

利用多模式对中国气温序列中不连续点的检测

李庆祥^{1,2} Matthew J. Menne³
Claude N. Williams Jr³ Bomin Sun³

1 中国气象局气候研究开放实验室, 北京 100081

2 中国气象局国家气象信息中心, 北京 100081

3 NOAA/ National Climatic Data Center, 151 Patton Ave. Asheville, NC 28801

摘要 发展了一种对元数据依赖程度较小的气候序列均一化思路, 在缺乏元数据的基础上, 采取3种不同的方法, 对中国东南部地区年平均最高、最低气温序列进行了均一性检验; 并对其中不连续的气温序列进行了订正。对比表明, 订正后序列较订正前更为合理。在检验过程中发现, 对于最低气温检验可以明显得出比最高气温更多的不连续点。为了进一步认识这个问题, 对此进行了进一步分析, 认为最低温度对变化更为敏感主要是由于其物理特征: 最低温度一般出现在夜间, 夜间大气较为稳定, 因此一些变化(如仪器, 迁站)可能引起明显的不连续现象, 而最高气温往往出现在白天, 因此大气混合比较充分, 空间的均一性要明显强于最低温度。另外, 热岛现象、台站密度等因素均是影响气温序列均一化的因素。

关键词 气温序列 极端气温 均一化

文章编号 1006-9585 (2005) 04-0736-07 **中图分类号** P468 **文献标识码** A

Detection of Discontinuities in Chinese Temperature Series Using A Multiple Test Approach

LI Qing-Xiang^{1,2}, Matthew J. Menne³, Claude N. Williams Jr³, and Bomin Sun³

1 *Laboratory for Climate Studies, China Meteorological Administration, Beijing 100081*

2 *National Meteorological Information Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081*

3 *NOAA/ National Climatic Data Center, 151 Patton Ave. Asheville, NC 28801*

Abstract Annual average daily maximum and minimum in situ temperature time series from southeastern China were evaluated for artificial discontinuities using three undocumented change point test statistics. Breakpoints in each series were identified via comparison to a reference series based on values from a number of nearby stations. Relative change point adjustments were estimated from a procedure previously used only with respect to documented change points. Under the requirement of agreement between test statistics, a list of artificial change points was generated using the full collection of series. Each target series then was adjusted accounting for change points in series from nearby stations that otherwise could bias estimates of discontinuity amplitude. A spatial comparison of linear trends from adjusted series suggests that major artificial discontinuities were accounted for in the homogenization process. However, a larger number of relative change points were detected in annual average minimum temperature series than in average maximum temperature series. It is possible that minimum temperature fields are more sensitive to changes in measurement practice than maximum temperature fields. A likely explanation is that local climate

收稿日期 2005-07-26 收到, 2005-12-02 收到修定稿

资助项目 国家“十五”科技攻关项目课题 2001BA611B-01 和中国气象局气候变化专项基金项目 CCSF2005-2-QH17

作者简介 李庆祥, 男, 1973 年出生, 硕士, 高级工程师, 主要从事气候资料分析及气候变化研究。E-mail: liqx@cma.gov.cn

effects are less evident when the atmospheric boundary layer is well mixed, which is more common during day-time. Fewer relative change points also were revealed when a larger number of nearby series were used to form the composite references. In this case, it is likely that the composite reference series is more insulated from change points in its component series than the larger number of component series. Consequently, the number of change points falsely attributed to the target series is reduced with a larger number of reference series components. Finally, although a zero slope model was assumed for the differences formed between target and reference series, the possibility of local trends was cursorily examined given previous evidence of urban heat island (i. e., local) trends in this region.

