

崔妍,徐文慧,李庆祥,等,2019. 东北地区月气温序列的均一性检验和订正[J]. 气象,45(2):240-250. Cui Y, Xu W H, Li Q X, et al, 2019. Homogeneity test and correction of monthly temperature in Northeast China[J]. Meteor Mon, 45(2):240-250 (in Chinese).

## 东北地区月气温序列的均一性检验和订正<sup>\*</sup>

崔 妍<sup>1</sup> 徐文慧<sup>2</sup> 李庆祥<sup>3</sup> 赵春雨<sup>1</sup> 周晓宇<sup>1</sup> 敖 雪<sup>1</sup> 余 君<sup>4</sup>

1 沈阳区域气候中心, 沈阳 110166

2 国家气象信息中心, 北京 100081

3 中山大学大气科学学院, 珠海 519082

4 重庆市气象局, 重庆 401147

**提 要:** 本文采用惩罚最大  $T$  检验(PMT)方法, 结合台站历史沿革信息, 对东北地区 129 个气象站月最高气温和最低气温资料进行均一性检验和订正, 并与已有均一化数据集(CHHT)进行对比分析。结果表明: 气温的非均一性在空间上普遍存在, 最高气温和最低气温分别检测出断点 74 个和 94 个, 资料拼接和迁站是造成非均一性的重要因素。均一性检验和订正提高了东北地区最高气温和最低气温的空间一致性, 线性趋势空间分布更加合理, 订正之后变化趋势略有增加, 年平均最高气温和最低气温分别由  $0.1$  和  $0.22\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{ a})^{-1}$  增至  $0.17$  和  $0.33\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{ a})^{-1}$ 。与 CHHT 相比, 两套数据时间相关系数在  $0.9$  以上, 对东北地区气候长期演变趋势基本一致, 东北地区年平均最高气温和最低气温均呈显著升温趋势, 采用 PMT 得到的年平均最高气温和最低气温变化趋势较 CHHT 分别偏高  $0.05$  和  $0.03\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{ a})^{-1}$ , 在线性趋势空间分布上 PMT 均一化检验订正结果较 CHHT 略有改善。

**关键词:** 东北地区, 气温, 均一性检验和订正, PMT

**中图分类号:** P413

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2019.02.009

## Homogeneity Test and Correction of Monthly Temperature in Northeast China

CUI Yan<sup>1</sup> XU Wenhui<sup>2</sup> LI Qingxiang<sup>3</sup> ZHAO Chunyu<sup>1</sup> ZHOU Xiaoyu<sup>1</sup> AO Xue<sup>1</sup> YU Jun<sup>4</sup>

1 Shenyang Regional Climate Centre, Shenyang 110166

2 National Meteorological Information Centre, Beijing 100081

3 School of Atmospheric Sciences, Sun Yat-Sen University, Zhuhai 519082

4 Chongqing Meteorological Service, Chongqing 401147

**Abstract:** Based on the observation data and detailed metadata archive recorded by 129 meteorological stations in the northeast of China, the homogeneity test and corrections are carried out to the monthly maximum and minimum temperatures by using the penalized maximum  $T$  test (PMT), and the corrections have been compared to the previous study (CHHT). The results show that the discontinuities of monthly temperature are prevalent which are mainly caused by data joint from different resources and station relocation. There are 74 and 94 breakpoints detected respectively from monthly maximum and minimum temperatures. The spatial consistency of the monthly maximum and minimum temperatures has been improved and the spatial distribution of long-term trends is more reasonable after data homogenization. The trends of annual

<sup>\*</sup> 中国气象局气候变化专项(CCSF201819, CCSF201841)、辽宁省气象局科研项目(201810)和辽宁省气象局“气候变化创新团队”共同资助  
2017 年 4 月 11 日收稿; 2018 年 8 月 22 日收修定稿

第一作者: 崔妍, 主要从事气候资料分析及气候变化研究. Email: cuiyan\_mail@foxmail.com

通信作者: 徐文慧, 主要从事气候数据分析处理研究. Email: xuwenhui@cma.gov.cn

maximum and minimum temperatures have respectively increased from  $0.1^{\circ}\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$  and  $0.22^{\circ}\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$  to  $0.17^{\circ}\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$  and  $0.33^{\circ}\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ . Compared to the CHHT, temporal correlation coefficient between PMT and CHHT is above 0.9, reflecting the consistent climate warming. The spatial distribution of long-term trends is slightly improved and the trends of annual maximum and minimum temperature calculated by PMT are  $0.05^{\circ}\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$  and  $0.03^{\circ}\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$  warmer than those by CHHT.

**Key words:** Northeast China, monthly temperature, homogeneity and test, PMT (penalized maximum  $T$  test)

## 引 言

气候变化尤其是气候变暖一直是气候学的研究重点,长期可靠的器测资料是进行气候变化趋势和变率分析的基础,中国的气象资料仪器观测最早开始于 19 世纪末期,东北地区开始于 20 世纪初,是中国具有百年器测资料最多的地区之一。但是在长期的观测中由于气象观测仪器变动、台站迁移、观测手段和观测环境变化等因素,可能造成气候资料的非均一性,这种非均一性可能掩盖真实的气候变化信息,而采用非均一化的气候资料进行气候研究则可能导致不正确的结果 (Peterson and Easterling, 1994)。因此对器测资料进行均一性检验和订正,建立高质量的均一性观测序列对气候变化研究具有重要意义。

国外许多气候学家在气候资料均一性研究方面做了大量工作,取得了众多成果。Kohler(1949)采用绘制目标站和参考站的累积图,主观判定资料的非均一性。Alexandersson(1986)发展了 SNHT 方法对瑞士西南部的降水资料进行均一性检验,之后被用于瑞士长序列气温资料的均一性检验和订正 (Moberg and Bergström, 1997)。Vincent(1998)采用多元线性回归对加拿大气温序列中的均值和趋势非均一性进行了检验。Solow(1987)采用二相回归对南半球气温序列连续性进行检验,结果表明南半球气温无明显非均一性。之后 Easterling and Peterson(1995a;1995b)对该方法进行了改进并分析了非均一性对气温趋势的影响,结果表明在大尺度上资料非均一性的影响有限,但在小尺度上非均一性的影响明显。在国内,也有一些均一化检验和订正方面的研究和尝试(曹丽娟等,2010;陈哲等,2015;李亚丽等,2015)。Yan et al(2001)利用详细

