

司鹏, 解以扬. 2015. 天津太阳总辐射资料的均一性分析 [J]. 气候与环境研究, 20 (3): 269–276, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2014.14075. Si Peng, Xie Yiyang. 2015. Analysis of the homogeneity of total solar radiation data in Tianjin [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 20 (3): 269–276.

天津太阳总辐射资料的均一性分析

司鹏 解以扬

天津市气象局, 天津 300074

摘 要 采用天津地区 1959~2012 年太阳总辐射年、月总量资料、日照百分率及其台站元数据, 通过惩罚最大 t 检验和顺序算法对太阳总辐射资料的均一性进行了检验。结果表明: 辐射观测仪器的变更造成了太阳总辐射序列产生不连续, 突变年代主要发生在 1968 年、1972 年、1990 年 3 次仪器变更年份或其附近年份, 而迁站没有造成显著影响。同时, 顺序算法检验发现, 天津地区太阳总辐射序列在 20 世纪 80 年代初 (1983 年前后) 出现了趋势减少的渐变, 并且在月总量序列的检验中, 仪器变更的非均一性影响也体现在其中。因此, 在太阳辐射的研究工作中, 尊重原始观测数据的同时, 还要充分考虑数据的均一性, 剔除非均一性因素, 以此确保气候变化分析结果的相对真实。

关键词 天津地区 太阳总辐射资料 均一性分析

文章编号 1006-9585 (2015) 03-0269-08

中图分类号 P413

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2014.14075

Analysis of the Homogeneity of Total Solar Radiation Data in Tianjin

SI Peng and XIE Yiyang

Tianjin Meteorological Bureau, Tianjin 300074

Abstract The homogeneity of total solar radiation during 1959–2012 in Tianjin is examined using the penalized maximal t -test and a sequential algorithm, using data and metadata of total solar radiation and the percentage of sunshine on monthly and annual scales. Results indicate that instrument change is mainly responsible for three shifts in total solar radiation at or around 1968, 1972, and 1990, while station relocation does not play a significant role. Moreover, a gradual decline in total solar radiation in the early 1980s, around 1983, is detected using the sequential algorithm. The non-homogeneity effect of instrument change is also detected in monthly total solar radiation series. Therefore, in studies of solar radiation, we must not only respect the raw data, but also fully consider the homogeneity of the data. Excluding non-homogeneity is necessary to obtain reliable analyses of climate change.

Keywords Tianjin, Total solar radiation data, Homogeneity analysis

1 引言

气候资料的可靠性和准确性是进行气候变化研究及气候预测的基础, 一个均一的气候时间序列是仅包含天气和气候变化的序列 (Conrad and Pollak,

1950), 但长期以来, 由于观测仪器类型变更、观测手段变化、台站迁移及台站周围环境改变等非气候因素的影响 (Jones et al., 1985; Karl and Williams, 1987; Gullett et al., 1990; Heino, 1999; 刘小宁等, 2005), 导致大部分长时间气候序列不能够真实地代表气候变化特征与规律, 造成气候变化监测结果的

收稿日期 2014-04-02; 网络预出版日期 2014-09-23

资助项目 天津市气象局科研课题项目 201302, 公益性行业 (气象) 科研专项 GYHY201206031

作者简介 司鹏, 女, 1983 年出生, 硕士, 工程师, 主要从事城市气候变化、气候资料分析处理等方面的研究。E-mail: spsbox@163.com

歪曲 (Easterling and Peterson, 1995a; Peterson et al., 1998; Yan et al., 2001; Peterson, 2003; Li et al., 2009; 李庆祥, 2011)。早在 20 世纪 80 年代, 国外学者已经对气候资料的均一性开展了大量的研究工作。Alexandersson (1986) 研究表明, 去除显著间断点的气候序列能够更为准确并且更容易进行气候要素分析。Peterson et al. (1998) 在总结 20 世纪 80~90 年代地面台站气候数据均一性订正方法与技术时, 指出对于单站或区域气候分析中, 均一性订正前、后的地面气候观测资料的趋势变化存在显著差异。另外, 在 Caussinus and Mestre (2004)、Jones et al. (2008) 的研究中均强调了对气候时间序列进行均一性分析的重要性和必要性。近年来, 我国气象工作者针对区域气温、降水、风速等地面观测要素及历史探空资料的均一性分析也开展了尝试性的研究 (翟盘茂, 1997; 李庆祥等, 2005; Li and Yan, 2009, 2010; 郭艳君等, 2009; 曹丽娟等, 2010; Yan et al., 2010; Li et al., 2011, 2014; 辛渝等, 2012), 特别是对气温和降水数据的均一性研究已经取得了重要进展, 建立了中国均一化历史气温和降水数据集 (李庆祥等, 2012; Xu et al., 2013), 但对于局地 (单站) 气象要素的均一性研究甚少。

