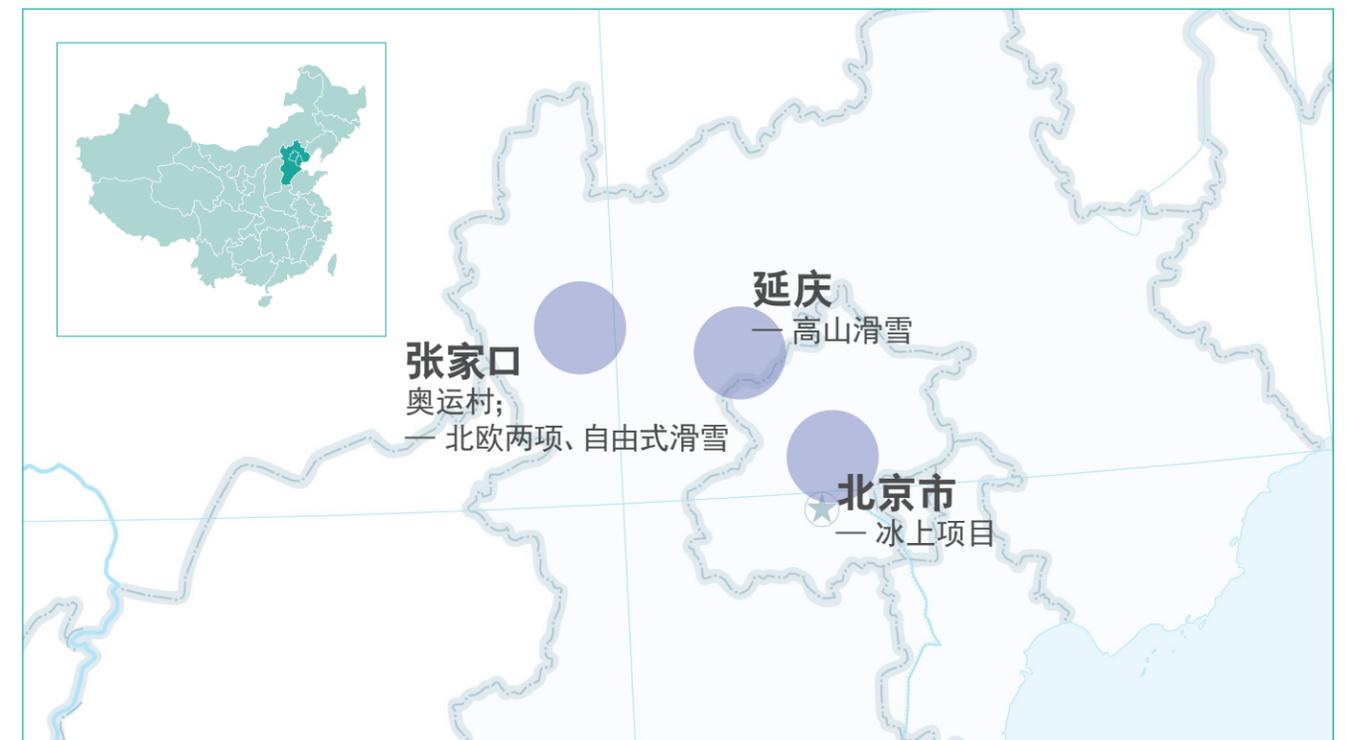
前言	1
1 执行摘要	3
2 中国发展可再生能源的挑战	6
3 京津冀地区的领先机遇	11
4 美国和欧洲的案例研究表明：可再生能源并网不无挑战，但通过正确的政策引导是完全可实现的	14
德国：政策设计和调度原则	16
德克萨斯州：制度改革以及输电项目投资的新方式	23
5 对京津冀可再生能源试点区的建议	29
作者简介	31
致谢	32
参考与注释	33

1. 执行摘要

中国正在向清洁能源体系转型。尽管中国的风电和光伏发电装机容量在全球遥遥领先（到2015年，风电装机容量达到129吉瓦，光电装机容量达到44吉瓦），但可再生能源并网却举步维艰。中国可以向情况类似的国家和地区学习在风光并网方面的最佳实践经验，以图可再生能源健康发展。

保尔森基金会认为，中国——特别是将要举办2022年冬奥会的京津冀地区——可以试点学习德国和美国德州的可再生能源并网经验。德国和德州通过新增输电线路、调整电力市场规则和电网运营模式，成功地降低了弃风率。京津冀地区之所以可以从这两个案例中汲取经验，有以下几个原因：京津冀地区可再生能源电厂与高用能中心城区的距离，与德国和德州的大致相同；京津冀地区的人口数量和德国接近，比德州略高；三地的电力消费也都处在同一水平；德国和美国德州虽然都做出了艰难的政策调整，但最后都实现了可再生能源的大规模并网，降低了弃风弃光率。

2022年冬奥会赛事举办地点规划



2022年冬奥会赛事将在北京市中心、北京市延庆县和河北省张家口市举办。

携手备战冬奥会之际，北京和张家口也各自制定了雄心勃勃的发展战略，以展示在治理空气污染和发展清洁能源方面的成就。

本报告提议，将整个京津冀地区设定为可再生能源并网试点区，并施行以下措施：

- **明确在试点区降低可再生能源弃风率的时间表。**德国和德州的案例表明，四至五年的时间足以让投资到位，完成政策调整，使可再生能源弃风率降至1%以下。为实现这一目标，需要制定明确的实施方案及时间表。
- **提高可再生能源新增电力与输电规划的协调性，**同时加快对输电设施的投资，确保京津冀地区实现清洁能源目标。
- **在京津冀地区试点区域性电力现货市场。**中国现行上网电价政策设计不合理，又没有电力现货市场，这就人为地导致可再生能源电价偏高。
- **将可再生能源电力调度范围扩大到京津冀地区，**实现全区调度、随时调度，全区统一规划和控制。这些调整从德国和德州的案例显示至关重要，但要求电网公司转变运营模式。

2022年冬奥会将成为推进京津冀地区可再生能源并网的重大契机。携手备战冬奥会之际，北京和张家口也各自制定了雄心勃勃的发展战略，以展示在治理空气污染和发展清洁能源方面的成就。张家口的重点是大规模发展可再生能源，而北京则积极推广电动汽车。何不将这两套方案结合起来，用张家口的风光电力为北京的大批电动汽车充电？还有比这更好的促进清洁能源发展的途径吗？此外，确保张家口的清洁电力输送到整个京津冀地区，也是推进京津冀地区经济一体化协调发展的切实成果。若能在京津冀地区解决这些巨大挑战，那么这些政策就可能在全国甚至全世界推广。

术语

平衡和平衡区域：平衡指的是电网运营商实时或者接近实时采取行动，根据用电量来平衡上网发电量，确保电力系统可靠运行。从德国的经验可知，可以打破政治边界或电网运营商的运营界限，在一个特定区域内实现发电和用电的平衡。

弃电：在发电资源充足的情况下，某一特定发电机组减少电能输出。¹在中国，电网调度员经常放弃瞬变性能风和太阳能的发电。

需求响应：电力公司、系统运营商及用户根据价格信号和其它激励措施，在特定时段内调整用电行为，如在电力需求过高时减少用电负荷，或在电价较低时增加用电等。

经济调度：根据优先顺序安排发电设备运行，以最低成本为电力用户提供可靠的服务，还能识别发电和输电设施的一切运营短板。²在经济调度下，边际成本最低的发电机组最先上网供电，边际成本最高的电厂最后上网。这种调度方式可以使发电成本降至最低。

绿色调度（或环保调度）：经济调度的一种形式，在燃料及其它边际成本之外，还考虑发电的环保成本。例如，可以考量不同电厂的废水废气排放带来的社会环境成本，再加上边际成本，然后按照优先顺序安排调度。通常，风能和太阳能等可再生能源在绿色调度中排名靠前。

发电的边际成本、可变成本及总成本：在经济学中，边际成本指的是每生产一单位新产品所需支付的总成本的增量。在电力行业中，风能和太阳能发电的边际成本通常为零或接近零，因为发电燃料（风能和太阳能）是免费的，而且运营成本也非常低。发电总成本是包括资本成本在内的所有成本。可变成本则是发电过程中的所有燃料成本和运营成本，但不包括资本成本和固定成本。

优先顺序（Merit Order）：对可用的发电资源，按边际成本由低到高进行排序，理想情况下还会考虑排放成本，参见“绿色调度”。优先顺序排序不一定只在电力批发市场才可行。

现货市场、日间市场及日前市场：一般情况下，在现货市场上，金融资产或商品（如电力）都是即时交割的。但就电力市场而言，日间市场和日前市场也可称为“现货市场”。日间市场是指买方和卖方在同一天内完成电力交易，日前市场是指在实际供电前一天进行交易。³这种电力市场有别于中长期电力交易合同，后者的交易期限可能是一个月或几个月，甚至是一年或数年。

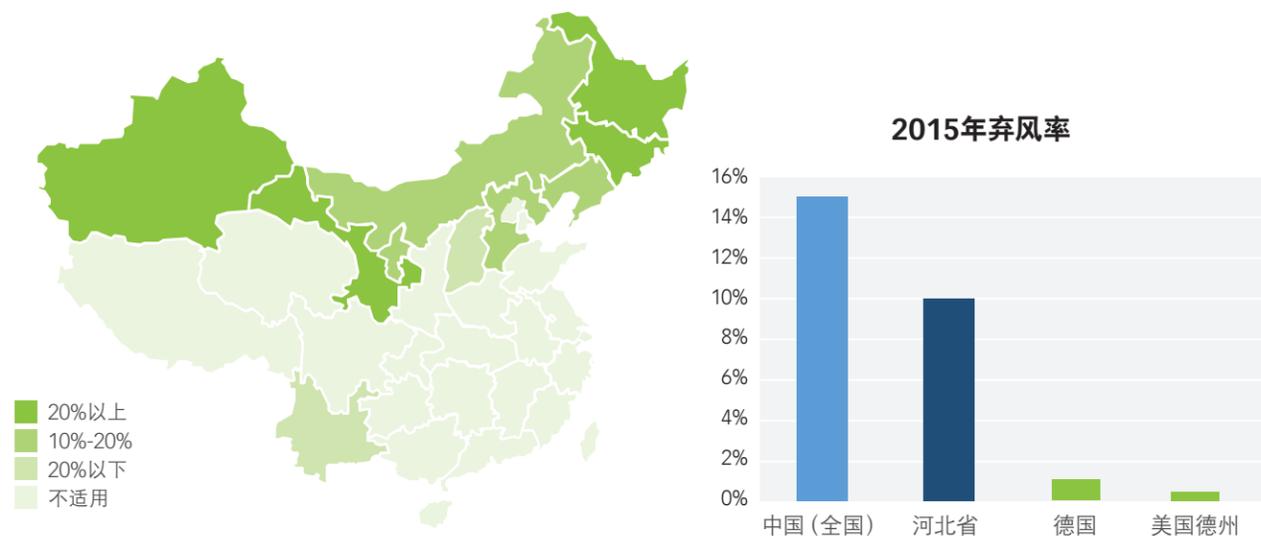
瞬变性可再生能源：比如风能和太阳能光伏等可再生能源，由于其电力输出的瞬时变化特点，无法被立刻调度（不可调度）到电网系统。

2. 中国发展可再生能源的挑战

目前，无论是发展中国家，还是发达国家，全球各国都已经认识到气候变化的严重性。在2015年12月召开的巴黎气候大会上，近200个国家首次就减少碳排放达成了协议，就充分证明了这一点。中国领导人正积极采取各项措施应对气候变化，许多措施已经纳入“十三五规划”，包括首次设定能源消费总量上限，以及上调非化石燃料占比目标等。

中国所面临最严峻的挑战之一，就是从煤炭等传统高碳能源过渡到低碳或零碳能源，如风、太阳能、地热和波浪能发电。好消息是，在过去几年，可再生能源技术的成本不断下降，促使我们向全球清洁能源转型的目标又迈进了一步。举例来说，过去五年中，太阳能光伏组件的成本下降了75%；风力涡轮机的成本下降了30%。⁴

