

上海需求响应市场潜力及效益评估



执行摘要

作者

牛津大学环境变化研究所

刘英琪先生、Nick Eyre 博士、Sarah Darby 博士

牛津能源研究所

Malcolm Keay 先生、David Robinson 博士、李鑫博士

委托单位

自然资源保护协会 (NRDC)

支持单位

英国驻华大使馆外交和联邦事务部中国繁荣战略项目基金
能源基金会

2015 年 7 月

联系我们

自然资源保护协会 (NRDC)
中国北京市朝阳区东三环北路 38 号泰康金融大厦 1706
邮编: 100026
电话: +86-10-5927 0688
www.nrdc.cn

上海需求响应市场潜力及效益评估

执行摘要

作者

牛津大学环境变化研究所

刘英琪先生、Nick Eyre 博士、Sarah Darby 博士

牛津能源研究所

Malcolm Keay 先生、David Robinson 博士、李鑫博士

委托单位

自然资源保护协会（NRDC）

支持单位

英国驻华大使馆外交和联邦事务部中国繁荣战略项目基金
能源基金会

鸣谢

这份报告是由牛津大学环境变化研究所（Environmental Change Institute, ECI）和牛津能源研究所（Oxford Institute for Energy Studies, OIES）的团队成员合作完成的。ECI 和 OIES 合作整合了利用、支持及评估需求响应的国际经验。ECI 带领团队进行了市场潜力评估，OIES 在价值评估中起到了领导作用，而双方都为这些方面的工作做出了重要的贡献。

我们对金亨美女士和她在自然资源保护协会（NRDC）需求侧管理项目团队的同事表示感谢，感谢他们在项目各个阶段给予的指导、支持和反馈。我们非常感谢上海需求响应项目专家组的宝贵支持，包括上海市经济与信息化委员会、国家电网上海市电力公司用电负荷控制中心、自然资源保护协会（NRDC）、上海腾天节能技术有限公司、上海电器科学研究所、北京南瑞智芯微电子科技有限公司、杭州天丽科技有限公司、同济大学、霍尼韦尔、量云能源科技（上海）有限公司。我们也感谢各位专家提供十分宝贵而独到的意见和指导：自然资源保护协会（NRDC）的 Pierre Bull 先生和 Jennifer Chen 女士、Energy Solutions 的 Steve McCarty 先生、Energy+Environmental Economics 的 Fredrich Kahrl 博士、同济大学的韩延民教授、上海电器科学研究所的张少迪博士。我们还要感谢自然资源保护协会科学中心（NRDC Science Center）、英国驻华大使馆中国繁荣战略项目基金（SPF）以及能源基金会对本研究的慷慨资助。

本报告的内容全部由作者负责，不一定代表牛津大学环境变化研究所、牛津能源研究所或其成员的观点。

目录

| | |
|--|----|
| 执行摘要 | 1 |
| 国际经验 | 2 |
| 电力系统的变革为需求响应等需求侧资源的发展创造了机遇 | 2 |
| 需求响应资源可以提供不同的系统服务 | 3 |
| 需求响应资源可以为电力系统的运作和规划作出显著贡献，其他国家的需求响应项目已从各类行业和终端用途上获取了需求响应资源 | 4 |
| 需求响应能够为电力系统带来显著效益 | 7 |
| 技术和社会经济的有利条件对于需求响应市场的长期发展至关重要 | 8 |
| 电力系统运行方面的差异对需求响应目前在中国的发展有一些阻碍，不过正在进行的电力体制改革为需求响应今后的发展提供了机会 | 10 |
| 需求响应的市场潜力和效益估计：以上海为例 | 13 |
| 估计需求响应市场潜力的框架和方法 | 13 |
| 评估需求响应效益的框架与方法 | 14 |
| 针对上海需求响应市场潜力的评估结果 | 15 |
| 针对上海需求响应可避免成本价值的估计结果 | 17 |
| 未来研究领域 | 18 |

执行摘要

中国的电力系统正在发生变化。随着能源系统的低碳转型，间歇性可再生能源和电动汽车的大规模并网将会对电网的运行和管理带来挑战。此外，日益增长的用电需求和高峰负荷，以及减轻环境影响、改善电网运行经济效率的政策目标，都强调了中国改变电力系统运作和规划方式的迫切性。各相关方，特别是高层决策者，对探索电力需求侧潜力的兴趣日渐浓厚，希望通过电力需求侧为电力供需平衡、减碳、环境保护和提升经济效率等政策目标作出贡献。

电力需求响应（DR），是能够帮助实现这些政策目标的一种重要的电力需求侧资源。按照定义，电力需求响应是指通过能够反映电力系统边际成本的电价，或者提供给用户资金奖励以要求他们在系统需要的时候减低负荷的机制，激励用户改变原有的用电行为，特别是实现高峰负荷的降低或转移。作为有序用电项目的一部分，中国的电力公司在实施行政性负荷管理项目方面拥有一定的经验，这些项目包括削峰填谷以及在电力严重短缺情况下的用电控制和需求削减。但是，由于缺少电力需求响应常采用的市场机制，行政性负荷管理在调动用户参与意愿方面的能力有限且缺乏灵活性，因此不适用于支持需求侧资源的长期发展。

正因为如此，电力需求响应在中国的发展愈发重要。2014年，上海市成为国家发展改革委指定的中国首个需求响应试点城市。目前该试点项目重点集中在工商业用户上，旨在探索通过市场机制来挖掘需求响应资源。在上海需求响应试点工作进行的同时，国家发改委对四个电力需求侧管理（DSM）城市（即北京、苏州、唐山和佛山）发布通知，要求规划和开展需求响应试点工作。中国在开展需求响应方面经验有限，尤其缺乏市场化机制的实施模式，因此，国际经验，特别是已经成功运用需求响应解决电力系统需求国家（如英国和美国）的实践和经验，对中国来说参考价值很大。

本报告总结了国际上开展电力需求响应项目的实践和经验，并针对上海需求响应的市场潜力和效益进行了初步评估，这些研究成果能够对上海试点或其他地区的类似工作作出贡献。在国际经验层面，报告回顾了需求响应资源的应用背景和现状，英国和美国在评估需求响应潜力和效益方面的研究成果，以及促进需求响应市场发展必需的政策支持。鉴于中国与英美等经合组织国家之间在电力系统管理和市场条件等方面存在显著差异，本报告特别提出了一些启示性的建议，以助于更好地理解经合组织国家的经验。为评估需求响应的市场潜力和效益，本研究首先介绍了评估的总体框架和方法，然后基于国际经验和上海本地数据来衡量需求响应的市场潜力和效益。我们的工作为如何开展此类评估提供了范例，并为同领域的研究提供参考建议。

国际经验

电力系统的变革为需求响应等需求侧资源的发展创造了机遇

由于电力存储难且成本高，电力供应和需求应满足实时平衡。一般来说，供需平衡的责任主要落在了供应侧，需求侧本质上被视为是被动的，其主要原因在于人们熟悉电力供应侧资源的特性，如可控性和可靠性、易于协调和整合，并在调度灵活性方面具有较高的经济效益。

电力系统的新兴变革激发了使用需求响应和其他需求侧资源来补充甚至替代供应侧资源的兴趣。这些变革包括间歇性可再生能源、分布式发电以及智能电表和家电的日益普及，市场的自由化，强调通过价格信号来实现系统平衡，用于电力监测和管理的智能技术成本的下降，以及能源系统减碳和环境保护的政策目标。

