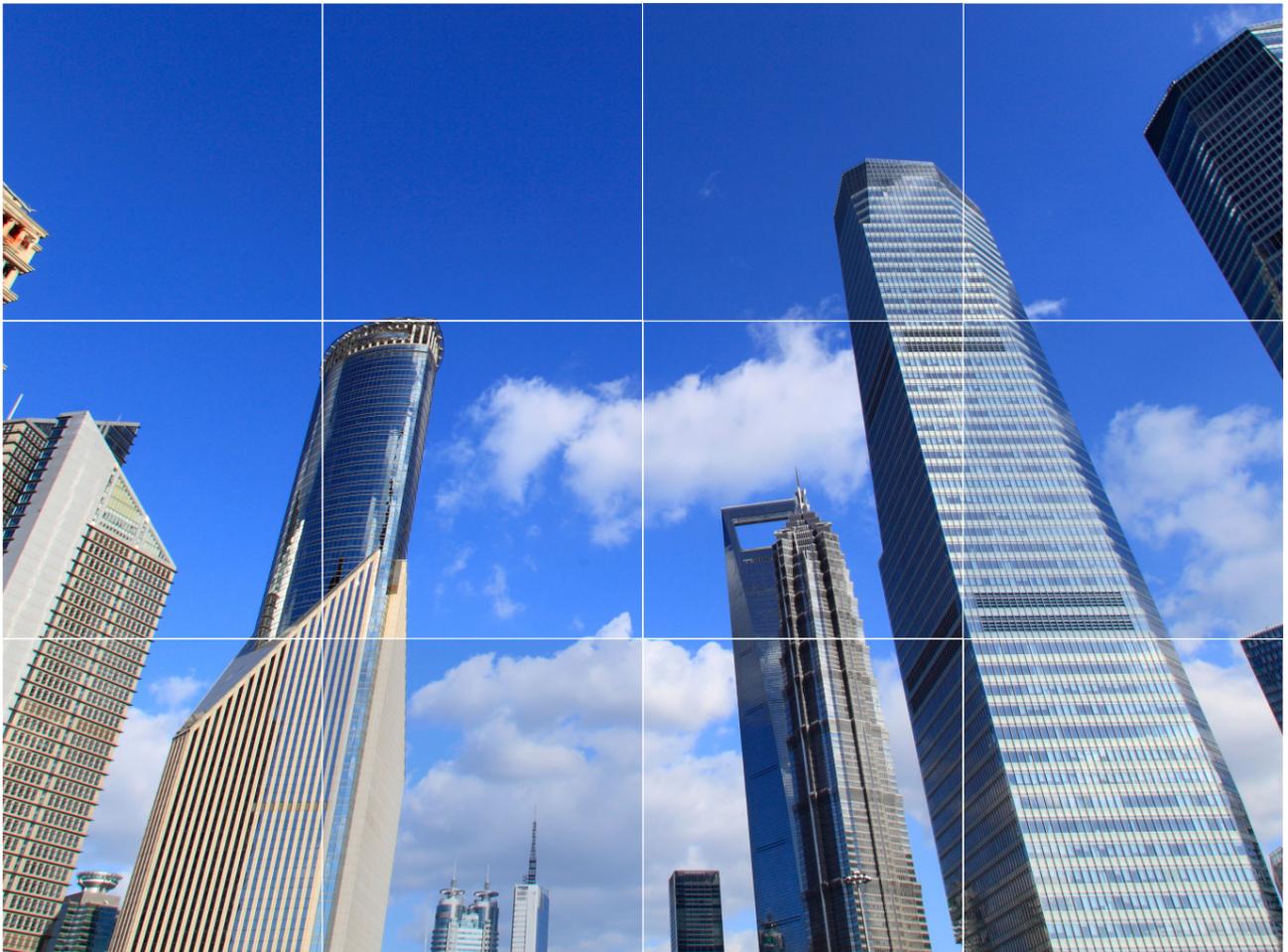




# 上海市冬夏季节商用楼宇 需求响应潜力后续分析报告

2016 年 11 月



## 作者

牛津大学环境变化研究所

刘英琪

Nick Eyre

Sarah Darby

牛津能源研究所

David Robinson

## 委托单位

自然资源保护协会

## 支持单位

英国驻华使馆外交和联邦事务部中国繁荣战略项目基金

## 致谢

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。在 ECI 和 OIES 合作完成的《上海需求响应市场潜力及效益评估》研究报告的基础上，运用上海需求响应试点项目的最新数据，对上海市夏季和冬季的需求响应潜力进行了后续分析。

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）、以及上海腾天节能技术有限公司。我们也感谢各位专家提供十分宝贵而深入的意见和指导：上海交通大学的韩延民教授、上海电器科学研究所的阮於东博士、自然资源保护协会（NRDC）的 Jennifer Chen 女士、Amenda Levin 女士和 Christina Swanson 女士。

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

---

研究对象：商用楼宇 02

研究方法 03

夏季商用楼宇的需求响应潜力评估 14

冬季商用楼宇的需求响应潜力评估 17

今后研究建议 19

附录：终端用电分类的定义 21

---

**需求响应**（Demand-side response）在提高电力系统的经济与运行效率、改善系统灵活性方面扮演着重要的角色。在中国，提升电力系统经济效率、减轻大气污染、减少碳排放以及可再生能源并网等诸多政策目标，凸显了探索需求响应这类非传统资源的必要性。需求响应的价值在于确保高质量用电服务的同时，避免或替代传统发电机组和输电容量建设，改善电力系统的经济效率，避免高峰时段使用高污染的电源，加强电力系统的灵活性和电网管理。另外，通过参与到需求响应，用户将提高对电力系统运行情况和要求的认识，改变其对自身如何参与电力运行管理的思维。

上海市是中国首个需求响应的试点城市，项目范围涵盖多种工商业用户（如制造业、办公楼宇、零售业和餐旅业）。尽管需求侧管理已在中国开展了数十年，现行的措施主要侧重于能效提升以及大型工业用户的负荷控制。上海市开展需求响应试点项目的意义包含两方面：1）设计和测试一个基于市场的机制，以激励用户持久性的参与；2）将需求响应的参与范围扩展到多种工商业用户，而不仅仅是大型工业用户。

在 2015 年 7 月，我们开展了一项题为“上海需求响应市场潜力及效益评估”（以下简称“15 年报告”<sup>1</sup>）的研究，希望借此总结推动需求响应发展方面的国际经验。我们从政策监管、市场和用户激励方面进行了分析，同时对需求响应在上海的潜在价值进行了初步的评估。我们还为推动需求响应在中国的发展提出了一些指导性的决策建议。

本报告是 15 年报告的后续分析，旨在评估上海市冬夏季节需求响应的潜力。该报告使用了新的数据，特别是用户在 2015 年夏季和 2015-16 年冬季的用电情况（即负荷曲线）及其在需求响应事件<sup>2</sup>中的响应情况。和 15 年报告一致，本次后续研究侧重于需求响应在削减高峰负荷方面的作用，其响应时间要长于其它系统服务（如平衡服务）。

针对上海市的两类商用楼宇，本报告有两个主要目标：

- 基于更充足的负荷特性与用户响应数据，对夏季需求响应潜力评估进行更新；
- 基于冬季需求响应试点的数据，评估冬季需求响应潜力。由于上海市全年的高峰负荷通常发生在夏季<sup>3</sup>，因此就目前而言，夏季的需求响应潜力与降低发输电容量需要最为相关。除了降低高峰负荷，上海市试行的需求响应类型也可能在冬夏两季提供其它有价值的服务（如提高电力系统灵活性、电网管理等）。由于本报告分析的基础是用户在冬季中午 12 点到下午 4 点间削减负荷的情况，因此本报告的结果应视为对该时段削减负荷潜力的评估。

本报告的主要发现为：

- 在**夏季最佳表现情景中**，预计到 2030 年，可削减负荷项目的潜在在两类商用楼宇（一类为金融业、房地产业、商业、服务业；另一类为零售业，酒店业和餐饮业）中可达到 345MW，明显高于直接负荷控制项目的潜力（34MW）。金融业、房地产业、商业及服务业的商用楼宇占夏季可削减负荷项目需求响应潜力的 80%。
- 在**冬季最佳表现情景中**，预计到 2030 年，暖通系统（如电力供暖）的可削减负荷项目潜在在上述两类商用楼宇中可达到 189MW。金融业、房地产业、商业和服务业楼宇将占到冬季需求响应潜力总体的 78%。

