

北京市能源消费与主要气象因子的突变点分析 ——基于灰色关联理论

赵玥¹ 巩在武² 王文昊³

摘要

采用灰关联分析算法,探寻北京市1980—2010年能源消费与气象因子(平均气温、降水量和日照时数等)时间序列的突变点,并将能源消费与气象因子序列进行趋势分析.结果表明:北京市能源消费序列的突变位置是1993与1997年,气象因子序列的突变位置介于1993—2000年之间;平均气温、日照时数与能源消费序列的突变位置完全相同,也即北京市气象因子与能源消费的关系极其密切.

关键词

灰关联分析;能源消费;气象因子;突变点;趋势分析

中图分类号 N5

文献标志码 A

收稿日期 2012-02-23

资助项目 国家自然科学基金(70901043,71-171115);教育部人文社科基金(09YJC630130).

作者简介

赵玥,女,硕士,研究方向为气候变化与公共气象、灰色系统理论.

zhaoyue 05992033@126.com

巩在武(通信作者),男,副教授,博士后,研究方向为气象风险评价、灰色系统理论.

zhangong26@163.com

1 天津市津南区气象局,天津,300350

2 南京信息工程大学 经济管理学院,南京,210044

3 天津市北辰区气象局,天津,300400

0 引言

基于某种因素影响下的一组随机时间序列,从某一点开始出现明显的突变或显著的弹跳趋势,则把这一点定义为突变点.这一概念由Hurst^[1]于1951年在讨论设备的长期存贮问题时首次提出,1970年,英国学者Hinkley^[2]突破性地寻找了一组随机时间序列的突变点,20世纪70年代中期,国外涌现出许多突变点理论研究者,代表人物包括James等^[3-4],Pettitt^[5],Smith^[6],Booth等^[7]和Perreault等^[8].上述研究极大地促进了突变点理论的发展.通过寻找一组随机时间序列的突变点,可以把握时间序列的突变特征,及时采取措施应对因时间序列变化带来的不利影响.

鉴于寻找突变点有利于把握时间序列的突变特征,国内外许多学者尝试将突变点理论用于水文变化、气象灾害和气候变化时间序列研究中,并取得了大量富有成效的研究成果.例如,Cobb^[9]利用最大似然估计的辅助统计量确定了尼罗河水文变化时间序列的突变点,对尼罗河水域变化特征做出大量的研究工作,Paturel等^[10]选取1950—1980年拉多斯附近5个城镇的年降水量资料,采用综合区域分析方法搜寻出年降水量时间序列的突变位置,Perreault等^[11]应用贝叶斯单一转移模型,研究出1970年以来流经加拿大东部和美国的水域水文变化时间序列的突变位置,翟盘茂等^[12]采用我国296个测站的逐日降水资料,探寻出降水量、降水频率和降水强度时间序列的突变点,刘莉红等^[13]利用小波分析方法,寻找出我国近百余年平均气温变化的突变点,并分析了百余年平均气温的变化特征,施洪波^[14]采用滑动 t 检验方法,分析出1960—2008年京、津、冀地区夏季高温的突变过程 and 变化特征.上述学者普遍采用统计学方法寻找时间序列的突变点,然而传统的统计学方法对大样本数据量要求较高,无法解决小样本数据时间序列突变点的搜寻问题.

灰关联分析方法在研究小样本、贫信息时间序列方面具有显著的优势,它可以有效地弥补传统统计分析方法的缺陷,即无需考虑样本量的多少和样本变化的规律,更不会出现量化结果与定性分析结果不符的情况^[15].本文试图建立一种基于灰关联分析的突变点选择算法,并将此算法应用到北京市能源消费与气象因子时间序列的突

变点选择中. 本文的研究结果充分考虑当地气候特征条件, 可以有针对性地对当地能源发展提供战略指导.

1 主要研究内容

1.1 理论与算法

1.1.1 灰关联理论

灰色关联理论是灰色系统理论的重要内容之一. 该方法的基本思想是根据一组或几组抽象因素序列的发展形态的几何相似或相异程度衡量它们之间的关联程度, 以确定这些抽象序列的定性和定量关系. 特别地, 灰色关联理论对样本的多少和样本有无典型分布规律没有特殊要求. 目前, 灰关联分析方法已经在经济、管理、模式识别和聚类分析中得到广泛应用.