的元数据对北京和上海的逐日气温进行均一性分析和订正。黄嘉佑和李庆祥(2007)使用偏最小二乘法对三峡地区的夏季气温进行了均一性检验并取得了较好的效果。高晓容等(2008)利用 SNHT 方法对五台山的季节气温、降水和相对湿度做了非均一性分析,结果表明迁站对气温和相对湿度的均一性影响明显,对降水量影响不显著。有研究分别采用二相回归 (Li et al, 2004) 和 MASH 方法 (Li and Yan, 2009) 对中国地区的气温资料进行均一性检验和订正,形成两套均一化气温数据集,对比分析表明两套数据集在气候变化检测中的表现基本类似 (李庆祥,2011)。近年来,加拿大环境部 Wang et al (2007) 和 Wang(2008) 发展了一种新的均一性检验和订正方法,得到了很多技术人员的欢迎和试用,国内很多学者也采用该方法做了一些研究。任雨和郭军(2014)利用 Rhtests V3 软件包对天津 1891 年以来的器测气温序列进行均一化检验和订正,订正之后与参证序列相关性明显提高。Cao et al(2013)收集整理了中国中东部 18 个长序列气象站点,对其进行插补之后采用最大惩罚  $F$  检验 PMF(1950 年之前)和最大惩罚  $T$  检验 PMT(1950 年之后)方法进行均一性检验和订正,并分析了过去百年中国的变暖趋势,结果表明资料的非均一性低估了过去 100 年的气温变暖趋势。Xu et al(2013)等结合元数据信息,利用最大惩罚  $T$  检验方法对中国 825 个站逐日气温资料进行均一性检验和订正,进一步采用均一化后的数据对极端气温指数进行分析,结果表明 85%~90% 的站点暖夜更多冷夜更少。

尽管中国地区已有众多均一性研究成果,但针对东北地区百年尺度上的均一性研究仍然比较缺乏,尤其是采用最新的均一性检验订正方法进行研究。因此本文将采用加拿大环境部气候研究中心 Wang et al(2007)建立的 PMT 均一性检验和订正

方法,利用东北地区 129 个气象站点建站以来的气温观测资料和站点元数据信息,对东北地区近百年气温序列进行系统的质量控制、均一性检验和订正,形成一套完整的均一化的东北地区百年气温数据集,为正确估计东北地区气候变化趋势提供可靠数据支撑。

## 1 资料和方法

### 1.1 资料

本文使用的资料为东北地区 129 个站点建站以来的逐月最高气温和最低气温,其中 100 个站点为东北地区基本基准气象站,为建立东北地区近百年气候序列,增加 1950 年之前有器测记录的非基本基准气象站点。资料包括解放前(1950 年之前)和解放后(1951 年之后)两个时段,其中解放前资料来源于国家气象信息中心搜集的 71 个东北地区站点资料,解放后资料来源于国家气象信息中心的原始逐月最高气温和最低气温资料。解放前资料存在交叉记录,因此首先对资料的交叉记录进行整理,整理遵循以下原则:(1)如果一个站有多个交叉记录,保存最长的资料记录;(2)进行资料拼接处理时整段拼接,并将拼接年份作为可疑断点进行记录。东北 71 个站点中仅站点 50745 存在交叉记录,国家气象信息中心搜集的资料中包含两套,一套资料长度为

1910—1932 年,另一套为 1929—1940 年,交叉年份为 1929—1932 年,按照以上原则,保留交叉记录中的第一套资料,1933—1940 年的资料用第二套补齐,并将 1932 年 12 月作为 Type-0 可疑断点(即有元数据支持的断点)。除交叉记录的资料拼接外,资料拼接更多来源于解放前和解放后资料拼接,将解放前资料的最后一月作为 Type-0 可疑断点进行记录。图 1 给出了东北地区观测台站的空间分布,图 1a 为 1950 年之前有器测资料的台站及其完整资料年份(台站左上角数字)。东北地区 1950 年之前有资料的台站中资料长度超过 30 年的站点共 6 个(长春、哈尔滨、营口、沈阳、大连和旅顺),超过 10 年的站点共 25 个(图 1a)。129 个气象站点中建站超过 100 年(截止 2014 年)的站点共 14 个,完整气象资料超过 100 年的站点共 3 个(营口、沈阳和大连),超过 80 年的共 12 个,超过 60 年的站点共 79 个,占总站数的 61%。从台站逐年变化看(图 2),1935 年之前不超过 30 个站,1936 年之后增加至 58 个,1950 年之后站点缓慢增加并趋于稳定。虽然台站随时间不断增加,但由于战争等原因,1943—1949 年资料缺测严重(图 2)。

除逐月最高气温和最低气温资料外,本文还使用了国家气象信息中心收集的东北地区 129 个站自建站以来迁站、仪器变更和周围环境变化的历史沿革信息,以及 129 个站经度、纬度和海拔高度等地理信息数据。

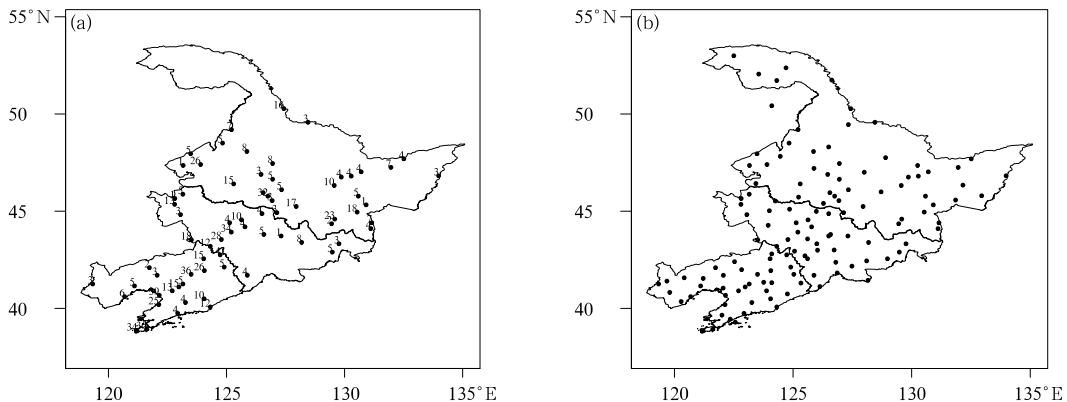


图 1 东北地区观测台站的空间分布

(a)1950 年之前有资料的台站,(b)1950 年之后的台站

Fig. 1 Distribution of observation stations in the Northeast China

(a) before 1950, (b) after 1950

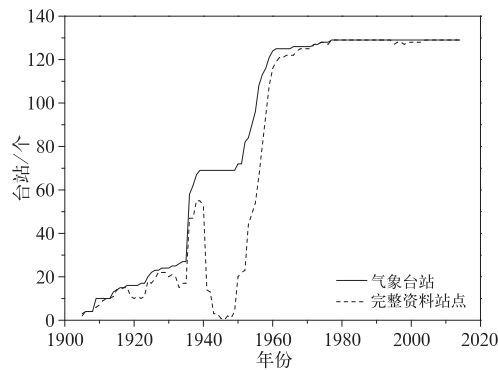


图 2 东北地区 1905—2014 年气象台站以及完整资料站点逐年变化

Fig. 2 Variation of the number of observation stations and stations with complete data during 1905—2014