需要指出的是，本后续报告应该与 15 年报告一起阅读。任何分析结果间的差异都应视为采用试点提供的新数据和由此适当调整方法的结果。

## 研究对象：商用楼宇

本次分析主要侧重于上海市的两类商用楼宇：

- 金融业、房地产业、商业和服务业；以及
- 零售业、酒店业和餐饮业。

侧重于这两类楼宇主要出自以下两个原因：

- 第一，其他类型商用楼宇用户（如公共楼宇）能够反映其用电特性和特定需求响应事件中负荷响应情况的样本量过少，因此很难开展具体分析。特别是与上述两类楼宇用电特征差异较大的商用楼宇（如交通、仓储和邮政），数据十分匮乏。
- 第二，上述两类楼宇代表了上海市大部分的电力用户，或者说代表了在未来对需求响应贡献较大的关键用户。2014 年，这两类楼宇的用电量占到了上海市商业部门用电量的 60% 以上<sup>4</sup>。

尽管如此，这并不意味着其他类型的商用楼宇缺乏需求响应的潜力——未来需要进一步的研究来补充有关这些商用楼宇用电特征和提供需求响应可行性的数据<sup>5</sup>。

1. Liu, Y., Eyre, N., Darby, S., Keay, M., Robinson, D. and Li, X. (2015). Assessment of Demand Response Market Potential and Benefits in Shanghai. Prepared for Natural Resources Defense Council. 文件链接：<http://www.eci.ox.ac.uk/research/energy/downloads/Assessment%20of%20Demand%20Response%20Market%20Potential%20and%20Benefits%20in%20Shanghai.pdf>

2. 当预先设定的情况发生，系统运营商通知用户在系统负荷高峰期减少用电

3. 尽管这一现象可能会随着电力供暖或热泵的普及率升高而有所变化

4. 国家电网并未在报告中提到这两类楼宇的峰值负荷占商业部门总峰值负荷的比例。

5. 本报告并未能够获取每一类商用楼宇的总负荷。今后的研究应详细了解每一类商用楼宇在系统高峰负荷中的占比，以找出需求响应潜力高的商用楼宇类型。

## 研究方法

本次对需求响应潜力的评估遵循了三个步骤。由于 15 年报告详细阐述了需求响应潜力的分析框架，本报告仅介绍了 15 年报告研究方法中未涉及的重点部分。



### 终端用电负荷曲线

分析的第一步是为本报告侧重的两类商用楼宇，建立终端用电平均负荷曲线，来描述其用电特征。本报告使用由负荷集成商腾天公司<sup>6</sup>采集的冬夏两季商用楼宇 24 小时终端用电典型负荷曲线样本（128 个夏季楼宇样本和 117 个冬季楼宇样本）。尽管这些样本为了解两类楼宇的用电特征提供了宝贵的参考，仍应注意这些样本数据背后的一些潜在问题：

- **负荷曲线**——终端用电平均负荷曲线应该代表某一特定用户群体的典型用电特征。为了确保负荷曲线具有“典型性”。这需要满足两个条件。第一，典型负荷曲线需要反映同类建筑楼宇中不同用户用电特性（如用户大小和生产/用电的性质）的平均水平。第二，针对夏/冬季，负荷曲线需要有代表性（即该负荷曲线对于整个夏季/冬季是否足够“典型”）。对于某一个样本来说，这通常需要对若干相似的采集日的负荷曲线做平均化处理，根据可能影响用电的外部因素（例如，温度、运行情况）进行调整。需要指出的是，本报告中获得的样本，有可能在用户多样性或“典型性”方面尚待改进（这是因为我们得到的负荷曲线并未根据温度或其它外部因素进行调整，仅仅是夏/冬季某一选定日的负荷曲线）。
- **系统负荷高峰期**——与 15 年报告类似，本报告侧重于需求响应在削减系统高峰负荷方面的潜力（即作为一种容量资源）。换句话说，这里并未涉及需求响应作为一个灵活的电网资源，为系统运行提供辅助服务<sup>7</sup>，虽然从长期来看，这方面的潜力或许具有价值与可能性。在夏季，日负荷高峰通常出现在中午 12 点到下午 4 点；在冬季，根据国家电网提供的系统负荷曲线，尽管其峰值负荷明显低于夏季，日负荷高峰仍然出现在上述时段。

为了估计两类商用楼宇在夏季的终端用电平均负荷曲线，本报告采用了瞬时终端用电负荷和年均负荷（即年用电量除以 8760 小时）的比率。换句话说，我们试图分辨终

端用电负荷和年均负荷的“典型”关系。这主要是因为本报告只能获得上海这两类商业楼宇年度总用电量的数据。如此我们假设，通过样本估计的终端用电负荷和年均负荷间的关系，就能够代表这两类商用楼宇所有用户。

附录详细列出了终端用电的类别。我们采取了以下三个步骤，估计夏季的终端用电平均负荷曲线：

1. 第一，为上述两类商用楼宇分别建立一个平均的总负荷曲线。腾天公司提供了夏季某高温日新的 24 小时负荷曲线，包括：1) 金融业、房地产业、商业和服务业的 82 个样本；以及 2) 零售业、酒店业和餐饮业的 46 个样本。为每个样本，对 24 小时的每一个 30 分钟计算瞬时用电负荷和年均负荷的比率；然后为每个商业楼宇类别，针对 24 小时的每一个 30 分钟计算所有样本的瞬时用电负荷和年均负荷之比率的  $L_{t, \text{年均}}$  的中位数（ $L_{t, \text{年均}}$ ）。
2. 第二，将总负荷曲线分配到各用电终端。对于样本中的各用电终端，报告确定了：1) 在系统高峰时段（中午 12 点到下午 4 点），平均终端负荷与平均总负荷的比率（ $P_{\text{峰值}}$ ）；2) 在一天 24 小时内，每 30 分钟的瞬时终端负荷与系统高峰时刻平均终端负荷的比率（ $R_{t, \text{峰值}}$ ）。对于前者，对同一类商用楼宇的样本取平均值。对于后者，对每 30 分钟时段同一类商用楼宇的样本取中位数。
3. 第三，对于一类商用楼宇的某一用电终端，将  $L_{t, \text{年均}}$  的中位数乘以  $P_{\text{峰值}}$  的平均值和  $R_{t, \text{峰值}}$  的中位数来计算瞬时终端用电负荷与年均负荷的比率（EUL-AAD）。然后，对 24 小时的每一个 30 分钟，将各用电终端的 EUL-AAD 值加起来，并按比例进行调整以符合之前估计的平均总负荷曲线。

为了估计两类商用楼宇在冬季的终端用电平均负荷曲线，腾天公司提供了某冬日 24 小时新的负荷曲线数据，包括：1) 76 个金融、地产、商业和服务业样本；以及 2) 41 个零售、酒店和餐饮业样本。由于这些样本缺乏年用电量数据，尚无法确定终端用电负荷和年均负荷间的平均关系。另外，由于夏季和冬季的样本针对不同用户，因此无法将冬季的任何样本楼宇与夏季的数据联系起来。

考虑到这一难点，我们采用了另一种方法来估计冬季的平均终端负荷曲线，即根据现有的夏季数据进行推断。其中的关键因素是终端用电负荷的季节关系，并使用这种关系对估计的夏季终端用电负荷曲线进行调整。对于本次后续分析，我们使用空调和非空调负荷的季节性关系，调整了估计的夏季终端用电平均负荷曲线。计算过程包括三个主要步骤：

1. 第一，在整个电力系统层面，分别针对暖通系统和非暖通系统计算在 24 小时的每 30 分钟内的冬季和夏季负荷的比率（ $R_{\text{冬-夏}}$ ）。数据来源于国家电网 2015 年提供的上海夏季和冬季的典型日内 24 小时的系统总负荷，并按暖通系统和非暖通用途进行分类。采取分类计算的方法是由于它们呈现出不同的季节性关系（见图 1）。我们做出一个假设，本报告关注的两类商用楼宇暖通系统和非暖通系统负荷的季节性，与其在系统层面上呈现的季节性是一致的。尽管这样估算非常粗略，但这是本次后续分析中

