

城市人均综合能耗分类评估研究*

宋国君¹ 国潇丹^{1#} 方国斌²

(1.中国人民大学环境学院,北京 100872;2.安徽财经大学统计与应用数学学院,安徽 蚌埠 233030)

摘要 提出了使用影响城市人均综合能耗的客观因素对城市进行分类评估的新方法,以解决城市间能效可比性及能效目标针对性的问题。运用单因素多阶段分类法及 AdaBoost 算法将全国地级以上城市分为采暖-高产值、采暖-低产值、非采暖-高工业-高产值、非采暖-高工业-低产值、非采暖-低工业-高产值、非采暖-低工业-低产值 6 类。2005—2015 年,人均综合能耗全国平均值呈逐年稳中有升趋势,其中“采暖-高产值”城市人均综合能耗水平高、增长快,“非采暖-低工业-低产值”城市人均综合能耗始终居 6 类城市中最低水平。

关键词 城市能效管理 人均综合能耗 AdaBoost 算法

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2019.01.024

Study on the classification evaluation of city per capita total energy consumption SONG Guojun¹, GUO Xiaodan¹, FANG Guobin². (1. School of Environment, Renmin University of China, Beijing 100872; 2. Institute of Statistics and Applied Mathematics, Anhui University of Finance & Economics, Bengbu Anhui 233030)

Abstract: A new classification evaluation method of city per total energy consumption was proposed based on objective factors, in order to solve the area comparability and pertinence. The prefecture level above cities of China was divided into 6 kinds of “heating - high per capita GDP”, “heating - low per capita GDP”, “non-heating - developed industry - high per capita GDP”, “non-heating - developed industry - low per capita GDP”, “non-heating - undeveloped industry - high per capita GDP” and “non-heating - undeveloped industry - low per capita GDP” using single multi-step classification and AdaBoost algorithm. During 2005-2015, the average per capita total energy consumption in China increased gradually. The per capita total energy consumption of the cities with heating - high per capita GDP was the highest and increased fastest while the cities with non-heating - undeveloped industry - low per capita GDP always ranked the last.

Keywords: city energy efficiency management; per capita total energy consumption; AdaBoost algorithm

随着经济规模的不断增长,我国单位国内生产总值(GDP)能耗逐年降低,但人均综合能耗却在逐年上升,因此人均综合能耗评价可能比单位 GDP 综合能耗评价更为重要。现有的能效管理多集中在国家级和省级层次,针对城市级的能效研究较少^[1-2]。然而城市是我国最规范的管理单元,建立城市级的能耗评估能更精细化地满足能效管理工作需求。受经济、地理等因素的影响,我国城市人均综合能耗差异显著^[3],若使用统一的评判标准判断城市是否达标,为城市设定或难以达到或过于宽松的标准^[4],并不能实现节能减排,因此对城市进行分类评价很有必要。

国内外学者在对城市能耗评估的研究中已总结出诸多影响因素^[5-7]。笔者认为,应将可控与不可控因素进行区分,在能耗评估之初应按照不可控的客观影响因素对城市进行分类,分类后的同一类型城

市之间客观条件相似,可直接进行横向比较,并可制定统一的评判标准,提高能效管理的科学性。

本研究在筛选关键人均综合能耗影响因素的基础上,使用可控的客观因素对全国地级以上城市进行分类,建立不同类型城市的能耗标杆体系,并分析各类城市能耗水平变动趋势及原因,对有针对性的制定城市能效管理手段和全面了解我国城市人均综合能耗的现状具有重要意义。

1 人均综合能耗影响指标确定

目前,研究较多的影响人均综合能耗的因素主要有以下 8 类:

