



中国电力  
Electric Power  
ISSN 1004-9649, CN 11-3265/TM

## 《中国电力》网络首发论文

题目：基于地理探测器的广州市分行业月度用电特点及优化管理  
作者：张云涛，蔡国田，柯尚军，王文秀  
网络首发日期：2020-07-13  
引用格式：张云涛，蔡国田，柯尚军，王文秀. 基于地理探测器的广州市分行业月度用电特点及优化管理. 中国电力.  
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3265.TM.20200713.1445.014.html>



**网络首发：**在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认：**纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

# 基于地理探测器的广州市分行业月度用电特点及优化管理

张云涛<sup>1,2,3</sup>，蔡国田<sup>1,2,3</sup>，柯尚军<sup>1,2,4</sup>，王文秀<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院广州能源研究所，广东 广州 510640；2. 中国科学院可再生能源重点实验室，广东 广州 510640；3. 中国科学院大学，北京 100049；4. 中国科学技术大学纳米科学技术学院，江苏 苏州 215123)

**摘要：**为将广州市电力需求侧管理落实到具体行业，在使用地理探测器、用电互补性模型分析 2013—2017 年共 60 个月各行业用电特点基础上，通过情景分析方法从行业、时间角度探索行业用电优化管理路径。研究发现，基于广州市分行业月度用电特点、抓住行业用电量风向标子行业，利用存在可相互抵消用电波动的用电组合，在 2017 年广州市用电量水平下优化行业用电结构和优化用电时间管理总计可减小约 2.25 亿千瓦时全社会用电月度峰谷差。未来可通过分行业月度用电预测、结合用电互补性分析测算行业用电调度潜力，为电力需求侧管理水平提高提供数据支撑。

**关键词：**行业月度用电量；地理探测器；用电互补性；情景分析；优化管理

## 0 引言

为贯彻落实国家“四个革命，一个合作”的能源战略布局，保障能源供应安全和加快能源结构调整，广东省在能源发展“十三五”规划中制定了能源消费总量年均增长 2.3% 的约束性目标<sup>[1]</sup>。作为广东省能源消费量最大的城市，2017 年广州市能源消费总量占广东省 14.3%，电力供应高度依赖外来电，在电气化率大于 50% 的情况下仅有 33.8% 的电力自给率<sup>[2]</sup>。广州市 2017 年 8 月的用电量为 96 亿千瓦时，而 2 月用电量为 49 亿千瓦时，一年内月度峰谷差高达 47 亿千瓦时。未来随着电气化率进一步上升，巨大的峰谷差对广州市的综合用电效率的影响将会更加显著。目前广州市电力需求侧管理主要为用电量的实时管理以确保日内用电高峰的电力供应，而月度用电管理才能有效减小一年内的月度用电波动，探索广州市各行业月度用电特点、用电规律及影响因子并对不同用电类型的行业实施优化管理具有重要意义。

目前关于行业用电的研究主要分为年度、月度、日度三种时间尺度。年度行业用电量变化相对平稳，相关研究<sup>[3-5]</sup>重点关注年度预测和驱动因素的分析，如汪斌等人基于时序模型分析北京市电力消费的驱动因

素<sup>[3]</sup>，王效岳等通过改进 BP 神经网络模型对城市工业用电量进行预测<sup>[5]</sup>。日度行业用电研究关注实时电力调控，内容涉及相关管理措施、实施路径、具体管理技术和短期预测方法<sup>[6-9]</sup>等。而月度行业相关研究涉及方法较多，主要目的仍限于对月度用电量大小预测，如仇红剑等人采取稀疏自回归时间序列的方法建立了行业用电量预测模型并对行业景气度进行分析<sup>[10]</sup>，商浩亮等发现各行业用户数量和装接容量对用电量存在滞后影响，得出一种新的月度用电量预测思路<sup>[11]</sup>。刘俊等基于协整-格兰杰因果检验和季节分解提出一种中期电力负荷预测的方法<sup>[12]</sup>。当前月度行业用电量相关研究侧重于中期预测以便电力部门从电力供应侧提前做好调整，而较少考虑通过需求侧管理减小月度用电量波动。

电力需求侧管理不仅要掌握用电量大小的时间规律，还需要从多维度掌握各行业的用电规律。地理探测器主要用于探测各因子空间分布规律的相似性，是用于探测某种地理属性与潜在影响因子之间关系的方法，基本原理是通过比较因变量在区域划分前后的总体方差与层内方差之和的变化来判断影响因子的影响程度，如果某个影响因子对某个因变量有重要影响，那么影响因子和因变量的空间分布应该具有相似性<sup>[13]</sup>，计算

结果 $q$ 值的大小则反映了影响因子对因变量的解释力度,地理探测器主要用于地理、生态、社会<sup>[14-19]</sup>发展等方面因素的解析。在国外的研究中,有使用地理探测器探测路表切割度、污染来源等研究对象的主要影响因素<sup>[20-21]</sup>,在国内也有将地理探测器用于石油终端碳排放、工业碳排放等活动的空间驱动因素分析<sup>[22-24]</sup>。目前国内外相关地理探测器主要用于带有空间属性的数据分析,将其应用于时间数据的研究较少,尚未有将地理探测器用于行业用电分析的文献。而地理探测器的适用条件主要有<sup>[13]</sup>:(1)当因变量 $Y$ 和影响因子 $X$ 均为数值量,对 $X$ 离散化转换为类型量后,运用地理探测器建立的 $Y$ 和 $X$ 之间的关系将比经典回归更加可靠;(2)对变量无线性假设,属于方差分析范畴,但地理探测器结果大小反映了 $X$ (分层或分类)对 $Y$ 解释的百分比 $100 \times q\%$ 。而方差分析结果为统计量 $F$ ,无明确含义;(3)在分层中,要求每层至少有2个样本单元,样本越多,估计方差越小。地理探测器的核心思想可以应用于时序数据,若影响因子对因变量有重要影响,那影响因子与因变量在时间上的分布也应具有相似性。故地理探测器不仅限于对具有地理信息的数据进行探测,用于时间序列同样可以探测出具有相似时间分布的影响因子与因变量的关系。用电量分析中的连续性变量需要作为影响因子时通过分层离散化后可符合地理探测器的数据要求,且保证每层的样本量合适。