6. 腾天公司是上海需求响应试点的唯一负荷集成商。商用楼宇必须通过腾天参与试点。

7. 示例包括英国 National Grid 公司的短期运转储备项目（STOR）和频率响应项目，ERCOT 的负荷资源项目，PJM 的同步（旋转）备用及调节市场等。MacDonald 等人 2012 年的报告 Demand Response Providing Ancillary Services: A comparison of opportunities and challenges in the US wholesale markets 以比较的视角研究了在美国电力批发市场中提供辅助服务的需求响应资源。报告链接：[http://eetd.lib.gov/sites/all/files/lbnl-5958e\\_0.pdf](http://eetd.lib.gov/sites/all/files/lbnl-5958e_0.pdf)

唯一能够预计冬季的终端用电平均负荷曲线的方法。为了提升对于上海不同类型用户的终端用电负荷和年均负荷间关系的了解，需要进一步的证据支持和研究分析。

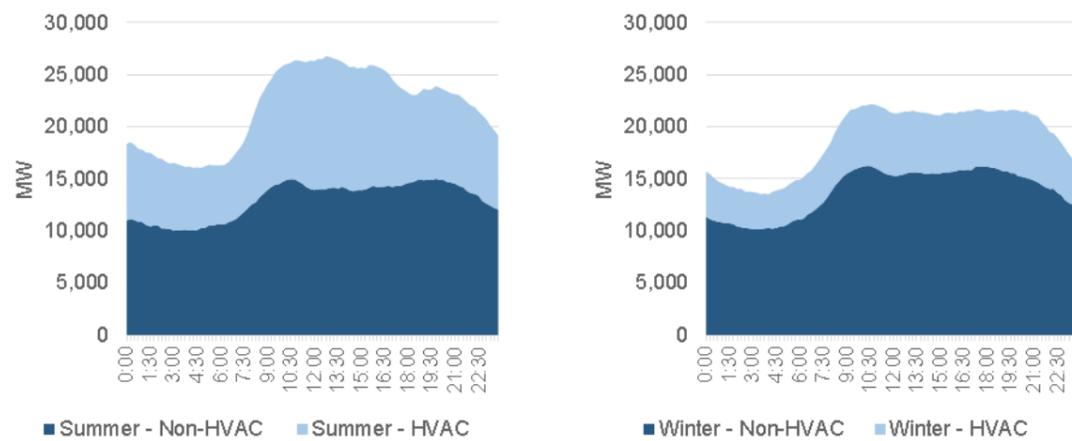


图 1. 上海市电力系统的暖通系统和非暖通系统总负荷间的季节关系<sup>8</sup>

来源：国家电网

- 第二，针对 24 小时中每 30 分钟间隔，调整夏季的 EUL-AAD 估算值，计算出冬季暖通系统与非暖通系统负荷的 EUL-AAD 值。这是分两部分完成的：首先，将照明设备和插座负荷<sup>9</sup>、电机和其他相关设备的负荷相加，计算夏季非暖通系统负荷的 EUL-AAD 值。然后，针对暖通系统和非暖通系统，使用  $R_{冬-夏}$  分别计算其总 EUL-AAD 值。
- 第三，按照三类终端用电（即照明和插座负荷、电机和其他设备）划分冬季非暖通系统负荷的 EUL-AAD 值。这需要知道：1）这些终端用电的平均峰值在非暖通系统总平均峰值的占比（ $P_{峰值-非暖通}$ ）；以及 2）对于某一特定终端用电，24 小时内每 30 分钟的瞬时负荷和平均峰值负荷的比率（ $R_{t-峰值-非暖通}$ ）。对于前者，针对每个样本个体，计算三类非暖通系统终端用电在系统高峰时（中午 12 点到下午 4 点），其平均负荷占非暖通系统总平均负荷的比率（ $P_{峰值-非暖通}$ ），然后对每类商用楼宇的所有样本取平均值。对于后者，针对每一类终端用电，估算出样本采集日 24 小时内每 30 分钟的瞬时负荷与平均峰值负荷的比率（ $R_{t-峰值-非暖通}$ ），然后对每类商用楼宇的所有样本取中位数。随后，对于每一类用电终端，估算的非暖通系统 EUL-AAD 值乘以  $P_{峰值-非暖通}$  的平均值和  $R_{t-峰值-非暖通}$  的中位数，来估算冬日 24 小时内每 30 分钟的终端用电 EUL-AAD 值。最后，对于 24 小时内的每个 30 分钟时段，将三类非暖通用电终端的 EUL-AAD 值加起来，并按比例进行调整以符合之前估计的非暖通系统用电终端平均总负荷曲线。

8. 对于一些终端用电（例如照明设备），它们的负载曲线可能是呈季节性的。然而，由于本报告的信息有限，这些有季节性变化的终端用电没有从非暖通总体分类中被标记出来。

9. 插座负荷是指除照明设备、暖通系统以外的其他用电器的负荷，例如办公设备、厨房用具、电话等。

图 2-3 显示了针对 1) 金融业、房地产业、商业和服务业；以及 2) 零售业、酒店和餐饮业等商业楼宇，估计的夏季和冬季终端用电平均负荷曲线。一些关键的结论如下：

- 在冬夏两季，上述两类商用楼宇的高峰负荷与系统的高峰负荷趋于同时出现。两类样本楼宇均在系统高峰时段（即工作日的中午 12 点到下午 4 点）达到其负荷高峰。这一现象强调了探索这两类楼宇需求响应潜力的重要意义，因为需求响应将直接作用于降低系统峰值负荷。此外，这两类商用楼宇中的照明和插座负荷以及暖通系统负荷也在系统高峰时段达到峰值，表明探索这些用电终端需求响应的潜力具有重要价值。
- 两类商用楼宇呈现出不同的负荷曲线。尽管存在一定的相似性，两类楼宇的平均负荷曲线在一些方面显示出差异性，如瞬时总负荷和年均负荷间的关系（即最高负荷水平或负荷曲线的“尖锐”程度）以及终端用电负荷曲线的特性。例如，在夏季，相比零售业、酒店业和餐饮业的样本楼宇，照明和插座负荷以及空调设备的负荷曲线在金融业、房地产业、商业和服务业的样本楼宇中达到了更高的峰值。尽管呈现了不同的最高负荷水平（或称“尖锐度”），这两类用电终端出现高峰负荷的时段与系统高峰时段趋于一致。一系列原因可能导致了这种差异性，包括不同类型楼宇用电特性的差异以及样本负荷曲线在楼宇类型及其用电特性上有何种程度的代表性（如负荷曲线是否能代表样本楼宇的典型用电规律）。考虑到这些因素，详细地对用户进行合适的分类（如不同商业楼宇类型以及同一类型下的不同类群），从而更好反映出导致这些差异的独特用电特性或驱动原因是至关重要的。同样重要的是了解这些差异性是否会影响到用户用电需求的灵活性以及这种影响是如何造成的。
- 在夏季，照明和插座负荷与空调的瞬时负荷在一天内表现出显著的变化。这两类用电终端构成了系统高峰期大部分的总负荷。在这两类楼宇的平均负荷曲线中，有三个规律特别值得注意。第一，照明插座和空调的日中最高和最低瞬时负荷间的差距，高于电机和其他用电终端。第二，照明/插座负荷和空调各自占据了近 40% 的总高峰负荷。考虑到空调的灵活性（参见下文讨论中涉及到上海试点项目的信息），该类用电终端在增加系统可靠性（如降低峰值负荷）方面具有巨大的潜力。在非高峰时段，空调在总负荷中也占有很大比例，这显示出其在电力系统运行的其他服务方面（如平衡服务、可再生能源并网）同样具有价值。对于照明和插座负荷来说，虽然试点项目的数据表明其在需求响应方面的可能性，但是其负荷响应程度远远低于来自空调的响应（讨论请参见后文）。这意味着使用照明和插座负荷提供需求响应可能有一定的机会<sup>10</sup>，但探索提升这些用电终端的能效从而降低高峰负荷的潜在价值可能更大。事实上，提高照明（如 LED 灯，照明传感器和日光照明）、插座用电以及其它用电终端的能效将会减少废热产生，从而有可能降低空调的使用需求。第三，照明和插座负荷与空调负荷在日中的变化紧密一致，特别是在系统高峰时段。虽然在本研究中解析这一现象有所困难<sup>11</sup>，但是对不同类型用电终端在灵活性和需求响应潜力方面互相关系（如高效照明和其他用电设备对空调负荷的影响大小）更加深入的认识，将会对未来的研究