在美国，电力需求响应的历史可追溯到 1970 年代，当时受监管的电力公司为应对不断上升的夏季用电高峰，提出了需求响应项目。在电力行业重组后，2000–2001 年发生的电力能源危机和电力价格急剧上涨等一些问题，促使政策制定者和监管者重新评估需求响应在电力批发市场有效运作中的价值。在欧洲，虽然政策一直侧重于提升能源效率，但是各类新趋势，如电力高峰负荷的增长、对可再生能源发展的远大目标、智能电表和其他支持技术成本降低以及“主动”需求侧所具备的潜力，提高了需求响应在欧盟能源政策中的重要性。

需求响应资源可以提供不同的系统服务

电力供需平衡需要在不同的时间尺度（例如每年、每天或每小时）得以确保。因此，多种需求响应产品已经被设计出来，以满足不同的系统需求。这些需求响应产品的性质和重要性在很大程度上取决于相关电力系统的具体特性（例如峰荷期、导致系统峰荷的因素以及对不同的系统服务的需求等特点）。电力需求响应还可以根据是针对整个电力系统平衡或发电容量充足性还是针对某一特定区域的电网瓶颈，进行进一步的划分。

发电容量充足性

电力系统实现节约最大的潜力来自于长期来看对容量要求的降低，特别是发电容量的降低。在美国和欧洲，许多实现了行业重组¹的电力系统已经引入或正在建立电力容量市场，为建设新的发电容量或保留已有的发电容量提供激励，以履行满足发电容量充足性之义务（例如，美国要求电力公司确保其采购的发电容量要高于预计峰荷需求的 10–20% 以上），并在间歇性发电（特别是风能和太阳能光伏）日益增长的背景下实现电力系统的平衡。在很多情况下，这些市场允许需求响应资源的参与。这些方案通过竞拍的方式来采购供应侧或需求侧的容量资源，从而确保可以满足预期的电力负荷需求。目前新英格兰独立系统运营商（ISO-NE）和宾新马输电组织（PJM）²的远期容量市场、英国容量市场以及纽约独立系统运营商（NYISO）和美国中西部独立系统运营商（MISO）的容量机制采用了这种做法。

经济响应

经济或基于电价的需求响应是指客户对电价信号做出反应的一种减少（或增加）用电负荷的项目类型，用户改变用电行为是基于用户当时的意愿和直接利益，而不是为了履行已经承诺提供的特定系统服务。在系统价格较高的时候（一般是用电负荷达到高峰的时候），用户可以减少负荷或者将负荷移到价格较低的时段。经济或基于电价的需求响应包括电力公司提供的不同电价项目（例如分时电价、尖峰定价）。在美国一些实现行业重组的电力市场（例如 PJM、ISO-NE 和 NYISO），需求响应资源也可以直接向电力批发市场投标，减少批发电价较高时段的电力消耗。随着间歇性可再生能源（例如风能和太阳能）的发展，需求响应资源可以在这些能源类型发电输出高从而导致电力批发市场价格低的情况下，增加电力需求，尤其是与储能相结合时，需求响应可发挥更大的作用。

辅助服务

由于电力系统经常遇到供需平衡的短期变动，为确保系统可靠性，辅助服务是必不可少的。在美国已经对电力系统实现行业重组的地区，独立系统运营商（ISO）或区域输电运营商（RTO）提供辅助服务，以帮助管理输电系统的运作和平衡。对于其他还未进行行业重组的地区，电力公司或负责电力系统平衡的机构可以提供或者采购此类服务。符合条件的需求响应资源可以提供这些辅助服务，例如德州电力可靠性委员会（ERCOT）和 PJM 的备用服务。在英国，国家电网作为其系统运营商，提供平衡服务（例如备用服务和频率响应），以支持大不列颠输电系统的供需平衡。需求响应资源已成功参与到这些辅助服务市场中，其中绝大多数是提供短期运行备用（STOR）服务。

电网过网费与监管

英国电力行业已经实现了发输配的重组，输电和配电网之间彼此分离且与其他部分（例如，竞争性的发电和零售市场）并不相连。输配电网过网费受政府监管，首先向能源供应商征收，然后转嫁到用户身上，以此回收输配电网的维护和升级成本。目前在电网过网费方面，有一些机会可以促使大用户参与到需求响应中（例如，输电网过网费（TRIAD）规避项目³、配电网过网费以及与系统运营商的双边协定）。

1. 行业重组指的是输发电分离（有时甚至输配分离），实现发电端（有时也包括售电端）的竞争。未进行行业重组一般指的是垂直整合的电力公司，他们一般是负责某一地区发输配服务的受监管垄断企业。

2. PJM 正在根据去年法院的一项裁决考虑其发展需求响应的方式（<http://www.pjm.com/~media/documents/reports/20141007-pjm-whitepaper-on-the-evolution-of-demand-response-in-the-pjm-wholesale-market.ashx>）。

3. 大型的工商业用户可以通过在全年中系统负荷最高的三个半小时时段中减低其电力负荷，从而减少需要支付的输电网过网费。

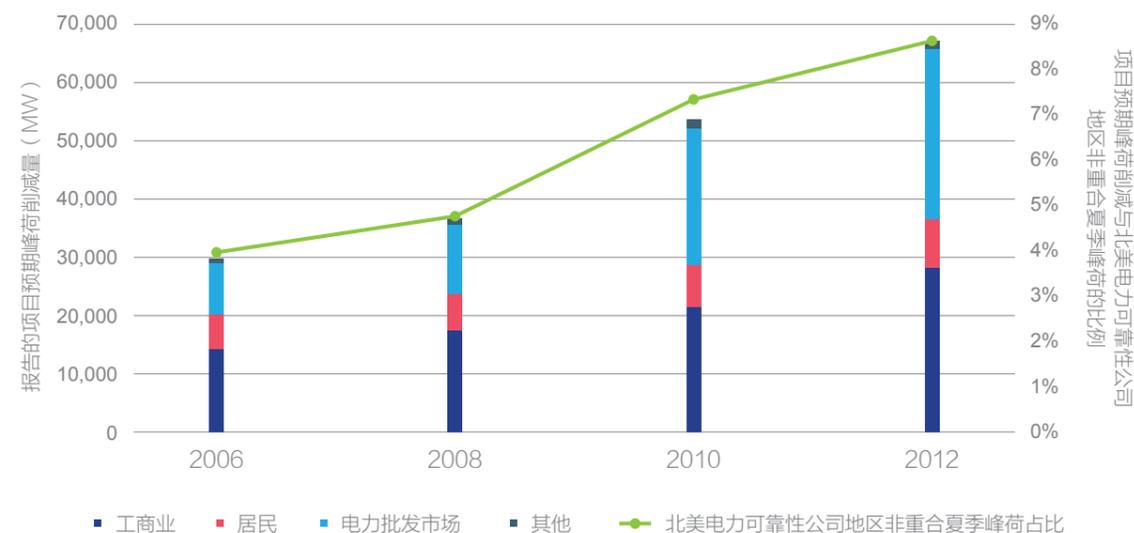
需求响应资源可以为电力系统的运作和规划作出显著贡献，其他国家的需求响应项目已从各类行业和终端用途上获取了需求响应资源

国际上的研究估计需求响应的潜力巨大。例如，根据 2009 年联邦能源管理委员会（FERC）《需求响应潜力国家评估》报告的估算，在最乐观的情况下⁴，美国 2019 年可通过需求响应削减 1.88 亿千瓦的高峰负荷，这相当于当年假设没有需求响应情况下预计峰值值的 20%⁵。

根据美国 2005 年《能源政策法案》，联邦能源管理委员会负责每两年针对智能电表的普及和需求响应发展的进度进行全美调查。调查结果显示，需求响应项目报告的预期峰值削减量从 2006 年的 2970 万千瓦