太阳辐射能是地球大气最重要的能量来源, 也是地面气候形成的重要因子之一。因此, 相对均一的太阳辐射资料才能够真实地代表能源气候的变化特征与规律。然而, 对于辐射观测仪器来说, 20 世纪 90 年代初我国进行了大规模地辐射仪器更换, 由原苏式或仿苏式辐射仪变换为自动遥测辐射仪。天津作为中国“北方经济中心”, 与北京同为环渤海经济圈的核心城市, 20 世纪 90 年代以来社会经济一直处于快速发展形势, 随之带来的地面台站周围环境的变化及迁站等势必会对观测到的气候时间序列的均一性产生影响。查阅台站历史沿革数据, 发现天津辐射站除了存在仪器变更外, 在 20 世纪 90 年代初和 21 世纪初期存在 2 次迁站现象。因此, 天津地区太阳总辐射资料的均一性状况如何是目前亟需探讨的问题。

2 资料

研究中用到的气候资料是由国家气象信息中心提供的天津地区 1 个辐射站 1959~2012 年逐月

太阳总辐射资料和 13 个地面气象站建站以来至 2012 年的逐月日照百分率资料及其台站元数据, 其经过严格的质量检测、质量控制以及疑误数据的更正, 确保了原始观测资料的客观合理。其中, 台站元数据资料用来描述各气象台站的历史沿革信息, 作为判断太阳总辐射、日照百分率资料均一性检验结果是否合理的科学依据。

3 均一性分析方法

气候时间序列中的非均一性既可能是突然不连续的间断点, 也可能是趋势的渐变 (Aguilar et al., 2003)。台站迁移和观测仪器变更等非气候因素影响, 具有显著的突变特征, 而台站周围环境的改变相对于前者具有渐变的特征。因此, 文中分别从非气候因素的突变和渐变影响两个方面对天津地区太阳总辐射资料的均一性状况进行分析。

3.1 突变因素影响的检验

研究中通过建立参考序列作为真实气候变化的参照, 利用惩罚最大 t 检验 (penalized maximal t -test, PMT) (Wang et al., 2007), 结合台站元数据, 对太阳总辐射序列中的突变影响进行检验。这里采用鞠晓慧等 (2006) 的研究方法, 利用日照百分率资料建立参考序列。

3.1.1 参考序列的建立

首先, 为保证参考序列尽可能均一, 研究中采用 Easterling and Peterson (1995a, 1995b) 的研究方法 (简称 E-P 技术), 结合台站元数据资料, 对天津地区 13 个地面气象站自建站以来至 2012 年的逐月日照百分率资料进行均一性检验, 同时利用 Student t 检验对已检测出的断点进行再次的显著性确认, 对其中存在显著间断点的台站进行剔除。另外, 考虑到日照百分率序列与太阳总辐射序列的时间一致性问题 (太阳总辐射资料起始于 1959 年), 最终选取序列相对均一且时间较长的东丽站 (54526)、天津站 (54527)、塘沽站 (54623) 3 个地面气象站的日照百分率资料作为建立参考序列的候选资料。为确定候选资料的真实代表性, 研究中分别对选取的 3 个台站年、月日照百分率资料与太阳总辐射年、月总量做相关性检验, 结果显示其均呈显著正相关 (显著性水平为 $\alpha = 0.05$)。因此, 利用公式 (1) (李庆祥等, 2008) 分别对 3 个台站年、月日照百分率资料进行加权平均建立参考序列

r_i (结果如图 1 所示):

$$r_i = \frac{\sum_{j=1}^3 (\rho_j^2 X_{ji})}{\sum_{j=1}^3 \rho_j^2}, \quad (1)$$

其中, ρ_j 是太阳总辐射序列与第 j 个候选台站日照百分率序列的相关系数, X_{ji} 是第 j 个候选台站的日照百分率序列。

气候变化的空间相关性和同一测站不同气候要素变化的协调性能够作为判断时间序列是否均一的依据之一。从图 1 中可以看出, 近 50 多年来, 利用日照百分率加权平均得到的参考序列与太阳总辐射年、月总量序列的年代际变化和趋势变化特

点基本一致, 并且从上述分析得到, 选取的日照百分率序列与总辐射序列有很好的相关性。因此, 可以说明研究中建立的参考序列能够作为太阳总辐射真实气候变化的参照, 通过检验与之显著不协调的信号来反映太阳总辐射年、月总量序列中的不均一性。

3.1.2 惩罚最大 t 检验

惩罚最大 t 检验 (penalized maximal t -test, PMT) (Wang et al., 2007) 为 RHtestsV3 软件包提供, 其适用于有参考序列的检验过程, 主要基于断点检验函数 (FindU.w Ref、FindUD.w Ref) 及断点显著性