基于以上分析,本文的主要研究思路如下:(1)使用地理探测器分析装接容量、季节、用电户数等变量对各行业用电量的解释力大小,并对各行业用电特点进行分类。通过分析子行业用电对八大行业的影响得到各行业用电量的风向标子行业。(2)使用地理探测器分析月份对各行业用电量的解释力大小,筛选出月度用电规律明显的行业。通过用电互补性模型对筛选后行业用电规律进行组合并计算各组合的方差大小得到用电互补性表。(3)以用电互补性表为参考,设计优化的行业用电结构情景,结合2017年基础情景与未来情景计算各情景下关键的全社会用电波动性指标,通过关键指标的变

化对各用电结构情景的波动性变化进行评价。(4)根据分行业月度用电特点和情景分析结果,从优化行业用电结构和优化用电时间管理提出月度电力需求侧管理优化路径。

## 1 研究方法 with 数据来源

### 1.1 地理探测器

地理探测器包括四种探测器:因子探测器、交互作用探测器、风险区探测器、生态探测器。文中使用因子探测器对各行业用电量在时间上进行分层探测,计算各因子对用电量的解释力的大小,相关公式来自参考文献<sup>[13]</sup>。因子探测器的基本思路是将研究范围按照某一影响因子划分为若干层,计算各层的用电量方差之和与用电量区域总方差进行比较,以判断该影响因子多大程度解释了用电量在时间上的分布差异性,影响因子的解释程度越大,说明该因子对用电量的影响越大。用 $q$ 值表示,其计算公式为:

$$q = 1 - \frac{\sum_{i=1}^k N_i \sigma_i^2}{N \sigma^2} \quad (1)$$

式中: $i=1, \dots, k$ 为各影响因子在时间上的分层。 $N$ 、 $N_i$ 分别为全时段和 $i$ 层内的样本数。 $\sigma^2$ 、 $\sigma_i^2$ 分别为全时段和 $i$ 层内用电量的方差。 $q$ 值表示影响因子解释了 $100 \times q\%$ 的用电量时间分布,其值域为 $[0,1]$ 。当 $q$ 为0时表示用电量在各分层中随机分布,说明影响因子对用电量没有解释力; $q$ 为1时,则表示影响因子完全决定用电量;

$q$ 值通过变化满足非中心 $F$ 分布:

$$F = \frac{N-k}{k-1} \frac{q}{1-q} \sim F(k-1, N-k, \lambda) \quad (2)$$

$$\lambda = \frac{1}{\sigma^2} [\sum_{i=1}^k \bar{Y}_i^2 - \frac{1}{N} (\sum_{i=1}^k \sqrt{N_i} \bar{Y}_i)^2] \quad (3)$$

式中: $\lambda$ 为非中心参数。 $\bar{Y}_i$ 为层 $i$ 中用电量的均值。根据上式可以检验 $q$ 值的显著性。

地理探测器中影响因子的输入量要求为类型量,故需要对大部分连续型变量的影响因子做分层处理。季节因子根据春、夏、秋、冬四季分为四层,而其余连续型变量则根据等间距分层法分为五层,分别对应各因子数值高、中高、中、中低、低五种类型。

## 1.2 用电互补性模型

用电互补性模型是为了计算各行业不同组合下月度用电的方差变化情况,也可用于其他时间频率的数据。首先要将连续的月度用电数据进行归一化以消除年度趋势与各行业用电量间的数量级差异。公式如下:

$$ES_{m,y} = \frac{12 \times E_{m,y}}{\sum_{m=1}^{12} E_{m,y}} \quad (4)$$

式中:  $m = 1, \dots, 12$  为月份。 $y = 2013, \dots, 2017$  为年份。 $ES_{m,y}$  为某行业  $y$  年  $m$  月的归一化用电量。 $E_{m,y}$  为某行业  $y$  年  $m$  月的用电量。

使用月度分层对归一化后的用电量进行地理探测器检验,当  $q$  值大于 0.95 时则说明月份能解释该行业归一化用电量 95% 的分布规律,选取  $q$  值大于 0.95 的行业进行互补性分析。然后将筛选后行业的归一化用电量总结成月度规律:

$$EA_m = \frac{5 \times ES_{m,y}}{\sum_{y=2013}^{2017} ES_{m,y}}$$

式中:  $EA_m$  为某行业  $m$  月的归一化用电量均值。

以下记  $j$  行业归一化用电量集合为  $EA_j = [EA_{j,1}, \dots, EA_{j,m}, \dots, EA_{j,12}]$ , 其中,  $ES_{j,m}$  为  $j$  行业  $m$  月的归一化用电量均值。同理记  $l$  行业为  $EA_l = [EA_{l,1}, \dots, EA_{l,m}, \dots, EA_{l,12}]$ 。 $j = 1, \dots, n$ ;  $l = 1, \dots, n$ 。 $n$  为筛选后总行业数。根据筛选行业作组合矩阵  $A$  如下:

$$A = \begin{bmatrix} EA_{1,1} & & & \\ \vdots & \ddots & & \\ \vdots & & EA_{j,l} & \ddots \\ EA_{n,1} & \dots & \dots & EA_{n,n} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中:  $EA_{j,l} = EA_j + EA_l$ 。此处为双行业 1:1 的归一化用电量组合。

计算  $EA_{j,l}$  集合的方差并以  $EA_{1,1}$  集合的方差作为基准值得到方差矩阵  $\gamma$  如下:

$$\gamma = \begin{bmatrix} \frac{\sigma_{1,1}}{\sigma_{1,1}} & & & \\ \sigma_{1,1} & \ddots & & \\ \vdots & \frac{\sigma_{j,l}}{\sigma_{1,1}} & \ddots & \\ \vdots & \sigma_{1,1} & & \\ \frac{\sigma_{n,1}}{\sigma_{1,1}} & \dots & \dots & \frac{\sigma_{n,n}}{\sigma_{1,1}} \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} 1 & & & \\ \vdots & \ddots & & \\ \vdots & \gamma_{j,l} & \ddots & \\ \gamma_{n,1} & \dots & \dots & \gamma_{n,n} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中:  $\sigma_{j,l}$  为  $EA_{j,l}$  集合的方差。 $\gamma_{j,l} = \frac{\sigma_{j,l}}{\sigma_{1,1}}$ 。