(1) 自然条件:城市气温与人群能源使用行为之间存在显著的正向相关关系^[8,19-20,19]。我国南方非采暖地区能效要显著高于北方采暖地区^[10]。

(2) 城市化程度:城市人均综合能耗水平显著

第一作者:宋国君,男,1962年生,博士,教授,博士生导师,主要从事环境管理政策研究。# 通讯作者。

* 教育部人文社会科学规划基金资助项目“中国节能管理城市分类技术与管理策略研究——基于 287 个城市面板数据的分析”(No. 12YJA790111)。

高于农村人均综合能耗水平^[11],城市建设用地占市区面积比例、城镇人口比例、人口密度、每万人拥有公共汽车数量、人均城市道路面积可以反映城市化程度。

(3) 产业结构:产业结构对人均综合能耗水平影响显著,工业化程度越高的城市人均综合能耗水平越高^{[12],[13],[9],[14]}。

(4) 经济发展水平:地区生产总值与人均地区生产总值是衡量地区经济发展总量和平均水平的指标,人均综合能耗与地区生产总值和人均地区生产总值均有相关性^[15]。

(5) 能源禀赋:城市的能源禀赋越好,则其能源可获得性越高,降低能耗的主动性就越低,导致人均综合能耗越高^[16]。由于受到数据可得性的限制,考虑到化石能源属于矿产资源的能源矿产部分,因此本研究采用采矿从业人员比例代表城市能源禀赋情况。

(6) 能源价格:不同能源类型之间的价格差异会促进居民使用低价格能源替代高价格能源,能源消费结构的转变会引起人均综合能耗的变化^[17-18]。

(7) 节能意识:节能意识的提升可减少不必要的能源浪费,也会引起人均综合能耗的变化^[19]。

(8) 节能政策:政策手段可通过外部调控和内部引导两个方面影响能源消费观念,继而影响城市人均综合能耗^[20]。

其中,前5类属于短期内不可控的客观影响因素,无法进行逆向管理;而后3类可通过定价、教育等手段进行调控,属于可控的主观因素。本研究对前5类不可控的客观影响因素进行细化,选择如表1所示的城市人均综合能耗可能影响指标。人均综合能耗(以标准煤计)数据来源于北京数汇通环境技

术研究院数据库,该数据库中缺失的数据尽可能从历年“中国城市统计年鉴”中查找综合能耗及年末总人口计算得出。平均气温来源于历年“中国环境统计年鉴”。采暖与否通过查找各省市“统计年鉴”及政府门户网站确定。其余数据均来源于历年“中国城市统计年鉴”。以“中国城市统计年鉴”中列出的全国(不包括港澳台)地级以上城市为基础,剔除指标获取不全的城市,研究年份为2005—2015年,重点对2015年进行评价,最后对历年时间序列进行分析。

判断人均综合能耗与上述11项指标间的相关性,结果如表2所示。人均综合能耗与平均气温、采暖与否、城镇人口比例、人口密度、每万人拥有公共汽车数量、人均城市道路面积、第二产业比重、人均地区生产总值、采矿从业人员比例在0.05水平上显著相关,与城市建设用地占市区面积比例和地区生产总值相关性不显著。

2 城市分类

使用单因素多阶段分类法,对与人均综合能耗显著相关的影响指标逐一按等样本量原则进行城市二分,以方差分析结果作为判断分类结果是否合理的依据,若组间差异显著则进一步分类,若不显著则更换分类指标,直至对全部指标完成分类。单因素多阶段分类法符合人类决策过程,具有可操作性和解释性强的突出优点,但由于其各阶段仅选用单一因素造成一定的信息损失,因此还需使用其他方法对分类结果进行验证。

通常使用判别分析、K最近邻(kNN)算法、AdaBoost算法进行验证,但受城市样本分类边界模糊的影响,本研究选用AdaBoost算法进行验证。若两种方法一致率超过95%,则认为单因素多阶段分类

表1 人均综合能耗可能影响指标

Table 1 Per capita total energy consumption possible indexes

影响因素	指标	解释
自然条件	平均气温/℃	全年有效日气温之和/全年有效天数
	采暖与否	采暖地区取1,非采暖地区取2
城市化程度	城市建设用地占市区面积比例/%	城市建设用地面积/市区面积
	城镇人口比例/%	城镇人口数量/年末总人口
	人口密度/(万人·km ⁻²)	年末总人口/行政区域总面积
	每万人拥有公共汽车数量/辆	公共汽车数量×10 000/年末总人口
产业结构	人均城市道路面积/m ²	城市道路面积/年末总人口
	第二产业比重/%	第二产业增加值/地区生产总值
经济发展水平	地区生产总值/万元	地区生产总值
	人均地区生产总值/(元·人 ⁻¹)	地区生产总值/人口总量
能源禀赋	采矿从业人员比例/%	采矿从业人员数量/从业人员总量