Key words temperature series, extreme temperature, homogenization

1 引言

近年来国内外很多专家致力于气候资料均一化方法的研究，取得了一系列成果，许多方法应用于各国气候资料业务、科研部门的研究，极大地推进了气候研究的发展^[1~6]。这些方法一些是基于详细的元数据支持，而有些则是无元数据。对于中国气象台站，元数据的收集还不够完整，因此要完全依靠元数据信息来对气候序列进行均一化，尚有相当难度；尤其是对百年尺度的气候数据的均一性研究尚是一个空白。因此，研究、选取不依赖于元数据的不连续点的检验方法，对序列进行研究仍是资料工作者努力的方向之一。

2 均一化思路

上述许多均一性检验方法都在各个国家的气候资料业务中发挥了非常大的作用，许多广泛应用的全球数据集（如美国的 GHCN、GDCN、CARDS，英国的全球格点气温、降水数据集和各国标准气候数据集^[7~9]）在建立时均得以充分借鉴。但是，气候资料均一性在不同时间、空间尺度上的表现和造成不确定性的幅度是不同的。对于全球气候变化数据集，由于相对来说，相对均一的数据序列或序列段毕竟占大多数，因此如果将那些非常大的不连续点去除，其分析结果就可以被接受；而对于区域甚至局地气候变化分析时，情况就显然不同，过度的订正或者不足的订正反而将给序列带入人为的不连续点，起不到减少非均一性和不确定性的目的。均一性检验和订正方法也一直不断地得以发展和创新，Karl 和 Wil-

liams^[5]针对美国历史气候网提出了一种依赖于元数据的检验、订正方法（后面将涉及），这种方法的好处是，订正数据序列可以反映更多的局地气候变化特征，但不足之处就是订正过程复杂，计算非常麻烦。Vincent^[6]提出了一种多线性回归方法用于检验气温序列的均一性，提出了订正方法并应用到加拿大气温序列的订正。最近 Lund 和 Reeves^[10]对 Easterling 和 Peterson 采用的二相回归模式检验方法的统计量和统计显著性水平进行了修改，使得检验结果更加合理，Wang^[11]也通过一个个例对这种修改的效果进行了肯定。Menne 等^[12]等对该方法进行了进一步修正，使得它能够较好地应用于实际的气候序列均一性检验。

集合上述许多科学家的研究成果和各种不同方法的特点，提出了一种较为客观的思路：通过采取不同的数学统计方法（二相回归模式^[10]，极大似然模式^[1]，多线性回归模式^[6]），判断序列中存在的^{不连续点}，检验中 3 种方法如果有两种方法检验出同一个不连续点，则认为它就是合理的不连续点，否则认为是人为不连续点。采用这种方法，对所有参与计算台站（不管是参考台站还是目标台站）的最高、最低气温序列都进行了检验。Karl 等^[5]利用均一的序列片断来对可能不连续的序列进行订正的方案虽然较为复杂，但最终其订正结果可以观察到更为局地的气候变化特征^[6]，基于此，采取该方法来对本文研究的台站网络进行订正。

3 应用试验

3.1 资料

全国气象台站具体情况各不相同，因此在进

行均一性分析时, 还需考虑到这种地理差异。中国东南部地区(35°N 以南, 105°E 以东, 不含港、澳、台)地形较为简单、台站密度较大, 平均温度均一性较其他地区好^[13,14], 因此首先选取该地区作订正试验。所选资料为该地区 1960 年 1 月~2001 年 12 月年平均气温, 资料通过中国国家气象中心气象资料室的质量控制。为了计算方便, 我们只选取了 1960 年以来 42 年的无缺测记录的 202 个台站进行研究。

3. 2 最高气温

在所有 202 个台站中, 将每个台站作为目标台站, 但同时又作为各个台站(本身除外)的备选参考台站。对每个目标台站, 根据距离远近, 选取 20 个最近的台站作为参考台站, 分别应用上述 3 种检验方法, 采取两种方法一致则认为合理的原则, 共检验得到 106 个可能不连续点, 共涉