## 1.2 方法

### 1.2.1 质量控制

由于本文使用的资料包含 1950 年之前器测资料,考虑历史资料观测误差以及抄录时可能错误,首先对观测数据进行简单质量控制。气象观测值与其平均值和方差之间存在一定概率关系,观测值落在区间  $\pm 4$  倍标准差的概率为 99.9% (林学椿等, 1995),因此将观测值落在该区间之外的记录认定为错误记录而作缺省处理。

### 1.2.2 建立参考序列

资料均一性检验和订正过程中,建立参考序列至关重要。参考序列一般用待检站点一定距离内邻近台站发展而成,可以在一定程度上作为局地气候的显示器,当台站变化与局地气候变化不一致时,认为台站资料是非均一的,需要对台站资料进行订正 (李庆祥, 2011)。

由于 1950 年之前东北地区站点较少,战争导致资料缺测严重,因此建立参考序列时引入了东北周边范围内 ( $35^{\circ}\sim 55^{\circ}\text{N}$ 、 $110^{\circ}\sim 140^{\circ}\text{E}$ ) 国内和国际长序列气象站点 (图 3)。其国际站点资料来源于近百年全球地表月气温数据集 (徐文慧等, 2014), 已经过均一性检验和订正,而国内站点则是未经订正的原始数据。从资料长度看 (图 3a), 俄罗斯和日本的资料长度多在 50~100 a, 部分站点超过 100 a, 1950 年之前的资料长度多在 0~20 a, 部分站点超过了 50 a, 超过 50 a 的站点资料多开始于 1900 年之前; 而国内站点资料长度一般在 50~100 a, 东北地区周围的站点资料多开始于 1920—1940 年, 部分站点开始于 1900—1920 年 (图 3b)。

建立参考序列时采用 P-E 技术和人为判定相结合的方法。第一步先利用 P-E 技术建立初始参考序列, 具体步骤为首先计算年一阶差分序列, 求出与待检站点相关较高的站点作为可能参考站点, 采用一种非参数的多元块排列检验方法 (MRBP) 对可能参考站点进行检验, 评估参考站点对待检站点的预测能力, 然后将通过 MRBP 检验的参考站点加权平均得到参考序列一阶差分序列, 最后反算得到参考序列。P-E 技术虽然不能建立完全均一的参考序列, 却可以将其非均一性最小化 (Peterson and Easterling, 1994)。在 P-E 技术建立参考序列的基础上, 通过主观经验方法进一步对参考序列进行判定。

### 1.2.3 均一性检验和订正方法

本文采用加拿大环境部 Wang et al (2007) 和 Wang (2008) 研发的 PMT 进行均一性检验和订正。PMT 对待检序列与参考序列的差值序列进行检验, 基本原理是基于标准正态检验, 同时引入惩罚因子,

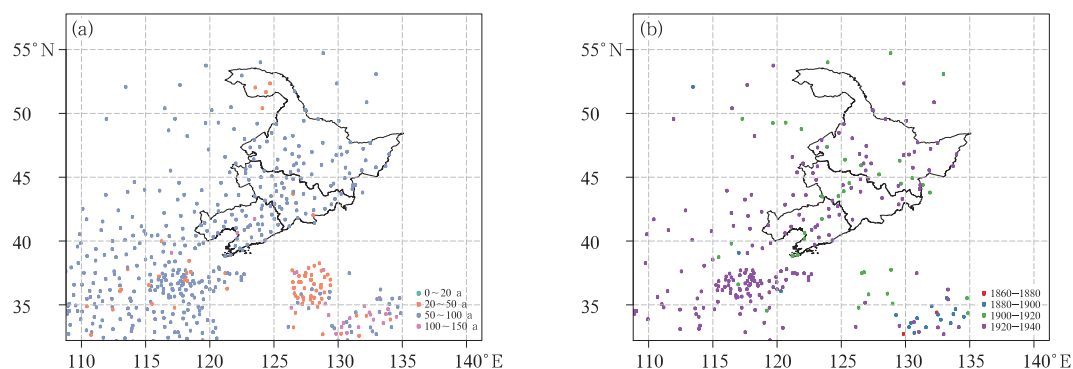


图 3 建立参考序列时采用的站点分布及其资料长度 (a) 和资料开始时间 (b)

Fig. 3 Distribution of stations and data periods (a) and data start time (b) used for composing reference series

构建新的统计量进行检验,该方法考虑了时间序列一阶滞后自相关,改善了误报警率和检验能力的非均匀分布问题(Wang et al, 2007; 孙佳等, 2014)。目前 PMT 方法已集成在 RHtests 软件中,本文使用最新发布的 RHtests V4 版本进行均一性检验和订正。

使用 PMT 方法检验过程如下,假设  $\{X_t\} (t = 1, \dots, N)$  服从正态分布,即原假设为:

$$H_0 : \{X_t\} \sim \text{IID}\lambda(\mu, \sigma^2)$$

备择假设为:

$$H_a : \begin{cases} \{X_t\} \sim \text{IID}\lambda(\mu_1, \sigma^2) & t = 1, \dots, k \\ \{X_t\} \sim \text{IID}\lambda(\mu_2, \sigma^2) & t = k + 1, \dots, N \end{cases}$$

式中  $\sigma_1 \neq \sigma_2$ , 并且“ $\{X_t\} \sim \text{IID}\lambda(\mu_1, \sigma^2)$ ”代表  $\{X_t\}$  遵循正态分布,均值为  $\mu$ , 方差为  $\sigma^2$ 。当  $H_a$  为真时,  $t=k$  时的点被称为间断点,  $\Delta = |\mu_1 - \mu_2|$  被称作平均突变的大小,最可能的间断点服从以下分布:

$$PT_{\max} = \max_{1 \leq k \leq N-1} [P(k)T(k)]$$

式中  $P(k)$  为经验型惩罚因子,建立方法详见 Wang et al(2007)的研究。

$$T(k) = \frac{1}{\hat{\sigma}_k} \left[ \frac{k(N-k)}{N} \right]^{1/2} | \bar{X}_1 - \bar{X}_2 |$$