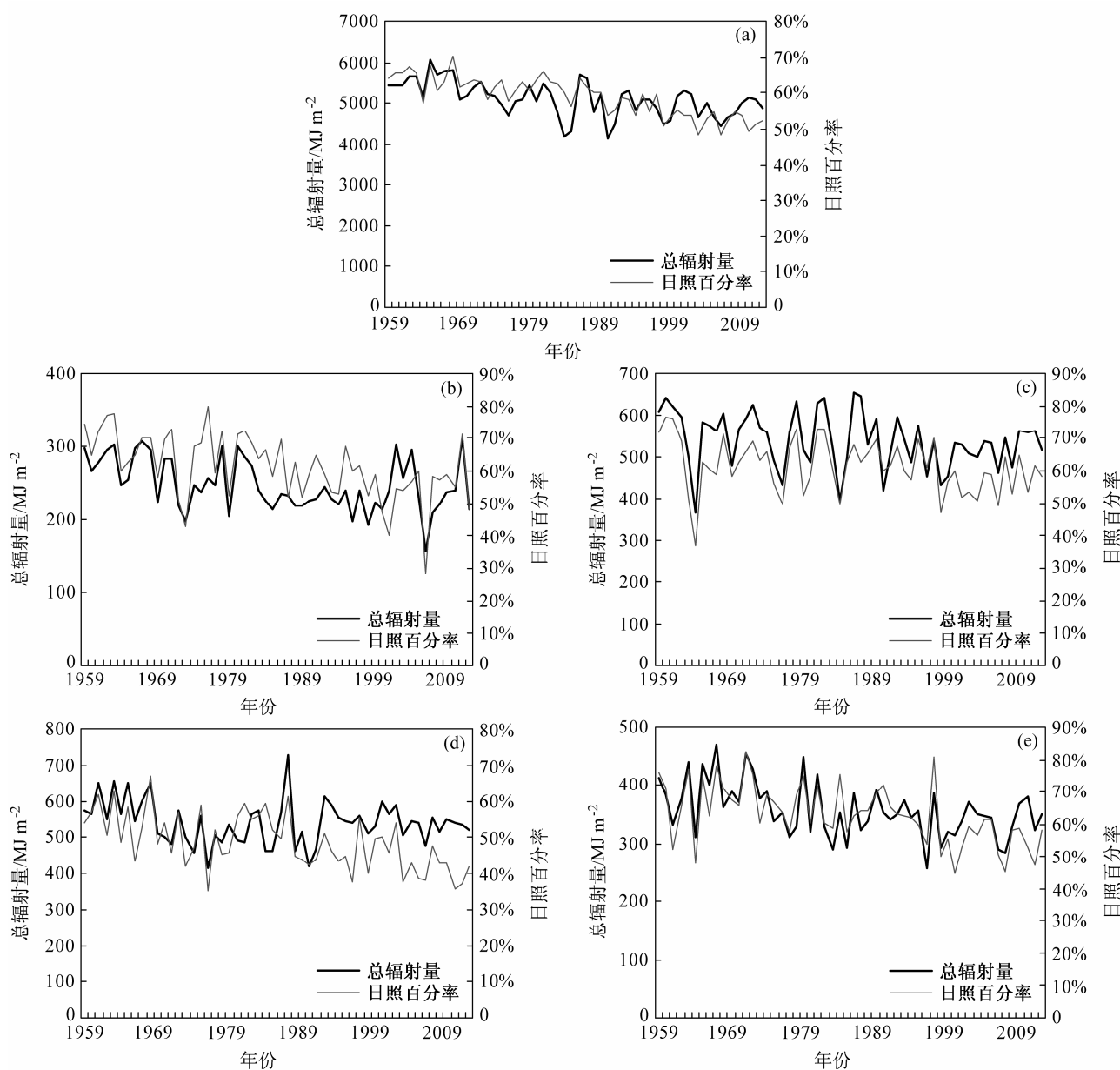


图 1 1959~2012 年太阳总辐射 (a) 年、(b) 1 月、(c) 4 月、(d) 7 月、(e) 10 月总量序列与参考序列

Fig. 1 (a) Annual and (b) Jan, (c) Apr, (d) Jul, and (e) Oct monthly total solar radiation series and reference series during 1959–2012

评估函数 (StepSize.w Ref) 3 类函数来检验气候时间序列的均一性。该方法已被前人广泛应用于气温、降水、风速及相对湿度等气候序列的均一性分析中 (Alexander et al., 2006; Wan et al., 2010; Dai et al., 2011; Kuglitsch et al., 2012; Wang et al., 2013), 其能够经验性地考虑到序列的滞后一阶自相关导致的统计量检验误差, 并嵌入了多元线性回归方法, 通过使用经验性的惩罚函数, 极大地减小伪识别率和检验功效不平衡分布的问题 (Wang, 2008)。检验步骤如下:

(1) 调用函数 FindU.w Ref 检验太阳总辐射年(月)总量序列与参考序列的差值(差值序列)中所有显著的间断点, 这种间断点可以没有元数据支持, 称之为“Type-1”断点。如果这一步没有显著间断点被检测出, 那么可以认为该序列是相对均一的, 不用进行以下检验。