中国弃风率以及与其它国家的比较



中国风力资源丰富地区多受弃风现象困扰；2015年全国弃风率达到15%。

资料来源：NEA, 2016

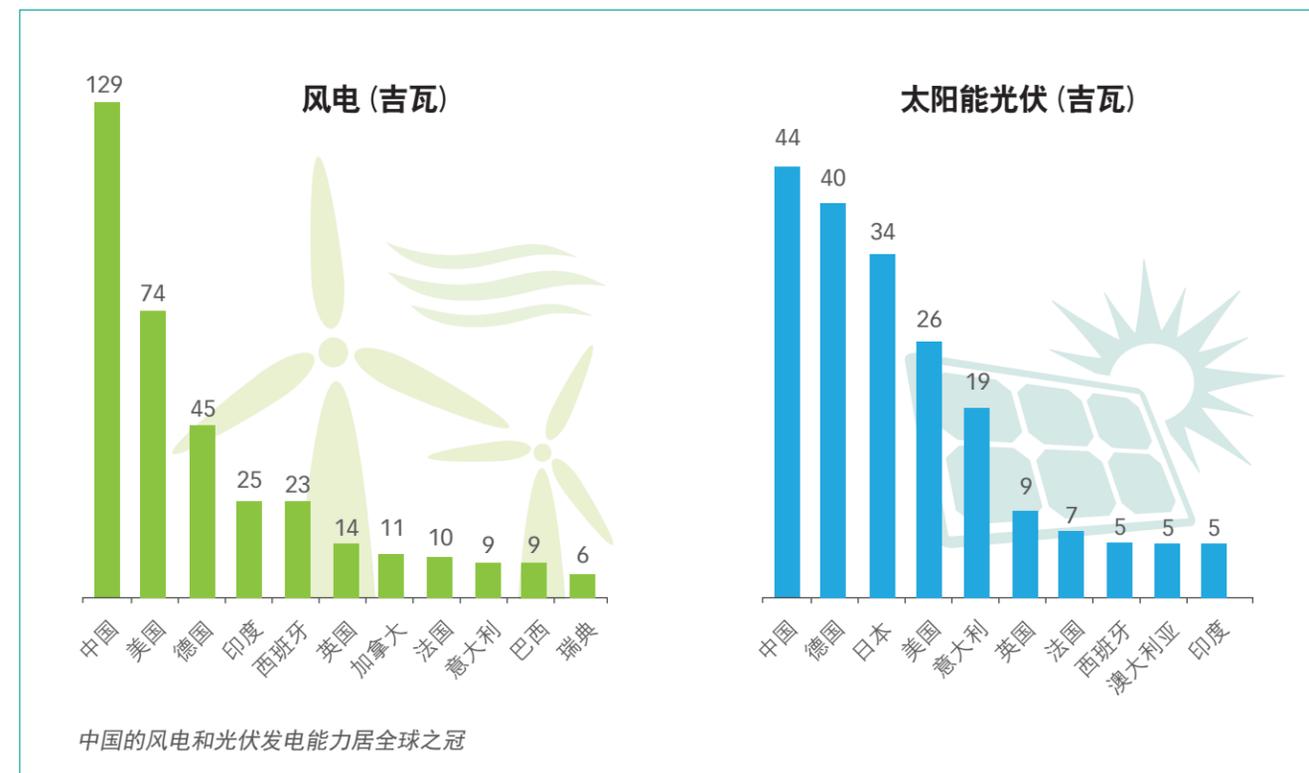
中国的风能和太阳能装机容量居全球之冠，但并网滞后

中国对可再生能源的投入已超过世界上其它任何国家。目前，中国风能总装机容量处于全球领先地位，2015年累计上网风电为129吉瓦⁵；以当前的发展势头来看，到2020年将超过200吉瓦的目标。⁶中国对太阳能光伏发电也同样投入巨大，截至2015年末，光伏发电总装机容量约为44吉瓦。⁷

中国的经济发展也从中受益颇多：清洁能源行业迅猛发展，在全球清洁能源生产领域占据领先地位；与风电和光电设备制造、安装相关的工作岗位持续增长。从全球清洁能源长期持续增长的趋势，中国在2030年之前达到碳排放峰值的目标、以及到2020年非化石燃料占一次能源15%的目标来看，⁸中国近年来对清洁能源的巨额投入将在未来数十年中获得回报，尤其是如果这些清洁能源的利用效率提高的话，回报将更为显著。

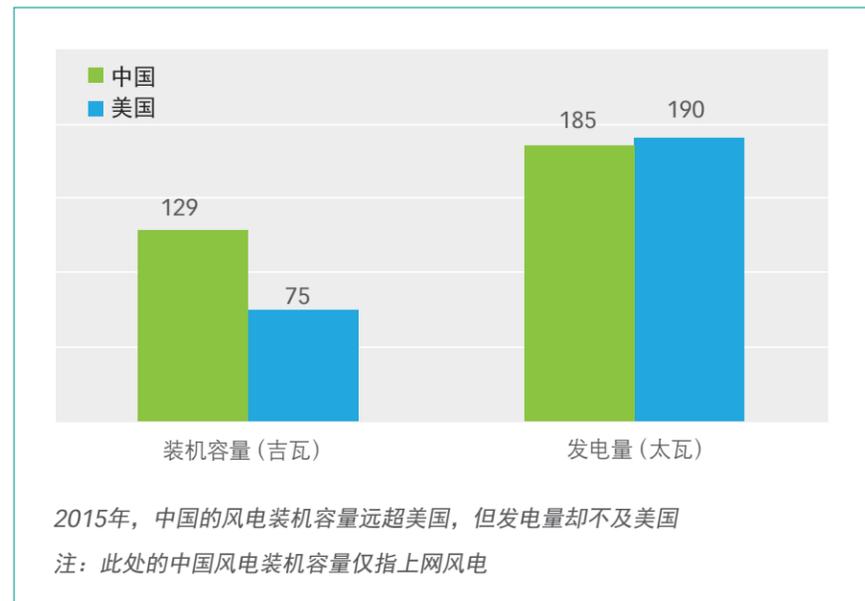
虽然中国的风能和太阳能装机容量处于全球领先地位，但发电量却落后于其它国家。以2015年为例，美国的风电装机容量为75吉瓦，仅为中国并网风电装机容量的58%，但风力发电量却超过中国（美国为190太瓦，中国为185太瓦）。⁹原因之一就是中国的太阳能和风能发电被大量“弃用”而浪费了。2015年，中国弃风率高达15%，¹⁰远高于2014年的8%。¹¹2015年前三个季度的弃光率达到了11%。¹²

中国和世界其它国家的风电和光伏发电装机容量，2015年



资料来源：国际可再生能源署(Irena)、GWEC及其它

中美两国风电装机容量与发电量比较，2015年



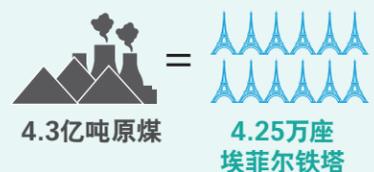
资料来源：Windpower Monthly

数据

从2011年到2015年，中国弃风限电导致的电费损失累计约**510亿元人民币**——足以购买**20万辆**新电动汽车



……相当于烧掉原煤**4.3亿吨**——与**4.25万座埃菲尔铁塔**等重



解决可再生能源弃电问题是中国实现清洁能源和减排目标的关键。实际上，在2015年巴黎气候变化大会召开之前，中国和美国就在9月发布联合声明，宣布中国将实施新的“绿色调度”，优先利用可再生能源。¹³ 眼下，中国正在推进电力行业改革，以实现习近平主席提出的电力生产和消费的“能源革命”。能源转型有望降低整体能源消耗，同时扩大非化石能源来源。¹⁴ 而可再生能源并网不仅可以解决弃电问题，还有助于最终实现习主席提出的能源供给侧和需求侧的真正革命。

可再生能源弃电原因及后果

只要提高现有可再生能源装机容量的利用率，就能实现应对全球气候变化和提振中国经济的双赢局面。风能和太阳能的生产成本为零，所以对已经安装的风力发电机组停止不用，就等于产生了经济损失。从2011年到2015年，中国弃风限电导致的电费损失累计约510亿元人民币，多消耗了原本可以避免的4.3亿吨原煤。¹⁵

导致中国可再生能源高弃电率的因素很多，保尔森基金会2015年发表的报告《电力行业：深化改革，降低排放，改善空气质量，促进经济增长》对此有详细论述，¹⁶ 这些因素包括：

中国可再生能源丰富地区多为偏远地区：甘肃、新疆、和内蒙古等人口稀少地区的弃风和弃光问题最为严重。这些地区的风能和太阳能装机容量高于当地需求，而且距人口密集的沿海省份较远。由于中国执行固定上网电

价，鼓励了风能和太阳能资源丰富地区积极开发这类可再生能源；再加上可再生能源电厂的建设速度要超过输电线路的建设速度，致使偏远地区的风能和太阳能发电站出现产能过剩现象。

以固定运行小时数为基础的调度方式，没有现货市场：中国当前的电力调度方式是按照运行小时数对发电企业进行补偿，并在月度或年度发电合同中加以规定。除了某些考虑发电效率和排放水平的因素外，每座燃煤电厂每年分配到的运行小时数，与电厂的运行成本和资本成本大致相当。¹⁷ 并网的可再生能源电厂会被视为燃煤电厂的竞争对手，因为他们的存在导致燃煤电厂运行小时数减少，收入也就相应减少。¹⁸ 在电力现货市场上，发电企业可以在最低边际生产成本的基础上参与竞争，而不是根据固定上网电价或长期供电合同。由于中国目前没有电力现货市场，这就导致可再生能源发电企业处于不利地位。¹⁹ 此外，中国的风电和光伏发电执行上网标杆电价，这个价格定得比较高，目的是鼓励可再生能源装机容量增长。发电企业收取的电费由两部分组成，一部分是政府制定的标杆电价，另一部分是政府通过可再生能源发展基金拨付的补贴，基金来自电力用户缴纳的可再生能源电价附加费。但是，可再生能源的上网标杆电价高于许多燃煤电厂的电价，所以在很多地区都缺乏竞争力。许多国家的电力市场都包括日间市场，风电和光电以各自的成本价参与竞争，而这个成本价通常低至零水平，从而解决了可再生能源电力电价高的难题。^{*}

发电和输电的规划及审批缺乏协调：在中国，风能和太阳能的开发利用多集中在风力和太阳能资源丰富的地区，由地方政府负责规划和审批。²⁰ 许多煤电过剩的地区也是由地方政府审批的。²¹ 而输配电的规划和投资一直以来都是由电网公司负责。其结果就是，国家的能源政策目标往往与省或区域一级的实际发电和输电投资脱节。²² 2015年3月，中央颁发《关于进一步深化电力体制改革的若干意见》，强调在各个层面进行全面、综合规划，部分原因就是为了解决这个问题。²³

此外，中国当前的输配电规划更有利于煤电企业。新建输配电线路时，主要考虑的是满负荷利用，²⁴ 这就对天生具有瞬变性特点的可再生能源电力构成了障碍。输配电线路需要大量投资，所以考察每条输电线路的利用率是很自然的想法。实际上，美国和欧洲不久以前也还是这样做的，直到最近才开始改变。中国要提高可再生能源电力的并网率，就可能有必要在清洁能源行业转型的大背景下，对新建输配电线路的投资进行更为系统的评估。

^{*} 德国很多可再生能源电厂也执行上网电价，但有别于风电和光伏电力在日间市场上的竞价。在美国的电力批发市场上，风电和光伏电力的日间市场价是当天每个时段结算价格的平均价。此外，风电和光伏电力还享有多种补贴和优惠政策，如税收减免。

从2011年到2015年，中国弃风限电导致的电费损失累计约510亿元人民币，多消耗了原本可以避免的4.3亿吨原煤。

有限的区域内电力交易：中国近年来新建了很多省内输配电项目，而且可再生能源弃电率增高，但跨省输电量并未发生很大变化。²⁵ 地方官员更倾向省内自给自足的供电用电模式，以增加本地税收，并对本地煤电和采煤企业提供帮助。若从省外输入电力，包括清洁能源电力，都会减少地方税收，损及当地煤炭企业。²⁶ 国家最近颁布了一批鼓励跨省电力交易的新政策，包括可再生能源发电配额制度和证书交易制度，²⁷ 但恐怕仍不足以克服地方保护主义。

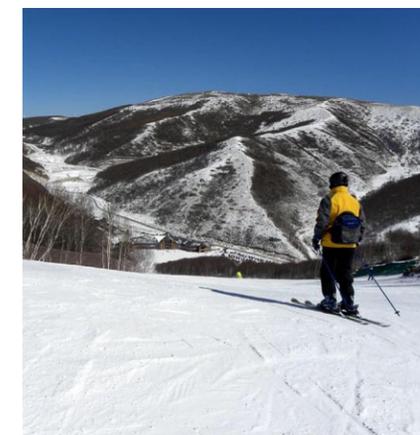
目前，在解决弃风弃光问题以及提高可再生能源并网率方面，中国推出了一大批试点政策，但仍然以本地消纳为主，²⁸ 通常是吸引高能耗企业来增加当地的电力需求。^{*} 中国弃风和弃光问题最严重的几个省份，如甘肃、内蒙古和吉林，都与人口稠密的沿海地区距离较远。同样，张家口的可再生能源规划也倡导大力提高本地区能源需求。不过，中国已经确立了2020年前能源消费总量50亿吨标准煤的上限，吸引新的高能耗企业以解决本地电力过剩的做法，可能会与国家气候变化的总体目标背道而驰。^{**} 为此，本报告提议以京津冀地区来开展可再生能源并网试点。基于京津冀地区的各项特点，如果能辅之以正确的政策引导，就有可能实现可再生能源的大规模并网。

3. 京津冀地区的领先机遇

京津冀地区是中国可再生能源发展困境的一个缩影：核心城区高度城镇化；人口数量达1.1亿，超过任何一个西欧国家。河北省既有密集的高能耗重工业，也有距离北京仅200公里并正在大力发展风能和太阳能的张家口市。京津冀地区尽管地域紧凑，但由于区域内输电线路不足，再加上第二章所述因素，仍出现了严重的可再生能源弃电问题。这也是全国性的难题。要解决这个问题，就要大幅提升对可再生能源的利用效率。

京津冀地区可以在可再生能源并网方面发挥领先作用：京津冀区域协同发展规划包含了环境及经济目标，三地领导人都承受着改善政策及规划协调的巨大压力。²⁹ 习近平主席在2014年提出将京津冀协同发展上升到国家战略层面，³⁰ 要求在基础设施、物流、政府及金融的政策协调方面做出探索。那么，提高京津冀地区的可再生能源并网率也就成了顺理成章之事。

在筹备2022年冬奥会之际，备受关注的京津冀地区也制定了推广清洁能源的规划。2015年7月，张家口在申奥成功的同时，还被批准成为中国第一个国家级可再生能源示范区。³¹ 与此同时，北京也在推广新能源车，尤其是电动车及充电桩的发展，以减少交通排放。北京计划在2020年保有60万