其中,

$$\hat{\sigma}_k^2 = \frac{1}{N-2} \left[ \sum_{1 \leq t \leq k} (X_t - \bar{X}_1)^2 + \sum_{k+1 \leq t \leq N} (X_t - \bar{X}_2)^2 \right]$$

$$\bar{X}_1 = \frac{1}{k} \sum_{1 \leq t \leq k} X_t$$

$$\bar{X}_2 = \frac{1}{N-k} \sum_{k+1 \leq t \leq N} X_t$$

通过回归检验算法检测出多个间断点,首先在  $t \in \{N_{\min}, N_{\min} + 1, \dots, N - N_{\min}\}$  分三段找出序列中各段最可能的间断点,计算三个间断点的统计量  $PT_{\max}$  并进行显著性检验,通过检验的即为第一个断点,寻找该间断点位置之后每段最可能的间断点并

判断其显著性,找出下一个可能间断点,不断重复,将间断点按显著性由大到小排列,形成间断点列表,判断最小的是否显著,不显著时剔除该间断点,再次评估剩余间断点的显著性,最终保留通过显著性检验的间断点(Wang, 2008)。

订正时采用均值订正,具体订正方法如下:

假设  $\alpha$  是检验出的不连续点,  $Z$  为差值序列,则根据不连续点的物理意义,对于序列而言:

$$\begin{cases} Z_i \in N(\mu_1, \sigma) & i \in \{1, \dots, \alpha\} \\ Z_i \in N(\mu_2, \sigma) & i \in \{\alpha + 1, \dots, n\} \end{cases}$$

$\mu_1 - \mu_2$  即为订正补偿量,将补偿量加至序列中不连续点  $\alpha$  之前的序列片段中,即完成了均一性订正,该订正过程也被集成于 RHtests 软件中(李庆祥, 2011)。

## 2 东北地区月气温均一性检验和订正

### 2.1 断点统计分析

对每个站的可疑断点采用 PMT 进行统计检验,超过 0.01 显著性水平检验的为显著断点,结合元数据信息对显著断点进行人工主观二次判定,判定时遵循以下原则:(1)当显著断点有资料拼接记录、迁站、仪器变更以及观测方式改变等元数据支持时,对断点进行保留;(2)当显著断点无元数据支持但断点在年序列、月序列以及不同气象要素(最高气温和最低气温)之间同时存在时,对断点进行保留。遵循以上原则,最高气温共检测出断点 74 个(图 4a),其中 43% (32 个)由资料拼接导致,26% (19 个)由迁站导致,27% (20 个)无元数据支持,为 Type-1 类断点;最低气温共检测出断点 94 个(图 4b),其中 35% (33 个)由迁站导致,30% (28 个)由资料拼接导致,34% (32 个)无元数据支持,为 Type-1 类断点。

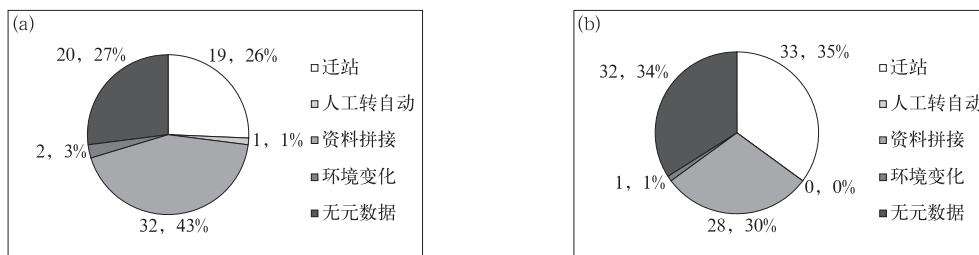


图 4 最高气温(a)和最低气温(b)的不同类型断点统计

Fig. 4 Distribution of different types of discontinuities for (a) maximum temperature and (b) minimum temperature

东北地区最高气温和最低气温普遍存在非均一性,逐月最高气温中有 72 个站是均一的,无断点存在,41 个站有 1 个断点,15 个站有 2 个断点,1 个站有 3 个断点;最低气温中有 76 个站是均一的,23 个站有 1 个断点,21 个站有 2 个断点,8 个站有 3 个断点,1 个站有 5 个断点,其中 3 次由迁站导致。从时间分布上看(图 5),1940 年是断点出现最多的年份,最高气温和最低气温分别出现 19 个和 15 个,其次为 1943 年,最高气温和最低气温的断点分别为 8 个和 6 个,这些断点多是由于 1950 年以前资料拼接导致的。

## 2.2 PMT 检验结果分析

### 2.2.1 个例分析

本节以沈阳站为例,详细说明 PMT 检验过程并对其结果进行分析。图 6 给出了沈阳站最高气温和最低气温的参考序列及其周边相关系数最高的 5 个站点。从中可以发现,沈阳站年最高气温和最低气温与参考序列的相关分别为 0.925 和 0.888,参考序列的变化与周边站点基本一致,因此采用该参考序列进行均一性检验和订正是可行的。

利用 PMT 方法对沈阳站原始序列与参考序列之间的差值序列进行 0.01 显著性水平检验,结果表

明沈阳最高气温存在 2 个断点,分别为 1953 年 12 月和 1988 年 12 月;最低气温存在 3 个断点,除与最高气温一致的 1953 年 12 月和 1988 年 12 月外,2005 年 12 月也存在明显断点。查看元数据信息可以发现(表 1),沈阳自建站以来共迁站 3 次。1954 年 1 月 1 日,由沈阳市和平区南一马路 2 号迁至沈阳市沈河区南塔街五里河子 5 号,水平距离变化 3200 m,高度变化 -1.4 m,1989 年 1 月 1 日由沈阳市沈河区文化路 2 段 2 号迁至沈阳市东陵区五三乡浑河堡村,水平距离变化 4500 m,高度变化 1.2 m,2006 年 1 月 1 日由沈阳市东陵区营盘路 12 号迁至沈阳市浑南新区南屏东路 5 号,水平距离变化 8000 m,高度变化 4.3 m。结合沈阳站 PMT 检验结果,可以发现沈阳站最高气温和最低气温断点均由迁站引起,其中第三次迁站对最高气温影响有限,但却造成了最低气温的非均一。

检测资料断点是均一化工作的第一步,最终目的是对资料中人为导致的非均一性进行订正,得到均一化资料序列进行气候研究(张高杰等,2013)。图 7 给出了沈阳站 PMT 订正前后的气温序列及其线性趋势,可以看出订正后原来存在较大突变的地方变得平缓,尤其是 2005 年前后的最低气温(图 7b),订正之前最低气温在 2005 年有一个陡降,