矩阵  $\gamma$  表示不同 1:1 用电组合情况下的方差大小,根据该矩阵可以判断不同行业间的月度用电规律的互补性。行业用电组合的互补性主要分为两类:(1)  $A \cap B$  行业组合后用电方差同时小于 A 行业与 B 行业用电方差。此类行业组合互补性明显,在调整 A 行业用电量时应尽可能保证 B 行业用电量同步调整。(2)  $A \cap B$  行业组合用电方差介于 A 行业与 B 行业用电方差之间。此类行业组合互补性强弱需通过具体行业组合用电方差进行判断,当高用电方差行业用电量无法调整时应尽可能通过互补性强的用电组合减小行业高用电方差对全社会用电的影响。

## 1.3 情景分析法

结合各行业用电量互补性矩阵,对现有用电结构进行情景设置并分析不同情景下峰值、峰谷差等关键指标的变化。(1) 用电峰谷差影响电厂的平均发电小时数从而影响综合发电效率。峰谷差大意味着在一年内电厂的平均发电小时数低,且多数电厂不能长时间按照额定负荷运转从而使得发电效率低于设计值,还会增加电厂的维护成本。

(2) 用电峰值代表了电力部门为了保障供应而需付出的额外成本。(3) 用电标准差变化与月度用电的波动幅度和频率相关,影响能源主管部门的电力调度成本。

设置情景主要有:(1) 基础情景:2017 年各行业与居民用电占比。(2) 弱、强月度用电结构优化情景:即在工业、农林牧渔业用电量占比不变的情况下,根据互补性矩阵中的方差大小,将方差大的行业用电量分配给方差小的行业并使得用电结构变化最大不超过 1%、5%,得到弱和强月度用电结构优化情景。由于在在固定工业、农林渔牧业用电占比后所剩行业用电占比低于 50%,过高的电力结构调整在实际操作中无法实现,此处仅设置 1%与 5%结构优化以探讨不同



的结构调整力度对各峰值、峰谷差指标的影响。(3) 未来情景：包括 2020、2025、2030 和 2035 四个时间节点，情景假定农林牧渔业用电占比不变，工业用电占比随着工业增加值占广州市 GDP 比值等比例下降，其余行业依据当前占比等比例上升。其中，未来的工业增加值占比由宏观经济联立方程拟合 1989-2017 年广州市的相关经济数据得出 [25]。

1.4 数据来源

文中使用 2013 年 1 月—2017 年 12 月

以月为时间频率总共 60 期各行业用电量的时序数据。全社会用电分为行业用电与居民生活用电，其中行业用电细分为八大行业，居民生活用电分为城镇居民用电与城乡居民用电。行业门类根据广州市电力数据统计口径划分，与最新的《国民经济行业分类 GB/T 4754—2017》中的门类有所不同，八大行业所包含的国家行业分类标准中 20 种门类在表中已经标明（表 1）。用电量以及装接容量、用电用户数等电力相关数据信息来自于广州市电力部门。

表 1 用电数据类别  
Table 1 Electricity consumption data category

| 八大行业                  |                  | 八大行业子行业                      |                                                                                                                                                           |
|-----------------------|------------------|------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 全<br>社<br>会<br>用<br>电 | 行<br>业<br>用<br>电 | 一、农、林、牧、渔业（A 类）              | 1、农业<br>2、林业<br>3、畜牧业<br>4、渔业<br>5、农、林、牧、渔服务业                                                                                                             |
|                       |                  | 二、工业（B、C、D 类）                | 10、非金属矿物制品业<br>11、黑色金属冶炼及压延加工业<br>12、有色金属冶炼及压延加工业<br>13、金属制品业<br>14、通用及专用设备制造业<br>15、交通运输、电气、电子设备制造业<br>16、工艺品及其他制造业(轻)<br>17、电力、热力的生产和供应业<br>18、水的生产和供应业 |
|                       |                  | 1、食品、饮料和烟草制造业                |                                                                                                                                                           |
|                       |                  | 2、纺织业(轻)                     |                                                                                                                                                           |
|                       |                  | 3、服装鞋帽、皮革羽绒及其制品业(轻)          |                                                                                                                                                           |
|                       |                  | 4、木材加工及制品和家具制造业              |                                                                                                                                                           |
|                       |                  | 5、造纸及纸制品业(轻)                 |                                                                                                                                                           |
|                       |                  | 6、石油加工、炼焦及核燃料加工业             |                                                                                                                                                           |
|                       |                  | 7、化学原料及化学制品制造业               |                                                                                                                                                           |
|                       |                  | 8、医药制造业(轻)                   |                                                                                                                                                           |
|                       |                  | 9、橡胶和塑料制品业                   |                                                                                                                                                           |
|                       |                  | 无细分行业                        |                                                                                                                                                           |
|                       |                  | 三、建筑业（E 类）                   |                                                                                                                                                           |
|                       |                  | 四、交通运输、仓储和邮政业（G 类）           | 3、邮政业                                                                                                                                                     |
|                       |                  | 1、交通运输业                      |                                                                                                                                                           |
|                       |                  | 2、仓储业                        |                                                                                                                                                           |
|                       |                  | 五、信息传输、计算机服务和软件业（I 类）        |                                                                                                                                                           |
|                       |                  | 1、电信和其它传输服务业                 |                                                                                                                                                           |
|                       |                  | 2、计算机服务和软件业                  |                                                                                                                                                           |
|                       |                  | 六、商业、住宿和餐饮业（F、H 类）           |                                                                                                                                                           |
|                       |                  | 1、批发和零售业                     |                                                                                                                                                           |
|                       |                  | 2、住宿和餐饮业                     |                                                                                                                                                           |
|                       |                  | 七、金融、房地产、商务及居民服务业（J、K、L、O 类） | 3、租赁和商务服务、居民服务和其它服务业                                                                                                                                      |
|                       |                  | 1、金融业                        |                                                                                                                                                           |
|                       |                  | 2、房地产业                       |                                                                                                                                                           |
|                       |                  | 八、公共事业及管理组织（M、N、P、Q、R、S、T 类） | 4、卫生、社会保障和社会福利业<br>5、公共管理和社会组织、国际组织                                                                                                                       |
|                       |                  | 1、科学研究、技术服务和地质勘查业            |                                                                                                                                                           |
|                       |                  | 2、水利、环境和公共设施管理业              |                                                                                                                                                           |
|                       |                  | 3、教育、文化、体育和娱乐业               |                                                                                                                                                           |