(2) 调用函数 FindUD.w Ref 检验太阳总辐射年(月)总量序列中所有显著的间断点, 这种间断点需要有可靠的元数据支持, 称之为“Type-0”断点。

(3) 查阅元数据, 保留有确凿迁站、仪器变更等记录支持的“Type-0”断点以及统计显著的“Type-1”断点。

(4) 调用函数 StepSize.w Ref 评估在第 3) 步中被保留的“Type-1”和“Type-0”断点的显著性和突变幅度, 筛选出显著的间断点。

(5) 分析第(4)步筛选出的间断点, 去除突变幅度最小且不显著的间断点, 然后, 重新运行函数 StepSize.w Ref, 直至每一个断点都被认为是统计显著的。

3.2 趋势渐变因素影响的检验

Rodionov (2004) 研发的一种顺序算法对趋势渐变具有较好的检验效果, 并且在气温序列趋势变化检验中已得到很好的应用 (Li et al., 2010; Si et al., 2012)。因此, 文中利用顺序算法对天津地区太阳总辐射年、月总量序列的趋势渐变进行检验。顺序算法的检验步骤如下:

(1) 设定序列突变检验的界限步长 $l=10$, 该参数类似于低通滤波中的界限点。

(2) 计算两个连续突变平均值的差值 d_{inf} , 用于 t 检验的显著性评估:

$$d_{\text{inf}} = t \sqrt{\frac{2\sigma_l^2}{l}}, \quad (2)$$

其中, 统计量 t 为遵从自由度为 $2l-2$ 、显著性水平为 p 的 t 分布的值, σ_l^2 为整条被检测序列滑动步长 l 年的方差平均值, 这里我们假设两个连续突变的方差一致, 并且等于 σ_l^2 。

(3) 计算最初的 l 步长序列要素值的平均值 $\bar{X}_{R1}$ 作为评估假设的突变, 对于每个起始于时间点为 $i=l+1$ 的要素值 x_i , 检测其是否超出 $\bar{X}'_{R2} = \bar{X}_{R1} \pm d_{\text{inf}}$ 范围。如果没有, 那么目前假设的突变 $R1$ 没有改变。这时, 重新计算平均值 $\bar{X}_{R1}$, 包括新的要素值 x_i 和 $l-1$ 之前的所有要素值的序列。如果下一个新的要素值 x_i 超出 $\bar{X}'_{R2} = \bar{X}_{R1} \pm d_{\text{inf}}$ 范围, 那么该要素值所在的时间点 j 被假设为新的突变 $R2$ 。

(4) 时间点 j 之后的每一个要素值 x_i ($i>j$) 都被用来检测突变 $R2$ 假设的显著性。如果序列 $x_i - \bar{X}'_{R2}$ 符号与突变 $R2$ 所在时间点一致, 那么其增加了突变 $R2$ 发生的可信度, 反之亦然。突变 $R2$ 可信度利用突变指数 (Regime Shift Index, RSI, R_{SI}) 值表示:

$$R_{\text{SI},j} = \sum_{i=j}^{j+m} \frac{x_i^*}{l\sigma_l}, \quad m=0,1,\dots,l-1, \quad (3)$$

其中, $x_i^* = x_i - \bar{X}'_{R2}$ (如果突变是上升的, 情况 1), 或 $x_i^* = \bar{X}'_{R2} - x_i$ (如果突变是下降的, 情况 2)。如果从 $i=j+1$ 到 $i=j+l-1$ 的任意时间点, R_{SI} 变为负值 (针对情况 1), 或者 R_{SI} 变为正值 (针对情况 2), 那么进行第 (5) 步, 否则, 进行第 (6) 步。

(5) 符号相反的 R_{SI} 值意味着时间点 j 的突变 $R2$ 检测不显著, 将 R_{SI} 值设置为 0。这时重新计算包括新的要素值 x_j 在内的序列平均值 $\bar{X}_{R1}$ 。同样, 如第 (3) 步, 检测始于 $i=j+1$ 要素值 x_i 是否超出 $\bar{X}_{R1} + d_{\text{inf}}$ 范围。

(6) 符号一致的 R_{SI} 值意味着时间点 j 的突变 $R2$ 检测显著。以时间点 j 为基础点, 计算新的平均值 $\bar{X}_{R2}$ 作为评估下一个突变 $R3$, 其时间点始于 $i=j+1$ 。计算过程从第 (3) 步到第 (6) 步循环执行, 直到整个时间序列的要素值都被检验过为止。