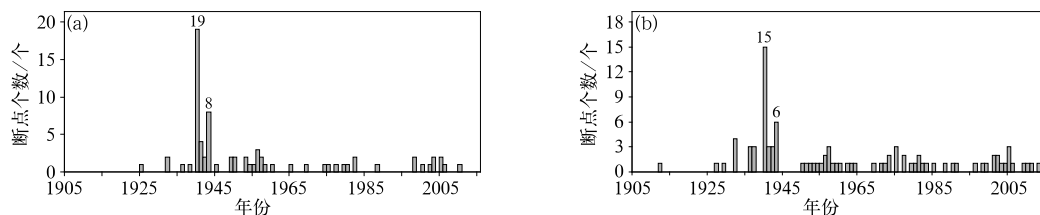


图 5 最高气温(a)和最低气温(b)的断点时间分布

Fig. 5 Annual distribution of discontinuities for (a) maximum temperature and (b) minimum temperature

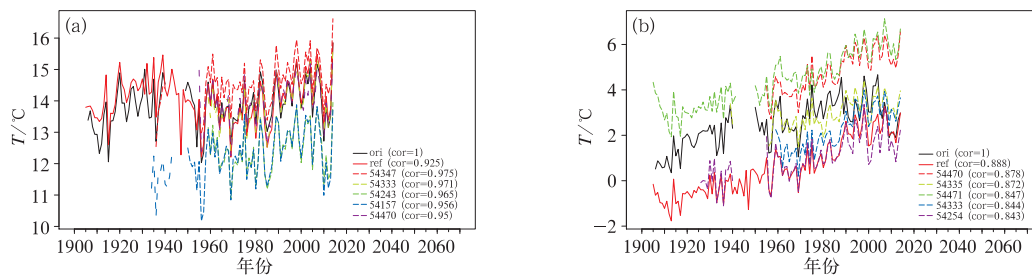


图 6 沈阳站最高气温(a)和最低气温(b)原始序列及参考序列

Fig. 6 Original and reference time series of Shenyang Station for (a) maximum temperature and (b) minimum temperature

经过订正之后序列均一性有所改善。最高温和最低温线性趋势在订正之后均有所增大,变暖趋势更加明显,最高气温和最低气温分别由订正之前的  $0.07^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{ a})^{-1}$  和  $0.21^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{ a})^{-1}$  变为订正后的  $0.13^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{ a})^{-1}$  和  $0.28^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{ a})^{-1}$ 。

表 1 沈阳站迁站信息

迁站时间 / 年月日	方向	水平距离/m	高度变化/m
19540101	SE	3200	-1.4
19890101	S	4500	1.2
20060101	SE	8000	4.3

2.2.2 订正前后趋势分析

图 8 和图 9 分别给出了东北地区最高气温和最低气温订正前后的趋势分布。可以看出,订正前后东北地区最高气温(图 8)基本都呈增加趋势,黑龙江西北部增温趋势最为显著。订正之前吉林省蛟河

站和黑龙江同江站呈不显著减小趋势(图 8b),订正之后蛟河站和同江站由不显著减小趋势变为不显著增加趋势(图 8a),与周围站点空间一致性有所提高。与最高气温一样,最低气温(图 9)订正之后空间一致性也略有改善,空间分布更加合理。抚顺订正之前变化趋势为  $-0.07^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{ a})^{-1}$ ,订正之后变为  $0.25^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{ a})^{-1}$ ,通过了 0.05 显著性水平检验,其变化趋势与周围站点更为一致,造成抚顺资料非均一的主要原因是 1960 年 1 月抚顺站由抚矿迁至中央路 59 号,海拔高度增加了 36.4 m。

图 10 给出了订正前后东北地区 129 个站平均的年最高气温和最低气温年际变化。可以看出,年平均最高气温(图 10a)和最低气温(图 10b)订正之后变化趋势都高于订正之前。相比较而言,最高气温增加较小,线性趋势从  $0.1^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{ a})^{-1}$  增加至  $0.17^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{ a})^{-1}$ ,最低气温增加相对较大,从订正前  $0.22^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{ a})^{-1}$  增至  $0.33^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{ a})^{-1}$ 。

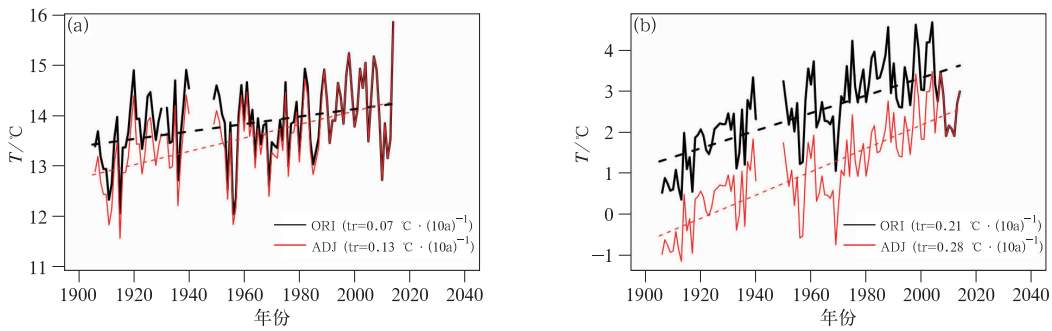


图 7 沈阳站最高气温(a)和最低气温(b)订正前后序列

Fig. 7 Original and adjusted annual (a) maximum temperature and (b) minimum temperature at Shenyang Station

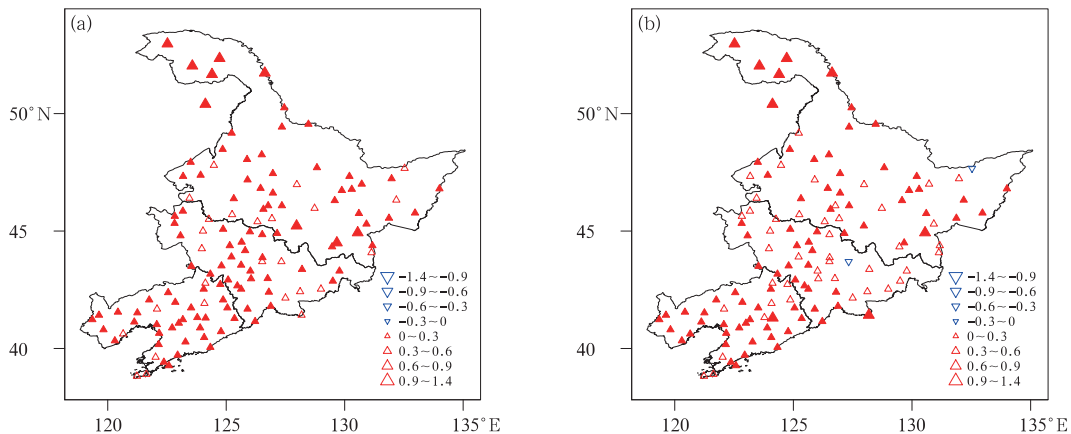


图 8 均一化订正后(a)和订正前(b)年平均最高气温趋势对比[单位:  $^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{ a})^{-1}$ ]