备战冬奥会：2022年冬奥会的几个比赛项目将在河北省张家口市崇礼县举办。自由式滑雪和单板滑雪赛事将在密苑云顶乐园（如图）举办。

京津冀地区可以在可再生能源并网方面发挥领先作用



* 重点提振本地需求可能是多种因素综合所致，如输电能力不足、地方主管部门在输电规划或电力改革中话语权不足，认为短期内不太可能通过市场改革或输配电规划调整来解决弃电问题等。

** 冬季风能采暖试点项目可减少当地煤炭采暖的污染物排放，有利于改善空气质量。但直到2016年，还都仅限于小规模试点项目，既没有大规模消纳可再生能源，也未能大规模取代煤炭采暖。

张家口可再生能源示范区可以，而且也应该与北京携手，成为京津冀可再生能源并网试点区，制定明确的行动时间表及可再生能源弃电率上限。

宏伟的可再生能源并网规划将给京津冀地区带来极大的利益。目前京津冀地区的能源供给仍然依赖煤炭，但风电装机容量已在全国排第三，光伏发电容量排名第七。³³ 2015年，河北省风电并网量达10吉瓦，光伏发电并网量2.4吉瓦。³⁴ 同时，河北省的弃风率约为10%，³⁵ 虽然稍低于全国平均水平，但仍远远高于国际水准。2015年底，张家口的风电和光伏发电容量达到8吉瓦，并计划到2030年增长到50吉瓦。这个数字要比中国、德国和美国三个国家以外所有国家当前的装机总量还高。³⁶

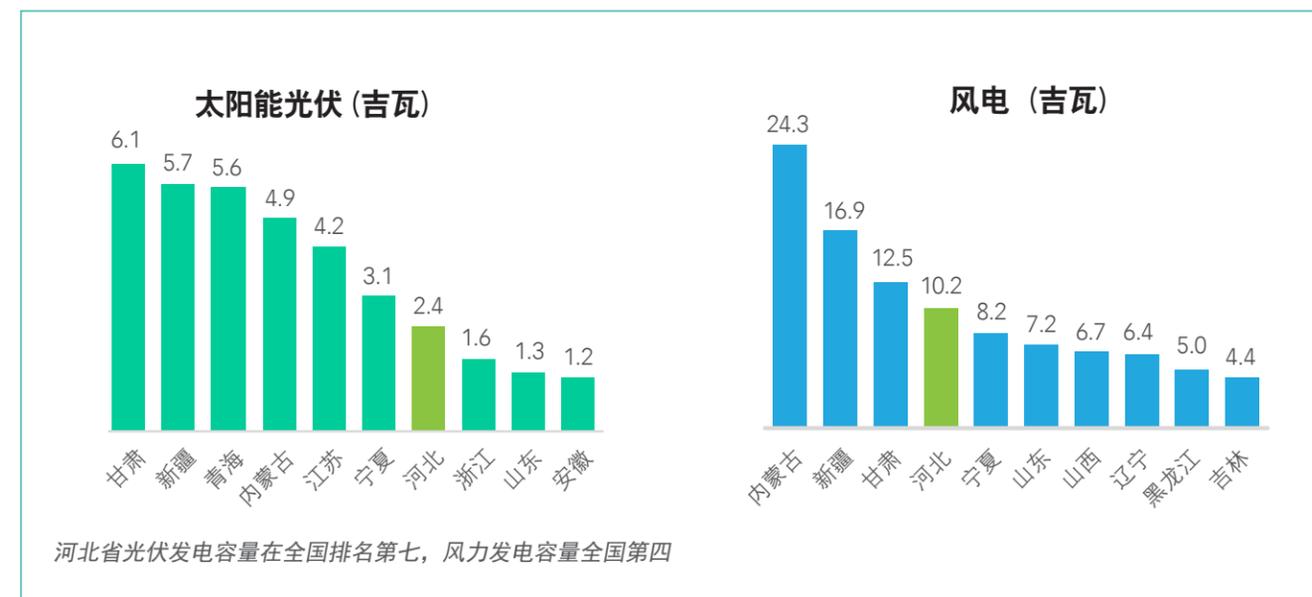
然而，张家口本地电力需求仅有1.85吉瓦，外送能力仅5.5吉瓦。³⁷ 距离张家口仅200公里的北京却仍然无法用上张家口的清洁电力，更不用说今后五年的新增可再生能源电力将要如何消纳。据报道，2014年张家口的弃风率已高达30%。³⁸ 如果不加大对输电设施的投资，提高可再生能源消纳及外送能力，张家口的弃风情况将会更严重。

张家口本地电力需求仅有1.85吉瓦，外送能力仅5.5吉瓦。³⁷ 距离张家口仅200公里的北京却仍然无法用上张家口的清洁电力，更不用说今后五年的新增可再生能源电力将要如何消纳。据报道，2014年张家口的弃风率已高达30%。³⁸ 如果不加大对输电设施的投资，提高可再生能源消纳及外送能力，张家口的弃风情况将会更严重。



雾霾：京津冀地区这几年饱受空气污染之苦，屡屡成为国际关注的热点。中国政府已经决心大力推动京津冀地区的清洁能源发展

河北省可再生能源装机容量与其它省份的比较（截至2015年底）



资料来源：保尔森基金会，基于国家能源局2015年数据

张家口可再生能源并网战略

张家口市多管齐下，推进可再生能源并网：为建设国家级可再生能源示范区，2022年冬奥会的东道主之一、张家口市制定了七大举措，以推进可再生能源并网工作，重点是提高用电需求³⁹：

1. 借助奥运契机，大力提升旅游业、食品饮料业、物流业等服务行业的用电需求
2. 重点发展数据中心等新经济产业的电力需求
3. 加大农村地区用电需求
4. 推广电动交通，包括电动公交车、电动出租车及电动旅游观光车
5. 在新建建筑中推广可再生能源电采暖，力争在2020年建筑采暖面积达1600万平方米，在2030年达9000万平方米
6. 发展风电制氢，成立首个10兆瓦风电制氢站项目
7. 鼓励发展大数据中心等有利于可再生能源就地消纳的地方产业

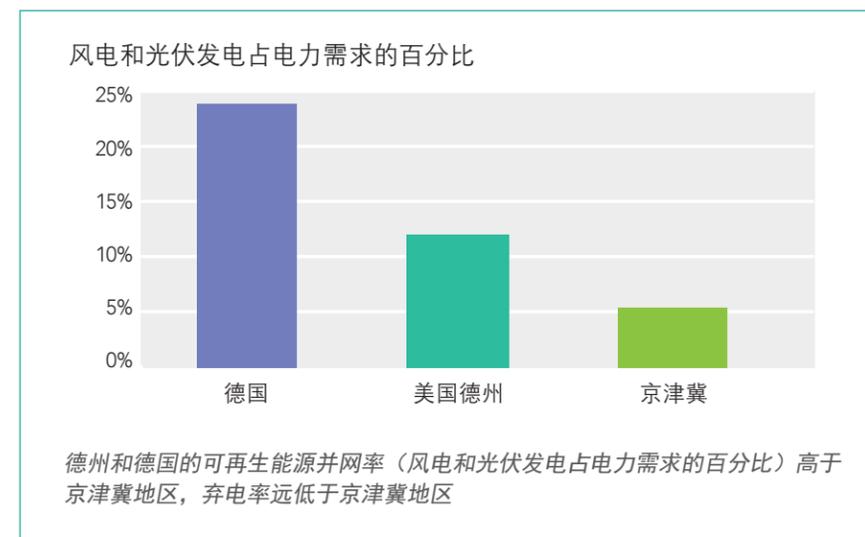
这些发展战略的意图可以理解，但对本地用电需求的刺激可能与2020年能源总量上限的国家目标相违悖。把张家口试点推广到整个京津冀地区，强调可再生能源并网而不是可再生能源装机总量，才是降低可再生能源弃电率、提高可再生能源效率的有效途径。

4. 美国和欧洲的案例研究表明：可再生能源并网不无挑战，但通过正确的政策引导是完全可实现的

国际上没有一个完美的可再生能源并网模式可供京津冀地区效仿。在地理距离和可再生能源需求占比方面，京津冀地区与美国的德克萨斯州和德国相似，可将二者作为参考。这两个国际案例都说明，通过正确的区域性试点和政策引导，将可再生能源弃电率降至1%是完全有可能的。

德国（人口总数8000万）和德克萨斯州（人口总数2800万）在一些主要方面与京津冀地区相似：一是面积广阔，二是可再生能源装机所在地与需求最高的区域性中心相距较远。在这两个国际案例中，为了提高可再生能源并网率，都需要对输配电规划和投资政策做出重大调整。二者也都实现了较低的弃风率（年风力发电量的1%或以下）。而且，在降低弃电率之前，二者都对电力调度 and 市场规则做出了重大调整。值得注意的是，德克萨斯州和德国仍在不断地完善政策，进一步提高可再生能源并网率。德国计划到2025年，可再生能源电力占比达到80%；德克萨斯州虽然没有明确的比例目标，但计划在2015-2017年之间，将风电和光电容量提高一倍。⁴⁰

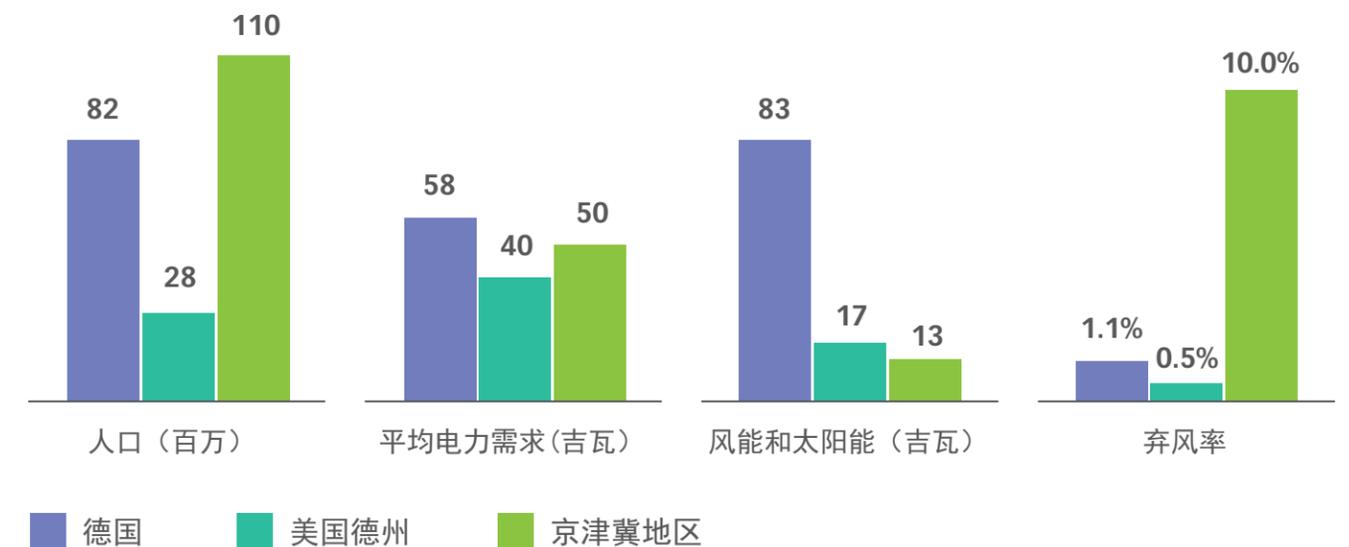
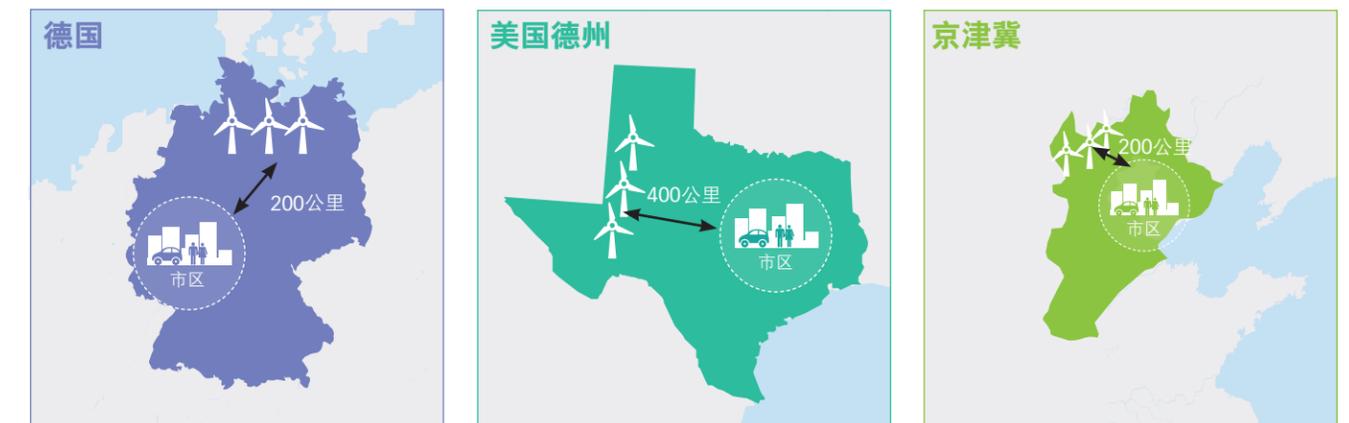
德国和德州与京津冀地区的可再生能源并网比较



资料来源：保尔森基金会

德国和德克萨斯州的案例说明，通过加快区域性可再生能源输电规划，在更广泛的区域内实现统一调度，推出电力现货市场，并根据风能和太阳能资源的瞬变性特点制定较短间隔的调度规则，就能够提高可再生能源并网率。