4 检验结果

4.1 突变因素影响的检验结果

表 1 给出利用 PMT 法对天津 1959~2012 年太阳总辐射年、月总量序列检验得到的断点年份、断点个数及突变幅度。可以看出, 明显的断点出现在

1968~1969 年、1972~1973 年、1989 年。其中，1968 年仪器变更的影响较为明显，造成了年、1 月、2 月、6 月、7 月、8 月总辐射量序列的不连续。同样，1972 年和 1990 年辐射观测仪器的转换也造成了不同程度的影响，分别导致 10~12 月、4 月和 6 月总辐射量序列产生不连续现象。此外，据台站历史沿革数据显示，天津辐射站在 1970 年、1995 年、2000 年、2001 年、2003 年、2004 年、2006 年、2007 年、2010 年同样存在仪器变更现象，但由于这几次仪器变更是相同类型的仪器更换，因此检验并没有发现其造成太阳总辐射序列产生突变。图 2 给出太阳总辐射年总量、6 月、10 月太阳总辐射量与日照百分率差值序列的突变幅度检验，分别显示出年序列（1968 年，图 2a）、6 月（1972 年和 1990 年，图 2b）、10 月（1968 年，图 2c）3 次仪器变更造成了总辐射序列产生幅度较大的突变，并且造成了太阳总辐射量具有明显的下降趋势，其中，年总辐射量下降幅度为 604.0 MJ/m^2 ，6 月出现了两次断点（图 2b），其幅度分别为 -73.7 MJ/m^2 、 -45.0 MJ/m^2 。然而，受仪器变更影响，夏季（6~8 月）也是序列突变幅度最为明显的月份（表 1）。

表 1 采用 PMT 法对天津 1959~2012 年太阳总辐射年、月总量序列突变的检验结果

Table 1 Changepoints identified by penalized maximal *t*-test (PMT) in annual and monthly total solar radiation series in Tianjin during 1959–2012

断点年份		断点个数	突变幅度/ MJ m^{-2}
年	1968 年	1	-604.0
1 月	1968 年	1	-34.8
2 月	1968 年	1	-45.9
3 月	无	0	无
4 月	1989 年	1	-38.5
5 月	无	0	无
6 月	1968 年、1989 年	2	-73.7、-45.0
7 月	1968 年	1	-63.7
8 月	1969 年	1	-65.3
9 月	无	0	无
10 月	1972 年	1	-46.0
11 月	1973 年	1	-27.6
12 月	1973 年	1	-29.3