表 2 相关性系数表¹⁾
Table 2 Table of relation coefficients

指标	人均综合能耗	平均气温	采暖与否	城市建设用地占市区面积比例	城镇人口比例	人口密度
人均综合能耗	1.000	-0.225 *	-0.271 *	0.008	0.224 *	-0.078 *
平均气温		1.000	0.765 *	0.079 *	0.116	0.374 *
采暖与否			1.000	-0.057 *	0.005	0.207 *
城市建设用地占市区面积比例				1.000	0.023	0.412 *
城镇人口比例					1.000	0.178 *
人口密度						1.000
每万人拥有公共汽车数量						
人均城市道路面积						
第二产业比重						
地区生产总值						
人均地区生产总值						
采矿从业人员比例						

指标	每万人拥有公共汽车数量	人均城市道路面积	第二产业比重	地区生产总值	人均地区生产总值	采矿从业人员比例
人均综合能耗	0.059 *	0.208 *	0.300 *	0.021	0.237 *	0.112 *
平均气温	0.050 *	-0.183 *	-0.102 *	0.100 *	0.075 *	-0.084 *
采暖与否	-0.038	-0.100	-0.047	-0.017	-0.026	-0.078 *
城市建设用地占市区面积比例	0.429 *	0.207 *	0.192 *	0.310 *	0.221 *	-0.070 *
城镇人口比例	0.152 *	0	-0.013	0.289 *	0.592 *	-0.012
人口密度	0.211 *	-0.073	0.152 *	0.449 *	0.263 *	-0.171 *
每万人拥有公共汽车数量	1.000	0.252 *	0.095 *	0.481 *	0.697 *	-0.030
人均城市道路面积		1.000	0.092	0.164 *	0.462 *	0.069
第二产业比重			1.000	0.125	0.020	0.113 *
地区生产总值				1.000	0.576 *	-0.095 *
人均地区生产总值					1.000	0.049 *
采矿从业人员比例						1.000

注：* 表示在 0.05 水平上显著相关。

法结果可靠,并使用 AdaBoost 算法结果对单因素多阶段分类结果进行校正;若一致率低于 95%,重新考虑未识别出的影响指标,重新进行分类。最后通过总体方差分析证明分类结果的合理性。

由于采暖与否本身就是二分变量,以此分类可更好地避免分类的不确定性,故首先使用该指标对城市进行分类。2015 年全国地级以上城市根据采暖与否进行二分后的组间方差分析结果表明,在 95%的置信度下,采暖地区与非采暖地区的人均综合能耗存在显著差异。

在剩余的影响指标中,第二产业比重与人均综合能耗的相关性系数绝对值最大,采用等样本量原则对采暖地区和非采暖地区城市进一步以此指标为依据进行分类。2015 年全国地级以上城市根据第二产业比重二分后组间方差分析结果显示,在 95%的置信度下:采暖地区的高工业与低工业地区之间人均综合能耗差异不显著,因此对采暖地区不使用此

指标进一步分类;而非采暖地区的高工业与低工业地区之间差异显著。

接下来的影响指标中,人均地区生产总值的相关性系数绝对值最大,继续采用等样本量原则对采暖、非采暖-高工业、非采暖-低工业地区进行分类。2015 年全国地级以上城市根据人均地区生产总值二分后组间方差分析结果表明,3 类地区的组间方差均在 95%的置信度下显著。

由表 2 可见,其他指标与以上 3 个指标之间存在依赖关系,不适宜再进行分类。综上所述,将 2015 年全国地级以上城市分为:采暖-高产值、采暖-低产值、非采暖-高工业-高产值、非采暖-高工业-低产值、非采暖-低工业-高产值、非采暖-低工业-低产值 6 类。