定义 1^[15] 设 $X_0 = (x_0(1), x_0(2), \dots, x_0(n))$ 为系统特征序列, $X_i = (x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(n))$, $i = 1, 2, \dots, m$ 为相关因素序列. 给定实数 $\gamma(x_0(k), x_i(k))$, 若实数

$$\gamma(X_0, X_i) = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^n \gamma(x_0(k), x_i(k)) \quad (1)$$

满足规范性、整体性、偶对称性和接近性, 则称 $\gamma(x_0(k), x_i(k))$ 为 X_i 与 X_0 的灰色关联度, $\gamma(x_0(k), x_i(k))$ 为 X_i 与 X_0 在 k 点的关联系数.

定理 1^[15] 设系统行为序列 $X_i = (x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(n))$, $i = 1, 2, \dots, m$ 为相应固定序列. 对于 $\xi \in (0, 1)$, 令

$$\gamma(x_0(k), x_i(k)) = \frac{\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)| + \xi \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|}{|x_0(k) - x_i(k)| + \xi \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|}, \quad (2)$$

$$\gamma(X_0, X_i) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \gamma(x_0(k), x_i(k)), \quad (3)$$

其中, $\xi \in (0, 1)$ 称为分辨系数, $\gamma(X_0, X_i)$ 称为 X_0 与 X_i ($i = 1, 2, \dots, m$) 的灰色关联度. 灰色关联度 $\gamma(X_0, X_i)$ 常简记为 γ_{0i} , k 点关联系数 $\gamma(x_0(k), x_i(k))$ 简记为 $\gamma_{0i}(k)$. γ_{0i} ($i = 1, 2, \dots, m$) 也称为邓氏关联度, 邓氏关联度满足规范性、整体性、偶对称性和接近性.

1.1.2 突变点的灰关联度搜索算法

根据灰关联模型特征, 建立基于灰色关联分析的突变点选择算法, 步骤如下:

1) 构建参考序列

从时间序列 $X = (x(1), x(2), \dots, x(n))$, $n \geq$

10 中选取

$$X_0 = (x(1), x(2), \dots, x(T)),$$

$$5 \leq T_f \leq T \leq T_b \leq \left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor. \quad (4)$$

将式(4)定义为参考序列, 并且 T_f 、 T 和 T_b 都为整数, 其中 $T_f \leq T_b$, T_f 表示每列时间序列的前一半数值序列数, T_b 表示每列时间序列的后一半数值序列数.

2) 构建比较序列

$$\{X_1 = (x(T+1), x(T+2), \dots, x(2T)); X_2 = (x(T+2), x(T+3), \dots, x(2T+1)); \dots; X_{n-2T+1} = (x(T+(n-2T+1)), \dots, x(n))\}, \quad (5)$$

将式(5)定义为 $n - 2T + 1$ 阶的比较序列集.

3) 计算整体关联度

根据式(2)和(3), 计算和的关联度, 然后, 计算这些关联度的算术平均值:

$$r(T) = \frac{1}{n - 2T + 1} \sum_{i=1}^{n-2T+1}, \quad (6)$$

称 $r(T)$, $5 \leq T_f \leq T \leq T_b \leq \left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor$ 为 T -整体关联度.

4) 确定突变点

$$\eta(T) = \left| \frac{r(T+1) - r(T)}{r(T)} \right| \times 100 \quad (7)$$

被称为相对 T -整体关联度,

$$\eta(T^*) = \max(\eta(T) \mid T = T_f, T_f + 1, \dots, T_b), \quad (8)$$

则 T^* 为时间序列 $X = (x(1), x(2), \dots, x(n))$ 的突变点.

注 1 在时间序列的突变点选择过程中, 可以合理地剔除与实际情况偏差较大的序列点.