及台站 92 个(占 45.5%左右)。也就是说 106 个可能不连续点, 至少都是由上述 3 种检验方法的两种检验所得到的。

当可能订正值超出 1 倍均方差时则作订正, 但对于那些开始年份和结束年份的 5 年内的不连续点不作订正, 如果两个不连续点之间不超过 5 年也不作订正(这样我们共得出 88 个不连续点的订正值)。可以看出, 中国东南部地区订正的幅度不大, 只有 53 个可能不连续点补偿值超过 0.2℃, 占到 60.2%左右, 而其中超过 0.5℃的不连续点只有 5 个, 占 4.7%, 超过 1.0℃的只有一个。这个订正比例是比较小的。因此可以看出, 中国东南部地区的平均最高温度的均一性是比较好的, 对于整个区域的气候变化趋势分析影响不大, 但对于个别单站气温变化进行分析时, 就会出现较大的偏差(表 1)。

表 1 部分站最高气温的订正信息
Table 1 Adjustment information of maximum temperature of some stations

台站 Station	省份 Province	纬、经度 Latitude and Longitude	不连续点(年) Discontinuities	订正值/℃ Adjust values	线性趋势比较 Differences in linear trends/ (℃/10 a)	
					订正前 Before adjustment	订正后 After adjustment
大陈岛 Dachendao	浙江 Zhejiang	28°27'N, 121°54'E	1982	-1.11	0.493	0.100
安庆 Anqing	安徽 Anhui	30°32'N, 117°03'E	1975, 1993	-0.52, -0.19	0.378	0.224
许昌 Xuchang	河南 Henan	34°01'N, 113°51'E	1981	0.83	-0.110	0.186
鄱县 Jinxian	湖北 Hubei	29°52'N, 121°34'E	1983, 1986	-0.83*	0.375	—
厦门 Xiamen	福建 Fujian	24°29'N, 118°04'E	1980	0.84	-0.053	0.248
宿县 Suxian	江苏 Jiangsu	33°38'N, 116°59'E	1976, 1995	-0.80, -0.52	0.506	0.319

* 订正值是由 1987~2001 年和 1960~1983 年之间年份计算
* Adjust value is obtained from differntes between 1987—2001 and 1960—1983

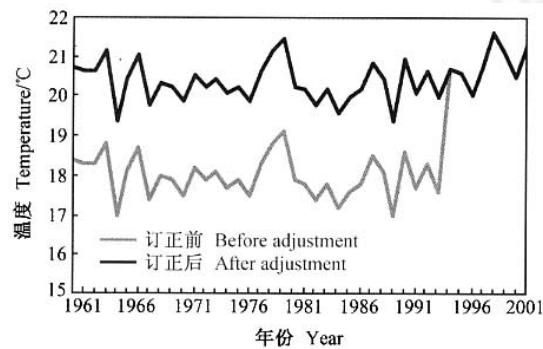


图 1 五峰(57458)站年平均最高气温订正结果对比
Fig. 1 Mean annual daily maximum temperature time series at Wufeng (57458) before (grey) and after (black) change point adjustment

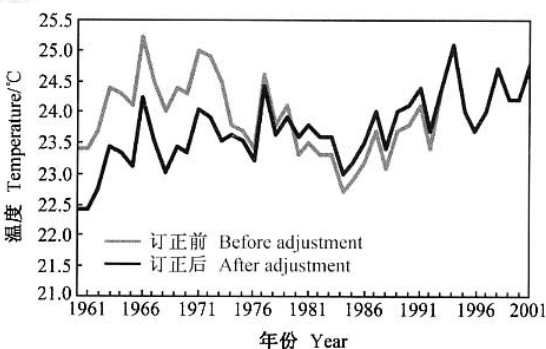


图 2 东山(59321)站年平均最低气温订正结果对比
Fig. 2 Mean annual daily minimum temperature time series at Dongshan (59321) before (grey) and after (black) change point adjustments