增加至 2012 年的 6600 多万千瓦（图 ES 1）。针对北美电力可靠性公司地区（除夏威夷和阿拉斯加的美国其他地区），需求响应项目报告的预期峰值削减量在相应地区非重合用电峰值总和⁶的占比也由 2006 年调查的 3.9% 上升至 2012 年⁷调查的 8.5%。在 2006 至 2012 年两次调查间，参与到电力批发市场和针对工商业的需求响应项目报告的预期峰值削减量出现了显著增长，两类项目均占 2012 年调查中需求响应项目预期峰值削减总量的 40% 左右。此外，在 2006 和 2012 年两次调查间，居民需求响应项目的预期峰值削减量增长了 40%。

图 ES 1 美国联邦能源管理委员会针对需求响应调查中项目的报告预期峰值削减量

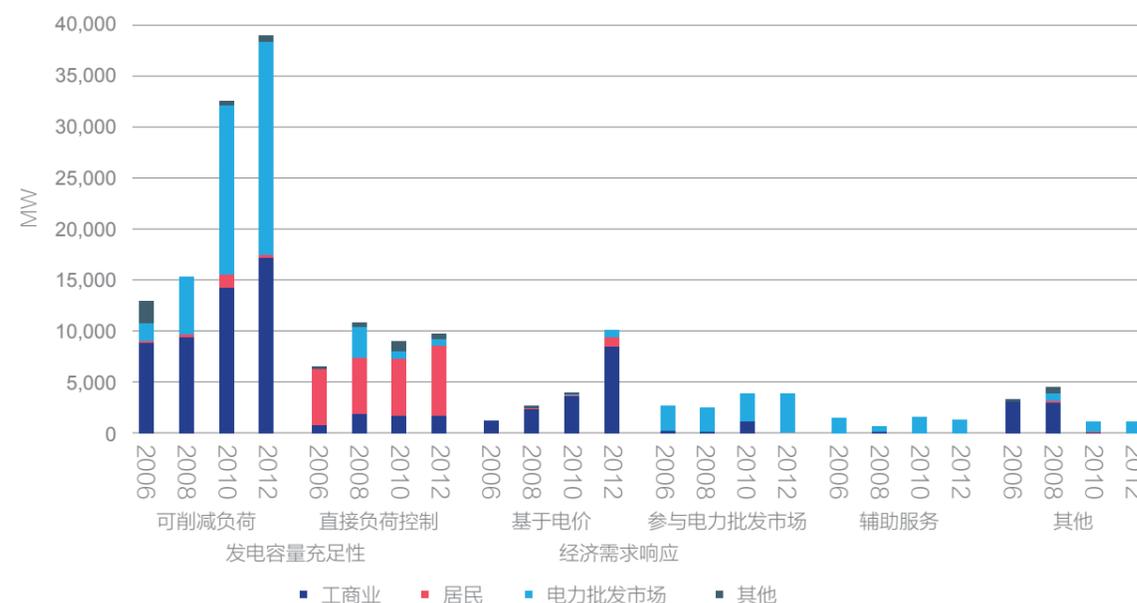


注：北美电力可靠性公司地区非重合夏季峰值占比，即联邦能源管理委员会调查中北美电力可靠性公司地区（即美国除夏威夷和阿拉斯加外其他地区）需求响应项目预期峰值削减量与相应年份非重合夏季总峰值的比值

来源：联邦能源管理委员会（2012 年、2011 年、2008 年和 2006 年）和美国能源信息管理局（2013 年）

4. 最乐观的情景假设智能电表的全面普及，分时电价作为默认选项并与支持性技术配套向用户提供。
 5. 根据北美电力可靠性公司 2008 年长期可靠性评估，针对于全美非重合夏季高峰负荷，考虑了能效提升的影响但是没有考虑需求响应的影响。
 6. 美国境内北美电力可靠性公司地区（除夏威夷和阿拉斯加外）夏季非重合峰值的总和。非重合是因为各地区夏季峰值出现在夏季月份的不同时候。
 7. 2005 年和 2011 年分别对应美国联邦能源管理委员会 2006 年和 2012 年针对需求响应和智能电表调查所针对的年份。

图 ES 2 美国联邦能源管理委员会调查中需求响应项目及其报告预期峰值削减量



来源：改编自联邦能源管理委员会（2012 年、2011 年、2008 年和 2006 年）

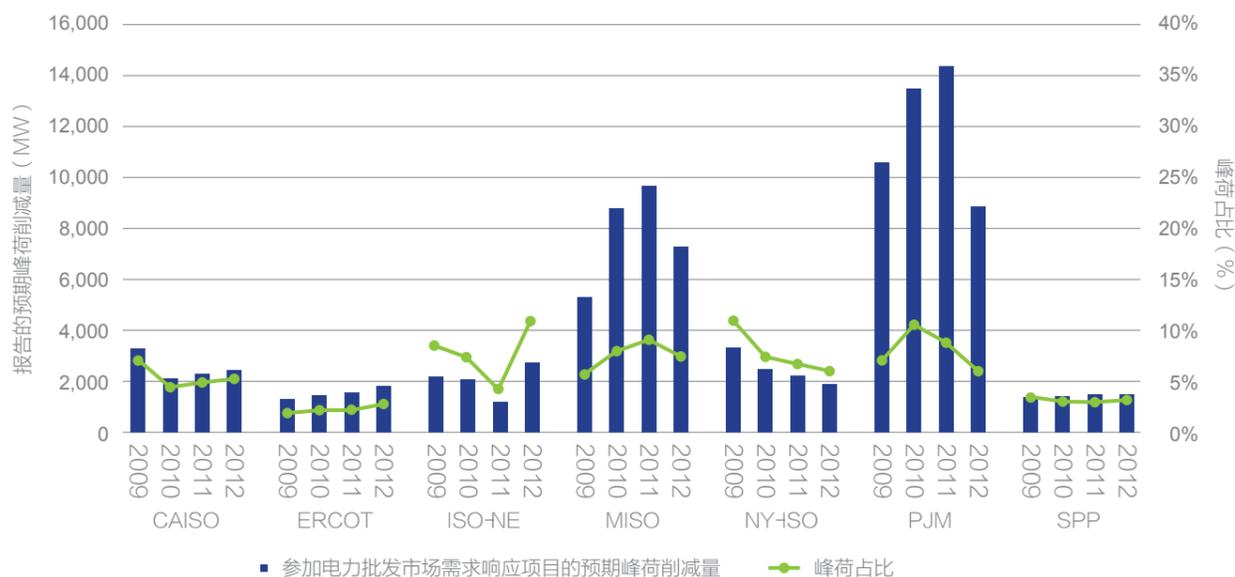
在美国，相比于其他项目，用来满足发电容量充足性的可调度需求响应项目（例如可削减负荷项目⁸和直接负荷控制项目⁹）贡献了更多的预期峰值削减量，但是基于电价的非可调度需求响应项目也在 2006-2012 年间两次调查中呈现显著增长（图 ES 2）。在 2012 年的调查中，可削减负荷项目和直接负荷控制项目占了需求响应项目报告的预期峰值削减量的近 70%。工商业用户提供的需求响应资源主要集中在可削减负荷项目和基于电价的需求响应项目（主要是分时电价）。另外，参加电力批发市场的需求响应资源主要集中在可削减负荷项目以及需求投标与回购项目（即经济需求响应项目），同时也参与辅助服务市场提供旋转和非旋转备用等服务。相比之下，居民需求响应资源则主要通过直接负荷控制项目和基于电价的需求响应项目（主要是分时电价）参与，而直接负荷控制项目也适合小型的工商业用户。

不同独立系统运营商或区域输电运营商中，参与电力批发市场的需求响应资源之规模也有所不同（图 ES 3）。与其他系统运营商相比，PJM 和 MISO 明显具备更高的需求响应峰值削减量¹⁰。需求响应的预期峰值削减量占 CAISO、ISO-NE、MISO、NYISO 和 PJM 高峰用电总需求的 5-10%，但是在 ERCOT（2-3%）和 SPP¹¹（3-4%）的贡献较小。