1.2 实证研究

根据 1.1.2 提出的突变点的灰关联度搜索算法, 分别探寻北京市 1980—2010 年能源消费和气象因子(平均气温、最高气温、降水量、日照时数、平均气压、平均风速和相对湿度)时间序列的突变点, 并将能源消费与气象因子序列分别进行趋势分析. 其中, 相关研究数据源于《2010 年北京统计年鉴》^[16] 和国家气象信息中心《2010 年北京气候资料年值数据集》^[17]. 由于我国统计年鉴上只有以年为尺度统计的能源消费数据, 无法以季节为尺度来衡量能源消费与气象因子的关系.

1.2.1 北京市能源消费和气象因子时间序列的突变点选择

由于 1980—2010 年北京市能源消费持续上升, 不利于观察能源消费时间序列的趋势变化. 因此, 本

文考虑用能源消费率时间序列代替能源消费时间序列寻找突变点.能源消费率的计算公式如下:

$$r_t = \frac{E_{c,t+1} - E_{c,t}}{E_{c,t}} \times 100\%, \quad (9)$$

其中, r_t 表示第 t 期能源消费率, $E_{c,t}$ 表示第 t 期的能源消费总量, $E_{c,t+1}$ 表示第 $t + 1$ 期的能源消费总量.

依据式(2)—(9), 计算 1980—2010 年北京市能源消费和气象因子时间序列的突变点, 数值结果见表 1 和 2.

由表 1 可知: 北京市能源消费和所有气象因子时间序列的突变位置 T^* 在第 14 点, 即北京市能源消费和所有气象因子时间序列的突变年份为 1993 年.

由表 2 可知: 北京市能源消费、平均气温和日照时数时间序列的突变位置 T^* 在第 14 点(本文剔除了平均气温序列的第 5 点和日照时数序列的第 7 点), 即突变年份为 1997 年; 降水量序列的突变位置 T^* 在第 11 点, 即突变年份为 2000 年; 平均气压、平均风速和相对湿度序列的突变位置 T^* 在第 13 点, 即突变年份为 1998 年.

1.2.2 北京市能源消费和气象因子时间序列的趋势分析

参考表 1 的数值结果, 本文将寻找到的北京市能源消费时间序列的突变点作为趋势分割点, 同时针对平均气温、降水量和日照时数时间序列分别与能源消费时间序列进行趋势分析. 具体步骤如下:

表 1 北京市能源消费和气象因子序列突变点选择的数值结果(按照时间序列的发生时间选取参考序列)

Table 1 Numerical results for change point analysis in Beijing energy consumption and meteorological factors, with reference sequence selected in accordance with time sequence

| 比较序列/参考序列 | 能源消费 | 平均气温 | 降水量 | 日照时数 | 平均气压 | 平均风速 | 相对湿度 |
|-----------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| (1985—2010 年)/(1980—1984 年) | 0.020 1 | 0.004 2 | 0.002 8 | 0.010 1 | 0.037 1 | 0.120 9 | 0.006 1 |
| (1986—2010 年)/(1980—1985 年) | 0.036 3 | 0.034 3 | 0.006 0 | 0.033 5 | 0.017 0 | 0.030 0 | 0.022 3 |
| (1987—2010 年)/(1980—1986 年) | 0.026 3 | 0.013 5 | 0.000 8 | 0.017 4 | 0.045 9 | 0.054 4 | 0.017 0 |
| (1988—2010 年)/(1980—1987 年) | 0.010 0 | 0.057 3 | 0.001 1 | 0.016 3 | 0.031 7 | 0.017 2 | 0.000 5 |
| (1989—2010 年)/(1980—1988 年) | 0.010 8 | 0.055 9 | 0.017 4 | 0.000 0 | 0.024 8 | 0.016 4 | 0.006 5 |
| (1990—2010 年)/(1980—1989 年) | 0.030 2 | 0.005 3 | 0.011 0 | 0.036 4 | 0.021 0 | 0.039 2 | 0.009 3 |
| (1991—2010 年)/(1980—1990 年) | 0.048 0 | 0.048 3 | 0.030 9 | 0.049 6 | 0.020 3 | 0.068 7 | 0.007 2 |
| (1992—2010 年)/(1980—1991 年) | 0.027 5 | 0.003 1 | 0.017 0 | 0.013 2 | 0.010 8 | 0.016 2 | 0.033 6 |
| (1993—2010 年)/(1980—1992 年) | 0.059 8 | 0.013 8 | 0.041 9 | 0.023 2 | 0.034 3 | 0.079 2 | 0.000 0 |
| (1994—2010 年)/(1980—1993 年) | 0.078 5 | 0.110 1 | 0.046 4 | 0.067 0 | 0.101 9 | 0.136 3 | 0.042 0 |
| T^* (突变点) | (1993 年)14 | (1993 年)14 | (1993 年)14 | (1993 年)14 | (1993 年)14 | (1993 年)14 | (1993 年)14 |