10. 国际经验包括美国的一项自动需求管理研究项目。此项目中，Albertsons 公司在不影响员工工作效率的前提下，通过关闭一半照明日光灯来降低照明设备 50% 的负荷。详情请参考 Piette 等人 2004 年的报告“Development and Evaluation of Fully Automated Demand Response in Large Facilities”。

11. 存在多个假设（能解释这一现象），例如照明和其他用电设备的废热增加了使用空调的需求，或者在工作时间给空调设定特定温度的做法（与照明/插座负荷的使用相应）。然而，本研究未能检验这些假设何者为真。

有所益处。这需要有关数据来源和分类更多的信息，来避免用电终端分类不清的情况。元数据相关问题的澄清和进一步分析对厘清能够影响需求响应潜力的用电终端间的关系是至关重要的。

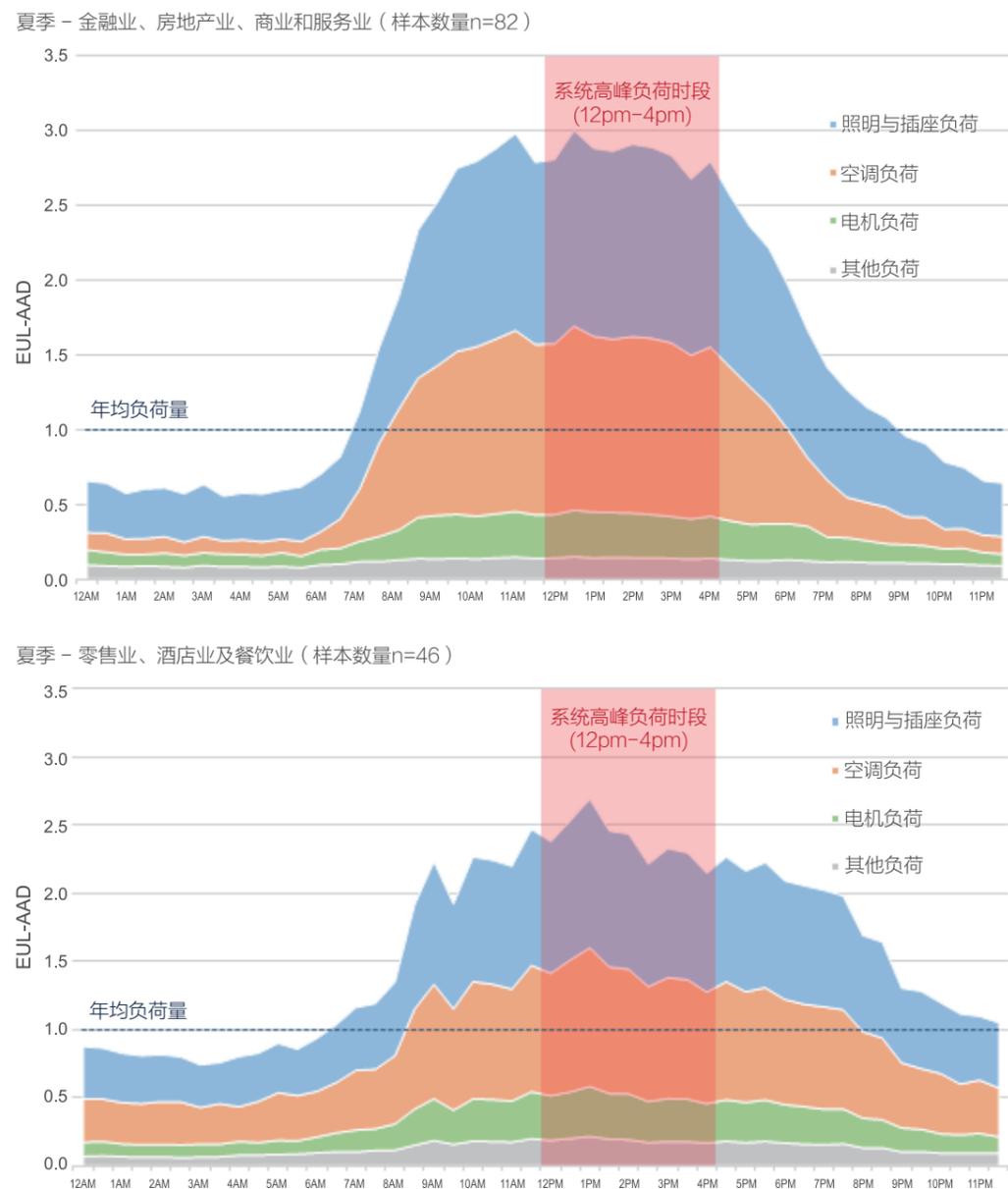


图 2. 夏季两类商用楼宇终端用电平均负荷曲线的估计

来源：作者分析

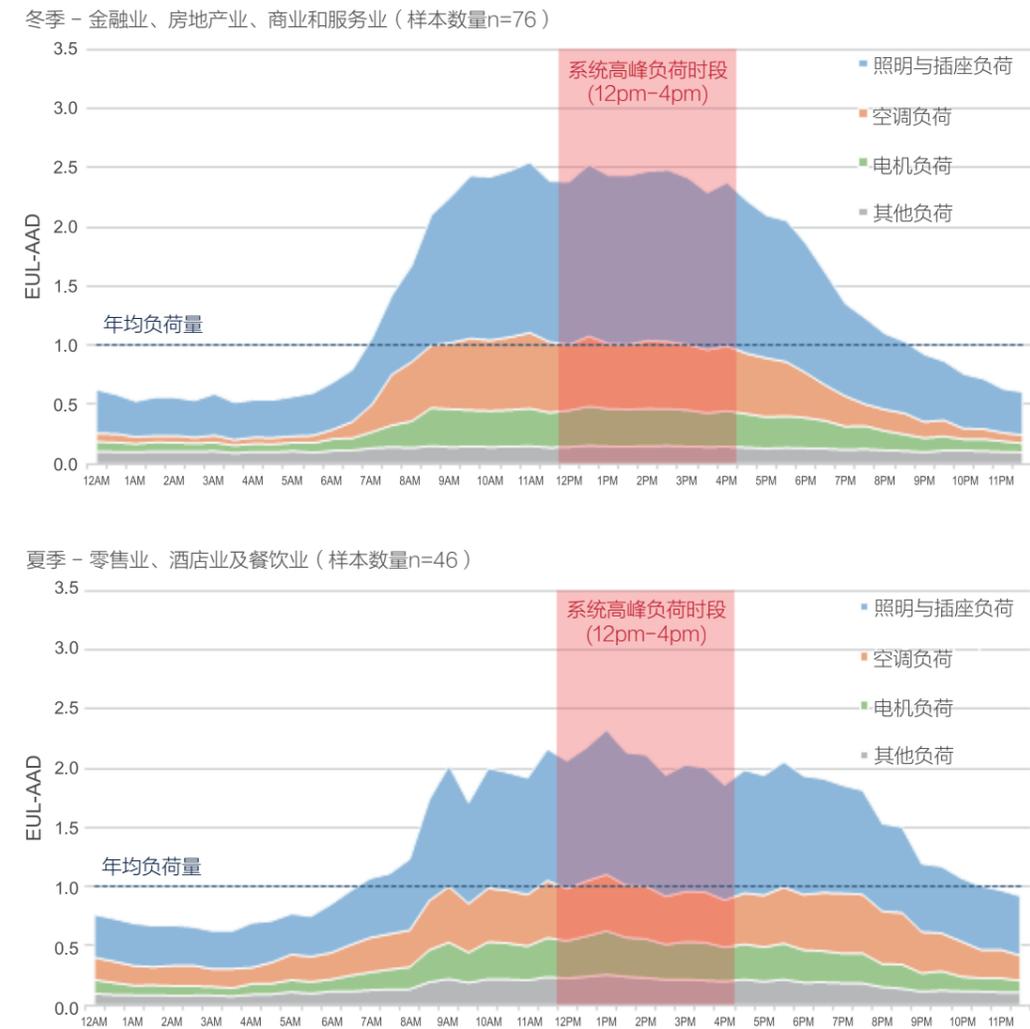


图 3. 冬季两类商用楼宇终端用电平均负荷曲线的估计

来源：作者分析

- 在冬季，照明和插座的负荷占据了大部分的总峰值负荷，相比夏季，暖通系统的负荷相对较低。对于这两类商业楼宇，根据估计的终端用电负荷曲线，照明和插座负荷占总峰值负荷（中午 12 点到下午 4 点）的 50% 以上，而同一时段的暖通系统负荷仅 20% 出头。这主要是因为冬季暖通系统的用电量较低，上海市使用天然气或石油供热的普及率远高于电力供热的普及率。如下文所示，尽管在冬季暖通系统存在一定的需求响应潜力，但是尚不明确上海用户在冬季改变照明 / 插座负荷的意愿强弱。当然根据一些国际经验，可能性是存在的（如脚注 10 中

的 Albertsons 案例)。考虑到这一情况,冬季的需求响应潜力(即在中午 12 点到下午 4 点间削减高峰负荷)也许并不大<sup>12</sup>。如果目标是为了降低该时段的负荷(如支持配电网管理),提高电力能效或推广分布式发电等措施可能会更加有效。

由于缺乏充分的信息表明各类商用楼宇是如何划分的(如用户用电量),本次研究采用了单个用户平均用电量(即某一类商用楼宇的总用电量除以该类楼宇的用户数量),计算不同类型楼宇的单个用户的平均高峰负荷和总高峰负荷。换句话说,本报告仅仅反映了单个用户平均用电量,而无法确定这一数据在同一类楼宇中不同分类间存在的差异。

考虑到未能获得对未来用电量的详细预测,本次研究根据 2008-2014 年的历史数据<sup>13</sup>,对上述两类楼宇的年总用电量和用户数量进行了线性回归分析。依照线性回归的结果,粗略估算了未来每类楼宇的年总用电量和用户数量。换句话说,我们假设每一类商业楼宇其年总用电量和用户数量在 2008-14 年的平均增长趋势会在 2015-30 年持续。将年总用电量除以用户总量即得到了任一特定年份下,某一类楼宇单个用户的平均年用电量,表 1 展示了所预测的未来单个用户平均用电量和用户数量。

表 1. 未来年份单个用户平均年用电量和用户数量假设值

	单个用户平均年用电量 (MWh)				用户数量 (千)			
	2015	2020	2025	2030	2015	2020	2025	2030
金融业、房地产业、商业和服务业	29	30	30	31	636	822	1,007	1,193
零售业、酒店业和餐饮业	63	63	63	63	129	148	167	186

数据来源: 2011,2013,2014 年《上海统计年鉴》; 国家电网 2013、2014 年年度用电数据; 2009-2011 年《电力工业统计资料汇编》