需求响应资源可以来自于多种终端用途。例如，备用发电、暖通系统和制造业在 PJM 远期容量市场“紧急需求响应”项目中贡献了最多的负荷削减（70-90%），同时照明和制冷的贡献也比较大。需求响应资源的来源中，约 50% 的峰值削减能力来自于工业或制造业，约 20% 来自于商业和公共建筑，终端居民用户占 15%。

8. 可削减负荷项目指的是用户需要在电力公司或电力系统运营商要求的时候，削减高峰负荷的可调度项目（例如可中断负荷项目、紧急需求响应项目和作为容量资源的项目）。可中断负荷项目指的是用户在预定系统情况出现时削减用电负荷，从而获得电价补贴的项目。紧急需求响应项目指用户同意在系统紧急情况出现时削减用电负荷的项目。作为容量资源的项目要求用户在预定系统情况出现时，履行义务减少预定额度的用电负荷削减。
 9. 在直接负荷控制项目中，用户允许电力公司或电力系统运营商远程控制其用电，从而获得需求响应补偿。
 10. 部分原因可能是他们覆盖的用户及其负荷较大，也有可能因为这些地区有关发展需求响应资源更强的政策兴趣和努力。
 11. 美国西南电网（Southwest Power Pool）。

图 ES 3 美国独立系统运营商或区域输电运营商电力批发市场中的需求响应资源及其报告预期峰荷削减量



来源：美国联邦能源管理委员会（2014 年、2011 年）

英国电力系统高峰用电时期在冬季，根据 2012 年《非居民部门的需求侧响应》预测，非居民建筑的需求响应潜力¹²为 120-450 万千瓦(或系统峰荷的 3-8%)。此外，据“英国电力需求项目”指出，2012 年 1800 万千瓦负荷(系统峰荷的 34%)在技术层面上可视为适于提供需求响应。这一潜力将在 2025 年增长至 2500-3200 万千瓦(预计系统峰荷的 37-55%)。

对英国而言，目前电力市场中需求响应的参与程度一般。Ward 等人(2012 年)估计 2012 年需求响应的参与规模达到了 100 至 150 万千瓦，而“真正意义上的”负荷削减(即非通过使用备用发电实现的需求削减)将达到约 40 至 60 万千瓦。即使加上通过“需求

侧平衡备用(DSBR)”项目¹³和英国容量市场新采购的需求响应资源，需求响应预期的峰荷削减量最多达到 200 万千瓦，仅占冬季峰荷 5800 万千瓦的约 3%。迄今为止，英国国家电网的“短期运行备用(STOR)市场”占据了现有需求响应资源的绝大部分，需求侧资源在最近几期竞标中贡献了 140 至 200 万千瓦的峰荷削减，占 STOR 总资源的约 50%。但是，这些需求侧资源大部分实际上是供应侧的解决方案(即使用备用发电设备)，而“真正意义上的”负荷削减仅贡献了 11 至 23.7 万千瓦容量，仅占近几期竞标中 STOR 资源的 4-7%。除此之外，目前需求响应在英国国家电网其他平衡服务市场和英国容量市场中的参与度也有限。

12. 在不考虑能够影响用户参与的经济或其他因素时，在系统高峰时段以及技术层面上能够被认为适合进行需求响应以及灵活的终端用电。

13. “需求侧平衡备用”项目通过给予大型用户支付，要求他们在冬季工作日的下午 4 点至下午 8 点间在英国国家电网给出指令后，削减用电负荷或使用备用发电设备。该项目在 2014 年由国家电网启动，为了在英国容量市场第一个交付年(2018 年)前解决中长期容量富余减少的问题。

需求响应能够为电力系统带来显著效益

需求响应具有多种效益，包括可避免容量成本、可避免能源成本、可避免电网成本、可避免环境外部性成本、参与者电费节约以及如系统安全等其他益处(表 ES 1)。因为“可避免成本”无法直接可见，所以有必要对没有需求响应情况下产生的成本进行假设，但这必然会带来分析的不确定性。需要记住的是，需求响应资源的效益对不同的电力系统而言可能大有不同，这主要取决于电力系统的结构和评估需求响应所采用的方法，特别是容量建设的基础。建造发电容量和输配电网来满足高峰用电需求时，如果电价不能完全反映高峰时期的供电成本，电力需求峰荷可能比经济学意义上的最优水平高。在这种情况下，需求响应可能有效地弥补价格信号的不足，从而可能避免建造非必需的发电容量。

很多国际研究估计了需求响应的效益。例如，英国 Element Energy 和 RedPoint 公司(2012 年)预测，在 2030 年高需求的情景下，来自于居民和中小型企业的需求响应之潜在效益可达到每年 5 亿英镑。英国天然气与电力市场办公室(2010 年)提供了另一个预测，估计英国通过需求响应获得可避免发电容量和可避免电网容量成本的潜力。对美国而言，Brattle 集团采用基于模拟的方法来估计需求响应(每个大西洋中部区域的高峰负荷削减 3%)在 2005 年对 PJM 能源市场的影响。研究总结得出，取决于市场状态，需求响应对整个 PJM 系统的效益达到每年 0.65 至 2.03 亿美元。此外，监管部门和其他利益相关方已采用三益公司(Energy and Environmental Economics)开发的“可避免成本计算器”来评估可节约的成本。

表 ES 1 需求响应对电力系统不同活动的潜在效益

| | 运营 | 扩容 | 市场* |
|-----------------|--|--|--|
| 发电 | <ul style="list-style-type: none"> 减少用电高峰时期的发电：减少能源成本，减少排放² 辅助供需平衡(对间歇性发电尤其重要) 减少为了增强供应短期可靠性所需要的运转备用容量需求 | <ul style="list-style-type: none"> 避免调峰机组的投资 减少容量备用需求或增强供电的长期可靠度 允许更多间歇性可再生能源接入电网³ | <ul style="list-style-type: none"> 减少供需不平衡的风险 限制市场权力 减少价格波动 |
| 需求 | <ul style="list-style-type: none"> 加强用户对成本、用电量及环境影响的认知 为用户提供选择从而实现效用最大化 减少电费或获得报酬的机会 | <ul style="list-style-type: none"> 在对用电量和成本认知度提高的情况下作出投资决策 | <ul style="list-style-type: none"> 增加需求弹性 |
| 输配电 | <ul style="list-style-type: none"> 缓解输配电网拥塞 管理意外事件，避免电力中断 减少整体损耗 推动技术操作⁴ | <ul style="list-style-type: none"> 推迟电网升级改造的投资需求或增强电网长期可靠度 | |
| 零售 ¹ | | | <ul style="list-style-type: none"> 减少供需不平衡风险 减少价格波动 新产品，为用户提供更多选择 |

¹ 仅适用于自由化市场；² 取决于电力能源结构；³ 在鼓励可再生能源发电的系统中可视为益处；⁴ 保持频率和电压水平，平衡有功和无功功率，控制功率因数等。

来源：Conchado 和 Linares (2012 年)，表 3

技术和社会经济的有利条件对于需求响应市场的长期发展至关重要

本报告介绍了一些能够支持需求响应市场发展的政策和市场方面的关键条件。为了创建这个市场，电力公司和电力系统运营商需要有激励来将需求响应作为一种资源使用并且需要对需求响应资源的可靠性有信心，与此同时，用户需要获得足够的经济效益和支持来长期参与。尽管本报告的案例主要来自于已经实现行业重组而且最终电价是通过竞争性零售市场决定的电力系统，但是这些结论也适用于其他电力市场结构（例如垂直整合的电力系统）。市场监管者和政策制定者在设计支持性的监管和政策环境时，应考虑到相关电力系统的特征。