表 3 所示的单因素多阶段分类法与 AdaBoost 算法分类结果的一致性比对表明:两种方法的一致率均为 100%,完全一致,无需校正。

表 3 单因素多阶段分类法与 AdaBoost 算法分类结果的一致率
Table 3 Accordance rates of single multi-step classification and AdaBoost algorithm %

项目	采暖-高产值	采暖-低产值	非采暖-高工业-高产值	非采暖-高工业-低产值	非采暖-低工业-高产值	非采暖-低工业-低产值
一致率	100	100	100	100	100	100

表4 2015年全国地级以上城市人均综合能耗评估结果
Table 4 Evaluation results of per capita total energy consumption for prefecture level above cities of 2015

城市类别	能效水平	城市
采暖-高产值	落后	乌海、鄂尔多斯、包头、石嘴山、朔州、唐山、呼和浩特、银川
	普通	巴彦淖尔、榆林、长治、阳泉、呼伦贝尔、太原、晋城、天津、通辽、铜川、三门峡
	先进	郑州、石家庄、廊坊、延安、洛阳、北京、沧州、秦皇岛、西安、宝鸡、咸阳
采暖-低产值	落后	临汾、乌兰察布、吴忠、晋中、吕梁、中卫、大同、运城、赤峰、安阳、承德
	普通	邯郸、渭南、张家口、忻州、濮阳、新乡、邢台
	先进	衡水、开封、保定、商丘、宿州、亳州、周口、固原
非采暖-高工业-高产值	落后	宜昌、铜陵、马鞍山、鄂州、三明、黄石、长沙
	普通	湘潭、襄樊、佛山、珠海、焦作、鹤壁、惠州、龙岩、荆门、中山、泉州、株洲
	先进	岳阳、合肥、芜湖、许昌、莆田、宁德
非采暖-高工业-低产值	落后	六盘水、娄底、十堰、郴州
	普通	淮北、潮州、平顶山、淮南、漯河、宣城、蚌埠
	先进	揭阳、安庆、滁州、安康、汕头、商洛
非采暖-低工业-高产值	落后	武汉、贵阳、深圳、广州、上海
	普通	厦门、南宁、东莞、福州、重庆、漳州
	先进	海口、肇庆、常德、阳江、江门、三亚
非采暖-低工业-低产值	落后	茂名、韶关、安顺、咸宁、池州、遵义、清远、孝感、汉中
	普通	云浮、衡阳、随州、益阳、黄冈、永州、荆州、怀化、信阳、梅州
	先进	张家界、驻马店、钦州、河源、黄山、湛江、阜阳、邵阳、南阳、六安、汕尾

总体方差分析的 F 检验结果表明,在 99% 的置信区间下,以上分类结果满足不同城市类型之间人均综合能耗差异显著的要求,分类结果合理。

3 人均综合能耗标杆体系确立

建立标杆体系的前提条件是变量要服从正态分布。首先假定各类城市人均综合能耗服从对数正态分布,运用单样本的 Kolmogorov-Smirnov(K-S) 检验方法来检验总体分布。结果表明,在 0.05 显著性水平下,2005—2015 年全国 6 类城市的人均综合能耗均服从对数正态分布。

在确定人均综合能耗变量满足正态分布后,即可利用各类城市的人均综合能耗均值加/减方差构建上下标杆体系。当某城市人均综合能耗落在上下标杆之间时,城市能效水平判定为普通;当某城市人均综合能耗大于等于上标杆时,城市能效水平判定为落后;当某城市人均综合能耗小于等于下标杆时,城市能效水平判定为先进。2015 年全国地级以上城市人均综合能耗评估结果如表 4 所示。其他年份城市分类及标杆体系可以同理确定。