注：表中突变幅度是对太阳总辐射序列与参考序列的差值序列进行的检测，显著性水平 $\alpha=0.05$ 。

值得注意的是，通过序列突变检验并没有得到迁站造成的影响。自 1959 年以来，天津辐射观测站在 1992 年和 2010 年发生过 2 次迁站。1992 年由

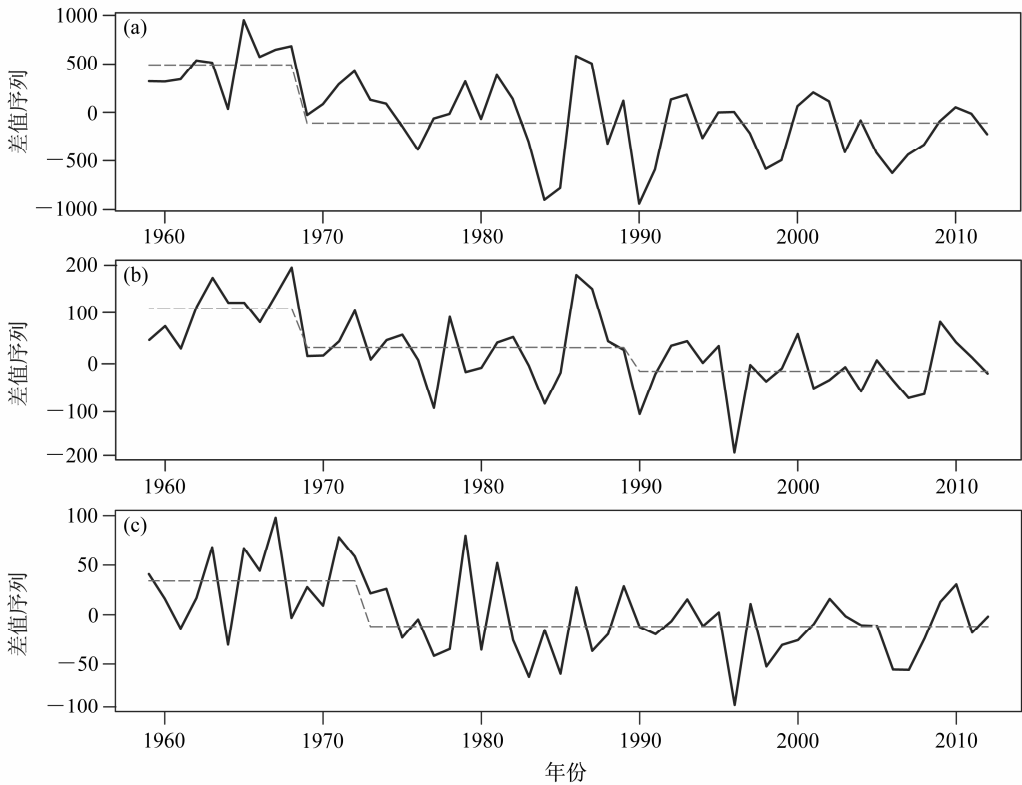


图 2 采用 PMT 法对 (a) 年、(b) 6 月、(c) 10 月太阳总辐射距平序列与日照百分率距平序列的差值（实线）的均一性检验（虚线为差值序列的多元回归）
Fig. 2 Changepoints identified by PMT in (a) annual, (b) Jun, and (c) Oct total solar radiation minus percentage of sunshine series (solid lines) with their multi-phase regression (dashed lines)

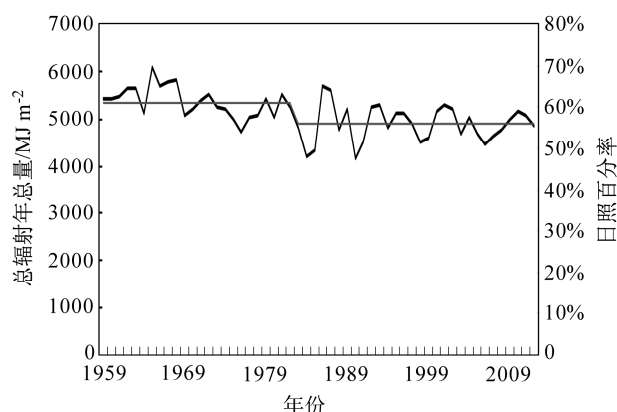


图3 采用顺序算法对天津太阳总辐射年总量序列的趋势渐变检验（显著性水平 $\alpha=0.05$ ）

Fig. 3 Climate shifts tested by equential algorithm in annual total solar radiation series in Tianjin (at the 0.05 significance level)

天津市迁到城郊，但是从辐射要素的观测环境来看，没有发生明显的变化，观测场周围环境均比较开阔，没有高大建筑物的遮挡，日照条件相当；而2010年的新迁站址则是在原站址西南方向1500 m处，距离较近，探测环境一致。因此，对于太阳总辐射资料来说，这2次迁站并不能对其序列造成显著的突变影响。

4.2 趋势渐变因素影响的检验结果

表2给出采用顺序算法检验得到的天津太阳总辐射年、月总量序列趋势渐变的检验结果。可以看出，太阳总辐射年总量的趋势渐变发生在20世纪80年代初（1983年前后），该结果与杨建莹等（2011）利用Mann-Kendall方法对天津地区辐射序列的趋势检验一致。月总量序列的趋势渐变也主要发生在20世纪80年代初期（1983年前后），而1968年、1972年、1990年3次仪器变更造成的显著突变也反映在此类检验中，考虑到序列均一性检验方法的通用性，因此这是合理的。另外，从图3年总辐射量的趋势检验曲线变化来看，突变后的天津地区太阳总辐射有明显的下降趋势，其幅度为463.8 MJ/m²。同样，与PMT法检验结果一致，6月、7月也是太阳总辐射趋势减少较为明显的月份（表2）。

5 结论

本文以天津地区为研究对象，通过惩罚最大 t 检验（PMT）和顺序算法两种不同的气候时间序

表2 采用顺序算法对天津1959~2012年太阳总辐射年、月总量序列趋势渐变的检验结果

Table 2 Climate shifts tested by sequential algorithm in annual and monthly total solar radiation series in Tianjin during 1959–2012

	断点年份	断点个数	突变幅度/MJ m ⁻²
年	1983年	1	-463.8
1月	1972年	1	-41.9
2月	1969年	1	-58.2
3月	1983年	1	-55.9
4月	无	0	无
5月	1983年	1	-69.0
6月	1969年	1	-107.2
7月	1969年	1	-72.2
8月	无	0	无
9月	1983年	1	-54.8
10月	1975年	1	-54.4
11月	1990年	1	-30.9
12月	1984年	1	-33.8

注：表中突变检验的显著性水平 $\alpha=0.05$ 。

列均一性检验方法，对1959~2012年太阳总辐射年、月总量序列的均一性进行了分析，得到如下结论：

（1）利用PMT法对天津地区1959~2012年总辐射年、月总量资料的均一性检验得到，辐射观测仪器的变更造成了太阳总辐射序列出现了不连续的间断点，主要发生在1968年、1972年、1990年3次仪器变更年份或其附近年份，而台站迁移则没有造成显著影响。另外，受仪器变更影响，天津地区的太阳总辐射量有明显的下降趋势，夏季（6~8月）序列突变幅度最为明显。

（2）利用顺序算法检验得到，天津地区太阳总辐射年、月总量序列在20世纪80年代初（1983年前后）出现了趋势减少的渐变，并且与PMT法检验结果一致，6月、7月的趋势减少幅度也是最为明显的。