根据表 2 所示,样本楼宇的平均用电量和同一类楼宇估计的单个用户平均用电量存在较大差异。这表明样本楼宇应该不能完全代表该类型的楼宇,且这两类商用楼宇中用户用电量的差异较大。鉴于这一情况,估计的终端用电平均负荷曲线有可能并不能反映该类商业楼宇的典型用电特性。未来的研究需要更详细地划分用户群体,并选择更具有代表性的样本。此外,楼宇间用电量的较大差异显示出这两类楼宇中大量的小型商户或个体用户,而他们也许有参与直接负荷控制项目的潜力。

12. 电热水采暖被认为是冬季需求响应的一个潜在来源。然而,本研究所获得的上海试点数据并没有将水暖作为一种负荷,这使分析水暖在冬季需求响应方面的潜力变得困难。

13. 年度用电量数据来自《上海统计年鉴》2011, 2013, 2014。2013 和 2014 年数据来自国家电网。客户数量的数据源自 2009-2011 年《电力工业统计资料汇编》

表 2. 样本楼宇的年用电量和估计的单个用户平均年用电量

	样本楼宇的年用电量 (MWh)		单个用户的平均年用电量 (MWh)
	平均值	范围	
金融业、房地产业、商业和服务业	5,680	7-55,927	29
零售业、酒店业和餐饮业	6,396	13-86,245	63

来源: 上海需求响应试点数据集; 作者分析

## 单个用户平均负荷响应和参与率

与 15 年报告一致,针对夏季,本次后续研究考虑到两种类型的需求响应——空调设备的直接负荷控制与可削减负荷项目。直接负荷控制项目允许电力公司在用户许可的情况下,远程调节空调的负荷;负荷削减项目通常允许用户自主决定如何对需求响应指令做出反应(如削减哪项终端用电,削减多少用电负荷等)。然而对于冬季,只考虑了可削减负荷项目,这主要是因为商用楼宇中,对电力供热使用直接负荷控制的情况有限,而且没有证据显示上海商用楼宇参与直接负荷控制的可能性。

根据上海试点的成果和国际经验(如空调直接负荷控制项目的负荷响应情况、负荷削减项目和直接负荷控制的参与度)<sup>14</sup>,我们设计了三种情景——基本情景、中等情景和最佳表现情景,来反映今后不同层次的负荷响应和参与度。在上述三个情景之中,最佳表现情景反映了上海试点和/或国际经验对标分析中较高的负荷响应和参与度水平,代表了最优情景。然而需要指出的是,本次研究并未选取一个特定的情景作为最有可能实现的情景,因为这将取决于多个因素(如用户和电力公司的成本效益、市场情况),在欠缺更多信息的情况下,我们很难确定最可能实现的情景。

对负荷削减项目而言,单个用户各用电终端进行负荷响应的假设,是根据 2014 和 2015 年夏季及 2015/16 年冬季试点项目中各用电终端对需求响应指令进行响应的结果。在夏季试点项目中,针对各类商用楼宇中每一个成功地进行了需求响应的样本,各用电终端负荷响应是由需求响应事件中的平均负荷与同一时间段的基准平均负荷确定<sup>15</sup>。在同一类型楼宇的样本中,确定了每种终端用电负荷响应的第一、二、三四分位数,以分别代表在基本、中等和最佳表现情景下的负荷响应水平(见表 3)。对于冬季,由于负荷响应情况是以总负荷的形式向研究组进行报告的,很难按照用电终端对负荷响应加以拆分。因此,我们计算了冬季试点项目中成功响应的每个样本总负荷的平均减少比率。因为大多数楼宇以削减电力供热负荷的方式参与响应,可认为可削减负荷项目是应用于暖通系统的。在同一类型楼宇的样本中,确定了负荷响应的第一、二、三四分位数,以分别代表在基本、中等和最佳表现情景下的负荷响应水平(见表 4)。

14. 本报告使用了上海需求响应试点数据集中的样本楼宇估算可削减负荷项目中的负荷响应。国外需求响应项目的信息(由 15 年报告整理分析)用于估算空调直接负荷控制项目的负荷响应和可削减负荷及直接负荷控制项目的参与度。

15. 腾天提供了基准负荷曲线。

就夏季的直接负荷控制项目而言，正如 15 年报告中阐述的一样，本研究对负荷响应的假设基于 2012 年美国联邦能源管理委员会对需求响应的调查和一系列国际需求响应潜力研究和评估报告<sup>16</sup>。由于这些研究根据不同用户群体单个用户的高峰负荷对负荷响应做了不同假设，本次研究根据估计的单个用户平均高峰负荷做出了相应的假设（见表 5）。