德国、美国德州与京津冀地区：区域特征比较



在地理距离和可再生能源需求占比方面，京津冀地区与美国德州和德国相似，可将二者作为参考

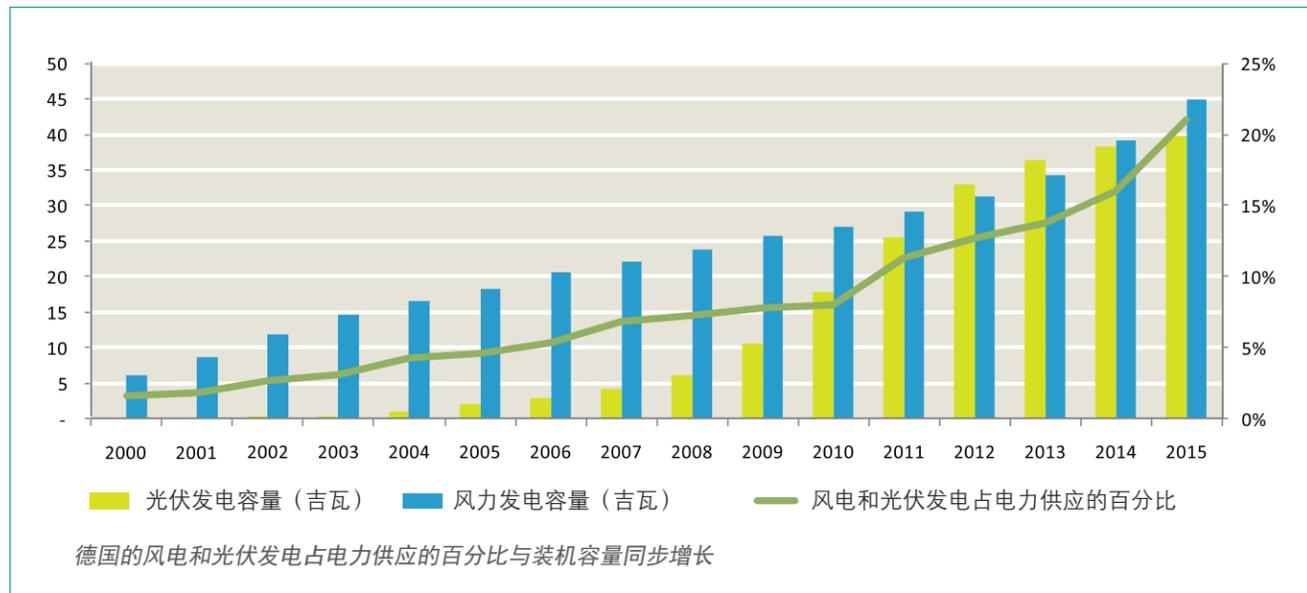
资料来源：保尔森基金会

德国：政策设计和调度原则

概况：德国在瞬变性可再生能源消纳方面处于全球领先地位。2015年，风电和光伏发电占净电力供给的25%。⁴¹ 在2016年5月，有一天一度占到全国电力供应的90%，不过只持续了很短时间。⁴² 截至2015年年末，德国风电装机容量约为43.8吉瓦，而光伏发电装机容量为39.6吉瓦。⁴³ 二者之和远高于当年电力需求的平均峰值，约为50吉瓦。⁴⁴ 目前，德国的可再生能源弃电率已低至1%左右。因此，虽然中国在风电和光电装机容量上已经超过德国，居全球之首，但德国仍然是**可再生能源并网率最高**的国家。就衡量清洁能源发展水平而言，也许并网率是比装机容量更合理的指标。

分布式能源的作用：分布式太阳能光伏发电发挥了极为关键的作用，确保在配电网层面就大规模消纳了可再生能源，从而避免了发展大型太阳能电厂可能需要的巨额输电网投资。德国的光伏发电以分布式屋顶太阳能系统为主，⁴⁵ 主要是因为德国此前执行过一项政策，让安装了屋顶光伏发电的业主享受长达20年的上网补贴电价。分布式太阳能，尤其是屋顶太阳能系统的普及，意味着发电端和用电端可以近在咫尺。当然，这并不能完全免除分布式能源并网所需的大规模输电网的投资，不过，德国的电网投资更侧重于能够提高电网灵活性的设备安装，而非建设高压输电线路。⁴⁶

德国的风电和光伏发电容量以及占电力供应的百分比



资料来源：Agora-Energiewende

德国可再生能源并网时间表

1994年

- 《可再生能源法》通过立法，规定了为期20年的固定上网电价

2000年

- 修改《可再生能源法》，规定到2010年，可再生能源电力占电力供应的比例达到12.5%，同时上调风电和光电的上网价格
- 建立电力交易现货市场

2009年

- FNA批准在德国新建1876公里的输电线路
- 德国的输电系统运营商打破原有的四大输电系统的界限，将原本平衡运行的市场合并到一起，统一调度可再生能源电力

2005年

- FNA开始对电网和燃气市场实施整体监管
- FNA通过调查提出建议，大规模投资新建输配电设施，以提高风电和光电的并网率

2014年

- 修改《可再生能源法》，规定到2025年，可再生能源电力占比达到40-45%，2035年达到55-60%，2050年达到90%

2015年

- 由ENTSO-E负责搭建的欧洲电力透明平台上线运行

2011年

- 日间电力市场的交易间隔从1个小时缩短至15分钟，便于调度可再生能源电力
- 德国与周边几个国家组成IGCC
- 议会通过输电规划法案，由FNA负责跨州输电线路的规划和审批

2016年

- 英国加入中欧平衡市场
- 德国风能和太阳能发电一度满足了全国90%的电力需求，创下新纪录；二者相加占全年电力供应的25%以上

1998年

- 德国政府下令，将兼顾上下游业务的公用事业公司拆分为独立的输电公司和发电公司

随着德国可再生能源利用目标的上调，所需输配电投资也随之增加。

可再生能源专属输配电设施的投资：德国风力发电主要位于北部地区，而光伏发电集中于光照最强且持续时间最长的南部地区。因此，德国要实现可再生能源并网，就需要新建输配电设施。2005年的一项研究表明，德国必须增加输配电投资，才可能实现2015年的清洁能源目标。为此，德国联邦网路管理局 (Federal Network Agency, FNA) 批准新建1876公里的输电线路，但工程进展较慢。⁴⁷ 随着可再生能源利用目标的上调，所需输配电投资也随之增加。2010年，德国能源署(German Energy Agency)预测，为实现2020年可再生能源电力占比39%的目标，德国要在今后10年再投入100亿欧元，新建3600公里的输电线路，大部分将取道传统的380千伏高架交流输电线路。⁴⁸ 配电网需要的投入就更大：德国能源署2012年预测，到2030年，德国需要投入270亿至400亿欧元，新建总长13.5万公里、不同电压等级的配电网。⁴⁹ 德国正在规划四条从北到南的高压直流 (HVDC) 输电线路。⁵⁰ 有专家认为，HVDC并非消纳可再生能源电力的主要方式，不同电压等级的电网都要持续升级，并且加强与邻国电网的互联，来提高可再生能源并网率。

为了加快铺设新增输电线路并巩固电网稳定性，德国在2011年通过了《加快电网扩建法案》和《能源法案》，规定由联邦网路管理局负责电网规划。⁵¹ 总体而言，法案要求电网规划机构和电网公司合作，确保有充足的输配电能力，可将所有可再生能源电力输送给终端消费者。到2015年，德国的电网公司，即输电系统运营商(TSO)，需要每两年公布一次电网发展规划，说



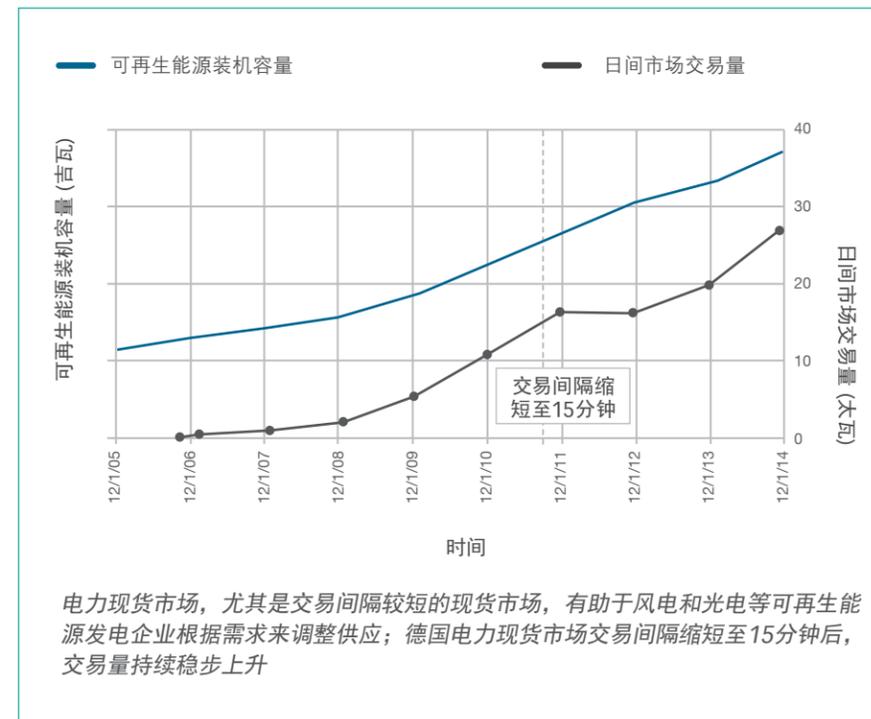
阳光照耀德国：德国的光伏发电以分布式屋顶太阳能系统为主，伯恩附近Buschhoven这所小木屋的太阳能面板就是一例。

明扩建电网以适应未来电力供需变化的计划，也包括可再生能源电力的供需变化。⁵² 联邦网路管理局负责规划和审批，电网公司负责建设。⁵³ 输配电系统扩建费用则按照所处地理位置和升级电压，由所有电力客户分担。

德国的可再生能源政策引起人们对成本的关注。⁵⁴ 多项相关研究表明，设定可再生能源弃电率上限，而不是追求可再生能源电力全部利用，可以降低未来十年内所需的输配电投资。⁵⁵ 但问题是，可再生能源最佳弃电水平是多少？根据成本效益分析，德国正考虑通过立法，为电网公司制定输电规划标准，允许每个电网企业在其服务区域内每年最高弃电率不超过3%。⁵⁶ 而在此之前，电网公司有义务建设充足的输电线路，确保充分利用所有可再生能源。

建立透明、活跃的日间电力市场：根据德国《可再生能源法》的规定，风能、太阳能、波浪能以及水能等可再生能源都享有优先调度权。可再生能源按照发电成本参与优先排序，风电和光电的成本最低。这是因为德国有一个高效运转的日间电力市场，电力在需求当日进行交易，调度却不是按照每日、每月或每年合同来确定。德国2006年启动日间电力市场交易，而且随着可再生能源电力的不断增长，交易量也持续增长。2011年，日间市场从每小时交易一次改为每15分钟交易一次，自此，日间电力市场交易量已经增长了近一倍。⁵⁷

交易间隔缩短至15分钟，能够更好地匹配可再生能源电力输出情况



资料来源：KIT

根据德国《可再生能源法》的规定，可再生能源享有优先调度权，按照发电成本参与优先排序，风电和光电的成本最低。

德国还大力提升信息透明度，确保客户、发电企业以及其它市场参与者能够全面了解各国电网的电力供应、需求以及发电情况。市场参与者可以通过2015年1月开始上线运行的欧洲电力公示平台查询相应数据。⁵⁸ 提高透明度有助于增强短期供求灵活性，也有利于改善输电企业和发电企业长期投资决策的有效性，从而促进整个能源市场的发展。

可再生能源平衡区统一调度：自2009年开始，德国的四大输电企业一改往日依靠内部资源平衡电力供需的做法，形成了一个共同平衡市场。2011年起，合作扩大到周边国家，包括奥地利、捷克共和国、丹麦、瑞士、荷兰和比利时，国际电网控制合作组织 (International Grid Control Cooperation, IGCC)由此成型。⁵⁹ 共同平衡市场的建立为德国节省了资金，促进了可再生能源并网。此后，尽管可再生能源发电迅速增长，采购平衡资源的成本依然下降了一半。⁶⁰

与欧洲其它地区联网：德国电网与邻国互联，2015年净出口电力接近9%。⁶¹截至目前，可再生能源电力出口并不是德国实现可再生能源大规模并网的主要原因，⁶² 但今后几年可能有所改变。欧洲正在制定覆盖全欧的可再生能源并网输电规划。根据欧洲输电网络运营商联盟 (ENTSO-E)的展望，新型互联电网将促使可再生能源以更高效、更灵活的方式，在整个欧洲大陆