以订正幅度（ $-2.35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）最大的台站五峰（ 57458 ）为例（ $30^{\circ}12'\text{N}$ ， $110^{\circ}40'\text{E}$ ）（图 1），圆点虚线为原未订正序列，菱形点实线序列为订正后序列。显然，订正前曲线趋势变化较为明显，计算得到其线性趋势为 $0.583\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ，而订正后则为 $0.065\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ，根据中国气温变化区域性特点^[13,14]，显然可以看出，后者是比较合理的。又如东山（ 59321 ）有 3 个断点，分别位于 1973、1979、1992 年，3 个断点的订正值分别是： 0.97 、 0.17 和 -0.30 ，也是一个比较典型的例子（图 2），可以看出这种订正的情况。订正前、后的线性趋势分别是 $-0.028\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 和 $0.322\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ，根据该站距离最近的一个没有不连续点且地理环境与东山（ 59321 ）类似（同处中国东南沿海）的汕头（ 59316 ）作比较，后者的年最高气温 42 年线性趋势为 $0.303\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ；另外，从元数据信息来看，除鄞县（ 58562 ）外，其余断点年份附近均发生了台站迁移。从这些情况看来，对上述序列的订正是比较合理的。

从整个区域来看（图 3a），以南部，东部沿海以及长江沿岸及以北地区年均最高气温升高较为明显，其余地区年均最高温度升高不明显或呈下降趋势。在这个整体的趋势分布下，可以看到一些明显不同于附近变化趋势的突出点，出现这种

情况主要原因就是由于序列的不均一造成的。而订正以后（图 3b），整个地区最高、气温变化趋势分布的总体格局并没有发生改变，但那些明显区别于周围台站的突出点基本上被消除，这就说明我们的订正既没有影响到整个地区气候变化的特征，但对于那些明显可能不连续的气候序列进行了修正，具有一定的气候意义。

3. 3 最低气温

采用同样的方法，对相同的台站网络年平均最低温度序列进行了检验，结果表明：共检验得到 196 个可能不连续点，共涉及台站 138 个（占总台站的 68.3% 左右）。显然，最低气温序列比上述最高气温序列存在着更为严重的不连续现象。这里仍然取五峰（ 57458 ）为例来检验订正效果（图 4）。从订正前的序列上直观地可以看到两个不连续点的存在，分别位于 1983 和 1993 两个点。前面对最高气温检验中得出 1993 年为明显的不连续点，没有 1983 年不连续点。但从图形直观来看（图 3、4），二者都比较合理。从整个区域的变化来看，也明显一致，说明这种订正是有一定代表性的。

同样，中国东南部地区年均最低温度订正的幅度也较小，有 60 个可能不连续点补偿值不超过 $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，占到 37.0% 左右（根据前面的做法，共