|    |        |
|----|--------|
| 居民 | 城镇居民用电 |
| 用电 | 城乡居民用电 |

2 研究结果

2.1 广州市分行业月度用电特点

2.1.1 分行业月度用电分析重点

考虑的影响因子

根据因子探测器计算各影响因子对广州市八大行业用电量的 $q$ 值，体现了不同行业各影响因子对用电量的解释力（表2），各影响因子对用电量的解释力具有不同的意义：（1）户均用电对大多数行业用电量的解释力强，说明大多数行业户均用电与用电量趋势一致，用电用户数量发展平稳。根据各行业 $q$ 值的显著差异，文中将户均用电 $q$ 值大于0.8的行业定义为用电用户数稳定发展行业，其余为用电用户数波动发展行业。（2）

容均用电（单位装接容量用电量）代表该行业的装接容量利用率，表中显示除农、林、牧、渔业和工业外的大多数行业的装接容量利用率对行业用电量的解释力较小，即此类行业的装接容量利用率不随用电量波动，较为稳定，故平均利用率高。根据容均用电 $q$ 值分布将 $q$ 值大于0.8的行业定义为低装接容量利用率行业其余为高装接容量利用率行业。（3）季节因子 $q$ 值表示季节对用电量的影响程度，可看出季节因子对大多数行业的用电量有较为明显的影响，仅信息传输、计算机服务和软件业用电量则受季节影响较小，故将季节因子 $q$ 值大于0.5的行业归为高季节影响型行业，小于0.5的行业为低季节影响型行业。（4）八大行业装接容量、用电用户数和户均容量影响因子的 $q$ 值多数未通过5%显著水平的显著性检验，不作为行业用电特点分类依据。

表2 广州市八大行业用电量因子探测 $q$ 值及用电特点分类

Table 2 Eight industries electricity consumption factor detection  $q$  value and classification of industries electricity consumption characteristics in Guangzhou

| 行业<br>影响因子 | 农、林、<br>牧、渔业 | 工业     | 建筑业       | 交通运<br>输、仓储<br>和邮政业 | 商业、<br>住宿和<br>餐饮业 | 金融、房地<br>产、商务及居<br>民服务业 | 公共事业<br>及管理组<br>织 | 信息传输、<br>计算机服务<br>和软件业 |
|------------|--------------|--------|-----------|---------------------|-------------------|-------------------------|-------------------|------------------------|
| 季节因子       | 0.566        | 0.672  | 0.688     | 0.501               | 0.675             | 0.652                   | 0.606             | 0.279                  |
| 户均用电       | 0.855        | 0.831  | 0.889     | 0.902               | 0.922             | 0.930                   | 0.901             | 0.394                  |
| 容均用电       | 0.899        | 0.861  | 0.560     | 0.516               | 0.601             | 0.712                   | 0.517             | 0.464                  |
| 装接容量       | 0.085*       | 0.143* | 0.102 *   | 0.198*              | 0.063*            | 0.090*                  | 0.118*            | 0.380*                 |
| 用电用户数      | 0.192*       | 0.190* | 0.144 *   | 0.173*              | 0.217*            | 0.224*                  | 0.333*            | 0.426                  |
| 户均容量       | 0.199*       | 0.100* | 0.098*    | 0.104*              | 0.137*            | 0.096*                  | 0.041*            | 0.135*                 |
| 行业类型       | 低利用率稳定发展型    |        | 高利用率稳定发展型 |                     |                   |                         |                   | 低季节影响<br>波动发展型         |

注：“\*”表示在5%显著水平下未通过显著性检验。各影响因子均以月为基本时间单位进行分层。

2.1.2 广州市八大行业用电特点

分类

总体上八大行业用电特点的差异主要体现在用电用户数发展、装接容量利用率、季节影响三个方面，故根据各行业的用电特

点将八大行业分为三类（表2）。

低利用率稳定发展型行业特点：（1）户均用电 $q$ 值高，说明用电用户数的发展平稳。

（2）容均用电 $q$ 值高，该类行业的装接容量利用率随用电量波动，用电用户需要增加装接容量以保证峰值用电，导致装接容量平均利用率偏低造成安装成本与维护成本的浪

费。(3) 季节 $q$ 值高,说明该类行业受季节影响较大,影响用电量的季节平衡。此类型的行业为生产型行业,同时也是第一产业、第二产业的代表性行业。

高利用率稳定发展型行业特点:(1) 行业用电用户数稳定发展。(2) 容均用电 $q$ 值低,该类行业的装接容量利用率的波动小,用电用户对装接容量的利用率高。(3) 行业受季节影响大。此类型行业为服务型行业,是广州市经济结构中的支柱型行业,故该类行业用电的季节波动对用电需求侧管理的影响在一段时间内不可避免。但是其拥有较高的容量利用率,可以从行业的装接容量变化提前预测其用电量变化。