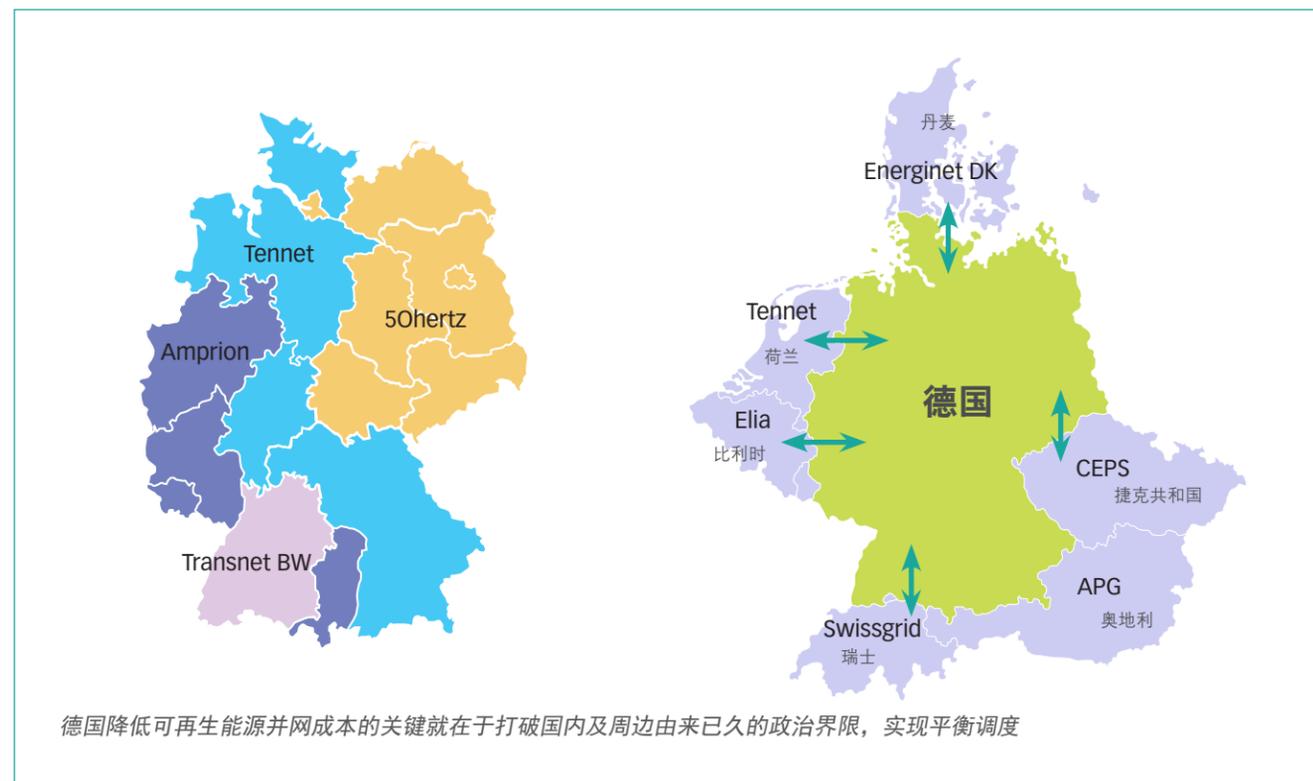
实现平衡利用。⁶³

提高供需灵活性来促进可再生能源并网的政策：到目前为止，德国并没有通过侧重需求侧的政策来促进可再生能源并网，⁶⁴ 但情况正在改变。有关部门正在考虑电动汽车充电和电采暖/制冷政策，这样不但可以减少交通和供暖导致的碳排放，还可以利用当地的可再生能源。⁶⁵ 从2009年开始，德国要求新建筑的采暖必须有一部分来自可再生能源。⁶⁶ 与邻国丹麦相比，德国依靠区级供暖站的城市较少；但与丹麦一致的是，区级供暖站都要做到灵活循环，帮助热电联产企业应对可再生能源电力产出的变化。⁶⁷ 如今，通过需求侧响应技术和需求响应聚集服务等市场机制，来增加需求灵活性的举措，往往会受到政策决策者青睐。⁶⁸

德国的主要经验：

- **以分布式太阳能光伏发电为主，**可以降低输电设施投资。德国大多数光伏发电设施都是屋顶式光伏系统，发电与用电距离很近。虽然也需要投资加强输配电系统，但远低于重点发展大型可再生能源电厂的投资。
- **加大可再生能源专属输配电设施的投资，**费用由电力用户共同承担。值得注意的是，德国法律要求电网规划机构和四大输电公司负责电网规划和建设，确保所有可再生能源都可以输送给用户。
- **交易活跃、透明的日间电力市场，**确保可再生能源电力可以优先调度，确保用户可以从边际生产成本低的风电和光电中受益。
- **扩大调度区域，实现统一调度。**打破国内外界限，扩大调度区域，这样就能够以较低成本提高可再生能源并网率。
- 目前为止，**德国并未通过提振当地电力需求**以提高可再生能源的并网率。只有在调度、市场和输电规划改革之后，才考虑这种做法，而且重点在于提高当地电力需求的灵活性。

德国四大输电公司 (左图) 和国际电网控制合作组织管理的地区



资料来源：50Hertz

专家观点：德国

德国为提高可再生能源并网率都做了哪些重要调整？哪些经验值得中国借鉴？

我在三月份去过张家口，据我了解，该地区的主要问题之一是如何实现可再生能源并网发电。中国政府和国家电网公司正努力推动全球能源互联网，这个问题很值得讨论。但是，我们也不应忽略区域配电网联网的可能性和必要性。我认为，眼下更重要的问题是全国输电网和区域配电网的投资建设。

在德国也是这样，我们不得不快速扩大配电系统。在现有配电网发达的地区，新投资压力较小，通过采用最新技术，条件良好的配电网还可以改造成智能配电网，扩大可再生能源并网发电规模，也避免了一些高昂的输电项目投资。德国的目标是实现智能、灵活的电网管理，来消纳瞬变性可再生能源发电。此外，德国计划在未来十年里大力投资输配电网建设，进一步提高可再生能源并网规模。根据最新估算，输电和配电投资加起来合计超过452亿美元（2930亿元人民币）。

如何规划新增输电容量？是否应该与新增可再生能源电力同步增长？

电网扩建和可再生能源发展基本上应同步进行，但不一定必须消纳所有的可再生能源发电量。我们的研究表明，这样反而会导致电力用户负担过重。因此，目前的立法草案对系统运营商的电网扩容义务做出了限制，在进行电网规划的时候，原则上可以接受年均3%的可再生能源弃电率。可再生能源发电将继续享有优先调度等级，所有弃电量均给予95%的补偿。在现有配电网已经很发达的地区，电网扩容的需求可能不大。另外需要指出的是，如果要升级配电网，可以利用新技术将其改造为智能配电网。这对可再生能源并网发电大有帮助。



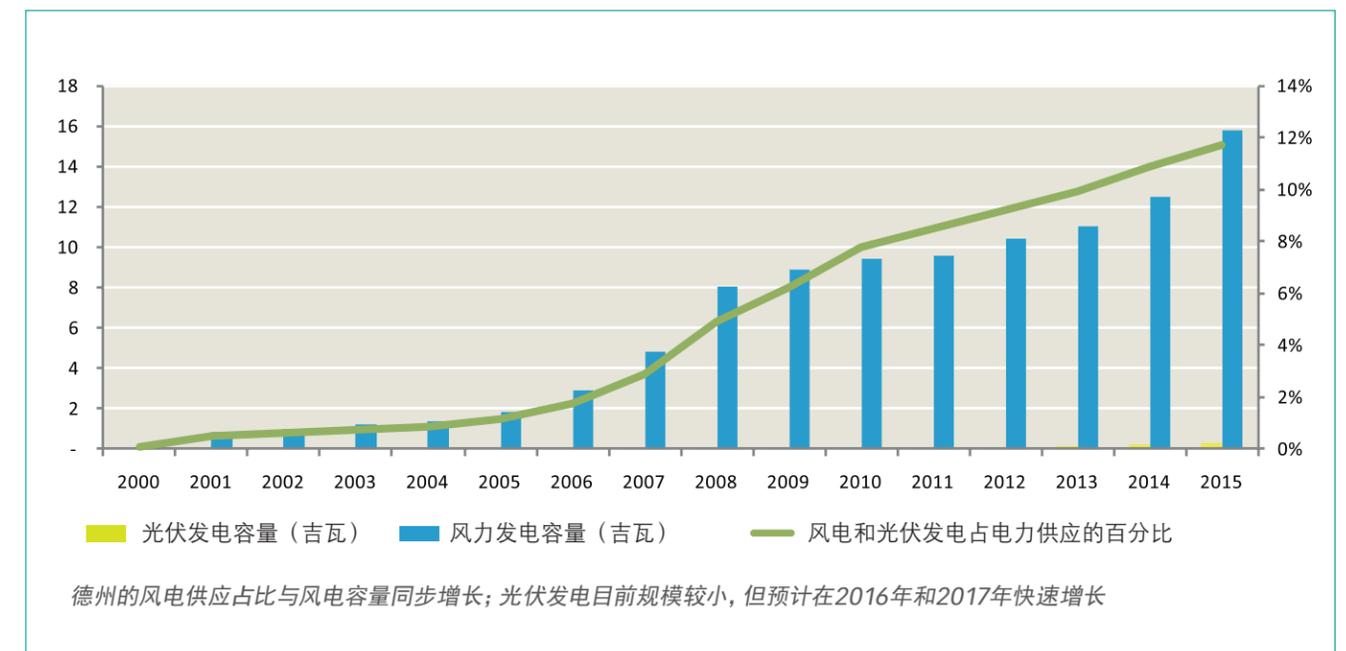
Andreas Kuhlmann
德国能源署总裁

德克萨斯州：制度改革以及输电项目投资的新方式

概况：德克萨斯州是美国人口最多、面积最大的州，也是美国风电发展最领先的州。德州清洁能源电力行业的发展要归功于州法律的修改，例如加快输电项目审批，扩大可再生能源调度区。得益于州政府当年所作出的艰难决策，德州不但实现了可再生能源装机容量目标，还在五年内将可再生能源弃电率从17%降至0.5%。虽然投入70亿美元新建风电专属输电设施，由电力用户买单，但巨额投资也在产生巨大回报，发展风电产生的社会效益约为每年33亿美元。⁶⁹

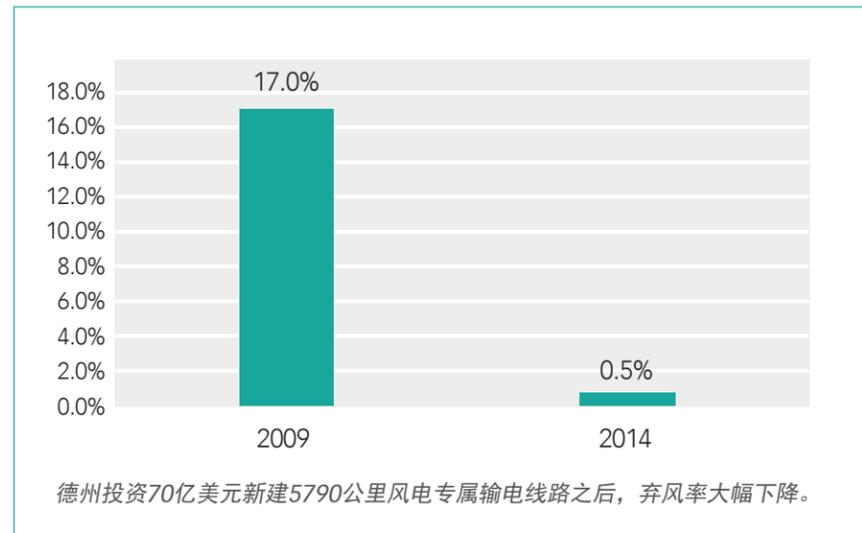
与其它48个州相比，德克萨斯州有如一座“电力孤岛”。德州电网独立于美国其它地区，由德州电力可靠性委员会（ERCOT）负责运营。ERCOT只能依靠德州自己的资源来满足全州的电力需求。⁷⁰ 1996年，依照联邦相关规定，ERCOT成为美国第一家独立电力系统运营商（ISO）。⁷¹ 尽管是一座“电力孤岛”，ERCOT仍在短短几年内，就实现了瞬变性可再生能源的大规模并网，成绩斐然。2015年，风电占电力需求的比例从2009年的约6% 增至12%，⁷² 并且持续快速增长。2015年的11月和12月，风电占比达到18%，⁷³ 在2015年的最后几天一度超过了43%。⁷⁴ 截至2015年末，ERCOT拥有大约16吉瓦风电装机容量和300兆瓦太阳能光伏发电装机容量。⁷⁵ 与之相比，德州平均电力需求为40吉瓦。

德州(ERCOT)的风电和光伏发电能力以及占电力供应的百分比



资料来源：ERCOT

德州输电设施投资及弃电率的下降



资料来源：保尔森基金会、ERCOT

德州的道路并非一帆风顺。2002年，德州实施可再生能源组合标准，要求公用事业公司增加风电采购比例，但是传统的输电规划流程无法适应偏远地区大量风电并网的需要。⁷⁶ 以德州的麦卡米地区为例，当地2002年风电装机容量为760兆瓦，但输电能力仅有400兆瓦，导致弃风率高达32%。⁷⁷

修改输电规划和投资相关的州法律条款：德州以前的法律规定，发电企业要明确承诺使用待建输电线路，并且拿出一笔有法律约束力的抵押金，与建设输电线路的总成本相当。^{*} 但风电企业不愿意这样做。⁷⁸ 于是，是否新建风电输电线路就陷入了“先有鸡还是先有蛋”的僵局：风电企业在输电线路未扩容前，不愿提高风电发电能力；而如果风电企业不明确承诺使用线路，输电项目也无法开工。

为了化解这个僵局，德州立法机构2005年修改立法，要求该州的电力行业监管部门，即德州公用事业委员会(PUCT)，增加德州西部的可再生资源发电量。法律要求PUCT建立竞争性可再生能源区(CREZ)，⁷⁹ 并授权PUCT根据可再生资源发电量预期来审批CREZ输电项目。⁸⁰ 这样，项目规划的着眼点就不再是百分百利用新建线路，而是通过新建线路来提升电网的整体输电能力，提高偏远地区可再生能源的并网率。