表 2 北京市能源消费和气象因子序列突变点选择的数值结果(按照时间序列的顺序从后往前选取参考序列)

Table 2 Numerical results for change point analysis in Beijing energy consumption and meteorological factors, with reference sequence selected in the order of time sequence from back to front

| 比较序列/参考序列 | 能源消费 | 平均气温 | 降水量 | 日照时数 | 平均气压 | 平均风速 | 相对湿度 |
|-----------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| (1980—1995 年)/(1996—2010 年) | 0.005 3 | 0.042 6 | 0.015 6 | 0.004 4 | 0.002 9 | 0.030 8 | 0.019 8 |
| (1980—1994 年)/(1995—2010 年) | 0.014 5 | 0.005 1 | 0.000 0 | 0.005 7 | 0.002 6 | 0.002 2 | 0.012 8 |
| (1980—1993 年)/(1994—2010 年) | 0.045 0 | 0.010 5 | 0.016 6 | 0.051 1 | 0.022 8 | 0.009 4 | 0.028 4 |
| (1980—1992 年)/(1993—2010 年) | 0.012 3 | 0.007 7 | 0.005 4 | 0.000 8 | 0.044 7 | 0.018 1 | 0.007 8 |
| (1980—1991 年)/(1992—2010 年) | 0.025 9 | 0.010 5 | 0.003 0 | 0.021 3 | 0.038 9 | 0.054 4 | 0.010 7 |
| (1980—1990 年)/(1991—2010 年) | 0.014 1 | 0.023 6 | 0.021 5 | 0.005 8 | 0.027 0 | 0.030 3 | 0.050 1 |
| (1980—1989 年)/(1990—2010 年) | 0.001 5 | 0.007 8 | 0.074 7 | 0.027 3 | 0.018 1 | 0.019 5 | 0.006 6 |
| (1980—1988 年)/(1989—2010 年) | 0.005 5 | 0.002 3 | 0.025 4 | 0.002 4 | 0.017 4 | 0.018 2 | 0.001 9 |
| (1980—1987 年)/(1988—2010 年) | 0.040 2 | 0.014 0 | 0.018 2 | 0.034 1 | 0.056 3 | 0.090 5 | 0.067 5 |
| (1980—1986 年)/(1987—2010 年) | 0.101 8 | 0.041 1 | 0.028 2 | 0.041 2 | 0.004 0 | 0.013 7 | 0.060 9 |
| T^* (突变点) | (1997 年)14 | (1997 年)14 | (2000 年)11 | (1997 年)14 | (1998 年)13 | (1998 年)13 | (1998 年)13 |

1) 数据处理

将各组时间序列除以表1相应 T^* 的数值,公式为

$$D_i = D_i / D_{T^*}, \quad (10)$$

其中, D_i 表示各组时间序列的趋势值, D_i 表示各组时间序列的初值, D_{T^*} 表示各组时间序列 T^* 的数值.

2) 描绘变化趋势

分别将1993年与1997年作为趋势分割点,描绘北京市能源消费与平均气温、降水量和日照时数时间序列的变化趋势(图1—3).

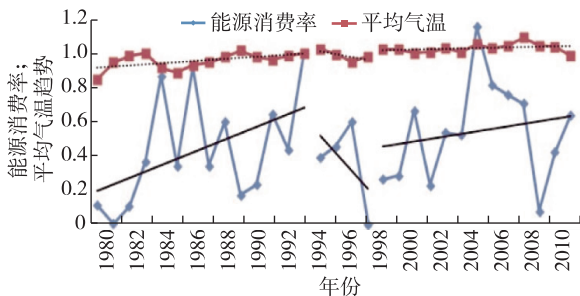


图1 1980—2010年北京市能源消费和平均气温时间序列趋势

Fig. 1 Time series and linear trends of energy consumption and average temperature during 1980—2010 in Beijing

图1中,1980—1993年北京市平均气温与能源消费序列均呈现递增趋势,1994—1997年均呈现递减趋势,而1998—2010年则均呈现递增趋势.显然,在3个不同时段下,平均气温与能源消费序列均呈现类似的变化趋势.