表 3. 夏季可削减负荷项目中各行业单个用户平均负荷响应假设

	基本	中等	最佳表现
<b>金融业、房地产业、商业和服务业</b>			
照明设备及插座负荷	4%	10%	13%
空调	13%	40%	57%
电机	5%	8%	27%
其他	15%	22%	34%
<b>零售业、酒店业及餐饮业</b>			
照明设备及插座负荷	6%	7%	13%
空调	24%	46%	53%
电机	12%	17%	25%
其他	9%	9%	9%

来源：上海需求响应试点；作者分析

表 4. 冬季可削减负荷项目中各行业单个用户平均总负荷响应假设

	基本	中等	最佳表现
金融业、房地产业、商业和服务业	5%	13%	21%
零售业、酒店业及餐饮业	5%	13%	21%

来源：上海需求响应试点；作者分析

表 5. 夏季空调直接负荷控制项目单个用户平均负荷响应假设

	基本	中等	最佳表现
金融业、房地产业、商业和服务业	总负荷的 2% (或空调总负荷的 5%)	总负荷的 3% (或空调总负荷的 7%)	总负荷的 5% (或空调总负荷的 12%)
零售业、酒店业及餐饮业	总负荷的 2% (或空调总负荷的 5%)	总负荷的 3% (或空调总负荷的 8%)	总负荷的 5% (或空调总负荷的 13%)

来源：作者分析，基于 Liu et al. (2015) Assessment of Demand Response Market Potential and Benefits in Shanghai. 中研究的国际经验

就用户参与度而言，由于上海需求响应项目实施时间短，且在本报告开展的时间范围内很难评估不同需求响应产品在上海的可行性，所以上海的用户参与率<sup>17</sup>数据难以获取。因此，为了与 15 年报告保持一致，最佳表现情景使用了从国际对标分析中得到的较高用户参与率；在基本和中等表现情景中，用户参与率分别是最佳表现情景的 1/4 及 1/2<sup>18</sup>。表 6 列出了各情景下用户参与率的假设。本研究对冬夏季可削减负荷项目的评估假设了相同的用户参与率。

16. 国际需求响应潜力评估报告包括，FERC (2009) ‘A national assessment of demand response potential’；Cadmus (2013) ‘Comprehensive assessment of demand-side resource potentials (2014-2030)’，用于 Puget Sound Energy; Brattle (2014) ‘Demand response market potential in Xcel Energy’s Northern States Power Service Territory’；Goldman 等 (2007) ‘Estimating demand response market potential among large commercial and industrial customers: a scoping study’；Element Energy (2012) ‘Demand-side response in the non-domestic sector’。

17. 用户参与率是指与需求响应项目相关的用户人口占比。由于上海市需求响应项目还处于试点阶段，可能的用户参与率没有任何可以借鉴的本地资料。

18. 正如前文所讨论的，上述两类商用楼宇中很有可能存在大量的小型用户，他们有可能愿意接受与加入直接负荷控制项目。考虑到在上海，小型用户在用户群体中占较高的比例，因此直接负荷控制项目的参与率很可能高于国际对标分析结果。但是，本研究的假设建立在国际对标分析的基础上。

表 6. 用户参与度假设

	基本			中等			最佳表现		
	2020	2025	2030	2020	2025	2030	2020	2025	2030
<b>金融业、房地产业、商业和服务业</b>									
负荷削减项目	1%	2%	3%	2%	3%	5%	3%	7%	10%
空调直接负荷控制项目	0%	1%	1%	1%	2%	3%	2%	3%	5%
<b>零售业、酒店业和餐饮业</b>									
负荷削减项目	1%	2%	3%	2%	3%	5%	3%	7%	10%
空调直接负荷控制项目	0%	1%	1%	1%	2%	3%	2%	3%	5%

来源：作者分析，基于 Liu et al. (2015) Assessment of Demand Response Market Potential and Benefits in Shanghai. 中研究的国际经验

对于特定的需求响应事件，不是所有承诺参与的用户最终都会实际提供需求响应。因此，与 15 年报告一致，本报告考虑了在不同情景下需求响应的响应率，反映出参与到任一特定需求响应事件中用户的比例（见表 7）。表 7 的假设值是以上海有序用电项目中负荷削减量与响应率之间的实际关系为基础的（即较低的负荷削减需求伴随着较高的响应率）。

表 7. 需求响应响应率假设

	基本	中等	最佳表现
<b>金融业、房地产业、商业和服务业</b>	90%	80%	70%
<b>零售业、酒店业和餐饮业</b>	90%	80%	70%

来源：上海市需求响应试点项目组

## 夏季商用楼宇的需求响应潜力评估

本章评估了夏季直接负荷控制项目和负荷削减项目在 1) 金融业、房地产业、商业和服务业以及 2) 零售业、酒店业和餐饮业这两类商用楼宇的潜力（见图 4-5）。一些主要的结论如下：

- **负荷削减需求响应项目在降低夏季系统高峰负荷上有巨大的潜力。**在最佳表现情景中，估计到 2030 年，上述两类楼宇中负荷削减项目的潜力可以达到 345MW<sup>19</sup>，比直接负荷控制项目（34MW）要高出许多。这里有两点值得注意。首先，本报告评估直接负荷控制项目和负荷削减项目的规模比 15 年报告的小，这很有可能是因为研究方法的改变，以及本研究只侧重于具有更多负荷曲线数据的两类商用楼宇。其次，较低的负荷响应和用户参与率（对标国际经验而来，参考脚注 14 及 15 年报告），是导致直接空调负荷控制项目潜力较低的因素。但直接负荷控制项目并未在上海实施，很难衡量商业用户是否愿意让电力公司控制空调的使用以及能够控制的负荷量。在美国，直接负荷控制作为一种需求响应方式主要面向居民用户的空调负荷，对工商业用户的市场渗透较少<sup>20</sup>。这种现象部分是由于居民空调制冷在夏季系统峰荷中比例高<sup>21</sup>，以及家庭空调直接负荷控制的实际可行。工商业直接负荷控制项目的实际普及率将取决于一系列影响因素，包括企业对电力公司控制其用电负荷的接受程度、有无相关支持技术（如远程控制或能源管理系统）、电力公司提供此类需求响应项目的商业价值以及项目设计的吸引力（如补偿水平以及参与的要求和便利程度）。
- **金融、房地产、商业和服务业的需求响应潜力比零售、酒店及餐饮业要大。**特别是对负荷削减项目来说，最佳表现情景中，到 2030 年，商用楼宇在金融、房地产、商业和服务业的可削减量占夏季需求响应整体可削减量的 80%。零售、酒店及餐饮业用电量较大<sup>22</sup>而且呈现更“尖锐”的平均负荷曲线。
- **空调的使用是造成高峰负荷的主要原因，同时有显著的潜力提供需求响应。**对于可削减负荷项目来说，最佳表现情景中，到 2030 年，空调的需求响应潜力占估计总体潜力的 70% 左右，能达到大约 238MW 的负荷削减量。空调设备可削减负荷潜力超过 80% 集中在金融业、房地产业、商业和服务业。因此，探索与实现空调在需求响应方面的潜力具有巨大的价值。除空调之外，还有相当大一部分潜力存在于其他用电终端类别中，特别是照明和插座设备，最佳表现情景中此类终端用电提供需求响应的潜力在 2030 年会达到 61MW。

19. 根据 15 年报告的粗略估计，该数据为 2030 年系统峰值负荷的 0.6%。未来峰值负荷预估的不确定性因素请参见 15 年报告。

20. FERC (2012). Assessment of Demand Response and Advanced Metering – Staff Report. Accessible at: <http://www.ferc.gov/legal/staff-reports/12-20-12-demand-response.pdf>

21. <http://www.cpuc.ca.gov/cfaqs/howhighiscaliforniaslectricitydemandandwheredoesthepowercomefrom.htm>