低季节影响波动发展型行业特点:(1) 户均用电 $q$ 值低,行业的用电用户数波动大。(2) 容均用电 $q$ 值低,装接容量利用率高。

(3) 季节 $q$ 值低,是唯一一个用电量对季节不敏感的类型。(4) 各影响因素解释力较为一致,受多种因素综合影响。此类行业为互联网相关行业,也是新兴行业。

2.1.3 广州市八大行业用电量风向标子行业

八大行业各子行业的用电量按照等间距法被分为五层,再将子行业用电量分层类型作为影响因子,八大行业用电量作为因变量对其进行因子探测得到对应 $q$ 值,取其中 $q$ 值最高的子行业作为八大行业的风向标子行业, $q$ 值越大说明该子行业的用电水平对行业的用电量解释力越强,子行业用电对行业用电的综合影响越大(表3)。

表 3 广州市八大行业(全社会)用电量风向标子行业及因子探测 $q$ 值

| Table 3 Eight industries electricity consumption main driving sub industry and factor detection $q$ value in Guangzhou |          |                 |       |             |                |           |                    |               |                 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|-----------------|-------|-------------|----------------|-----------|--------------------|---------------|-----------------|
| 行业                                                                                                                     | 农、林、牧、渔业 | 工业              | 建筑业   | 交通运输、仓储和邮政业 | 信息传输、计算机服务和软件业 | 商业、住宿和餐饮业 | 金融、房地产、商务及居民服务业    | 公共事业及管理组织     | 全社会用电           |
| 风向标子行业                                                                                                                 | 农业       | 交通运输、电气、电子设备制造业 | 无细分行业 | 交通运输业       | 电信和其它传输服务业     | 批发和零售业    | 租赁和商务服务、居民服务和其它服务业 | 卫生、社会保障和社会福利业 | 金融、房地产、商务及居民服务业 |
| 风向标子行业 $q$ 值                                                                                                           | 0.916    | 0.835           |       | 0.912       | 0.862          | 0.928     | 0.942              | 0.893         | 0.907           |
| 八大行业（全社会）用电占比最高子行业                                                                                                     | 农业       | 电力、热力的生产和供应业    |       | 交通运输业       | 电信和其它传输服务业     | 批发和零售业    | 租赁和商务服务、居民服务和其它服务业 | 教育、文化、体育和娱乐业  | 工业              |
| 八大行业（全社会）用电占比最高子行业 $q$ 值                                                                                               | 0.916    | 0.711           |       | 0.912       | 0.862          | 0.928     | 0.942              | 0.796         | 0.826           |

多数行业的用电量风向标子行业为行业内用电占比最大的子行业,即直接影响最大的子行业。且多数风向标子行业所对应的 $q$ 值较大,能解释 90%左右的行业用电量的

时间分布。而工业中用电占比最大的是电力、热力的生产和供应业,但是其 $q$ 值仅有 0.711,与交通运输、电气、电子设备制造业 0.835 的 $q$ 值有显著差异,说明工业的用电量主要

由制造业生产活动主导而非能源生产活动，全市的能源生产活动为了保障供给而处于较为平稳的状态，为工业的用电量提供了一定基数，而制造业的生产活动则导致了工业的用电量上下波动，故制造业的用电水平更能解释整个工业用电量的时间分布。公共事业及管理组织中教育、文化、体育和娱乐业的用电占比最大，但 $q$ 值仅为 0.796，这是因为教育、文化、体育和娱乐业有着固定的活动趋势。而 $q$ 值为 0.893 的卫生、社会保障和社会福利业的用电水平对公共事业及管理组织的用电量有较大的间接影响。

此外，从全社会用电的角度进行 $q$ 值计算。风向标行业为八大行业中的金融、房地产、商务及居民服务业，其用电占比仅 11.1%，但 0.907 的 $q$ 值为八大行业中最高，说明该行业的用电水平对全社会用电月度趋势的影响最大。综上可知，用电占比大的行业未必影响总用电波动，在进行电力需求侧管理时更需注意对总用电影响大的风向标行业。

2.1.4 广州市八大行业及居民用电互补性

居民用电占全社会用电比例在 20%~30% 之间，对全社会月度用电波动的影响不可忽略。表 4 为各行业及居民用电归一化后的用

电规律，月度均值为 1。最后一列为使用月份作为影响因子所计算的因子探测 $q$ 值，表示月份对各行业用电规律的解釋力大小（此处的月份因子与 2.1.1 节中的季节因子为不同的影响因子）。表中有两个行业的月份因子探测 $q$ 值小于 0.95，说明各月度分层之内的归一化用电量方差较大。由于归一化后月度用电规律为历年平均值，月度分层方差过大将导致归一化的用电规律不能准确地反映行业真实用电规律。故在互补性分析中舍去月份对用电规律解釋力小于 95%的交通运输、仓储和邮政业；信息传输、计算机服务和软件业，且两行业用电量之和仅为 4%~5%用电占全社会比例。

表 5 表示 $q$ 值筛选行业与居民月度用电在不同 1:1 用电组合情况下的方差大小，其中基准方差为农林牧渔业无组合时的方差。根据 1.2 节中行业用电组合的互补性分类标准，属于第一类互补性强的组合有：工业 $\cap$ 农林牧渔业组合、商业住宿和餐饮业 $\cap$ 居民用电组合。由于各行业组合之间的方差差异较大，可通过用电结构调整的方式减小总方差。从月度用电波动性的角度考虑，在分配用电量时，应对方差较小的组合优先分配用电量，再结合约束条件将用电量逐步分配到方差较大的组合中直至用电量完全分配，此时可得到较小月度用电波动的分配方案。