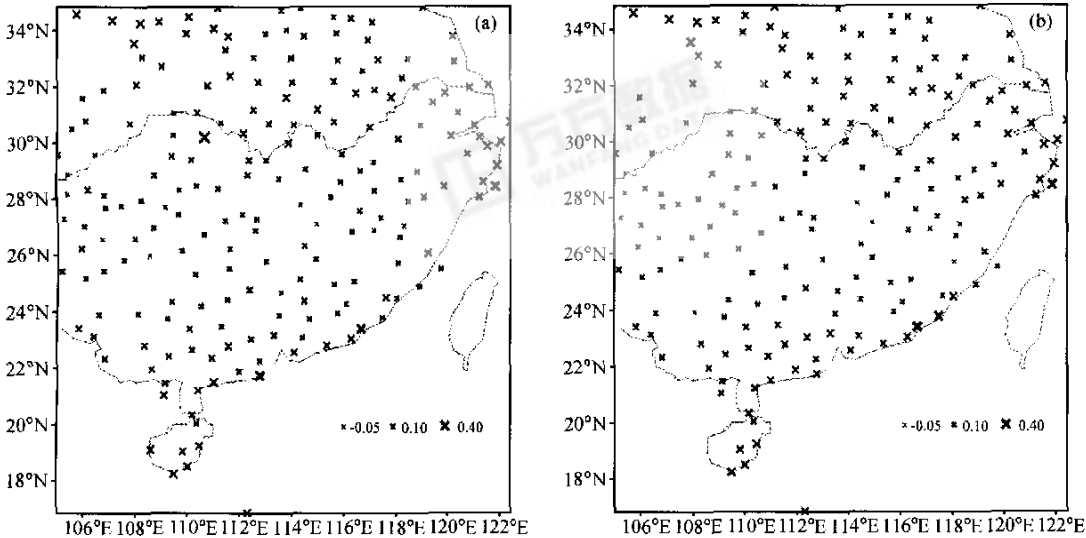


图 3 订正前 (a)、后 (b) 该地区年均最高气温线性趋势分布 (单位： $^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$)
Fig. 3 Geographic distribution of the 1960 to 2001 linear trend in average annual daily maximum temperature (a) before and (b) after adjustment (units: $^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$)

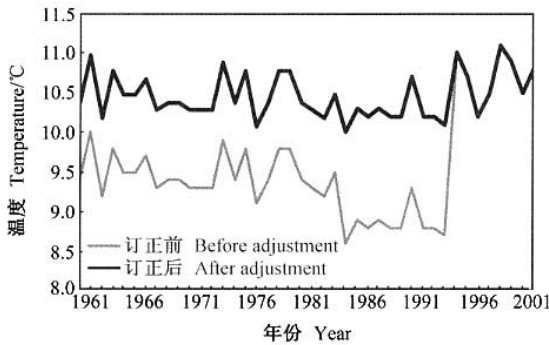


图4 五峰(57458)站年平均最低气温订正结果对比
Fig. 4 Mean annual daily minimum temperature time series at Wufeng (57458) before (grey) and after (black) change point adjustments

订正了 162 个断点),而在 0.2 到 0.5℃之间的不连续点有 74 个, 占总不连续点数的 45.7%, 超过 0.5℃的有 25 个(涉及 23 个台站), 占总不连续点数的 15.4%, 超过 1℃的有 3 个点, 涉及两个台站。这个订正量较最高温度而言, 有了明显的提高。

4 分析和讨论

由上面的均一性检验和订正过程来看, 即使是资料密度较大, 完整性较好的中国东南部地区, 由于台站的各种变化导致的气温资料不连续点仍然是广泛存在的。下面从几个不同的侧面对这个订正思路进行一些讨论。

4.1 城市热岛对均一性检验的影响

根据 Karl 等人^[15]的研究, 北半球大部分地区最高、最低气温的趋势变化是明显不对称的。即: 最低气温升高幅度较大而最高气温升温趋势较小甚至有些下降。是不是由于明显趋势变化的存在对检验结果有所影响? Li 等^[13], Zhou 等^[14]研究表明, 中国东南部地区是中国区域气候受到热岛影响最为突出的区域, 因此, 热岛问题成为该地区气温数据均一化的一个主要障碍。Karl 和 Williams^[5]曾经指出了这个问题。Li 等发现^[13], 在我们所研究的地理范围内, 约有 1/3 的台站所在城市人口在 5×10^4 以上, 并且其中有一半以上城市人口超过 5×10^5 , 其余少于 5×10^5 人口的城市气象台站均设在市区。如果以 5×10^4 人作为分界点,

约 1/3 的台站受热岛的影响。但从另一个角度看, 比较多的城市台站受热岛影响, 在每一个目标台站的参考台站中一般都会包含一些城市台站, 在建立参考序列和目标序列的差值时, 这种热岛增暖的影响部分地被消除, 反而会使更多的目标台站序列中热岛影响保留下来, 更多的热岛影响在订正后仍然被保留了下来, 而仅仅是把那些跳点式的不连续点进行了订正。但从另外一个角度, 我们用该思路检测到深圳站最高、最低气温序列中分别存在 2 个和 3 个不连续点, 但从元数据信息来看, 这些不连续点是由于城市热岛效应累积得到的。看来, 由于热岛带来的缓慢增暖导致的影响对我们均一化的过程有一定的影响, 必须更多给予注意。同时也说明, 元数据信息对于序列均一性的研究是非常重要的。