需求响应项目的商业模式

需求响应资源需要有机会和机制提供电力系统服务。根据电力行业的结构和特性，可使用不同的商业开发获取需求响应资源，包括零售端基于电价的项目、基于激励可调度的项目或者参与电力批发市场项目等（表 ES 2）。

给予包括电力公司在内的行业相关方有力的政策激励以促进需求响应发展

无论市场结构如何，需求响应长期发展的一项必要前提是主要利益相关方意识到需求响应的广泛价值（例如经济、可靠度和环境效益），并且有合适的激励来获取其能带来的效益。相关项目的融资（至少从民间资本的角度）要求实施需求响应获得的效益可靠而且可以被投资需求响应项目的实施主体获得。对受监管的电力公司而言，政策框架应该给予足够的激励（例如对发电资源采购经济性的要求）来鼓励电力公司获取需求响应能够实现的经济和电力系统运行方面的效益。此外，为了需求响应项目的长期发展，电力公司需要有途径回收需求响应项目的成本以及在合理范围内获得针对收入损失的补偿。为了进一步激励电力公司，监管者也可以根据电力公司在促进需求响应发展方面的绩效给予奖励。对电力批发市场以及实现了行业重组的电力系统而言，预测和获取需求响应的效益可能比较困难，因为存在不同的价值流而某些价值流（例如对电网的效益）可能无法直接被项目投资者获得。在这种情况下，因为没有单一的行业相关方可以获得所有的效益，即使成本效率高的需求响应项目也不一定得以实施。简而言之，对于需求响应能够带来的某一价值，如果没有相应市场的存在，那么不仅难以估计真实的价值，而且该价值是非电力公司的其他个体难以获得的。至关重要的是有一个稳定透明的市场机制，使得需求响应的价值能够得以体现，并且行业相关方能够获得相应价值。监管政策应为需求响应参与这些市场移除障碍，确保电价和市场规则能增强利益相关方参与需求响应的兴趣，并且确保需求响应资源有机会获得相应的收益。

表 ES 2 不同电力行业结构下发展需求响应的商业模式

| 市场结构 | 实施主体 | 需求响应项目产品 ¹ | | | |
|--------|------------------------|-----------------------------------|-------------------------|------------------------------|--|
| | | 非可调度的项目 | | 可调度的项目 | |
| | | 类型 | 执行方式 | 类型 | 获取方式 |
| 垂直整合 | 电力公司 | 两部制电价；分时电价和尖峰电价 | 行政方式决定电价 | 直接负荷管理；可削减负荷 | 双边合同；行政方式设计的产品；特别举行的竞标 |
| 单一买家模式 | “单一买家实体”或电力系统运营商 | 两部制电价；分时电价和尖峰电价 | 行政方式决定电价 | 直接负荷管理；可削减负荷 | 双边合同；行政方式设计的产品；特别举行的竞标 |
| 竞争批发市场 | 电力系统运营商；配电电力公司 | 两部制电价；分时电价、尖峰电价和实时电价 ² | 行政方式决定电价；对电力批发市场电价作出响应 | 直接负荷管理；可削减负荷；参与电力批发市场的经济需求响应 | 双边合同；行政方式设计的产品；特别举行的竞标；电力批发市场（“多资源竞标”） |
| 完全竞争 | 电力系统运营商；配电网运营商；电力零售供应商 | 两部制电价；分时电价、尖峰电价和实时电价；分时的过网费 | 行政方式决定的电价；对电力批发市场电价作出响应 | 直接负荷管理；可削减负荷；参与电力批发市场的经济需求响应 | 双边合同；行政方式设计的产品；特别举行的竞标；电力批发市场（“多资源竞标”） |

¹ 一般来说，非可调度需求响应指的是基于电价的项目，而可调度需求响应则指的是基于激励的项目。但是，“可调度”的程度在不同的资源类型间可能有差异，取决于包括资源绩效违约的惩罚程度在内的一些因素。

² 理论上，实时电价也可以在垂直整合或单一买家模式下推行，但是这种做法并不常见。

负荷集成商能够在需求响应资源采购方面起到支持作用

负荷集成商能够依靠创新的商业模式，向电力系统运营商、电力公司和用户提供“增值服务”。负荷集成商的三大主要商业模式包括提供负荷削减服务、支持电力系统运营商/电力公司直接采购需求响应资源以及提供其他能源方面的服务。负荷集成的好处有很多，包括开发小型的需求响应资源、用户和市场开发、绩效风险管理和创新机会。更重要的是，负荷集成商本身应该就有激励来尽可能地开发需求响应资源。为支持负荷集成商的发展，监管机构和政策制定者应增强其发展用户和获得需求响应商机的渠道，为需求响应产品创造市场，并且在负荷集成产品能够降低系统成本的前提下确保该商业模式的经济可行性。

用户的技术能力、参与激励和宣传是非常重要的

如果用户长期参与到需求响应项目中，他们需要实施需求响应的技术能力、参与需求响应项目的适度经济激励以及有关为什么需求响应重要和如何参与等方面的知识。用户需要获得能够帮助他们发掘需求响应潜力以及确定所需支持性技术的资源。这包括有机会获得负荷集成商或其他资源提供的技术支持、双向的表计和通讯设备以及可以监测需求响应实施成果的能源管理反馈系统。需求响应项目可以考虑提供免费或带有补贴的技术支持，以及向支持性技术提供经济激励。根据电力系统的需要和用户对需求响应的熟悉程度，需求响应项目的设计也应该多样，从而满足用户不同的需求和用电特性。除此之外，用户也需要获得足够覆盖参与成本（例如投资支持性技术的直接成本和间接参与成本）的效益，但是同时项目的经济激励需要和需求响应给电力系统带来的效益相匹配。因此，需求响应项目需要在潜在的经济收益方面给予用户信心，并且确保用户看到参与需求响

应项目的好处（比如对用户电力支出的影响）。最后，持续的用户沟通和宣传对需求响应项目的长期发展是至关重要的。这主要是因为为了解如何成为“更智能用户旅程”的不同阶段，用户可能会有不同的需求。当用户对需求响应这个概念不太熟悉时，教育宣传对于解决用户有关参与项目风险的担忧是非常重要的。一旦用户获得了一些经验并且对参与的好处有了更好的认识，用户的宣传沟通提供了很好的机会鼓励用户进一步发掘其提供需求响应的能力。

需求响应资源可靠性

电力公司和系统规划机构需要对需求响应资源的可靠性（针对其提供如频率响应和发电容量充足性等系统服务的具体特征）有信心。这对于使用需求侧资源替代供应侧资源至关重要。项目的设计（比如对未能履行需求响应义务进行处罚）可以给予促进可靠性的激励，与此同时，能够提高用能可控性的技术也可以发挥支持作用。另外，项目的实施主体需要对项目进行定期的评估，对项目实现的峰荷削减进行测量验证，从而增强有关需求响应资源可靠性的数据。这对于非可调度需求响应项目尤其重要，因为这类项目通常没有促进可靠性的激励机制。

支持性技术

智能量测系统（AMI）是市场范围需求响应项目的一项关键技术，尤其是对基于电价的项目。其他技术（例如智能家电、能源管理系统或工商业用户的过程控制系统）也是需求响应项目的重要推手，尤其是对于需要快速响应和自动化的项目。此外，各类用电终端负荷的实时数据对于增加需求响应成果的“可见度”以及挖掘提供不同需求响应项目的潜力是很有帮助的。最后，备用发电设备的使用可能会增强用户提供需求响应的积极性和能力，但是备用发电设备只是一种替代性的供应端解决方案，而且很有可能带来比所节约的系统成本更高的环境和能源成本。