表 4 广州市八大行业及居民用电月度用电规律与月份因子探测 $q$ 值

| Table 4 The law of monthly electricity consumption and monthly factor detection $q$ value of eight industries and residents electricity consumption in Guangzhou |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| 月份<br>行业                                                                                                                                                         | 1月   | 2月   | 3月   | 4月   | 5月   | 6月   | 7月   | 8月   | 9月   | 10月  | 11月  | 12月  | $q$ 值 |
| 农、林、牧、渔业                                                                                                                                                         | 0.80 | 0.63 | 0.97 | 0.86 | 1.02 | 1.17 | 1.21 | 1.23 | 1.19 | 1.01 | 0.97 | 0.99 | 0.99  |
| 工业                                                                                                                                                               | 0.88 | 0.64 | 0.84 | 1.00 | 1.14 | 1.23 | 1.19 | 1.19 | 1.09 | 0.95 | 0.90 | 0.96 | 0.96  |
| 建筑业                                                                                                                                                              | 0.87 | 0.63 | 0.71 | 0.92 | 1.07 | 1.27 | 1.25 | 1.28 | 1.14 | 1.01 | 0.90 | 0.95 | 0.95  |
| 交通运输、仓储和邮政业                                                                                                                                                      | 0.73 | 0.61 | 1.01 | 0.88 | 1.05 | 1.30 | 1.27 | 1.26 | 1.15 | 0.98 | 0.86 | 0.81 | 0.81  |
| 信息传输、计算机服务和软件业                                                                                                                                                   | 0.79 | 0.67 | 1.11 | 0.96 | 1.06 | 1.25 | 1.17 | 1.17 | 1.06 | 0.94 | 0.88 | 0.90 | 0.89  |
| 商业、住宿和餐饮业                                                                                                                                                        | 0.69 | 0.56 | 0.85 | 0.81 | 0.97 | 1.27 | 1.32 | 1.39 | 1.26 | 1.09 | 0.92 | 0.97 | 0.97  |
| 金融、房地产、商务及居民服务业                                                                                                                                                  | 0.69 | 0.55 | 0.85 | 0.81 | 0.99 | 1.28 | 1.34 | 1.39 | 1.26 | 1.07 | 0.92 | 0.97 | 0.97  |
| 公共事业及管理组织                                                                                                                                                        | 0.76 | 0.56 | 0.83 | 0.84 | 1.00 | 1.31 | 1.42 | 1.29 | 1.14 | 1.10 | 0.91 | 0.97 | 0.97  |
| 居民用电                                                                                                                                                             | 0.71 | 0.59 | 1.02 | 0.77 | 0.91 | 1.02 | 1.30 | 1.37 | 1.37 | 1.10 | 0.93 | 0.81 | 0.95  |



表 5 q值筛选行业及居民用电月度用电规律互补性

Table 5 The complementarity of monthly electricity consumption law of industries screened by q value and residents

| 行业<br>行业            | 农、林、<br>牧、渔业 | 工业   | 建筑业  | 商业住宿<br>和餐饮业 | 金融、房地产、<br>商务及居民服务<br>业 | 公共事业<br>及管理组<br>织 | 居民用电 |
|---------------------|--------------|------|------|--------------|-------------------------|-------------------|------|
| 农、林、牧、渔业            | 1.00         |      |      |              |                         |                   |      |
| 工业                  | 0.91*        | 0.92 |      |              |                         |                   |      |
| 建筑业                 | 1.12         | 1.11 | 1.37 |              |                         |                   |      |
| 商业、住宿和餐饮业           | 1.50         | 1.38 | 1.67 | 2.14         |                         |                   |      |
| 金融、房地产、商务<br>及居民服务业 | 1.54         | 1.42 | 1.71 | 2.18         | 2.23                    |                   |      |
| 公共事业及管理组织           | 1.41         | 1.34 | 1.62 | 2.03         | 2.08                    | 1.99              |      |
| 居民用电                | 1.41         | 1.21 | 1.47 | 2.00*        | 2.04                    | 2.00              | 2.03 |

注：“\*”表示强互补性行业组合。

## 2.2 广州市分行业月度用电优化管理情景及路径

### 2.2.1 广州市分行业用电优化情景

利用 2.1.4 节中月份因子探测 $q$ 值大于 0.95 的行业及居民用电进行组合，通过一年内 12 个月的用电量分布规律可计算得到各情景下全社会用电波动性指标（表 6）。弱月度用电结构优化情景中各用电波动性指标下降说明用电结构优化可减小全社会用电

波动性。对比弱月度用电结构优化情景与强月度用电结构优化情景的波动性指标可知，提高结构优化的幅度对标准差的影响不大，但强月度用电结构优化情景下峰谷差和峰值指标下降幅度为 1.3%和 0.6%，明显大于前者的 0.4%和 0.2%，说明在可行的前提下更大幅度的用电结构优化可以进一步降低全社会用电的峰谷差、峰值。此外，强月度用电结构优化情景各指标下降率与 2020 年情景下的上升率大致相当，这说明强月度用电结构优化无法完全抵消未来广州市用电波动性的增强。但随着未来工业用电占比的下降，其余行业可调整的用电占比将增加，未来可以通过更大幅度的用电结构优化来抑制各种波动性指标的上升。

表 6 q值筛选行业及居民用电月度用电情景分析

Table 6 q value screening industries and residential monthly electricity consumption scenario analysis

| 情景<br>行业            |                | 基础<br>(2017<br>年) | 弱月度用电<br>结构优化 | 强月度用电<br>结构优化 | 2020<br>年 | 2025<br>年 | 2030<br>年 | 2035<br>年 |
|---------------------|----------------|-------------------|---------------|---------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 各行<br>业<br>用电<br>占比 | 农、林、牧、渔业       | 0.01              | 0.01          | 0.01          | 0.01      | 0.01      | 0.01      | 0.01      |
|                     | 工业             | 0.53              | 0.53          | 0.53          | 0.51      | 0.47      | 0.42      | 0.35      |
|                     | 建筑业            | 0.01              | 0.02          | 0.04          | 0.01      | 0.01      | 0.01      | 0.02      |
|                     | 商业住宿和餐饮业       | 0.04              | 0.03          | 0.03          | 0.05      | 0.05      | 0.06      | 0.06      |
|                     | 金融、房地产、商务及居民服务 | 0.12              | 0.11          | 0.07          | 0.12      | 0.13      | 0.15      | 0.16      |

|    | 业             |      |       |       |      |      |      |      |
|----|---------------|------|-------|-------|------|------|------|------|
|    | 公共事业及管理组织     | 0.07 | 0.08  | 0.10  | 0.08 | 0.08 | 0.09 | 0.10 |
|    | 居民用电          | 0.22 | 0.22  | 0.22  | 0.23 | 0.25 | 0.27 | 0.30 |
| 波动 | 峰谷差变化（综合发电效率） | 0%   | -0.4% | -1.3% | 0.8% | 2.4% | 4.2% | 6.9% |
| 性指 | 峰值变化（保障供应成本）  | 0%   | -0.2% | -0.6% | 0.3% | 0.9% | 1.6% | 2.6% |
| 标变 |               |      |       |       |      |      |      |      |
| 化  | 标准差值变化（调度成本）  | 0%   | -0.4% | -0.4% | 0.8% | 2.7% | 4.7% | 8.0% |