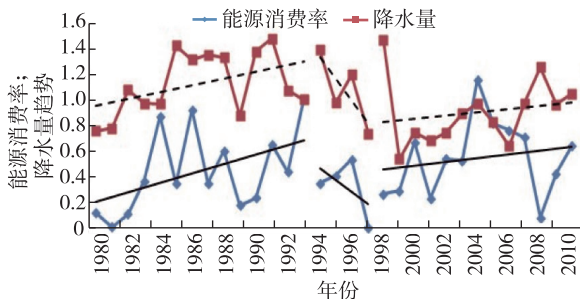


图2 1980—2010年北京市能源消费和降水量时间序列趋势

Fig. 2 Time series and linear trends of energy consumption and precipitation during 1980—2010 in Beijing

图2中,1980—1993年北京市降水量与能源消费序列均呈递增趋势,1994—1997年均呈现递减趋势,而1998—2010年则均呈现递增趋势.显然,在3

个不同时段下,降水量与能源消费序列均呈现类似的变化趋势.

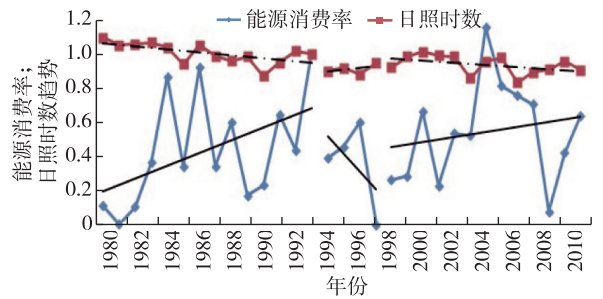


图3 1980—2010年北京市能源消费和日照时数时间序列趋势

Fig. 3 Time series and linear trends of energy consumption and sunshine hours during 1980—2010 in Beijing

图3中,1980—1993年北京市日照时数序列呈现递减趋势,1994—1997年该序列呈现递增趋势,而1998—2010年该呈现递减趋势.显然,在3个不同时段下,日照时数与能源消费序列均呈现类似的变化趋势.这正好解释了日照时数和能源消费之间存在反向变动关系.

通过分析时间序列突变点附近的变化趋势,不难发现:1980—1993年、1994—1997年和1998—2010年3个时间段内,北京市能源消费与平均气温、降水量和日照时数时间序列的变化趋势基本一致.这一结果也验证了北京市能源消费与气象因子时间序列突变点选择的正确性.众所周知,1993年北京市开始推行清洁生产试点工作,能源消费出现下降,这一情况恰好也证实了突变点选择的正确性.

2 结论

本文尝试将灰关联度算法应用到能源消费与气象因子时间序列突变点的搜索中:利用北京市1980—2010年能源消费与气象因子(平均气温、降水量和日照时数等)时间序列为实证数据,验证了灰关联度算法寻找时间序列突变点的实用性和有效性.通过北京市1980—2010年能源消费与气象因子时间序列的突变点选择和变化趋势分析,实证得出北京市能源消费序列的突变位置是1993与1997年;气象因子序列的突变位置集中于1993—2000年之间.特别地,平均气温、日照时数与能源消费序列的突变位置完全相同,进一步说明北京市气象因子与能源消费的关系极其密切.因此,政府可以根据当地的气候条件,有针对性地安排能源发展战略.