电力系统运行方面的差异对需求响应目前在中国的发展有一些阻碍，不过正在进行的电力体制改革为需求响应今后的发展提供了机会

尽管上述驱动需求响应发展的因素及其潜在的效益与中国相关，经合组织国家的经验也许不能被直接借鉴，这在本质上是因为中国电力系统与经合组织国家电力系统的发展十分不同。这种不同凸显了根据中国特定监管政策环境设计需求响应项目的必要性，同时也必须对管理电力系统运作的实践方法和制度框架作出改变。这也提出了在估计需求响应资源潜力和效益时需要考虑的若干实际因素。

行政需求规划与市场化机制的需求响应不兼容

年度需求规划起源于供电短缺的 1970 年代，至今依然存在。需求规划存在一些限制，譬如行政措施的经济损失、用户改变用电行为的激励不足以及设计需求响应项目满足不同系统需求（例如应对系统紧急事件之外的需求响应，如促进间歇性可再生能源入网的辅助服务）可能性有限。从行政需求规划向市场化需求响应转型不仅需要监管变革，也需要合适的用户教育沟通和项目设计。此外，行政需求规划可能会对电力需求产生压制，因而减弱了市场化机制的需求响应的效益。

资源规划与调度的体制与管理框架不够灵活，会对需求响应造成限制

如 Kahri 和 Wang（2014 年）所述，年度发电规划和机组发电计划，连同电网运营规划，一起构成了发电调度规划的基础¹⁴。年度发电规划通常需要维持发电容量一定的运行时间。结合区域间与省际间电力交易¹⁵的固定安排，该调度模型可能会限制需求响应的使用范围，因为需求响应的应用可能会对发电机组的运行时间产生影响。此外，调度模型的多层级结构也会增加省间共享需求响应资源及其效益成本的复杂性。

资源规划与调度中缺乏经济效益的驱动力，可能会阻碍需求响应的发展

不同于英国和美国，追求经济效益的驱动力在中国的电力系统中不强。例如，对所有发电能源类型（如煤炭、天然气、水电和可再生能源）缺乏优化的经济调度（如日前与运行备用），或在某些时候通过临时手段调度发电资源，这就意味着经济效率低的机组可能会以降低经济效益高机组的运行作为代价生产。这对需求响应的影​​响有两方面：第一，具有成本效率的需求响应的潜在效益可能无法在电力系统现有调度和运行模式下完全体现；第二，在电力系统规划中没有激励来将需求响应作为一种替代资源进行考虑。

电力系统中的定价信号缺失，给估计需求响应效益造成困难

在英国和美国的部分地区，可以基于竞争性电力批发市场中获取容量、能源和辅助服务、金融输电权和二氧化碳排放许可等信息，估算需求响应资源的效益。对于具备竞争市场机制的系统，需求响应资源可直接与供应侧以及其他需求侧资源竞争，或者通过竞争机制获取需求响应资源，同时确定特定需求响应服务的价格。对于不具备竞争市场机制的系统，通常会有一些经济信息，使得需求响应的行政价格可以反映对可避免成本的估计。相比之下，中国的电力系统主要还是受制于集中规划，价格、发电厂运行时间和高峰电力需求所都已经被提前设定。由于不存在竞争性市场机制来确定价格，需求响应成为了规划过程的一部分，而非被电价信号所驱使。定价信号的缺失给评估需求响应全部的经济效益带来困难。此外，因为消费者没有获得能够反映系统运行状况和经济成本的价格信号，他们参加需求响应项目获得的利益可能会相对较低，从而影响他们参与的兴趣。

但是，中国近来有关电力体制改革的政策举措应该能够在中长期支持需求响应的发展

在 2015 年公布的《关于进一步深化电力体制改革的若干意见》中，国务院不仅明确了需求响应和其他需求侧资源在确保电力供需平衡上的重要作用，而且重点提出了深化电价改革以及引入市场机制的目标。在这些领域的进一步努力有助于增强电力系统运行中的价格信号以及资源规划和调度的灵活性。此外，有序地缩减行政需求规划以及鼓励用户与电力公司签订可中断负荷合同也是政策鼓励的方向。从本质上来说，这些举措应该能够为需求响应的发展提供更加有利的环境。

14. 年度发电计划由省级规划部门制定，从而保证发电商的运行小时数。对于使用基于能效的调度模式的省份，发电组合方案基于发电排序表制定。电网运行计划考虑了输电系统的安全和限制因素。

15. 跨区域和跨省的电力调度计划在省级调度机构制定调度计划前确定。

基于中国现有的电力体制，“分阶段”的方式发展需求响应市场应该更加适合

在最初的阶段，需求响应项目可以考虑比较简单的设计（例如向特定用户群推广用于保证发电容量充足性的可削减负荷项目），也可以通过试点的形式，主要是为了增强用户对市场化机制需求响应的兴趣和认识。一旦用户对于参与需求响应项目有了一定的经验，就有机会设计更加细致的项目来满足用户的不同特征和电力系统的不同需求。从“用户旅程”的角度来看，这种方式的价值在于更好地促进用户兴趣和学习，这可以通过持续的用户教育宣传支持。电力公司和负荷集成商在其中需要扮演重要角色。另外，定期的项目评估对于增强对需求响应可靠性的实际认识、分享“最佳实践”以及寻求项目的改善都是非常重要的。除此之外，在政策的层面上，建议把握进一步电力体制改革所提供的机会，让用户逐渐“熟悉”电价的市场特性。这可以包括推广分时电价或尖峰电价来增加用户在高电价时段参与需求响应的效益。监管者和电力公司也应该进一步提升系统成本核算和更细致地定义系统服务，从而更好地支持对需求响应系统价值的估算。这些应该与通过政策手段促进电力资源采购的成本效益和对电力公司的激励等方面的工作进行互补。

需求响应的市场潜力和效益估计：以上海为例

为促进使用需求侧资源提供系统服务，很重要的一部分内容是评估需求响应资源的潜力和效益。这种评估能够帮助电力公司、电力系统运营商、政府和其他关键利益相关方明确需求响应资源的预期规模、来源、对电力系统的潜在价值，从而帮助制定需求响应发展的目标和战略。

估计需求响应市场潜力的框架和方法

市场潜力在这里指的是考虑能够影响用户参与度和用电负荷削减潜力的实际因素后（例如项目设计、激励、用户参与、用电特点、监管和市场条件），能够在系统高峰时段减低用电负荷的潜力¹⁶。国际上对需求响应市场潜力的研究采用的分析方法各有不同。然而，他们潜力分析的总体框架有一些共性，其中之一就是通过“自底向上”的方法评估需求响应的潜力，而该方法的使用是有充分理由的。例如，各类用户减少需求从而实现需求响应的潜力很大程度上取决于其用电特性，而各用户群体的用电特性很可能出现差异。特定的终端用途及支持性技术的普及率也能够影响用户提供需求响应资源的多少。此外，考虑到各用户群体在满足项目要求、参与动机和项目其他特点等方面的具体特点，不同用户群体参与需求响应项目的能力和意愿可能不同。图 ES 4 展示了“自底向上”方法在评估市场潜力中的框架和步骤。

16. 需要注意的是，需求响应可以用来应对不一定在系统高峰时段发生的系统情况（比如大型发电机组非预期的故障或新能源并网的需要）。

图 ES 4 分析需求响应市场潜力的关键步骤



评估需求响应效益的框架与方法

需求响应的效益是基于需求响应项目使电力公司可以避免的成本（被称为可避免成本，即没有需求响应项目时，满足额外的电力负荷需求而产生的成本）计算出来的。通常考虑不同类型的可避免成本。