注：其中各行业及居民用电后所对应数值代表各情景下用电占比，求和为 1。波动性指标后数值为相对于基础情景各指标的变化幅度。2020 年及以后情景为预测情景，基础情景为 2017 年实际用电结构，并在基础情景上设置月度用电结构优化情景。此处的峰谷差、峰值和标准差值变化幅度仅为全年用电量归一化后的变化。若未来用电量进一步上升，即便其归一化后的峰谷差等指标不变，但是其峰谷差的实际值等也会随着用电量的上升等比例增加。

## 2.2.2 优化行业用电结构路径

对行业用电结构进行优化以减小社会月度用电波动，强月度用电结构优化后可以减小约 6110 万千瓦时的月度用电峰谷差与约 5760 万千瓦时的月度用电峰值。强月度用电结构优化所调整的行业均为高利用率稳定发展型行业，故对全社会用电特性如用电用户数稳定性、装接容量利用率等无明显影响。在对高利用率稳定发展型行业用电结构调整时，应重点调整各行业风向标子行业用电量以达到最好的调节效果。根据表 6 计算结果，2020 年用电结构情景下月度用电峰谷差将增加 3760 万千瓦时，而到 2035 年产业结构变化所导致的全社会月度峰谷差增加高达 3.24 亿千瓦时，因此未来非常必要通过增加电力结构优化力度以进一步减小月度电力峰谷差。此外也可通过优化各行业用电时间管理路径减小全社会用电波动性。

## 2.2.3 优化用电时间管理路径

除了行业用电结构调整外，可针对各行业用电特点提出相应管理措施以减小广州市全社会月度用电波动性。根据 2.1.2 节的分类，受季节 $q$ 值越高的行业越难以进行用电量的季节调整。可以利用低季节影响行业如信息传输、计算机服务和软件业可调度性强的特点进行季节用电量峰谷调配。该行业 17 年月度峰谷差值为 7596 万千瓦时，若合理调整其月度用电规律，在最理想的情况下可减小全社会用电约 1.27 亿千瓦时的月度峰谷差（此时该行业用电峰谷值发生月份与全社会用电相反）。

根据 2.2.1 节情景分析，未来金融、房地产、商务及居民服务业用电占比上升，全社会月度用电波动将增强。原因是金融、房地产、商务及居民服务业的月度用电方差最大且为全社会用电的风向标行业。2017 年该行业月度用电峰谷差高达 7 亿千瓦时，且峰谷值出现的月份与全社会用电同为 8 月和 2 月。通过新节能技术应用或者加强用电管理的方式减小该行业的 8 月峰值用电最多可减小全社会用电 6300 万千瓦时的月度峰谷差（此时该行业 8 月峰值用电量等于次峰值用电量，若在强月度用电结构优化情境下该值为 3675 万千瓦时）。此外，由于用电趋势不一致，非风向标子行业方差的减小未必能减小全社会用电方差，甚至可能起反作用。在对一年的用电量根据行业进行调配时，可将 2.1.4 节中行业月度用电组合方差作为参考之一，在约束条件一定的情况下尽量减小月度用电方差，从长期来看可以提高电网利用率与发电厂综合发电效率。

## 3 结论与讨论

以广州市分行业月度用电优化管理为研究对象，论文结合地理探测器、用电互补性、情景分析等方法形成了一套包括前期判断、中期模拟优化和后期应用的月度用电优化管理分析方法，通过行业用电特点的分类、准确把握多数风向标子行业、结合用电互补性挖掘行业用电调度潜力、对各用电类型行业提出不同的调控策略等程序，优化行业用电结构和优化用电时间管理最终实现全社会月度用电量波动的减小，各优化路径总计最多可减小约 2.25 亿千瓦时的全社会用电

月度峰谷差。月度用电优化路径提高电力使用效率,为电力需求侧管理的有效实施提供一个重要的分析视角。

在进一步的研究中可根据地理探测器分层探测且不要求时序数据严格连续的特点,将探测方法从市级向上拓展至省级、向下至区级,同时也可将分行业用电转变为分区用电、分时段用电的用电特点研究。将电力数据进行分层时,对连续型变量进行离散化处理会导致部分信息损失,在进一步的研究中可采取地理探测器与时序分析模型结合的方式保证数据信息的完整性。在地理探测器拓展至省或区级可能会出现以下问题:省级数据时间跨度长,而我国多数省份处于产业结构转型阶段,行业用电特点随时间变化明显,要得出符合实际的行业用电特点分析与更准确的预测,需要分阶段分析行业用电量数据;区级数据则容易出现行业较少、不全面等问题,可利用区级小范围内的数据汇总相对简单的优势,收集区内企业空间位置信息与用电量时序数据,进行企业用电特点的时空分析与电力需求侧优化管理研究。