Fig. 8 Trends of annual maximum temperature (a) after and (b) before homogenization [unit:  $^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{ a})^{-1}$ ]

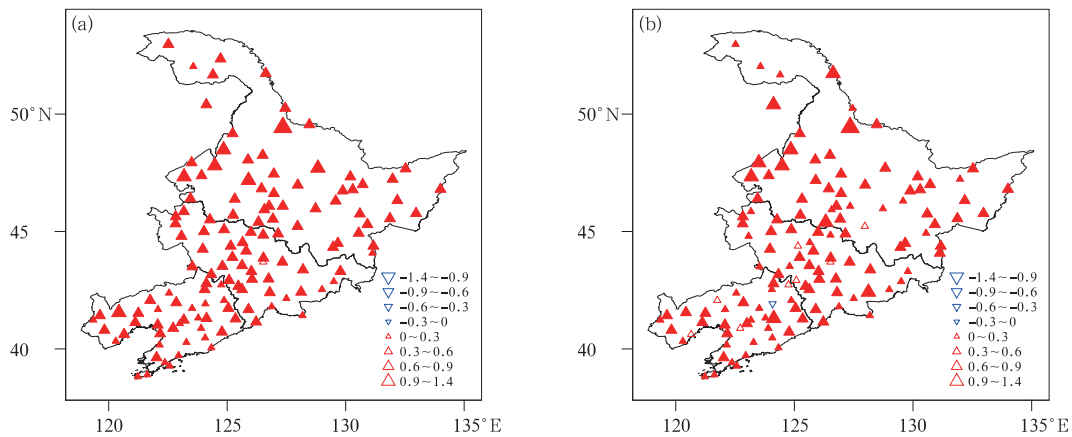


图 9 同图 8, 但为年平均最低气温趋势对比

Fig. 9 Same as Fig. 8, but for annual minimum temperature

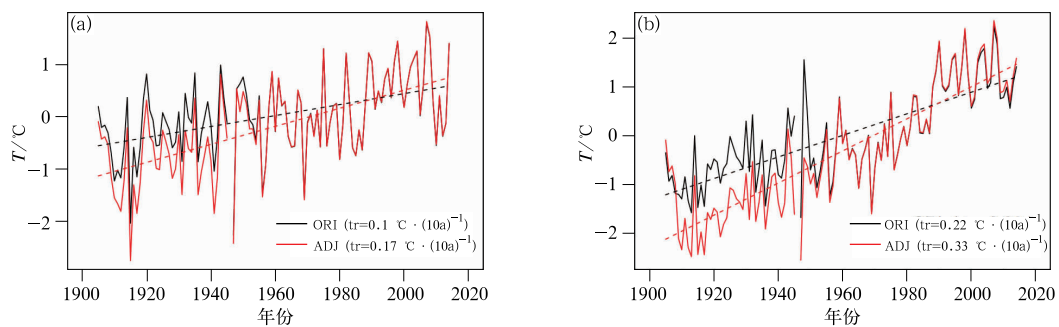


图 10 同图 7, 但为东北地区

Fig. 10 Same as Fig. 7, but for the Northeast China

### 2.3 与 CHHT 均一化数据集比较分析

Li et al(2004;2009)采用二相回归方法对中国 731 个站点气温进行了均一性检验和订正,于 2006 年发布了中国第一版均一化历史气温数据集(1951—2004 年)(CHHT1.0),之后在此数据集基础上,收集中国大陆 1900 年 1 月至 2006 年 12 月逐月最高气温和最低气温数据,采用相同方法进行质量控制和均一化调整,建立了中国地面百年均一化数据集(1900—2006 年),为了统一将整个 1900 年以来的数据集统称为 CHHT(李庆祥等,2010)。为了评估 PMT 均一性检验和订正效果,选择与 CHHT 中共有站点(83 个)进行对比分析,对比时段截止至 2006 年。图 11 和图 12 分别给出了 PMT 和二相回归(CHHT)均一化订正后最高气温和最低气温变化趋势的空间分布。可以看出两套数据集的空间一致性较高,最高气温和最低气温的空间相关系数分别为 0.63 和 0.58,均通过了 0.01 显著性

水平检验。从最高气温和最低气温变化趋势一致性上看,PMT 较 CHHT 略有改善,空间相关系数从 0.39(CHHT)提升至 0.49(PMT)。

年平均最高气温增温最显著的地区均位于黑龙江西北部,在线性趋势空间分布上 PMT 较 CHHT 略有改善(图 12)。两套数据中存在较大差异的两个站点(54093 和 54195),究其原因,主要是由于对 1950 年前资料拼接可疑断点的处理上,CHHT 未将 1932 年 12 月(54093)和 1941 年 4 月(54195)作为断点进行订正,而 PMT 则将两个断点作为 Type-0 类断点进行了订正(图 12a)。从数值上看,PMT 订正之后 23 个站变化趋势较 CHHT 偏小,38 个站偏大,64 个站的线性趋势差在  $\pm 0.1^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$  以下。与年平均最高气温相比(图 11a),年平均最低气温升温趋势更加明显,PMT 订正后最低气温均呈显著升温趋势(图 12a)。与 CHHT 相比,PMT 订正之后 28 个站线性趋势偏小,42 个站偏大,52 个站点变化趋势之差在  $\pm 0.1^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$  之间。