新建可再生能源专属输电线路投资不菲：CREZ区域新增5790公里线路耗资约70亿美元，相当于每公里投资125万美元。线路大多是为345千伏输电线，可输送约18.5吉瓦的风能和太阳能电力。⁸¹ 这笔投资将通过公用事业收费回收，⁸² 换句话说，新建输电线路的投资将由所有电力用户支付。

^{*}换言之，风电开发企业要在银行存入一笔与线路投资相等的资金，作为使用承诺保证金。

德州CREZ区域输电网络扩容



资料来源：ERCOT

德州CREZ区域输电网络（绿线所示）扩容，导致弃风率大幅下降。

ERCOT的分析显示，输电能力的提升应当与风电装机容量的增长大体保持同步。但一年中，仅有短短几个小时，全州的风电机组可以实现满负荷运行。⁸³ 为了使新项目的成本效益处于合理的平衡状态，ERCOT规定弃风率上限为3%，适用于全州所有风电厂。⁸⁴ ERCOT并没有足够时间进行多情景模拟分析来确定弃风率上限，2005年颁布的CREZ法只给了6个月时间来制定输电规划，但这个上限要接受利益相关方的公开审查。⁸⁵ 中国的电网规划情况与之类似：规划机构和监管机构也没有时间对所有情景进行分析，而且必须根据区域和全国性的政策目标，对瞬变性可再生能源新增装机容量的地区做出合理预测。

德州的弃风率从2009年的17%降至2014年的0.5%以下，主要归功于2011年至2013年末逐步建设完成的新输电线路。⁸⁶ 在此期间，ERCOT的风电装机容量从9吉瓦增加至16吉瓦。⁸⁷ 虽然为CREZ建设的输电线路还有余力吸纳更多风电，但德州已经开始考虑是否有必要扩建，以满足进一步投资风电和光电项目带来的新增需求。⁸⁸

数据

2014年，据美国风能协会估算，德州发展风电产生的社会效益约为每年**33亿美元**。



德州电力市场重大政策改革时间表



电力市场改革：德州CREZ的案例说明，恰当的输电项目投资机制，以及根据可再生能源发展来规划输电投资项目的做法，有助于解决一个地区的弃电问题。然而，CREZ的成功必须放在美国监管体制的大背景下来理解。德州的实时电力批发市场有利于边际成本最低的风电和光电，德州的独立输电运营商根据最低成本法调度电力（也称为经济调度），这些都有利于弃电率的下降。这些市场和监管机制如今已在美国其它地区普及开来，但德州仍是开路先锋，并在早期探索过程中克服了很多困难和挑战，比如电价意外大幅上涨等。

德州1990年取消电力批发市场管制，2000年推出日间电力市场，实行有利于风电和光电的自动调度。也就是说，德州开始发展风电行业时，关键的市场因素之一已经具备。但要实现可再生能源的顺利转型，还需要采取其它改革措施。与德国类似，德州也实施了电力调度改革，使电网能够对可再生能源电力输出的快速变化做出有效响应。德州日间电力市场的交易间隔是15分钟，已经比很多国家和州的交易间隔更短，但德州将交易间隔进一步缩短至5分钟，更有利于提高瞬变性可再生能源的并网率。⁸⁹

电力调度改革：德州对原有的调度方式也进行了改革，尤其是要确保可再生能源能够快捷地输送到全州各地。在2001年至2002年间，德州将九个独立控制区合并为一个控制区，以降低输电拥堵成本并平衡线路荷载。⁹⁰ 2010年，取消四个独立的批发价格市场，采用全州统一的边际成本定价制度，⁹¹ 有效提高了市场运行效率，同时也向市场发出信号，鼓励长期投资输电或发电项目，从而缓解输电拥堵。这样，德州原本散乱的调度区和价格区就合并为一个统一的全州电力市场。德州电网规划机构认为，对于可再生能源并网来讲，这些措施与CREZ输电投资同等重要。

德州的弃风率从2009年的17%降至2014年的0.5%以下，主要归功于2011年至2013年末逐步建设完成的新输电线路。



清风吹拂德州：德州是美国人口最多和面积最大的州之一，也是风电发展最领先的州。

德州的主要经验：

- 修改法律规定，加快**可再生能源专属输电项目的投资**。值得注意的是，德州放弃了对新输电线路利用率的要求，代之以3%的弃电率上限规定。
- **交易活跃、透明的日间电力市场**，鼓励可再生能源发展。德州电力市场交易间隔短至5分钟，更符合风力和太阳能发电的瞬变性特点，降低了可再生能源电力并网成本。
- **统一的调度和平衡区域**，在全州范围内平衡电力供需，确保清洁能源能够以最低成本输送给用户。这种做法不但促进了可再生能源的优先使用，而且还向市场发出信号，有利于今后输电和发电项目的投资。
- 德州的风电资源主要位于人口稀少的地区，远离需求中心，但德州**并未试图提高风电资源丰富地区的本地需求**。德州也在考虑提高电力需求的灵活性，但只视为充分落实市场、调度和输电规划改革后的补充措施。

专家观点：德州

德州为实现可再生能源高并网率，都做了哪些重大改革？

CREZ输电项目投资无疑为如今风电和光电的大规模并网提供了有力保障，我认为CREZ是一大成功。

另外，电力批发市场的改革也很重要。取消四个独立的批发价格市场，采用全州统一的边际成本定价制度。我们还将交易间隔从15分钟缩短至5分钟。如果没有这些改革，目前的高并网率恐怕就难以实现。

德州也在探索通过需求响应、交通电气化和海水淡化，促使电力需求更加积极地响应可再生能源供应。但到目前为止，输电项目投资以及电力批发市场改革所发挥的作用明显更大。

您是如何规划新增输电能力的，电网扩容是否要与可再生能源发电增长保持同步？

在德州，我们发现输电能力的提升应该与可再生能源并网电量形成一定比例。风电场并非都在同一时间发电。ERCOT目前在德州西部有15吉瓦风电容量，但一年中只有4.5%的时间实际发电超过11吉瓦。我们在规划CREZ新增输电线路时，目标是ERCOT内整体弃电率不超过3%。这个上限主要是通过利益相关方的讨论，而不是通过耗时耗资的多情景模拟来确定的。



Warren Lasher,
ERCOT 系统规划总监

5. 京津冀可再生能源试点区的建议

德国和德州的情况与京津冀地区类似，可再生能源发电与用电之间的距离、可再生能源发电的比例，以及可再生能源快速增长所遇到的挑战，都大致相同。德国和德州最后都成功地实现了可再生能源电力的大规模并网，弃电率很低。然而，这些目标是在对电网的运营模式及输电规划进行了实质性的改革后才实现的。

本章节提出了京津冀地区可再生能源并网试点的总体框架和战略建议，并给出了试点工作的基本要素，以区别于现有的一些可再生能源试点区。

政策建议

保尔森基金会提议**将京津冀地区设定为可再生能源并网试点区**，将张家口口的清洁电力直接输送到北京和天津等电力需求较高的中心地区。试点区应采取以下措施：

合理的总量及弃电率目标：中国和京津冀地区不乏各类可再生能源的总量及利用率目标，但国家能源局应该与国家电网和省级政府一起，为降低弃电率和提高专项输电能力设定一个清晰的目标和时间表。德州和德国的案例都表明了政策的重要性。恰当的政策对促进电网规划与投资的紧密协调，以及实现非化石能源的政策目标都至关重要。京津冀可再生能源并网试点应该包括量化目标和明确的时间表：（一）加强可再生能源丰富地区的电力外送能力，建设专用输电线路，以提高整个京津冀地区的可再生能源并网率；（二）突破区域内部的传输瓶颈，尤其是张家口与北京、天津这类大城市间的输电瓶颈；（三）通过进一步分析，确定合理的弃电率目标。从德国和德州的案例来看，京津冀地区有望在2022年前将弃电率降至3%以下。

合理的输配电设计：借鉴其它地区快速发展可再生能源的经验，京津冀地区要将输配电范围扩大到整个地区，就应该提升区域内部的输配电能力，而不是提高各地自身的消纳能力。原则上，区域输电能力的提升要与可再生能源的增长保持一致，并通过收取电费回收成本。尽管鼓励电动汽车、可再生能源制氢和电采暖的政策都值得肯定，但迄今为止，这些政策对提高可再生能源并网、降低可再生能源弃电率的影响微乎其微。过度刺激电力需求反而会与提高能源效率和控制能源消费总量的目标背道而驰。

提议将京津冀地区设定为可再生能源并网试点区，将张家口的清洁电力直接输送到北京和天津等电力需求较高的中心地区。

从德国和德州的经验来看，京津冀地区也有望提高可再生能源并网率，改善空气质量，提高非化石燃料发电比例。

合理的定价及调度结构：多项研究表明，中国的煤电价格并未体现煤炭消费的社会总成本。⁹² 此外，中国上网电价设计不合理，没有建立电力现货市场，这些因素推高了可再生能源电价。相比之下，美国和德国普遍认为可再生能源的边际成本最低，至少从调度的角度来看是最低的（享有优先调度权）。日间或日前电力市场和平衡区域覆盖的面积越广（例如覆盖整个京津冀地区），越有助于体现可再生能源优先调度的经济效益。

结论

京津冀地区既有北京、天津这类高科技城市，也有风景优美的山区和农村，还有高能耗的工业中心。由于地处中国的中心位置，而且能源密集型行业聚集，京津冀地区长期遭受严重的空气污染。随着2022年冬奥会的临近，京津冀地区将备受瞩目，也为全区作为可再生能源并网的试点提供难得机遇。

从德国和德州的经验来看，京津冀地区也有望提高可再生能源并网率，改善空气质量，提高非化石燃料发电比例。因此，保尔森基金会建议，与其将小范围的张家口列为可再生能源示范区，不如扩大到整个京津冀地区，开展可再生能源并网试点，将可再生能源丰富的张家口市与区域内电力需求旺盛的中心城区连接起来。这个试点区必须强调三个关键要素：（一）完善区域输电规划；（二）实现全区统一调度；（三）试点区域性电力现货市场。这些政策的执行绝非易事，但保尔森基金会认为，要实现能源供给及能源消费的革命，一些重大的政策变革势在必行。一旦在京津冀地区解决了可再生能源并网这个重大难题，其很多经验就可以在全国甚至全世界推广。



奥运蓝：2022年冬奥会是京津冀地区加快实现清洁能源和空气质量目标的难得机遇。

作者简介

Anders Hove (侯安德)

侯安德是保尔森基金会的研究部副主任。他负责领导基金会涉及中国空气质量和气候变化的研究工作，提供与政策、市场和技术解决方案相关的真知灼见。他还为基金会的其他项目提供研究支持。侯安德在能源政策和市场方面拥有超过15年的公共和私营部门工作经验，其中包括9年华尔街工作经验和4年在华工作经验。他的职业生涯始于在华盛顿特区的兰德公司担任能源政策分析师，后来在德意志银行和杰富瑞投资银行从事电力公司和石油服务行业的股票研究。2007年，在太阳能热潮的初期阶段，侯安德曾为一家对冲基金工作，进行清洁能源技术和项目的私募股权投资，尤其是太阳能领域。2010年，侯安德迁往北京，开始担任中国绿色科技的研究分析总监。2012年，侯安德加入安元易如，负责管理清洁科技咨询团队，咨询项目的重点是储能、太阳能、风能和智能电网技术。侯安德拥有麻省理工学院政治学学士学位和硕士学位，他还是一名特许金融分析师。他著有大量关于中国能源行业的研究报告和论文。

Kevin Mo, Ph.D. (莫争春博士)

莫争春博士是保尔森基金会北京代表处的执行主任，主要负责气候变化和可持续城镇化。莫博士在中美两国的气候和能源政策的战略制定与执行方面有着丰富的经验，并且与政府部门、智库、非营利机构、科研院所、国有企业、跨国公司和中小型企业都有密切联系，经常应邀在国际会议和研讨会上就能源政策和可持续发展发表演讲。

加入保尔森基金会之前，莫博士曾在能源基金会工作超过五年，担任中国建筑节能项目主任，负责建筑节能、绿色建筑、家用电器节能，以及非二氧化碳温室气体减排等项目的资助及管理。他资助的研究项目为不少国家政策做出贡献，包括：《绿色建筑国家行动方案》、国家居住建筑节能标准修订、国家公共建筑节能标准修订、绿色建筑国家标准修订，以及40多项国家强制性的家用电器节能标准和标识。此外，他也资助了很多创新政策研究，包括能源大数据分析、智慧能源、净零能耗建筑、低碳供应链，以及数字化能效标识等。他曾担任中美清洁能源联合研究中心建筑节能项目的美方团队技术顾问、中国住建部建筑环境与节能标准化技术委员会顾问委员。

他曾在美国自然资源保护协会担任国际可持续建筑项目主任和资深专家，先后在该机构的华盛顿和北京办事处工作。他还曾在马里兰州的美国全国住房建筑商协会研究中心担任研究员，在美国能源部、美国环保署、美国住宅与都市发展部的资助下，研究先进的建筑节能技术和材料。莫博士曾主持美国全国住宅节能大奖，并在2007年荣获能源和环境建筑联盟（EEBA）第25届年度传承大奖。此前，他在清华大学担任教职三年，并于1995年因一项关于国家大剧院的可行性研究而获得中国文化部科技进步二等奖。