4 人均综合能耗时间序列分析

图 1 比较了 2005—2015 年全国地级以上城市及全国平均的城市人均综合能耗时间序列。

人均综合能耗全国平均值呈逐年稳中有升趋势,其中 2006 年较 2005 年上升幅度最大,增幅达

12.80%,平均增幅为 6.16%。

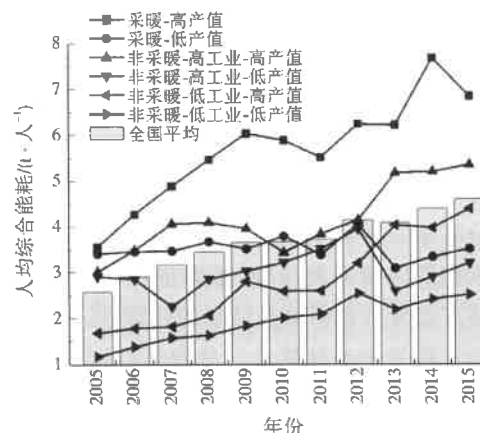


图1 2005—2015年6类城市人均综合能耗时间序列
Fig.1 Time series of per capita total energy consumption of 6 types of cities during 2005-2015

“采暖-高产值”城市人均综合能耗水平居 6 类城市中最高,平均增长速率也最快。

“采暖-低产值”城市人均综合能耗 2005 年为 3.409 t/人,仅次于“采暖-高产值”城市,但是该类城市 2005—2015 年间人均综合能耗基本稳定在 3.4 t/人左右,且 2013 年显著下降至 3.086 t/人,降幅达到 23.58%。

“非采暖-高工业-高产值”城市在 2005—2015 年间也保持着较高的人均综合能耗水平及增长速率。2005 年该类城市人均综合能耗水平比采暖城市都低,但自 2006 年起基本都超过了“采暖-低产值”城市。

“非采暖-高工业-低产值”城市 2005 年人均综合能耗为 2.910 t/人,2007 年下降至最低水平 2.258 t/人,2015 年为 3.201 t/人。

“非采暖-低工业-高产值”城市人均综合能耗平均增幅在 6 类城市中最大,达 10.86%。该类型城市发展程度高,能源消耗总量将随着地区生产总值的上升而持续增加。

“非采暖-低工业-低产值”城市人均综合能耗始终处于 6 类城市中的最低水平,2015 年的人均综合能耗也只有 2.511 t/人,平均增幅为 8.87%。

5 讨论

本研究使用采暖与否、第二产业比重和人均地区生产总值对全国地级以上城市进行分类评估,不同于现有能效管理手段中普遍通过调整产业结构降低能耗的思路^{[8]22},而是将城市产业、经济、环境、人口视为不可逆向管理的客观因素,在相同类型城市内部进行比较,以便从能源领域的价格引导、供需结构、政策设计等主观因素方面寻求控制能耗的方法。这种思路使得城市能效管理更尊重城市的客观现状,城市节能手段的选择针对性和可操作性更强。

本研究使用统计学方法对单因素多阶段分类法结果进行验证,相比于陈泽军等^{[13]98-99}的城市分类结果更加可靠。本研究所使用的 AdaBoost 算法比方国斌等^[21]使用的 kNN 算法能更准确的对边界模糊的城市样本进行分类。

在评估结论方面,更能适合不同城市的发展和节能需要。以郑州为例,“十二五”期间该市采取了优化能源结构、推动重点行业节能技术研发等多项节能措施,取得了一定成效,若以全国统一标准衡量,2015 年郑州人均综合能耗 4.120 t/人,仅比全国平均水平低 0.260 t/人,但在“采暖-高产值”城市中,其处于先进水平,肯定了城市本身的主观努力,突出了能效管理的绩效水平。

6 结论及建议

(1) 根据影响城市人均综合能耗的采暖与否、第二产业比重和人均地区生产总值等客观因素指标把全国地级以上城市分成采暖-高产值、采暖-低产值、非采暖-高工业-高产值、非采暖-高工业-低产值、非采暖-低工业-高产值、非采暖-低工业-低产值 6 类。