#### 参考文献 (References):

- [1] 广州市人民政府.《广州市“十三五”能源消费总量控制工作方案》[R],2017-11.
- [2] 广州市发展和改革委员会.《广州市能源数据分析手册》[R],2019-12.
- [3] 汪斌,张欣欣,嵇灵,解玉磊.北京市电力消耗驱动因素分析及需求预测[J].中国电力,2018,51(6):178-184.
- [4] 王凯军,龙厚印,吴良良,石清.基于时间序列数据的用电结构变化对产业结构调整效应[J].电力与能源,2016,37(5):533-537.
- [5] 王效岳,刘好明,刘晓丽.改进BP神经网络在城市工业用电量预测中的应用[J].自动化技术与应用,2007(12):3-5+11.
- [6] 叶泽,姚军,吴永飞,何姣.考虑用户需求的电价交叉补贴及社会福利计量研究[J/OL].中国电力:1-10[2020-01-07].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3265.TM.20191111.1015.002.html>.
- [7] 李岩春,张化清,林伟,李承东,白杨,张笑晗,赵燃,张凯璇,汪洋.调峰辅助服务与电量协调优化的日内安全约束经济调度[J].中国电力,2018,51(10):95-102.
- [8] 伍伟华,陈广开,庞建军,等.广州市需求侧智能电网综合管理中的若干关键技术[J].电子测试,2014(8):119-122.
- [9] 张蕾.分析电力需求侧管理及其对负荷预测的影响[J].科技创新导报,2019,16(22):240-241.
- [10] 仇红剑,李宝树,林华德.基于稀疏自回归时间序列方法的行业用电市场景气度分析[J].电子技术与软件工程,2018(20):160.
- [11] 商浩亮,李丹丹,郭琛绵,等.基于用户数量和装接容量的用电分析研究[J].电力勘测设计,2019(1):60-65+77.
- [12] 刘俊,赵宏炎,刘嘉诚,潘良军,王楷.基于协整-格兰杰因果检验和季节分解的中期负荷预测[J].电力系统自动化,2019,43(1):73-80.
- [13] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,2017,72(1):116-134.
- [14] 王伟,阿里木·赛买提,吉力力·阿不都外力.基于地理探测器模型的中亚NDVI时空变化特征及其驱动因子分析[J/OL].国土资源遥感,2019(4):32-40.
- [15] WANG J F, LI X H, George Christakos, et al. Geographical Detectors-Based Health Risk Assessment and its Application in the Neural Tube Defects Study of the Heshun Region, China[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2010, 24(1): 107-127.
- [16] HUANG J X, WANG J F, BO Y C, et al. Identification of Health Risks of Hand, Foot and Mouth Disease in China Using the Geographical Detector Technique[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2014, 11(3):3407-3423.
- [17] WANG Y, WANG S J, LI G D, et al. Identifying the determinants of housing prices in China using spatial regression and the geographical detector technique[J]. Applied Geography, 2017, 79:26-36.
- [18] 湛东升,张文忠,余建辉,等.基于地理探测器的北京市居民宜居满意度影响机理[J].

地理科学进展,2015,34(8):966-975.

[19] 吕晨,蓝修婷,孙威.地理探测器方法下北京市人口空间格局变化与自然因素的关系研究[J].自然资源学报,2017,32(8):1385-1397.

[20] LUO W, Jasiewicz J, Stepinski T, et al. Spatial association between dissection density and environmental factors over the entire conterminous United States[J]. Geophysical Research Letters, 2015, 43(2): 692-700.

[21] ZHANG Y, ZHANG K C, AN Z S, et al. Quantification of driving factors on NDVI in oasis-desert ecotone using geographical detector method[J]. Journal of Mountain Science,2019, 16(11): 2615-2624.

[22] 周敏丹,匡耀求,云国梁.基于地理探测器的广州市大气PM2.5浓度驱动因素分析[J/OL].环境科学研究:2019,1-15.

[23] ZHOU C S, CHEN J, WANG S J. Examining the effects of socioeconomic development on fine particulate matter (PM2.5) in China's cities using spatial regression and the geographical detector technique[J]. The Science of the total environment, 2018, 619-620.

[24] WU R N, ZHANG J Q, BAO Y H, et al.

Geographical detector model for influencing factors of industrial sector carbon dioxide emissions in Inner Mongolia, China.

Sustainability, 2016, 8(2): 149.

[25] 中国科学院广州能源所.《粤港澳大湾区中长期经济社会发展趋势》[R],2019-12.

## 作者简介:

张云涛(1996-),男,硕士研究生,从事能源战略研究, E-mail:380945650@qq.com;

蔡国田(1975-),男,通信作者,博士,研究员,从事能源战略、经济地理等研究, E-mail:caigt@ms.giec.ac.cn;

柯尚军(1993-),男,硕士研究生,从事能源战略研究, Email: ksj@mail.ustc.edu.cn;

王文秀(1983-),女,助理研究员,从事能源战略、低碳经济研究, E-mail:wangwx@ms.giec.ac.cn。

## 基金项目及重大科研攻关项目

广东省软科学研究计划项目(2016A080803002)。

广东省科技计划项目(2018A050501011)。

# Monthly Electricity Consumption Characteristics of Industries in Guangzhou and Electricity Optimized Management Based on Geographical Detector

ZHANG Yuntao<sup>1,2,3</sup>, CAI Guotian<sup>1,2,3</sup>, KE Shangjun<sup>1,2,4</sup>,

WANG Wenxiu<sup>1,2</sup>

(1. Guangzhou Institute of Energy Conversion, CAS, Guangzhou 510640, China;2. The Key Laboratory of Renewable Energy, CAS, Guangzhou 510640, China;3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;4. Nano Science and Technology Institute, University of Science and Technology of China, Suzhou 215123, China)

**Abstract:** In order to implement electricity demand-side management (DSM) to specific industries, based on the analysis of electricity consumption characteristics of each industry in 60 months from 2013 to 2017 by using geographic detector and electricity consumption complementarity model, this paper explored the optimal management path of industry electricity consumption from the



perspective of industry and time through scenario analysis method. This study found that, based on the monthly electricity consumption characteristics of different industries in Guangzhou, and finding the electricity consumption driving sub industry in the industry, by using the electricity consumption combination that can offset the fluctuation of electricity consumption, optimizing the industrial electricity consumption structure and optimizing the electricity consumption time management under the electricity consumption level of Guangzhou in 2017 can reduce the monthly peak-valley difference of Guangzhou electricity consumption about 225 million kwh. In the future, the monthly electricity consumption forecast of the industry, combined with the analysis of electricity complementarity, can be used to calculate the industry's electricity dispatching potential, so as to provide data support for the improvement of electricity demand-side management.

**Key words:** monthly electricity consumption by industry; geographic detector; electricity complementarity; scenario analysis; optimal management