莫博士拥有卡内基-梅隆大学博士学位、清华大学硕士学位，以及浙江大学学士学位。

致谢

保尔森基金会衷心感谢以下专家和机构对本报告提供的支持和建议。

美国和欧洲电力行业专家

Lars Bregnbæk	国家可再生能源中心首席建模专家
Max Dupuy (戴翎松)	睿博能源智库中国项目总监
Andreas Kuhlmann	德国能源署总裁
Nanna Foller Larsen	Energinet.dk市场开发和国际合作部经济学家
Warren Lasher	德州电力可靠性委员会系统规划总监
Grant Mack	加州能源委员会会长能源政策顾问
Stephanie Ropenus	Agora Energiewende欧洲能源合作高级经理

制作

保尔森基金会的工作团队成员包括: Chelsea Eakin (艾巧思)、Dinda Elliott (艾鼎盛)、Kate Gordon (成可黛)、Hortense Halle-Yang (海棠)、姜新燕、任婷婷、娄雪莲和万婧。

照片

照片由Thomas Tillotson、Flickr用户D J Clark、Shutterstock的Anton_Ivanov, 以及Dallas Events提供。

参考与注释

1. Lori Bird, Jaquelin Cochran, and Xi Wang, “Wind and Solar Energy Curtailment: Experience and Practices in the United States,” U.S. National Renewable Energy Laboratory, NREL/TP-6A20-60983, 2014, <http://www.nrel.gov/docs/fy14osti/60983.pdf>.
2. “Economic Dispatch: Concepts, Practices and Issues,” U.S. Federal Energy Regulatory Commission, November 13, 2005, accessed at <http://www.ferc.gov/eventcalendar/Files/20051110172953-FERC%20Staff%20Presentation.pdf>.
3. “Power Markets,” accessed June 11, 2016 at www.wind-energy-the-facts.org/power-markets.html; “Spot Electricity Market (MPE),” Gestore Mercati Energetici, accessed June 11, 2016, at www.mercatoelettrico.org/en/mercato/mercatoelettrico/mpe.aspx.
4. Michael Taylor et al, “Renewable Power Generation Costs in 2014,” International Renewable Energy Agency (IRENA), January 2015, accessed at http://www.irena.org/documentdownloads/publications/irena_re_power_costs_2014_report.pdf.
5. “国家能源局发布2015年风电产业发展情况,” BJX, February 2, 2016, accessed at <http://www.china5e.com/news/news-931782-1.html>.
6. “2020年风电2亿千瓦装机目标或提前完成,” Cable ABC, December 9, 2012, <http://news.cableabc.com/commentary/20151209026757.html>.
7. “2015年光伏发电相关统计数据,” China National Energy Agency, February 5, 2016, accessed at <http://guangfu.bjx.com.cn/news/20160205/707267.shtml>.
8. Alvin Lin, “How China’s 13th Five Year Plan Climate and Energy Targets Accelerate its Transition to Clean Energy,” Natural Resources Defense Council, March 26, 2016, accessed at <https://www.nrdc.org/experts/alvin-lin/how-chinas-13th-five-year-plan-climate-and-energy-targets-accelerate-its>.
9. Ros Davidson, “US leads global production in 2015,” Windpower Monthly, March 7, 2016, accessed at <http://www.windpowermonthly.com/article/1386391/us-leads-global-production-2015>.
10. “2014年风电产业监测情况,” National Energy Agency, February 12, 2015, accessed at http://www.nea.gov.cn/2015-02/12/c_133989991.htm.
11. “能源局: 2015年全国风电产业继续保持强劲增长势头,” National Energy Agency, February 4, 2016, accessed at http://www.nea.gov.cn/2016-02/04/c_135073627.htm.
12. “能源局公布2015年光伏发电数据 甘肃弃光最严重,” National Energy Administration, February 5, 2016, accessed at <http://www.mcshe.com/zcny/252636.html>. In 2015, Gansu had solar curtailment of 32% and Xinjiang 25%. John Parnell, “China has installed 9.9GW of solar in 2015 but curtailment issues continue,” PV Tech, October 21, 2015, accessed at http://www.pv-tech.org/news/china_has_installed_9.9gw_of_solar_in_2015_but_curtailment_issues_continue.
13. “The United States and China Issue Joint Presidential Statement on Climate Change with New Domestic Policy Commitments and a Common Vision for an Ambitious Global Climate Agreement in Paris,” U.S. White House, Office of the Press Secretary, September 25, 2015, accessed at <https://www.whitehouse.gov/the-press-office/2015/09/25/fact-sheet-united-states-and-china-issue-joint-presidential-statement>.
14. “习近平: 积极推动我国能源生产和消费革命,” Xinhua, June 13, 2014, accessed at http://news.xinhuanet.com/politics/2014-06/13/c_1111139161.htm.
15. “2011-2015年中国弃风数据统计,” China Wind Energy Net, April 8, 2016, accessed at <http://www.fenglifadian.com/news/201604/20732.html>.
16. Max Dupuy, Frederick Weston, and Anders Hove, “Power Sector: Deepening reform to Reduce Emissions, Improve Air Quality, and Promote Economic Growth,” Paulson Institute, 2015, accessed at <http://www.paulsoninstitute.org/economics-environment/climate-sustainable-urbanization/research/power-sector/>.
17. “重点区域风电消纳监管报告 [Report on Wind Absorption in Key Areas],” State Electricity Regulatory Commission (SERC), 2012, accessed at <http://www.eeetchina.cn/upload/file/电监会重点区域风电消纳监管报告.pdf>.
18. “重点区域风电消纳监管报告 [Report on Wind Absorption in Key Areas],” State Electricity Regulatory Commission (SERC), 2012, accessed at <http://www.eeetchina.cn/upload/file/电监会重点区域风电消纳监管报告.pdf>.

19. “能源局下发关于征求做好电力市场建设有关工作的通知 (征求意见稿),” China National Energy Administration, March 24, 2016, accessed at <http://news.bjx.com.cn/html/20160325/719393.shtml>.

20. “发改委叫停风电光伏指标发放 甘肃等试点就近消化,” BJX, April 13, 2016, accessed at <http://guangfu.bjx.com.cn/news/20160412/723951.shtml>.

21. Lauri Mlylyvirta et al., “Is China doubling down on its coal power bubble?” Greenpeace, February 2016, accessed at [http://www.greenpeace.org/eastasia/Global/eastasia/publications/reports/climate-energy/2016/Greenpeace_Doubling%20Down%20on%20Coal%20Power%202015%20\(update\).pdf](http://www.greenpeace.org/eastasia/Global/eastasia/publications/reports/climate-energy/2016/Greenpeace_Doubling%20Down%20on%20Coal%20Power%202015%20(update).pdf). See also Yuan Jiahai, “Coal Power Bubble 2,” Greenpeace East Asia, 2016, accessed at <http://www.greenpeace.org/eastasia/publications/reports/climate-energy/2016/Coal-Power-Bubble-2/>.

22. Fredrich Kahrl and Wang Xuan, “Integrating Renewable Energy Into Power Systems in China: A Technical Primer Electricity Planning,” Regulatory Assistance Project, 2015, accessed at <http://www.raponline.org/document/download/id/7823>.

23. “中共中央国务院关于进一步深化电力体制改革的若干意见,” National Development and Reform Commission, March 15, 2015, accessed at http://tgs.ndrc.gov.cn/zywj/201601/t20160129_773852.html; “国家能源局关于推进简政放,” China National Energy Agency, June 5, 2016, accessed at http://zfxgk.nea.gov.cn/auto81/201506/t20150610_1936.htm.

24. Based on discussions with grid officials and experts. For a discussion of the need that policymakers in China see for transmission lines to have high utilization, see “德宝直流等10项典型电网工程投资成效监管报告” National Energy Administration, April 2015, accessed at <http://www.cnea.gov.cn/new/2015-5/2015520161250.htm>.

25. “国家电力市场2015年完成交易电量7221.4亿千瓦时 比降0.34%,” State Grid Corporation of China, accessed at BJX on April 8, 2016 at <http://news.bjx.com.cn/html/20160408/722997-7.shtml>.

26. Michael R. Davidson et al., “Towards a political economy framework for wind power: Does China break the mould?” United Nations University, UNU-WIDER, WIDER Working Paper 32/2016, 2016, accessed at <https://www.wider.unu.edu/publication/towards-political-economy-framework-wind-power>.

27. Renewable energy quotas are included in the Yindong AC power line plan: “国家发展改革委关于放开银东直流,跨区部分送受电计划的复函,” National Development and Reform Commission, March 9, 2016, accessed at http://www.sdpc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/201603/t20160309_792337.html. Joint planning of renewable capacity and power lines is discussed in NEA’s work plan for wind interconnection: “能源局发文要求做好2016年度风电并网消纳工作,” Hexun Securities, March 7, 2016, accessed at <http://futures.hexun.com/2016-03-17/182818763.html>.

28. For summaries of China’s existing pilots, see “国家发展改革委办公厅关于同意甘肃省、内蒙古自治区、吉林省开展可再生能源就近消纳试点方案的复函,” China National Development and Reform Commission, April 2016, accessed at http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/201604/t20160411_797827.html.

29. “中国提速京津冀一体化发展,” Xinhua, March 6, 2014, accessed at http://news.xinhuanet.com/politics/2014-03/06/c_119638994.htm; “京津冀一体化上升为国家战略,” ifeng, April 9, 2014, accessed at http://finance.ifeng.com/a/20140409/12081267_0.shtml.

30. “中国提速京津冀一体化发展,” Xinhua, March 6, 2014, accessed at http://news.xinhuanet.com/politics/2014-03/06/c_119638994.htm; “京津冀一体化上升为国家战略,” ifeng, April 9, 2014, accessed at http://finance.ifeng.com/a/20140409/12081267_0.shtml.

31. “国家发展改革委关于印发《河北省张家口市可再生能源示范区发展规划》的通知,” National Development and Reform Commission, July 28, 2015, accessed at http://www.sdpc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/201507/t20150729_743278.html.

32. “北京市电动汽车充电基础设施专项规划 (2016-2020),” Beijing City Development and Reform Commission, April 22, 2016, accessed at http://www.d1ev.com/statics/js/kindeditor-4.1.10/attached/file/20160422/20160422124422_31804.pdf.

33. “国家能源局发布2015年风电产业发展情况,” BJX, February 2, 2016, accessed at <http://www.china5e.com/news/news-931782-1.html>; “国家能源局发布2015年光伏发电相关统计数据,” China National Energy Agency, February 5, 2016, accessed at <http://guangfu.bjx.com.cn/news/20160205/707267.shtml>.

34. “国家能源局发布2015年风电产业发展情况,” BJX, February 2, 2016, accessed at <http://www.china5e.com/news/news-931782-1.html>; “国家能源局发布2015年光伏发电相关统计数据,” China National Energy Agency, February 5, 2016, accessed at <http://guangfu.bjx.com.cn/news/20160205/707267.shtml>.