参考文献（References）

- Aguilar E, Auer I, Brunet M, et al. 2003. Guidance on metadata and homogenization [R]. WMO-TD No. 1186, WCDMP No. 53. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, 29.
- Alexander L V, Zhang X, Peterson T C, et al. 2006. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation [J]. J. Geophys. Res. Atmos., 111 (D5): 05109.
- Alexandersson H. 1986. A homogeneity test applied to precipitation data [J]. International Journal of Climatology, 6 (6): 661–675.
- 曹丽娟, 鞠晓慧, 刘小宁, 等. 2010. PMFT方法对我国年平均风速的均

- 一性检验 [J]. 气象, 36 (10): 53–57. Cao Lijuan, Ju Xiaohui, Liu Xiaoning, et al. 2010. Penalized Maximal F Test for the homogeneity study of the annual mean wind speed over China [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 36 (10): 53–57.
- Caussinus H, Mestre O. 2004. Detection and correction of artificial shifts in climate series [J]. Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics), 53 (3): 405–425.
- Conrad V, Pollak C. 1950. Methods in Climatology 2nd ed. [M]. Cambridge: Harvard University Press, 459.
- Dai A G, Wang J H, Thorne P W, et al. 2011. A new approach to homogenize daily radiosonde humidity data [J]. J. Climate, 24 (4): 965–991.
- Easterling D R, Peterson T C. 1995a. A new method for detecting and adjusting for undocumented discontinuities in climatological time series [J]. International Journal of Climatology, 15 (4): 369–377.
- Easterling D R, Peterson T C. 1995b. The effect of artificial discontinuities on recent trends in minimum and maximum temperatures [J]. Atmospheric Research, 37 (1–3): 19–26.
- Gullett D W, Vincent L, Sajecki P J F. 1990. Testing for homogeneity in temperature time series at Canadian Climate Stations [R]. CCC Report No. 90–4. Ontario: Atmospheric Environment Service, 43.
- 郭艳君, 李庆祥, 丁一汇. 2009. 探空资料中的人为误差对中国温度长期变化趋势的影响 [J]. 大气科学, 33 (6): 1309–1318. Guo Yanjun, Li Qingxiang, Ding Yihui. 2009. The effect of artificial bias on free air temperature trend derived from historical radiosonde data in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (6): 1309–1318.
- Heino R. 1999. Homogeneity of the long-term urban data records [J]. Atmos. Environ., 33 (24–25): 3879–3883.
- Jones P D, Raper S C B, Santer B, et al. 1985. A grid point surface air temperature data set for the Northern Hemisphere [R]. Technical Report TRO22. Washington D. C., U. S.: Department of Energy, 251.
- Jones P D, Lister D H, Li Q X. 2008. Urbanization effects in large-scale temperature records, with an emphasis on China [J]. J. Geophys. Res., 113 (D16): 280–288.
- 鞠晓慧, 屠其璞, 李庆祥. 2006. 我国太阳总辐射月总量资料的均一性检验及订正 [J]. 南京气象学院学报, 29 (3): 336–341. Ju Xiaohui, Tu Qipu, Li Qingxiang. 2006. Homogeneity test and reduction of monthly total solar radiation over China [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 29 (3): 336–341.
- Karl T R, Williams Jr C N. 1987. An approach to adjusting climatological time series for discontinuous inhomogeneities [J]. J. Climate Appl. Meteor., 26 (12): 1744–1763.
- Kuglitsch F G, Auchmann R, Bleisch R, et al. 2012. Break detection of annual Swiss temperature series [J]. J. Geophys. Res. Atmos., 117 (D13): 110–117.
- 李庆祥. 2011. 气候资料均一性研究导论 [M]. 北京: 气象出版社, 115. Li Qingxiang. 2011. The Introduction to the Research of Climate Data Homogenization (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 115.
- 李庆祥, Menne M J, Williams Jr C N, 等. 2005. 利用多模式对中国气温序列中不连续点的检测 [J]. 气候与环境研究, 10 (4): 736–742. Li Qingxiang, Menne M J, Williams Jr C N, et al. 2005. Detection of discontinuities in Chinese temperature series using a multiple test approach [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 10 (4): 736–742.
- 李庆祥, 江志红, 黄群, 等. 2008. 长江三角洲地区降水资料的均一性检验与订正试验 [J]. 应用气象学报, 19 (2): 219–226. Li Qingxiang, Jiang Zhihong, Huang Qun, et al. 2008. The experimental detecting and adjusting of the precipitation data homogeneity in the Yangtze Delta [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 19 (2): 219–226.
- Li Q X, Zhang H Z, Liu X N, et al. 2009. A mainland China homogenized historical temperature dataset of 1951–2004 [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 90 (8): 1062–1065.
- Li Q X, Li W, Si P, et al. 2010. Assessment of surface air warming in northeast China, with emphasis on the impacts of urbanization [J]. Theor. Appl. Climatol., 99 (3–4): 469–478.
- 李庆祥, 彭嘉栋, 沈艳. 2012. 1900–2009 年中国均一化逐月降水数据集研制 [J]. 地理学报, 67 (3): 301–311. Li Qingxiang, Peng Jiadong, Shen Yan. 2012. Development of homogenized monthly precipitation dataset in China during 1900–2009 [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 67 (3): 301–311.
- Li Z, Yan Z W. 2009. Homogenized China daily mean/maximum/minimum temperature series 1960–2008 [J]. Atmospheric and Ocean Science Letters, 2 (4): 237–243.
- Li Z, Yan Z W. 2010. Application of multiple analyses of series for homogenization (MASH) to Beijing daily temperature series 1960–2006 [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 27 (4): 777–787.
- Li Z, Yan Z W, Tu K, et al. 2011. Changes of wind speed and extremes in Beijing during 1960–2008 based on homogenized observations [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 28 (2): 408–420.
- Li Z, Yan Z W, Cao L J, et al. 2014. Adjusting inhomogeneous daily temperature variability using wavelet analysis [J]. International Journal of Climatology, 34 (4): 1196–1207.
- 刘小宁, 张洪政, 李庆祥. 2005. 不同方法计算的气温平均值差异分析 [J]. 应用气象学报, 16 (3): 345–356. Liu Xiaoning, Zhang Hongzheng, Li Qingxiang. 2005. Analyses on average temperature difference resulted from different calculation methods [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 16 (3): 345–356.
- Peterson T C. 2003. Assessment of urban versus rural in situ surface temperatures in the contiguous United States: No difference found [J]. J. Climate, 16 (18): 2941–2959.
- Peterson T C, Easterling D R, Karl T R, et al. 1998. Homogeneity adjustments of in situ atmospheric climate data: A review [J]. International Journal of Climatology, 18 (13): 1493–1517.
- Rodionov S N. 2004. A sequential algorithm for testing climate regime shifts [J]. Geophys. Res. Lett., 31 (9): L09204.
- Si P, Yu R, Liang D P, et al. 2012. The combined influence of background climate and urbanization on the regional warming in Southeast China [J]. Journal of Geographical Sciences, 22 (2): 245–260.
- Wan H, Wang X L, Swail V R. 2010. Homogenization and trend analysis of Canadian near-surface wind speeds [J]. J. Climate, 23 (5): 1209–1225.
- Wang X L. 2008. Accounting for autocorrelation in detecting mean-shifts in climate data series using the penalized maximal t or F test [J]. Journal of