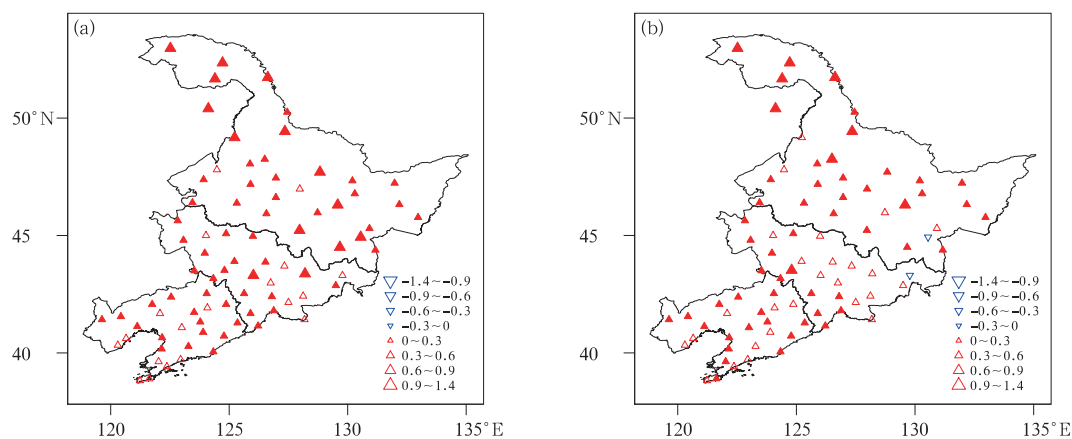


图 11 PMT 均一化数据集(a)与 CHHT 数据集(b)年平均最高气温趋势对比[单位:  $^{\circ}\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ]

Fig. 11 Trends of annual maximum temperature (a) adjusted using PMT and (b) CHHT1.0 [unit:  $^{\circ}\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ]

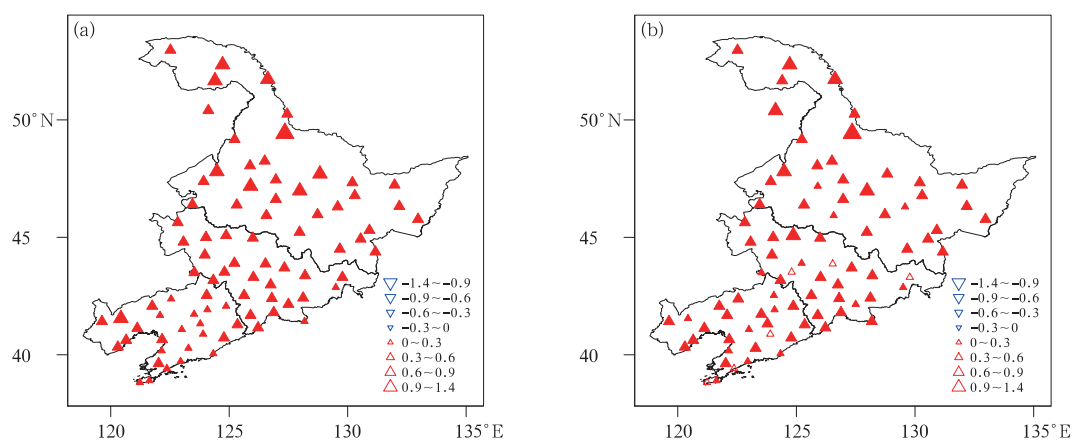


图 12 同图 11, 但为年平均最低气温

Fig. 12 Same as Fig. 11, but for annual minimum temperature

为对比最高气温和最低气温的年际变化, 将两套数据共有站点进行区域平均(图 13)可以看出, 两套数据年平均最高气温和最低气温年际变化基本一致, 时间相关系数分别为 0.95 和 0.98。PMT 订正

之后最高气温和最低气温在 1950 年之后与 CHHT 基本重合, 1950 年之前 PMT 订正之后的值略低于 CHHT。从变化趋势看, PMT 订正之后的东北地区增温趋势大于 CHHT, 最高气温和最低气温变化

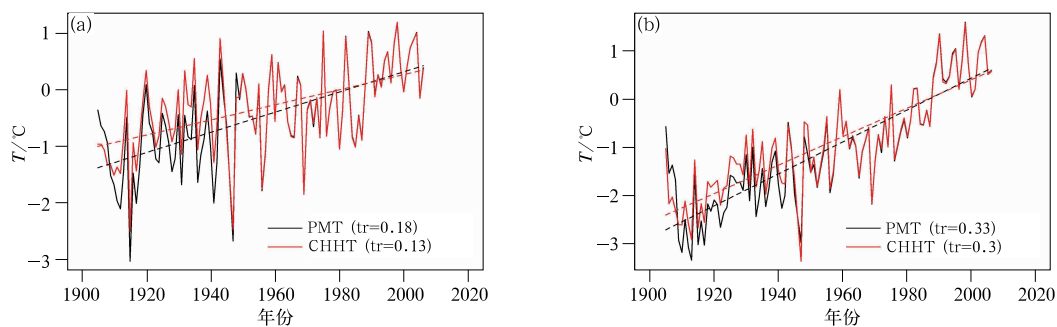


图 13 1905—2014 年东北地区年平均最高气温(a)和年平均最低气温(b)年际变化对比分析

Fig. 13 Comparative analysis of annual maximum temperature (a) and minimum temperature (b) averaged for the northeast of China during 1905—2014

趋势分别偏大  $0.05$  和  $0.03\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ 。从不同要素变暖趋势看,最低气温的增温趋势( $0.33\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ )大于最高气温( $0.18\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ ) (IPCC,2014)。

### 3 结 论

本文采用 PMT 均一性检验和订正方法对东北地区 129 个站点月气温资料进行了均一化检验和订正,并与已有均一化数据集(CHHT)进行对比分析,结果表明:

(1) 气温的非均一性在空间上普遍存在。最高气温共检测出断点 74 个,其中 43%是由 1950 年资料拼接导致,最低气温检测出断点 94 个,其中 35%是由迁站导致;1940 年是断点出现最多的年份,其次是 1943 年,这些断点多是由于 1950 年资料拼接导致。

(2) PMT 均一性检验订正之后东北地区的最高气温和最低气温空间一致性有所提高,变化趋势较订正之前略有增加,空间分布更加合理。东北地区年平均最高气温和最低气温变暖趋势较订正之前更加明显,分别由  $0.1$  和  $0.22\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$  增加至  $0.17$  和  $0.33\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ 。

(3) PMT 均一化订正结果与 CHHT 数据集空间分布基本一致,线性趋势空间分布较 CHHT 略有改善;从变化趋势上看,PMT 均一化数据集中最高气温和最低气温变化趋势略高于 CHHT,分别偏高  $0.05$  和  $0.03\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ 。

本文对东北地区 129 个站月气温进行了均一性检验和订正,但仍存在一定的不确定性,尤其是在 1950 年之前,资料缺测、站点偏少、参考序列的不确定以及元数据的缺失等均可能导致均一性结果的不确定性。因此在未来的研究中,将继续收集和补充东北地区的气温资料,尤其是 1950 年之前的资料,不断进行元数据的收集以减少均一性检验和订正的不确定性。

### 参考文献

曹丽娟,鞠晓慧,刘小宁,2010. PMFT 方法对我国年平均风速的均一性检验[J]. 气象,36(10):52-56. Cao L J, Ju X H, Liu X N, 2010. Penalized maximal  $F$  test for the homogeneity study of the annual mean wind speed over China[J]. Meteor Mon,36(10):52-56(in Chinese).