参考文献

References

- [1] Hurst H E. Long-term storage capacity of reservoirs[J]. Transactions of the American Society of Civil Engineering, 1951, 116:770-779
- [2] Hinkley D V. Inference about the change-point in a sequence of random variables [J]. Biometrika, 1970, 57 (1):1-17
- [3] James B, James K L, Siegmund D. Tests for a change-point [J]. Biometrika, 1988, 74 (1):71-83
- [4] James B, James K L, Siegmund D. Conditional boundary crossing probabilities, with applications to change-point problems [J]. Ann Probab, 1988, 16 (2):839-852
- [5] Pettitt A N. A Simple cumulative sum type statistic for the change-point problem with zero-one observations [J]. Biometrika, 1980, 67 (1):79-84
- [6] Smith A F M. A Bayesian approach to inference about a change-point in a sequence of random variables [J]. Biometrika, 1975, 62 (2):407-416
- [7] Booth N B, Smith A F M. A Bayesian approach to retrospective identification of change-points [J]. J Econom, 1982, 19 (1):7-22
- [8] Perreault L, Bernier J, Bobee B, et al. Bayesian change-point analysis in hydrometeorological time series. Part 2: Comparison of change-point models and forecasting [J]. J Hydrol, 2000, 235 (3/4):242-263
- [9] Cobb G W. The problem of the Nile: Conditional solution to a change-point problem [J]. Biometrika, 1978, 65 (2):243-251
- [10] Paturel J E, Servat E, Kouame' B, et al. Climatic variability in humid Africa along the Gulf of Guinea. Part II: An integrated regional approach [J]. J Hydrol, 191 (1/2/3/4):16-36
- [11] Perreault L, Hache' M, Slivitsky M, et al. Detection of changes in precipitation and runoff over eastern Canada and US using a Bayesian approach [J]. Stochastic Environ Res Risk Assess, 1999, 13 (3):201-216.
- [12] 翟盘茂,任福民,张强. 中国降水极值变化趋势检测 [J]. 气象学报, 1999, 57 (2):208-216
ZHAI Panmao, REN Fumin, ZHANG Qiang. Detection of trends in China's precipitation extremes [J]. Acta Meteorologica Sinica, 1999, 57 (2):208-216
- [13] 刘莉红,郑祖光. 近百余年我国气温变化的突变点分析 [J]. 南京气象学院学报, 2003, 26 (3):378-383
LIU Lihong, ZHENG Zuguang. Analysis on the abrupt change points of Chinese temperature in the last 120 years [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 2003, 26 (3):378-383
- [14] 施洪波. 1960—2008年京津冀地区夏季高温日数的变化趋势分析 [J]. 气象, 2011, 37 (10):1278-1282
SHI Hongbo. Analysis of trends in the variability of summer high temperature days during 1960—2008 in Beijing, Tianjin and Hebei [J]. Meteorological Monthly, 2011, 37 (10):1278-1282
- [15] 刘思峰,党耀国,方志耕,等. 灰色系统理论及其应用 [M]. 北京:科学出版社,2004
LIU Sifeng, DANG Yaoguo, FANG Zhigeng, et al. Grey system theory and its application [M]. Beijing: Science Press, 2004
- [16] 北京市统计局. 北京统计年鉴:2010 [M]. 北京:中国统计出版社,2010
Beijing Bureau of Statistics. Beijing statistical yearbook: 2010 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2010
- [17] 国家气象信息中心. 北京气候资料年值数据集:2010 [M]. 北京,2010
National Meteorological Information Center. Beijing climate data set:2010 [M]. Beijing, 2010

Change point analysis of energy consumption and meteorological factors in Beijing: Based on gray relation theory

ZHAO Yue¹ GONG Zaiwu² WANG Wenhao³

1 Tianjin Municipal Meteorological Bureau of Jinnan District, Tianjin 300350

2 School of Economics & Management, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

3 Tianjin Municipal Meteorological Bureau of Beichen District, Tianjin 300400

Abstract This paper uses the method of gray relation analysis to find out the change point for time series of meteorological factors and energy consumption in Beijing from 1980 to 2010. The meteorological factors include average temperature, precipitation and sunshine hour \soutet al. It is shown that the change point of Beijing's energy consumption series occurs in 1993 and 1997, while the change points of the meteorological factors occurs in period from 1993 to 2000. Especially, the change point of average temperature, sunshine hour and energy consumption sequences occur in the same period exactly. Furthermore, meteorological factors have the extremely close relationship with energy consumption in Beijing. In a word, according to the local climate conditions, the government could arrange the strategy of energy resource development accurately.

Key words gray relation analysis; energy consumption; meteorological factors; change point; trend analysis