4.2 最高、最低气温自身物理特点

以前的研究表明^[16]: 台站迁移是我国气温资料非均一性的主要原因。因此这里我们仅讨论台站迁移的影响。虽然最高、最低温度观测业务非常类似, 但不同的是: 最低温度往往出现在日出之前, 这个时候大气边界层的稳定性是最强的, 局地的微气象尺度特征非常明显; 而最高温度往往出现在白天。夜间的气象条件和白天有所区别, 在不同气象条件下气温观测的影响因子随之也有所不同, 在白天, 由于太阳短波辐射作用, 使中小尺度范围的大气边界层内大气混合充分, 则不同地点的气温变化差别相对较小; 这样如果发生台站迁移, 则可能对最高气温影响不大, 而对最低气温的影响则相对较为明显, 从而出现更多不连续现象。从这个角度, 可以较好地解释这种最高、最低气温均一性程度的差别。美国气候参考网络 (USCRN)^[17,18]提供了一个非常优秀的数据质量检查和研究网络, 这里从 USCRN 数据里面提取部分资料进行了统计, 发现短距离的台站对之间的最低气温变化幅度远大于最高气温幅度(表 2), 最高气温出现的不连续点远远少于最低气温不连续点也就不足为奇了。

4.3 参考台站的数目对断点检验的影响

仍以上述网络为例, 我们分别以 5、10、20 作为参考台站的数目, 以最高气温为例, 进行了检验, 表 3 显示了这种差别。不管哪种方法, 随着参考台站数目的减少, 检查出的不连续点随之

表 2 台站短距离变址对最高、最低气温的影响

Table 2 Maximum and minimum temperature differences at paired locations in the U. S. Climate Reference Network

成对台站 Paired Stations	距离 Separation/km	天数 Days in sample	$T_{\max}$ 差异 $T_{\max}$ diff/°C	$T_{\min}$ 差异 $T_{\min}$ diff/°C
Asheville, NC	10.0	877	0.2	1.1
Durham, NH	7.2	740	0.1	0.4
Kingston, RI	1.5	710	0.0	0.5
Lincoln, NE	29.9	741	0.3	0.7
Newton, GA	13.7	550	0.2	0.7
Stillwater, OK	2.5	708	0.2	0.9

表 3 3 种方法对不同参考台站数目检验得出的不连续点数目

Table 3 Number of discontinuities detected using different numbers of reference series components to calculate the composite

检验模式 Test statistic	参考台站数 Number reference series components		
	5	10	20
二相回归 TPR	160	153	119
极大似然 SNH	241	208	191
多线性回归 MLR	281	242	201

TPR: Two phase regression; SNH: Standard normal homogeneity; MLR: Multiple linear regression

增加。这是可以理解的，随着参考台站数目的减少，每个参考台站的重要程度随之增加，由于我们事先并不知道参考台站序列中的不连续序列的比重也增加，导致参考序列的均一性随之下落，因此出现更多的人为不连续点。因此在检验中采取尽可能多的参考台站是十分必要的。

5 小结和展望

(1) 本文发展了一种对元数据依赖程度较小的气候序列均一性检验订正流程，对中国东南部台站网络最高、最低气温进行了均一性研究。采用多种检验统计量的方法，可以使得检验出的随机不连续点更少，检验结果更加有代表性；订正时不固定地采取某一条参考序列可以使订正在时间上更加均一和合理。这一手段对于中国历史气候资料尤其是长年代缺乏元数据文件的气温数据质量检验和均一化具有很好的应用前景。