陈哲,杨溯,刘靛珂,2015. 1979—2012 年中国探空相对湿度资料的

非均一性检验与订正[J]. 气象,41(11):1374-1382. Chen Z, Yang S, Liu L K, 2015. Inhomogeneity test and correction of China radiosonde relative humidity data from 1979 to 2012[J]. Meteor Mon,41(11):1374-1382(in Chinese).

高晓容,李庆祥,董文杰,2008. 五台山站历史气候资料的均一性分析[J]. 气象科技,36(1):112-118. Gao X R, Li Q X, Dong W J, 2008. Homogeneity analysis of historical meteorological data at Wutaishan[J]. Meteor Sci Technol, 36(1):112-118(in Chinese).

黄嘉佑,李庆祥,2007. 一种诊断序列非均一性的新方法[J]. 高原气象,26(1):62-66. Huang J Y, Li Q X, 2007. A new diagnosis method for non-homogeneity on a series[J]. Plateau Meteor,26(1):62-66(in Chinese).

李庆祥,2011. 气候资料均一性研究导论[M]. 北京:气象出版社:22-53. Li Q X,2011. Introduction To Homogeneity of Meteorological Data[M]. Peking:China Meteorological Press:22-53(in Chinese).

李庆祥,董文杰,李伟,等,2010. 近百年中国气温变化中的不确定性估计[J]. 科学通报,55(16):1544-1554. Li Q X, Dong W J, Li W, et al, 2010. Assessment of the uncertainties in temperature change in China during the last century[J]. Chinese Sci Bull,55(16):1544-1554(in Chinese).

李亚丽,任芝花,陈高峰,等,2015. 自动与人工观测气温差异偏大的原因及影响分析——以 143 个国家基准站为例[J]. 气象,41(8):1007-1016. Li Y L, Ren Z H, Chen G F, et al, 2015. Causes and impact analysis of errors between temperatures obtained by automatic and manual observations at 143 national automatic benchmark stations[J]. Meteor Mon,41(8):1007-1016(in Chinese).

林学椿,于淑秋,唐国利,1995. 中国近百年温度序列[J]. 大气科学,19(5):525-534. Lin X C, Yu S Q, Tang G L, 1995. Series of average air temperature over China for the last 100-year period[J]. Sci Atmos Sinica,19(5):525-534(in Chinese).

任雨,郭军,2014. 天津 1891 年以来器测气温序列的均一化[J]. 高原气象,33(3):855-860. Ren Y, Guo J, 2014. Homogenization of temperature observation in Tianjin since 1891[J]. Plateau Meteor,33(3):855-860(in Chinese).

孙佳,李永华,李庆祥,等,2014. 重庆气温资料均一性检验和订正的初步分析[J]. 西南师范大学学报(自然科学版),39(9):173-179. Sun J, Li Y H, Li Q X, et al, 2014. On detection and adjustment of homogeneity for annual mean temperature over Chongqing[J]. J Southwest China Normal Univ(Nat Sci), 39(9):173-179(in Chinese).

徐文慧,李庆祥,杨溯,等,2014. 近百年全球地表月气温数据的概况与初步整合[J]. 气候变化研究进展,10(5):358-364. Xu W H, Li Q X, Yang S, et al, 2014. Summary of the typical global monthly surface temperature datasets and the integration of multi-source datasets[J]. Adv Climate Change Res,10(5):358-364(in Chinese).

张高杰,曹丽娟,李亚丽,2013. 均一性对西北五省气温变化特征影响分析[J]. 农业灾害研究,3(2-3):27-32. Zhang G J, Cao L J, Li Y

- L, 2013. Analysis of homogeneity impact on the characteristic of the temperature variation in the five provinces of the Northwest China [J]. *J Agri Catastrophology*, 3 (2-3): 27-32 (in Chinese).
- Alexandersson H, 1986. A homogeneity test applied to precipitation data[J]. *Int J Climatol*, 6(6): 661-675.
- Cao L J, Zhao P, Yan Z W, et al, 2013. Instrumental temperature series in eastern and central China back to the nineteenth century [J]. *J Geophys Res*, 118(15): 8197-8207.
- Easterling D R, Peterson T C, 1995a. A new method for detecting undocumented discontinuities in climatological time series[J]. *Int J Climatol*, 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]. *Atmos Res*, 37(1-3): 19-26.
- IPCC, 2014. *Climate Change 2013: the Physical Science Basis*[M]. Cambridge: Cambridge University Press: 156-168.
- Kohler M A, 1949. Double-mass analysis for testing the consistency of records and for making adjustments[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 30: 188-189.
- Li Q X, Liu X N, Zhang H Z, et al, 2004. Detecting and adjusting temporal inhomogeneity in Chinese mean surface air temperature data[J]. *Adv Atmos Sci*, 21(2): 260-268.
- 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 Z, Yan Z W, 2009. Homogenized daily mean/maximum/minimum temperature series for China from 1960—2008[J]. *Atmos Ocean Sci Lett*, 2(4): 237-243.
- Moberg A, Bergström H, 1997. Homogenization of Swedish temperature data. Part III: the long temperature records from Uppsala and Stockholm[J]. *Int J Climatol*, 17(7): 667-699.
- Peterson T C, Easterling D R, 1994. Creation of homogeneous composite climatological reference series[J]. *Int J Climatol*, 14(6): 671-680.
- Solow A R, 1987. Testing for climate change: an application of the two-phase regression model[J]. *J Climate Appl Meteor*, 26(10): 1401-1405.
- Vincent L A, 1998. A technique for the identification of inhomogeneities in Canadian temperature series[J]. *J Climate*, 11(5): 1094-1104.
- Wang X L, 2008. Penalized maximal F test for detecting undocumented mean shift without trend change[J]. *J Atmos Ocean Technol*, 25(3): 368-384.
- Wang X L, Wen Q H, Wu Y H, et al, 2007. Penalized maximal t test for detecting undocumented mean change in climate data series [J]. *J Appl Meteor Climatol*, 46(6): 916-931.
- 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.
- Yan Z W, Yang C, Jones P, 2001. Influence of inhomogeneity on the estimation of mean and extreme temperature trends in Beijing and Shanghai[J]. *Adv Atmos Sci*, 18(3): 309-322.