35. “能源局：2015年全国风电产业继续保持强劲增长势头,” National Energy Agency, February 4, 2016, accessed at http://www.nea.gov.cn/2016-02/04/c_135073627.htm.
36. “关于河北省张家口市可再生能源示范区有关情况的汇报,” Zhangjiakou People's Government, February 2016.
37. “关于河北省张家口市可再生能源示范区有关情况的汇报,” Zhangjiakou People's Government, February 2016.
38. “每日财经新闻,河北张北弃风率已达30%, 网易财经,” Economic News Daily, October 28, 2014, accessed at <http://money.163.com/14/1028/00/A9J5TBH600253B0H.html>.
39. “关于河北省张家口市可再生能源示范区有关情况的汇报,” Zhangjiakou People's Government, February 2016.
40. Robert Fares, “Texas Poised to Integrate More Wind, Solar Energy,” Scientific American, March 17, 2016, accessed at blogs.scientificamerican.com/plugged-in/texas-poised-to-integrate-more-wind-solar-energy/.
41. “Annual electricity generation in Germany in 2015,” Fraunhofer Institute, accessed March 21, 2016, at https://www.energy-charts.de/power_inst.htm. Solar is shown at 35 TWh, wind at 85 TWh, and net electricity generation at 479 TWh.
42. Sophie Vorrath, “Renewables Supplied 90% Of Germany's Electricity On Sunday,” Cleantechica, May 11, 2016, accessed at <http://cleantechica.com/2016/05/11/renewables-supplied-90-germanys-electricity-sunday/>.
43. “Net installed electricity generation capacity in Germany,” Fraunhofer Institute, accessed March 21, 2016, at https://www.energy-charts.de/power_inst.htm. Bruno Burger, “Power Generation from Renewable Energy in Germany – Assessment of 2015,” Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, January 16, 2016, accessed at <https://www.ise.fraunhofer.de/en/downloads-englisch/pdf-files-englisch/power-generation-from-renewable-energy-in-germany-assessment-of-2015.pdf>.
44. “Revenge of the renewables: How wind and solar play in Germany and Texas,” Platts, April 1, 2015, accessed at <http://blogs.platts.com/2015/04/02/revenge-of-the-renewables-how-wind-and-solar-play-in-germany-and-texas/>.
45. Jakob Peter et al., “Germany's Wind and Solar Deployment 1991-2015 Facts and Lessons Learnt,” Institute of Energy Economics at the University of Cologne (EWI), October 2015, accessed at http://www.ewi.uni-koeln.de/fileadmin/user_upload/Publikationen/Studien/Politik_und_Gesellschaft/2015/2015-10_Germanys_Wind_and_Solar_Deployment_1991-2015_Case_Study.pdf.
46. Hans Poser et al, “Development And Integration Of Renewable Energy: Lessons Learned From Germany,” FinAdvice, July 2014, accessed at http://www.finadvice.ch/files/germany_lessonslearned_final_071014.pdf.
47. Interview with Stephanie Ropenus of Agora-Energiewende, April 8, 2016. See also, “Energie der Zukunft: Vierter Monitoring-Bericht zur Energiewende,” Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2015, accessed at <http://www.bmwi.de/DE/Mediathek/publikationen,did=739122.html>.
48. “Dena Grid Study II – Integration of Renewable Energy Sources in the German Power Supply System from 2015 – 2020 with an Outlook to 2025,” Dena, 2010, accessed at http://www.uwig.org/Summary_dena_Grid_Study_II.pdf.
49. “Electricity distribution grids require significant expansion for the energy turnaround,” Dena, December 11, 2012, accessed at <http://www.dena.de/en/press-releases/pressemitteilungen/electricity-distribution-grids-require-significant-expansion-for-the-energy-turnaround.html>.
50. Peter Fairley, “Germany Takes the Lead in HVDC, IEEE Spectrum, April 29, 2013, accessed at <http://spectrum.ieee.org/energy/renewables/germany-takes-the-lead-in-hvdc>.
51. “Expansion of the electricity transmission networks,” Bundesnetzagentur, accessed April 11, 2016, at http://www.bundesnetzagentur.de/cln_1422/EN/Areas/Energy/Companies/ElectricityGridExpansion/ElectricityGridExpansion-node.html.
52. “Federal Cabinet Adopts Bill Amending Laws Regulating Power Line Expansion,” German Energy Blog, March 26, 2015, accessed at <http://www.germanenergyblog.de/?p=18278#more-18278>.
53. Jakob Peter et al., “Germany's Wind and Solar Deployment 1991-2015 Facts and Lessons Learnt,” Institute of Energy Economics at the University of Cologne (EWI), October 2015, accessed at http://www.ewi.uni-koeln.de/fileadmin/user_upload/Publikationen/Studien/Politik_und_Gesellschaft/2015/2015-10_Germanys_Wind_and_Solar_Deployment_1991-2015_Case_Study.pdf.
54. Hans Poser et al, “Development And Integration Of Renewable Energy: Lessons Learned From Germany,” FinAdvice, July 2014, accessed at http://www.finadvice.ch/files/germany_lessonslearned_final_071014.pdf.
55. Daniel Fürstenwerth et al, “The Integration Cost of Wind and Solar Power. An Overview of the Debate on the Effects of Adding Wind and Solar Photovoltaic into Power Systems,” Agora Energiewende, December 2015, accessed at https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2014/integrationskosten-wind-pv/Agora_Integration_Cost_Wind_PV_web.pdf. See page 39.
56. “The integration of wind energy when paving the way for renewables in Germany,” Agora-Energiewende, November 6, 2015, accessed at https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2015/integration-variabler-erneuerbarer-energien-daenemark/EER-Academic_Seminar_No_6-DTU_-_Wind_Integration_in_Germany-Nov2015-SR.pdf; interview with Stephanie Ropenus of Agora-Energiewende, April 8, 2016.
57. Fabian Ocker and Karl-Martin Ehrhart, “The “German paradox” in the balancing power markets,” Institute for Economics, Karlsruhe Institute of Technology (KIT), September 24, 2015, accessed at http://games.econ.kit.edu/img/RSER_final.pdf.
58. “Security of Supply in 2015: Looking Ahead; ENTSO-E Annual Report 2014,” European Network of Transmission System Operators for Electricity (ENTSO-E), 2014, accessed at <https://www.entsoe.eu/Documents/Publications/ENTSO-E%20general%20publications/ENTSO-E%20AR%202014.pdf>.
59. Fabian Ocker and Karl-Martin Ehrhart, “The “German paradox” in the balancing power markets,” Institute for Economics, Karlsruhe Institute of Technology (KIT), September 24, 2015, accessed at http://games.econ.kit.edu/img/RSER_final.pdf.
60. Fabian Ocker and Karl-Martin Ehrhart, “The “German paradox” in the balancing power markets,” Institute for Economics, Karlsruhe Institute of Technology (KIT), September 24, 2015, accessed at http://games.econ.kit.edu/img/RSER_final.pdf.
61. Calculation based on figures provided by Bruno Burger, “Power Generation from Renewable Energy in Germany – Assessment of 2015,” Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, January 16, 2016, accessed at <https://www.ise.fraunhofer.de/en/downloads-englisch/pdf-files-englisch/power-generation-from-renewable-energy-in-germany-assessment-of-2015.pdf>. Based on electricity generation of 540 TWh in 2015 (see chart on page 6); 48 TWh was exported, or 9% of electricity generated.
62. Eric Martinot, “How is Germany Integrating and Balancing Renewable Energy Today?” Renewables Energy Futures to 2050, January 2015, accessed at <http://www.martinot.info/renewables2050/how-is-germany-integrating-and-balancing-renewable-energy-today>.
63. “Security of Supply in 2015: Looking Ahead; ENTSO-E Annual Report 2014,” European Network of Transmission System Operators for Electricity (ENTSO-E), 2014, accessed at <https://www.entsoe.eu/Documents/Publications/ENTSO-E%20general%20publications/ENTSO-E%20AR%202014.pdf>.
64. Germany had only about 1 GW of demand-response bid into the monthly market as of 2015. See Mackay Miller et al, “Status Report on Power System Transformation: A 21st Century Power Partnership Report, U.S. National Renewable Energy Laboratory, NREL/TP-6A20-63366, May 2015, accessed at <http://www.nrel.gov/docs/fy15osti/63366.pdf>.
65. Interview with Stephanie Ropenus of Agora-Energiewende, April 8, 2016.
66. Baerbel Epp, “Germany: Renewable Heating Law Pushes Solar Thermal in New Buildings,” Global Solar Thermal Energy Council, February 19, 2013, accessed at <http://www.solarthermalworld.org/content/germany-renewable-heating-law-pushes-solar-thermal-new-buildings>.
67. Eric Martinot, “Grid Integration of Renewable Energy: Flexibility, Innovation, Experience,” Prepublication Version, Annual Review of Environment and Resources, February 2016, accessed at http://martinot.info/Martinot_AR2016_grid_integration_prepub.pdf.
68. Germany had only about 1 GW of demand-response bid into the monthly market as of 2015. See Mackay Miller et al, “Status Report on Power System Transformation: A 21st Century Power Partnership Report, U.S. National Renewable Energy Laboratory, NREL/TP-6A20-63366, May 2015, accessed at <http://www.nrel.gov/docs/fy15osti/63366.pdf>.
69. Peter Kelly-Detwiler, “Benefits of Texas Wind Energy Estimated to Exceed \$3.3 Billion Annually,” Forbes, November 10, 2014, accessed at <http://www.forbes.com/sites/peterdetwiler/2014/11/10/benefits-of-texas-wind-energy-estimated-to-exceed-3-3-annually/#7e5d43414eb2>.
70. “Deregulated Electricity in Texas: A History of Retail Competition, Appendix E, Electric Reliability Council of Texas,” Texas Coalition for Affordable Power, 2012, accessed at <http://historyofdereulation.tcaptx.com/chapter/appendix-e-electric-reliability-council-of-texas/>.
71. “History,” Electric Reliability Council of Texas, accessed March 21, 2016, at <http://www.ercot.com/about/profile/history/>.
72. “Energy use in ERCOT region grows 2.2 percent in 2015,” Electric Reliability Council of Texas (ERCOT), January 15, 2016, accessed at http://ercot.com/news/press_releases/show/86617. For 2009 wind percentage, see “2014 total energy use in ERCOT region up by 2.5 percent from 2013,” Electric Reliability Council of Texas (ERCOT), January 22, 2015, accessed at http://ercot.com/news/press_releases/show/51654.
73. See “Energy by Fuel Type, 2015,” in spreadsheet ERCOT2015DE, accessed at http://ercot.com/news/press_releases/show/86617.
74. Karl Cates and Seth Feaster, “Data Bite: A Wind-Generation Record in the Lone Star State,” Institute for Energy Economics and Financial Analysis (IEEFA), December 16, 2015, accessed at <http://ieefa.org/data-bite-a-wind-generation-record-in-the-lone-star-state/>.
75. Karl Cates and Seth Feaster, “Data Bite: A Wind-Generation Record in the Lone Star State,” Institute for Energy Economics and Financial Analysis (IEEFA), December 16, 2015, accessed at <http://ieefa.org/data-bite-a-wind-generation-record-in-the-lone-star-state/>. “Texas Solar,” Solar Energy Industry Association, accessed March 21, 2016, at <http://www.seia.org/state-solar-policy/texas>.
76. David Harbut, “Competitive Renewable Energy Zones in Texas,” National Renewable Energy Laboratory (NREL), presentation at National Governors Association Center for Best Practices Clean Energy States Grant Program Workshop, November 18, 2008, accessed at https://www.michigan.gov/documents/mpsc/tx-crez-background_258398_7.pdf.
77. David Harbut, “Competitive Renewable Energy Zones in Texas,” National Renewable Energy Laboratory (NREL), presentation at National Governors Association Center for Best Practices Clean Energy States Grant Program Workshop, November 18, 2008, accessed at https://www.michigan.gov/documents/mpsc/tx-crez-background_258398_7.pdf.
78. David Harbut, “Competitive Renewable Energy Zones in Texas,” National Renewable Energy Laboratory (NREL), presentation at National Governors Association Center for Best Practices Clean Energy States Grant Program Workshop, November 18, 2008, accessed at https://www.michigan.gov/documents/mpsc/tx-crez-background_258398_7.pdf.
79. “Our History,” Wind Energy Transmission Texas, LLC, accessed March 21, 2016, at <http://www.windenergyoftexas.com/history/>.
80. David Harbut, “Competitive Renewable Energy Zones in Texas,” National Renewable Energy Laboratory (NREL), presentation at National Governors Association Center for Best Practices Clean Energy States Grant Program Workshop, November 18, 2008, accessed at https://www.michigan.gov/documents/mpsc/tx-crez-background_258398_7.pdf.
81. Ryan Wiser and Mark Bolinger, “2014 Wind Technologies Market Report,” U.S. Department of Energy, August 2015, accessed at <http://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/08/f25/2014-Wind-Technologies-Market-Report-8.7.pdf>.
82. David Harbut, “Competitive Renewable Energy Zones in Texas,” National Renewable Energy Laboratory (NREL), presentation at National Governors Association Center for Best Practices Clean Energy States Grant Program Workshop, November 18, 2008, accessed at https://www.michigan.gov/documents/mpsc/tx-crez-background_258398_7.pdf.
83. Paulson Institute interview with Warren Lasher, Director of Grid Planning, ERCOT, April 13, 2016.
84. Paulson Institute interview with Warren Lasher, Director of Grid Planning, ERCOT, April 13, 2016.
85. Paulson Institute interview with Warren Lasher, Director of Grid Planning, ERCOT, April 13, 2016.
86. Ryan Wiser and Mark Bolinger, “2014 Wind Technologies Market Report,” U.S. Department of Energy, August 2015, accessed at <http://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/08/f25/2014-Wind-Technologies-Market-Report-8.7.pdf>. For 2009 wind capacity, see April Lee, “Wind generates more than 10% of Texas electricity in 2014,” U.S. Department of Energy, Energy Information Administration, February 19, 2015, accessed at <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.cfm?id=20051>. For 2015 wind capacity, see Karl Cates and Seth Feaster, “Data Bite: A Wind-Generation Record in the Lone Star State,” Institute for Energy Economics and Financial Analysis (IEEFA), December 16, 2015, accessed at <http://ieefa.org/data-bite-a-wind-generation-record-in-the-lone-star-state/>.
87. Ryan Wiser and Mark Bolinger, “2014 Wind Technologies Market Report,” U.S. Department of Energy, August 2015, accessed at <http://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/08/f25/2014-Wind-Technologies-Market-Report-8.7.pdf>. For 2009 wind capacity, see April Lee, “Wind generates more than 10% of Texas electricity in 2014,” U.S. Department of Energy, Energy Information Administration, February 19, 2015, accessed at <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.cfm?id=20051>. For 2015 wind capacity, see Karl Cates and Seth Feaster, “Data Bite: A Wind-Generation Record in the Lone Star State,” Institute for Energy Economics and Financial Analysis (IEEFA), December 16, 2015, accessed at <http://ieefa.org/data-bite-a-wind-generation-record-in-the-lone-star-state/>.
88. Paulson Institute interview with Warren Lasher, Director of Grid Planning, ERCOT, April 13, 2016.
89. Paulson Institute interview with Warren Lasher, Director of Grid Planning, ERCOT, April 13, 2016.
90. “Investigations of Bulk Power Markets: ERCOT,” U.S. Federal Energy Regulatory Commission, November 1, 2000, accessed at <http://www.ferc.gov/legal/maj-ord-reg/land-docs/ercot.PDF>. “The Story of ERCOT,” The Steering Committee of Cities Served by Oncor and The Texas Coalition for Affordable Power, February 2011, accessed at <http://tcaptx.com/downloads/THE-STORY-OF-ERCOT.pdf>.
91. Paulson Institute interview with Warren Lasher, Director of Grid Planning, ERCOT, April 13, 2016.
92. Teng Fei, “煤炭的真实成本,” Tsinghua University and Natural Resources Defense Council, 2012, accessed at <http://www.nrdc.cn/coalcap/console/Public/Uploads/2014/11/06/%E6%8A%A5%E5%91%8A%EF%BC%9A2012%E7%85%A4%E7%82%AD%E7%9A%84%E7%9C%9F%E5%AE%9E%E6%88%90%E6%9C%AC.pdf>, or at http://www.nrdc.cn/coalcap/index.php/English/project_content/id/508.