(2) 极端气温序列检验显示，最低气温的非均一性要比最高气温严重，试验表明，这个现象是和二者本身的物理特点相关密切；对比分析表明，采用该思路对该地区极端气温序列的订正是

比较合理的。

(3) 对比分析表明，采取尽可能多的有效参考台站有助于使检验结果更加合理；同时，高质量的元数据对于检验效果的分析是非常必要的，城市热岛对于气温数据均一性影响还有待于进一步深入研究。

致 谢 美国国家气候资料中心的 David R. Easterling 博士为本工作顺利进行提供了非常重要的技术支持，并预先审阅了英文全文；Thomas C. Peterson 博士提出了许多建设性的意见。任国玉研究员提出了宝贵的审稿意见。谨致谢忱。

参考文献

[1] Alexandersson H. A homogeneity test applied to precipitation data. *International Journal of Climatology*, 1986, **6**: 661~675

[2] Aguilar E, Auer I, Brunet M, et al. Guidance on metadata and homogeneity. WMO Publication T D. No. 1186, World Meteorological Organization, Geneva, 2003

[3] Easterling D R, Peterson T C. A new method for detecting and adjusting for undocumented discontinuities in climatological time series. *International Journal of Climatology*, 1995, **15**: 369~377

[4] Jones P D, Raper S C B, Bradley R S, et al. Northern Hemisphere surface air temperature variations: 1851~84. *J. Climate Appl. Meteor.*, 1986, **25**: 161~179

[5] Karl T R, Williams C N. An approach to adjusting climatological time series for discontinuous inhomogeneities. *J. Climate Appl. Meteor.*, 1987, **26**: 1744~1763

[6] Vincent L A. Technique for the identification of inhomogeneities in Canadian temperature series. *J. Climate*, 1998, **11**: 1094~1104

[7] Peterson T C, Vose R S. An overview of the Global Historical Climatology Network temperature database. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1997, **78**: 2837~2849

- [8] Easterling D R, Peterson T C, Karl T R. On the development and use of homogenized climate datasets. *J. Climate*, 1996, **9**: 1429~1434
- [9] Peterson T C, Easterling D R, Karl T R, et al. Homogeneity adjustments of in situ atmospheric climate data: A review. *International Journal of Climatology*, 1998, **18**: 1493~1517
- [10] Lund R, Reeves J. Detection of undocumented change points: A revision of the two-phase regression model. *J. Climate*, 2002, **15**: 2547~2554
- [11] Wang X. Comments on "Detection of undocumented change points: A revision of the two-phase regression model". *J. Climate*, 2003, **16**: 3383~3385
- [12] Menne M J, Williams C N Jr. Detecting of undocumented change points: on the use of multiple test statistics and composite reference series. *J. Climate*, 2005, **18**: 4271~4286
- [13] Li Qingxiang, Zhang Hongzheng, Liu Xiaoning, et al. UHI effect on annual mean temperature during recent 50 years in China. *Theor. Appl. Climatol.*, 2004, **78**: 156~165
- [14] Zhou Limin, Dickinson R E, Tian Yuhong, et al. Evidence for a significant urbanization effect on climate in China. *Proceedings National Academy of Sciences*, 2004, **101**: 9540~9544
- [15] Karl T R, Kukla G, Razuvayev V N, et al. Global warming: Evidence for asymmetric diurnal temperature change. *Geophys. Res. Lett.*, 1991, **18**: 2253~2256
- [16] Li Qingxiang, Liu Xiaoning, Zhang Hongzheng, et al. Detecting and adjusting on temporal inhomogeneities in Chinese mean surface air temperature Datasets. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2004, **21**: 260~268
- [17] Sun Bomin, Baker C B, Karl T R, et al. A comparative study of ASOS and CRN temperature measurements. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 2005, **22**: 679~686
- [18] Guttman N B, Baker C B. Exploratory analysis of the difference between temperature observations recorded by ASOS and conventional methods. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1996, **77**: 2865~2873