可避免新增发电容量成本

这是相比较于没有进行需求响应情景下的电力高峰负荷需求（包括规划备用容量¹⁷，并考虑可避免的边际输配电损耗），需求响应项目能够通过避免新增发电容量而实现的发电容量减少。估计的需求响应潜力（通常以兆瓦为单位）可作为参考点，用来计算可避免发电容量的规模。可避免新增发电容量成本（每兆瓦）可以通过对合适的参考电厂的投资成本和固定运行维护成本进行“自底向上”的分析进行估计（图 ES 5）。

图 ES 5 估计可避免新增发电容量成本的步骤



可避免能源成本

该成本的计算方式有多种。例如，使用历史负荷曲线和预计的未来负荷曲线，并结合对电力平均批发价值的预测（或是对电力批发市场价格的预测，如果这个价格存在的话）进行计算。在没有电力批发市场的地区，可避免能源成本可通过比较两种情形下的能源成本而确定：一种实施需求响应，一种不实施需求响应。然而，可避免成本很难评估，因为没有真正意义上的与实际情况相反的情况。

可避免辅助服务成本

类似地，可避免辅助服务成本的估计也存在定义与实际情况相反情况的困难。在很多国家存在辅助服务的市场；这些市场内的价格可能会为其对系统的价值提供合理的评估。

17. 我们在计算可避免容量时加入了一个备用富余。但是今后的研究分析需要针对上海电网规划和运行的实际情况进行详细的分析。

可避免输配电成本

实际上，可避免输配电成本难以评估，因为成本取决于时间段、具体位置和系统的总体配置。评估的起始点通常是找出未来可能存在的电网拥塞，并考虑无需求响应情景下用于缓解电网拥塞所需的容量。

实施需求响应项目的潜在成本

需要记住的是，实施需求响应也存在潜在的费用，例如安装需求响应设备所涉及的资本支出。需求响应项目的成本和效益间的平衡将取决于相关电力系统的性质。由于相应数据无法获得，本研究没有能够估计实施需求响应的现在成本。

针对上海需求响应市场潜力的评估结果

本研究重点预测至 2030 年直接空调负荷控制项目（针对居民和中小工商业用户）以及可削减负荷项目（针对工商业用户）的需求响应市场潜力。研究基于三个情景，以反映不同级别的参与率和用户平均负荷削减水平。图 ES 6 展示了在未来几个主要年份（2020 年、2025 年和 2030 年）需求响应市场潜力的评估结果。在“最佳表现”情景中，分析显示 2030 年，需求响应资源的市场潜力能够达到 250 万千瓦，为当年预期高峰用电需求的 4%。而“中等表现”情景中，估计 2030 年市场潜力总量为 79 万千瓦，达到当年预期高峰用电需求的 1%。至于更加保守的“基本表现”情景中，估计 2030 年需求响应市场潜力达到 21.4 万千瓦，即当年预期高峰用电需求的 0.3%。

工商业可削减负荷项目贡献了预期需求响应市场潜力的主要份额

据估计，约 64–73% 的需求响应市场潜力来自上海工商业的可削减负荷项目。特别是工业可削减项目，在不同情景下的主要年份中预计能够贡献需求响应市场总潜力的 43–59%。在“最佳表现”情景下，2030 年总计 250 万千瓦的需求响应市场潜力中，工业和商业用户的可削减项目可以分别实现 110 万千瓦和 50 万千瓦的峰荷削减。

直接空调负荷控制项目能够为需求响应市场潜力做出显著贡献

虽然针对中小型工商业用户的空调直接负荷控制项目的贡献很少，但是在不同情景下的主要年份中，针对居民空调的直接负荷控制项目可占预期需求响应市场潜力的 23–33%。在“最佳表现”情形下，2030 年针对居民空调的直接负荷控制项目可以减少 80 万千瓦的峰荷。

图 ES 6 上海需求响应市场潜力的估计

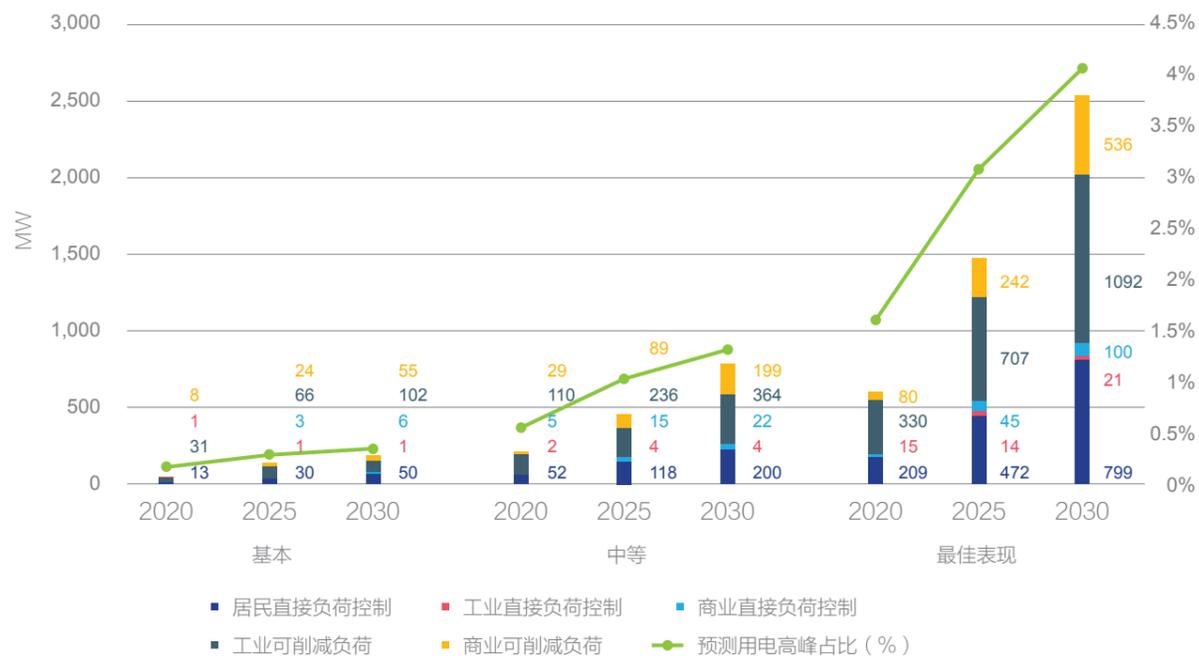
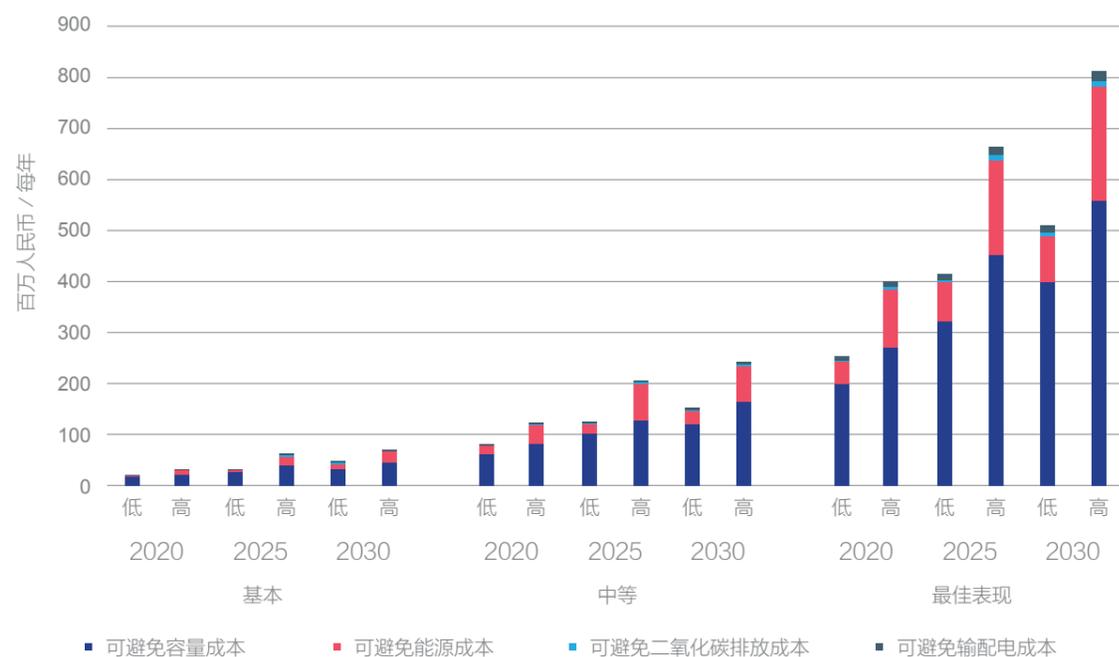