(2) 2005—2015 年间人均综合能耗全国平均值呈逐年稳中有升趋势,其中“采暖-高产值”城市人均综合能耗水平高、增长快,“非采暖-低工业-低产值”城

市人均综合能耗始终居 6 类城市中最低水平。

(3) 在《国家生态文明建设示范县、市指标》中,因不同客观条件的城市划定统一的指标值,导致高产值城市由于环境、经济发展需求等难以逆向管理,无法达标;而低产值城市由于发展及城镇化水平低,能耗目标过于宽松,无法对能源消耗起到应有的限制作用。

(4) 在评估城市人均综合能耗水平时,应在确定城市分类后再进行评估,识别出在能源供给及消费方式等主观因素方面降低城市人均综合能耗的方法。

参考文献:

- [1] 方国斌,马慧敏,宋国君.基于气候区划的城市能源效率分类研究[J].统计与决策,2016(18):125-130.
- [2] 赵先超,宋丽美,朱翔.湖南省城乡居民生活能耗测算及节能思路研究[J].科技与经济,2016,29(1):77-81.
- [3] 宋国君,傅毅明,马本,等.中国地区能源利用效率评估指数体系设计及其实证探讨[J].环境污染与防治,2010,32(10):91-96.
- [4] 宋国君,马本.中国城市能源效率评估研究[M].北京:化学工业出版社,2013.
- [5] HAO Y, PENG H. On the convergence in China's provincial per capita energy consumption: new evidence from a spatial econometric analysis[J]. Energy Economics, 2017, 68: 31-43.
- [6] BURCU O, ILHAN O. A new approach to energy consumption per capita stationarity: evidence from OECD countries[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 65: 332-344.
- [7] HASSAN M, RATI R. Convergence in energy consumption per capita across the US states, 1970-2013: an exploration through selected parametric and non-parametric methods[J]. Energy Economics, 2017, 62: 404-410.
- [8] 史丹,马翠萍.我国能源需求的驱动因素与节能减排政策效果分析[J].当代财经,2014(10).
- [9] 孙欣.省际节能减排效率变动及收敛性研究——基于 Malmquist 指数[J].统计与信息论坛,2010,25(6):101-107.
- [10] 宋一弘.环境约束下城市能源效率及其影响因素分析——基于三阶段 DEA-malmquist 指数的实证分析[J].暨南学报(哲学社会科学版),2012(11):99-105,163.
- [11] 王效华,胡晓燕.农村家庭能源消费的影响因素[J].农业工程学报,2010,26(3):294-297.
- [12] 王菲,董锁成,毛琦梁.基于工业结构特征的中国地区能源消费强度差异分析[J].地理科学进展,2013,32(4):522-531.
- [13] 陈泽军,马本.浙江省城市能源效率评估研究[J].环境污染与防治,2011,33(6).
- [14] 曾雪兰,徐伟嘉,郭绍德,等.广东省“十二五”节能减碳下降潜力分析及对策研究[J].环境污染与防治,2014,36(3):99-102,109.
- [15] 沈镭,刘立涛,王礼茂,等.2050 年中国能源消费的情景预测[J].自然资源,2015,30(3):361-373.
- [16] 傅春,巫锡金.中部地区能源效率影响因素的分析模型与案例研究[J].长江流域资源与环境,2010,19(10):1107-1110.
- [17] HOSSEIN E. A structural equation model of energy consumption in the United States: untangling the complexity of per-capita residential energy use[J]. Energy Research & Social Science, 2015, 6: 109-120.
- [18] 刘满芝,刘贤贤.中国城镇居民生活能源消费影响因素及其效应分析——基于八区域的静态面板数据模型[J].资源科学,2016,38(12):2295-2306.
- [19] 杨冰,王继龙,左晓利,等.北京市居民节能意识调查及潜力分析[J].中外能源,2017,22(10):92-97.
- [20] 刘满芝,刘贤贤,陈梦.中国城镇居民生活能源消费:影响因素分解及空间差异分析[J].首都经济贸易大学学报,2017,19(5):13-20.
- [21] 方国斌,宋国君.城市能源效率的 PS-kNN 分类综合评价[J].统计与信息论坛,2014,29(9):34-43.

编辑:陈锡超 (收稿日期:2018-01-22)