22. 在 2014 年，金融、房地产、商业和服务业的用电量占商用楼宇总用电量的 42%。

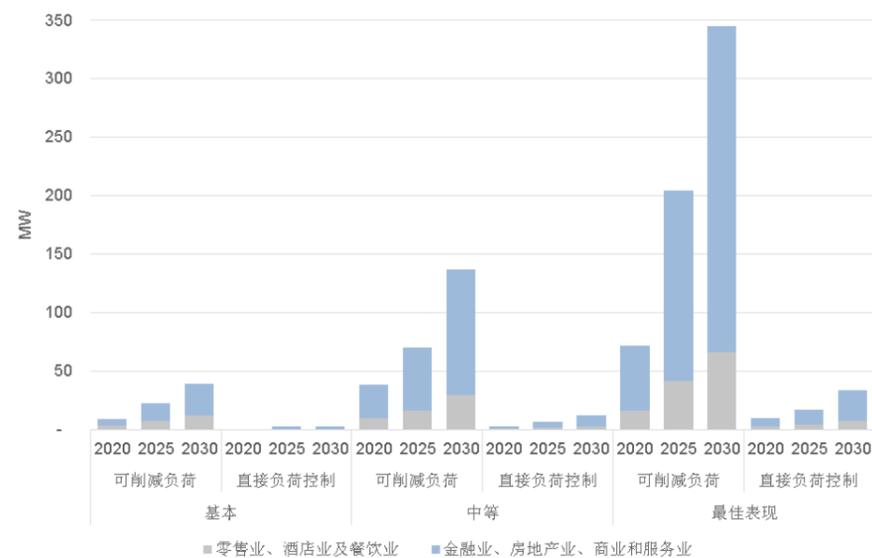


图 4. 负荷削减项目和直接负荷控制项目在夏季的需求响应潜力

数据来源：作者分析

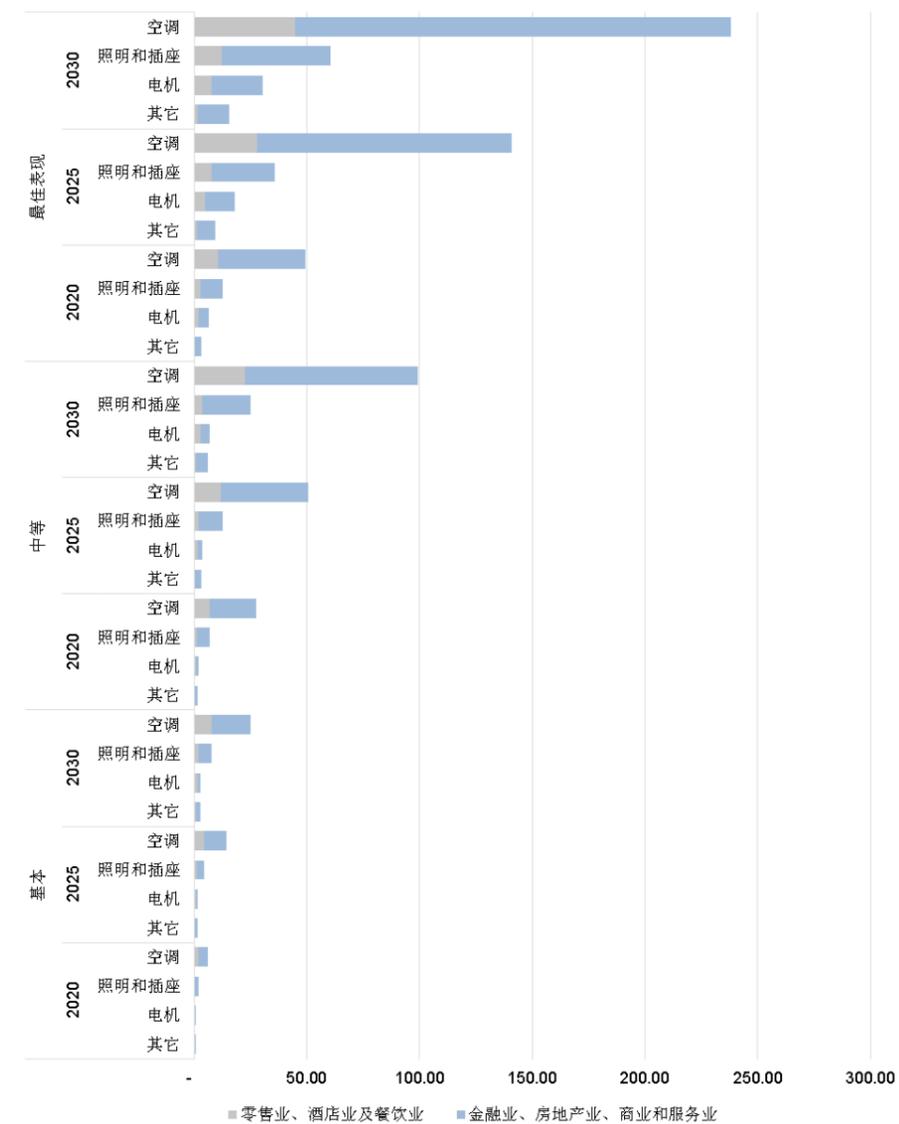


图 5. 按用电终端划分负荷削减项目的需求响应潜力

数据来源：作者分析

## 冬季商用楼宇的需求响应潜力评估

图 6 显示了冬季负荷削减项目在 1) 金融业、房地产业、商业和服务业以及 2) 零售业、酒店业和餐饮业的潜力评估结果。

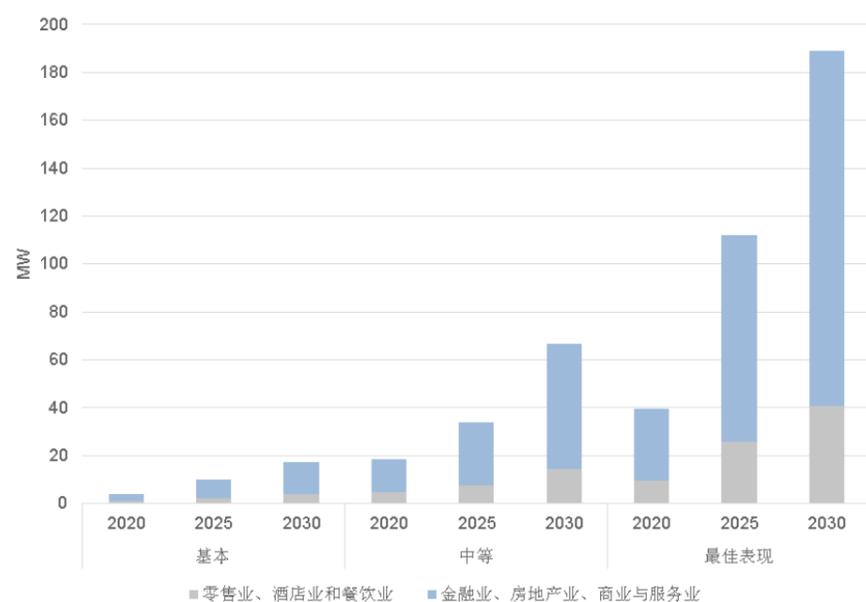


图 6. 可削减负荷项目在冬季的需求响应潜力

数据来源：作者分析

一些重要发现如下：

- **冬季暖通系统在负荷削减项目中的潜力是巨大的，但低于其在夏季的潜力。**在最佳表现情景中，到 2030 年，负荷削减项目通过暖通系统（如电炉）在上述两类商业楼宇可以实现的潜力达 189MW，占冬季平均高峰负荷的 1% 左右（根据国家电网提供的数据，冬季典型负荷约为 21GW）。然而，除了上文提到的与估计用电终端负荷曲线相关的不确定因素之外，其他方面也存在一些不确定性。首先，本报告的分析是基于一些商业楼宇在冬季通过削减电炉负荷的方式来实现需求响应所提供的数据。换句话说，尚不明确其它用电终端是否也能够通过需求响应服

务（如用户其它用电终端进行需求响应是否存在阻碍，以及如果有的话，用户或项目执行者需要采取什么样的措施等）。如果其它用电终端也可以提供需求响应服务，实际的潜力可能会比本报告的估计值高。其次，用户参与率是参考国际上一些夏季需求响应项目案例而得来的（参考脚注 14 及 15 年报告），因此可能不完全适用于冬季负荷削减项目。另外，正如上文讨论过的，上海市特定的监管和市场条件对用户参与冬季需求响应项目有着很重要的影响。此外，需要强调的是，这些评估着重于需求响应在削减高峰负荷方面的潜力——需求响应还会带来其它方面的利益（如促进电力系统灵活性的快速响应和配电网管理等）。