图 ES 7 2020 年至 2030 年间可避免的总成本



针对上海需求响应可避免成本价值的估计结果

上海需求响应的可避免总成本包括与作为参考的燃气电厂相关的可避免发电容量以及其他可避免成本（包括可避免能源成本、可避免二氧化碳排放成本以及可避免输配电成本）。本研究假设估计的需求响应市场潜力可以通过削峰而不是移峰或是使用备用发电设备实现¹⁸。图 ES 7 展示了 2020 至 2030 年期间预期的年度可避免总成本。该图表明，折现率为 7% 时，2030 年可避免总成本将达到 8.112 亿人民币。可避免发电容量成本对可避免总成本的贡献最大（所占比例在 68.3% 至 79.7% 之间），其次为可避免能源成本（在 17.8% 至 28.1% 之间）。可避免输配电成本和可避免二氧化碳成本合计占可避免总成本的 2.5% 至 3.8%。

本研究有几点需要说明的地方。一方面，我们的估计只考虑了可调度需求响应（即基于激励的需求响应项目）。因为如基于电价的非可调度需求响应项目没有包括在内，以及由于数据有限我们无法估计可避免电网扩展建设的成本，我们的分析可能低估了需求响应市场潜力和效益。另一方面，针对考虑了的可调度项目，我们的研究有可能高估了需求响应的价值。第一，我们的效益分析假设所有估计的市场潜力可以通过削峰实现，但是如果部分的市场潜力实际上是通过移峰或使用备用发电设备实现的话，从系统角度来看的总可避免成本可能低于我们的估计值。第二，行政性质的用电需求计划可能会抑制电力需求，而这有可能降低了需求响应的“真实的”经济效益，因为已有的容量本身就可能低于经济学意义上满足高峰负荷的最优水平。第三，因为缺少有关未来年份用电负荷和用电量的详细预测，我们的研究只能进行非常简单的估计，而这些估计可能并不能准确反映用电负荷和用电量未来变化的趋势。最后，数据的限制使得我们无法估计实施需求响应的潜在成本。

未来研究领域

最后，本研究还对未来有研究价值的几个领域进行展望。

加强负荷曲线研究

本研究的主要挑战之一是缺少不同用户群体的典型负荷曲线。进一步的研究将得益于更为严谨的用户负荷曲线分析，尤其是样本容量大、持续计量时间长的分析。这将帮助研究者确定关键的用电特征，从而改善用户群体的划分。智能电表在上海的普及率很高，因此可以利用智能电表量测系统提高对用户负荷曲线的了解。针对不同终端用途（例如照明、空调、插座负荷）的负荷曲线也将促进对用户需求响应潜力的分析。

18. 主要是因为本研究获得的数据有限，不能反映出削峰、移峰和使用备用发电设备在项目层面上对峰荷削减贡献的关系。

为参与率和需求响应 负荷削减量建立 更为丰富的证据基础

许多因素可能影响用户对需求响应项目的接受程度和参与的能力，这包括商业生产行为及其用电需求的灵活性、支持性技术的普及率和功能以及参与需求响应项目和其他解决方案（比如备用发电和能源替代等）的成本效益。随着需求响应试点的发展，将出现更多本地特有的证据或数据来显示上述因素在用户群体间如何不同，而这可以为未来进一步的潜力分析提供信息。因此，对需求响应项目全面和定期的评估是有必要的。

对上海 2015 年的需求响应 试点项目进行评估分析

该试点的数据对于分析需求响应如何影响不同用户群体和用电终端用途是非常有帮助的。对这些信息的分析有助于为上海和其他地区进行需求响应项目设计提供详细的参考。

分析不同需求响应策略的 相对潜力大小

今后的研究可以考虑上海用户实现峰荷削减可能采取的不同策略（比如削峰、移峰或备用发电设备的使用）。这些信息将有助于效益分析在可避免能源成本、可避免二氧化碳排放成本以及系统层面上可避免发电容量成本等方面作出更有根据的假设。这就需要更好地了解商业生产行为及其用电特性，支持性技术对于不同响应策略的作用，以及用户角度的成本效益。

针对用电终端和其他需求响应 类型进行详细的潜力分析

由于数据有限，本研究没有能够针对不同用电终端类型（例如空调、工业过程或冷藏）或其他需求响应类型（例如非可调度基于电价的需求响应）进行潜力分析。今后的研究可以借助不同用户群体用电终端水平的实时用电负荷数据，以及有关用户用电价格弹性的证据基础来进行分析。

进一步定义需求响应产品

随着需求响应在系统运行和规划中的角色日趋重要，评估单个需求响应产品的潜力和价值，从而为系统规划和运营提供更为详细的需求响应潜力和效益的估量，这样做是有用的。然而，这可能增加对证据或数据的需求，以表明不同用户在参与需求响应产品以及提供响应资源方面的差异。换言之，这需要对用户进行更为深入的了解。

加强长期高峰用电 需求预测

需求响应的最大效益可能是长期来说的可避免发电容量成本和可避免输配电成本，而需求响应项目在达到特定水平的参与率或负荷削减效果之前，通常具有一个“爬坡增长”的阶段。基于这些原因，对需求响应在中长期的潜力和效益的考虑是有意义的。这需要将高峰电力需求预测的时间段延长至更长的时期，其中要考虑到电力系统中可能出现的、影响高峰负荷的因素。

制定用户宣传沟 通战略

持续的用户教育宣传对于需求响应项目的长期发展是十分关键的，而且应该在全面的需求响应发展计划中有所体现。今后的研究可以对国际上进行用户宣传沟通的模式进行细致研究。

获得更好的系统成本信息， 以更好地评估系统效益

为了更为准确地估计可避免成本，需要更为详细的有关需求响应会影响哪些电厂以及这些电厂具体的增量成本方面的信息。从长远来看，在市场化的系统中，或是电价可以反映边际成本且调度基于边际成本的系统中，可通过预测实时的可避免电力成本来计算系统的可避免成本。另外，评估需求响应能够实现可避免电网容量扩展建设的潜力也是很重要的。

评估需求响应项目成本

理解需求响应项目能够为系统运营和规划带来的真正价值，就必须评估需求响应项目的成本。因此，我们可以评估需求响应项目的净价值，并就项目应如何设计（例如如何减少项目成本）或特定项目是否值得推出（例如需求响应的成本效益）做出明智的决定。

考虑增加其他环境 外部效应

目前这项研究将二氧化碳作为一项潜在的重要可避免成本纳入分析。进一步的研究可以将其他可避免环境外部效应囊括其中，包括 PM₁₀ 的排放。