- Applied Meteorology and Climatology, 47 (9): 2423–2444.
- Wang X L, Wen Q H, Wu Y H. 2007. Penalized maximal t test for detecting undocumented mean change in climate data series [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 46 (6): 916–931.
- Wang X L, Feng Y, Vincent L A. 2013. Observed changes in one-in-20 year extremes of Canadian surface air temperatures [J]. Atmos. Ocean, 52 (3): 222–231, doi: 10.1080/07055900.2013.818526.
- 辛渝, 陈洪武, 李元鹏, 等. 2012. 新疆气象站年均风速均一化订正与基本风压估算初探 [J]. 气候与环境研究, 17 (2): 184–196. Xin Yu, Chen Hongwu, Li Yuanpeng, et al. 2012. Homogeneity adjustment of annual mean wind speed and elementary calculation of fundamental wind pressure over Xinjiang meteorological stations [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (2): 184–196.
- Xu W H, Li Q X, Wang X L, et al. 2013. Homogenization of Chinese daily surface air temperatures and analysis of trends in the extreme temperature indices [J]. J. Geophys. Res., 118 (17): 9708–9720, doi: 10.1002/jgrd.50791.
- Yan Z W, Yang C, Phil J. 2001. Influence of inhomogeneity on the estimation of mean and extreme temperature trends in Beijing and Shanghai [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 18 (3): 309–322.
- Yan Z W, Li Z, Li Q X, et al. 2010. Effects of site change and urbanisation in the Beijing temperature series 1977–2006 [J]. International Journal of Climatology, 30 (8): 1226–1234.
- 杨建莹, 刘勤, 严昌荣, 等. 2011. 近 48a 华北区太阳辐射量时空格局的变化特征 [J]. 生态学报, 31 (10): 2748–2756. Yang Jianying, Liu Qin, Yan Changrong, et al. 2011. Spatial and temporal variation of solar radiation in recent 48 years in North China [J]. Acta Ecologica Sinica (in Chinese), 31 (10): 2748–2756.
- 翟盘茂. 1997. 中国历史探空资料中的一些过失误差及偏差问题 [J]. 气象学报, 55 (5): 563–572. Zhai Panmao. 1997. Some errors and deviations problems in Chinese historical radiosonde data [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 55 (5): 563–572.