- **金融业、房地产业、商业和服务业的需求响应潜力比零售业、酒店业和餐饮业的潜力要高。**这个结果与夏季需求响应潜力的评估结果相似。最佳表现情景预测，预计到 2030 年，金融业、房地产业、商业和服务业的商用楼宇在冬季将提供上述两类行业中 78% 的需求响应。这主要是由于金融、房地产、商业和服务业的负荷曲线“尖锐”程度更高，且该类商用楼宇的用电量占上海市总用电量的大部分。
- **能效和节能应该对削减高峰负荷起到重要作用。**从用电终端负荷曲线可以看出，在两类商用楼宇中，下午 12 点到 4 点间照明设备和插座负荷占平均高峰负荷的 52%-58%。如上文讨论过的，尚不明确这类终端用电是否可以提供一定规模的需求响应。如果直接削减峰值负荷难度过大，另一种可行的方法是提高用电设备或系统的能效，降低用电负荷，进而降低高峰负荷。另外，节约能源的价值可能会高于需求响应降低符合所实现的价值<sup>23</sup>，这或许可以增强节能的商业吸引力。

23. 案例包括沃尔玛在零售区域安装 LED 灯，以节省运行维护成本并且提升生产力和舒适程度，(<https://www.rila.org/sustainability/RetailEnergyManagementProgram/Documents/EnergySavingOpportunities+TacticsforRetail.pdf>)，以及 PG&E 与 IKEA 在能效方面的合作 ([https://www.pge.com/includes/docs/pdfs/mybusiness/energysavingsrebates/incentivesbyindustry/cs\\_ikea.pdf](https://www.pge.com/includes/docs/pdfs/mybusiness/energysavingsrebates/incentivesbyindustry/cs_ikea.pdf))。

## 今后研究建议

本章总结了本报告的一些不足之处，并对今后的研究方向提出了建议。

- 样本负荷曲线的生成方式导致了依此建立的负荷特性和评估结果的不确定性。首先，本研究所用的负荷曲线是商用楼宇样本在 2015 年出现系统最高峰值负荷当日的日负荷曲线。换句话说，这些负荷曲线也许不能充分反映“典型”的用电特征，进而代表“典型”的商用楼宇高峰负荷。这些数据也没有针对天气等能够影响负荷曲线的外部因素进行调整。其次，提供给本研究的商用楼宇样本的负荷曲线也许不能代表所有用户的情况。综合以上两个问题，本报告中估计的负荷曲线或许不能充分反映“平均”或“典型”的用电特征。今后的研究应注重选取更有代表性的样本，并且收集更长一段时间的数据。第三，针对冬季的需求响应试点，由于缺少相关样本楼宇的年用电量信息，本研究根据估计的夏季平均负荷曲线得到了冬季高峰负荷与年均负荷的关系。这意味着此处的数据存在高度的不确定性——未来的研究应通过更加严谨的分析，针对不同的用户群体建立负荷曲线，加强数据的充分性。
- 随着上海市需求响应试点项目对其成果进行评估，对本地数据的分析总结至关重要。本报告的许多假设都是建立在国际经验的基础之上的。一些关于负荷削减项目的需求响应的案例，考虑了试点中参与者展示出的负荷响应水平，但是这些参与者数量很少，也许并不能代表同一类商用楼宇的整个用户群体。另外，由于试点项目是近年出台的，尚不清楚参与者是否充分挖掘了提供需求响应的潜力。需求响应项目的设计和补偿水平、支持需求响应的监管和市场条件、用户宣传和对需求响应项目的接受程度、系统运行情况和用户用电特性以及有无支持性技术（如能源管理系统或备用发电设备）等本地因素都可能影响用户响应的意愿和程度，从而影响需求响应潜力。随着需求响应试点在上海的开展以及其对成果的评估，对相关本地因素进行定期的评估同时增加其数据的充分性，对于提升潜力评估和需求响应项目设计是很重要的。
- 同类商用楼宇的用户之中可能存在差异，这将影响负荷响应和用户参与率。前文提到，由于针对不同客户群体的信息有限，本报告主要依靠估计的平均负荷曲线，并没有根据用户意愿和参与响应能力的不同来区分客户群体。事实上，商业活动的性质（如客户用电是否可以被中断）、楼宇的特性以及一些外界因素（如温度和湿度）、需求响应项目的设计及其经济补偿、有无支持性技术以及客户参与意愿等，都将会影响需求响应发展的潜力。今后的研究，应详细分析影响上海市需求响应潜力的关键因素，以及用户在这些关键因素方面存在的差异，从而更好地对用户进行划分。
- 考虑不同用电终端之间的相互作用，特别是其会如何影响需求响应潜力，是十分重要的。在估计的平均负荷曲线中，发现在系统高峰时段，出现了照明设备和插座负荷的瞬时负荷与空调运行负载同时变化的趋势。这一现象可能并非特例，但由于缺少相关数据，本报告无法研究造成这一趋势的可能原因。如果终端用电之

间存在强烈的相互关系，那么一些灵活性较差的终端用电可能会限制负载削减的程度。然而，本报告并没有考虑这种性质的互动关系。

- 今后的研究应该考虑到需求响应可能提供的其它系统服务的潜力。到目前为止，我们的分析着重研究使用需求响应来削减系统高峰负荷。虽然这是一个非常重要的问题，特别是考虑到电力负荷峰谷差较大以及系统规划和运行中经济效率的日渐重要性，但是随着关键基础设施的发展（例如信息和通讯设备）和发电燃料结构的变化（如间歇性可再生能源等灵活性较差的发电方式的占比升高），需求响应可以带来的其它服务（如通过快速响应来提高系统灵活性）会变得越来越重要。除了降低系统高峰负荷之外，进一步的研究需要评估需求响应在其它类型服务方面的潜在价值。
- 未来的研究领域需要考虑需求响应资源的地理位置。通过降低高峰需求，需求响应将会避免或延缓在发电容量和电网（如电网局部拥堵现象<sup>24</sup>）方面的资金投入。如果间歇性可再生能源发电只是集中在特定的地点，或者负荷需求高度不确定，需求响应机制将会相应地增加或减少用电需求来减轻当地电网的负担。这意味着，今后的研究不仅应关注需求响应资源总的潜力，而且要考虑其地理位置以及是否可以解决特定地点的电网问题。
- 需要探索包括能效 / 节能和分布式发电在内的其它可削减系统高峰负荷的方法<sup>25</sup>。在估计的负荷曲线中，照明和插座负荷这类可能不太灵活的用电终端，在系统高峰负荷中占比较大。这意味着研究能效和分布式发电（如太阳能光伏发电）等方法能否降低峰值负荷是非常有价值的。事实上，在美国和英国，许多电力系统运营商长期使用能效和分布式发电以及需求响应，来满足容量需求。然而，也有必要考虑一种用电终端能效的提升是否会影响到其它用电终端的负荷（如高效照明设备可能会降低废热，从而降低空调的电力需求）。对后者来说，这可能会影响到其提供需求响应服务的潜力（如削减峰值负荷、电网管理以及用于系统平衡的快速响应）。

24. 案例包括英国的 Low Carbon London 试点项目，和纽约的 Reforming the Energy Vision, REV 项目。

25. 出于对环境的考虑，应避免使用高污染的分布式发电（例如燃油发电）。

## 附录：终端用电分类的定义

照明和插座负荷	公共区域照明	
	走廊和应急照明	
	外部照明	
	地下室照明	
	照明和插座负载	
空调设备	冷却和加热站	制冷泵
		冷却泵
		空调机组
		冷却塔
		热水循环泵
		炉
	终端空调	全空气空调机组
		新风机组
		排气风扇机组
		风机盘管
分体空调		
电机	电梯	电梯
	水泵	水泵
	风扇	风扇
	其他发动机	其他发动机
其他	信息技术中心	
	洗衣房	
	厨房和食堂	
	泳池和浴室	
	健身房	
	其他	



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

T: +86(10)5927-0688

F: +86(10)5927-0699

[www.nrdc.org](http://www.nrdc.org)