

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.

探空资料中的人为误差对中国温度 长期变化趋势的影响

郭艳君^{1, 3, 4} 李庆祥^{2, 3, 4} 丁一汇¹

1 中国气象局国家气候中心, 北京 100081

2 中国气象局国家气象信息中心, 北京 100081

3 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

4 中国科学院研究生院 北京 100049

摘 要 利用 1958~2005 年探空温度序列, 通过质量控制、均一化处理和序列缺测率分析, 探讨了探空资料中人为误差对中国高空气温变化趋势的影响。中国探空温度序列存在明显的间断点, 72% 的序列包含 2~4 个间断点。相应的订正总体上降低了 1958 年以来平流层低层降温和对流层升温趋势, 如 700 hPa 和 100 hPa 平均趋势值分别降低 0.12 K/10 a 和 0.04 K/10 a。缺测率是气温区域平均趋势估算的重要参数, 30% 作为最大缺测率是中国探空温度序列适宜的取样标准。提高取样标准 (台站数减少) 使 1958~2005 年间对流层上层和平流层下层的降温趋势减弱。中国高空气温变化趋势与全球或北半球大体一致, 但也有不同特点: 500 hPa 以下大气趋于升温, 以上则趋于降温, 最大降温趋势位于对流上部的 300 hPa, 而且各气候区间区域差异性十分明显。

关键词 高空大气 探空温度 间断点 均一化 趋势

文章编号 1006-9895 (2009) 06-1309-10

中图分类号 P423

文献标识码 A

The Effect of Artificial Bias on Free Air Temperature Trend Derived from Historical Radiosonde Data in China

Guo Yanjun^{1, 3, 4}, Li Qingxiang^{2, 3, 4}, and Ding Yihui¹

1 National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

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

3 Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

4 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract The effects of the artificial bias on free air temperature trend derived from historical radiosonde data in China were assessed, by conducting quality control, homogenization and analysis on miss rate to the individual radiosonde temperature time series (RTTS) during 1958–2005. Identification reveals evident discontinuities in the RTTS with 2–4 breakpoints at 72% of stations. As a result of adjustments, original RTTS exhibit systematic cooling biases in the lower stratosphere and warming in the troposphere, suggesting both cooling in the stratosphere and warming in the troposphere are substantially overestimated in the original radiosonde data, e. g. the cooling trend at 100 hPa decreases 0.12 K/10 a and the warming trend at 700 hPa decreases 0.04 K/10 a. Missing rate is an impor-

tant index to evaluate availability of RTTS for assessing regional average trend, and analyses suggest that the maximum missing rate of 30% is the optimum requirement for RTTS in China. Reduction of sampling stations results in underestimate of average trends in both the troposphere and the lower stratosphere. Upper air temperature changes in China are generally consistent with the results from the globe and the Northern Hemisphere, but there are some discrepancies; the atmosphere tends to warm below 500 hPa and cool in the upper levels with the maximum cooling around 300 hPa. Furthermore, the comparison of the trends among different sub-climatic regions implies spatial heterogeneity in upper air temperature changes in China.

Key words upper atmosphere, radiosonde temperature, discontinuity, homogenization, trend

1 引言

仪器观测资料是现代气候研究必不可少的基础,然而所有的气候观测资料均不同程度受到非气候因素的影响(Easterling et al., 1995),如:观测仪器和方法的改变、台站的迁移或者周围环境的变化等,气候学界将此类因素导致的误差归为人为误差。自气候观测仪器诞生约 200 年来,人为误差对于观测序列的可靠性的影响便倍受关注。与地面观测相比,高空气候观测更为困难且精度不易控制。IPCC (2007) 第 4 次评估报告(IPCC AR4)在确认近 50 年来全球对流层温度趋于升高、平流层温度趋于下降的同时,强调了目前研究结果中的不确定性,其不确定性普遍存在于多种高空温度序列中(卫星遥感、探空和再分析资料)。人为误差导致的噪音几乎与自然变化幅度相同,对于探空温度,仪器和方法的变更以及站点的变化最大可导致 40 年尺度的趋势相差 1 K (Gaffen, 1994)。探空温度序列因其具有观测历史悠久和垂直空间分辨率高的优点,在高空气候变化尤其是区域气候变化研究中具有不可替代性。所以,研究人为误差对中国区域探空温度趋势的影响具有十分重要的科学意义。

世界气象组织(WMO)气候项目出版了气候资料序列误差研究的指导手册,将单一站点气候序列中的观测误差分为随机误差、过失误差及系统误差,并推荐了相应对策:随机误差在气候研究中可以忽略;过失误差通常由操作失误引起,鉴别相对容易,应用质量控制法可剔除,方法也较为成熟;系统误差可导致长期序列的间断点,其鉴别和订正(即均一化)方法随着近年来各国探空温度数据集的建立而发展,且差异较大(郭艳君, 2008)。WMO 气候项目出版的《元数据和数据均一化》手册列举了 14 种以上的均一化方法,其气候学基础或探查时间尺度不同,应用于同一序列可能得到矛盾

的结论。尽管需要普适的均一化方法,但是各国探空观测仪器、方法和台站布设方法的发展差别很大,目前寻求统一的均一化方法相当困难。IPCC AR4 (IPCC, 2007) 指出高空温度变化研究结果中的不确定性,例如, HadRT (Hadley Center 发展的全球格点探空温度集) 和 LKS (Lanzante, Klein 和 Seidel 发展的全球 87 个站的探空温度集) 得到的赤道地区对流层中部温度趋势分别为 $-0.132\text{ K}/10\text{ a}$ 和 $-0.032\text{ K}/10\text{ a}$ 。更为显著的是 HadRT 得到 1979~1997 年全球高空大气温度趋势廓线显示地表至 300 hPa 为降温, LKS 则显示升温(Seidel et al., 2004)。Free et al. (2005) 揭示上述不确定性主要来自原始资料、台站的选取和均一化方法,其中台站的选取造成的不确定性约占 30%。各个数据集往往只收录各个国家(地区)部分而非全部的台站。除资料获取途径的限制外,台站的选择多与序列的缺测率有关,而台站取舍原则应该在台站数对区域平均高空气温趋势影响研究的基础上决定(Gaffen et al., 2002)。

中国探空观测大致开始于 1950 年代,站点遍布全国,均一化研究始于 1990 年代,并且是针对少数台站进行的试验性研究(Zhai et al., 1996; 翟盘茂, 1997), 近期对全国多数探空温度序列的均一化分析(Guo et al., 2008, 2009)证实了仪器换型、辐射订正方法上的修改等造成序列的非均一性在各站探空资料中不同程度的存在,均一化过程也存在着相当的不确定性(郭艳君, 2008)。事实上,很多研究已经注意指出我国气候观测资料的可靠性问题。例如, Li et al. (2004) 在进行中国地面温度序列的均一化处理时注意到, 1960 年代观测时间以及日平均气温计算公式的变化可能影响中国温度序列均一性。Wang et al. (2001) 发现中国地面资料 1965 年存在间断点, Feng et al. (2004) 发现了 1973~1974 年的间断点, Zhai et al. (1996)、翟盘茂

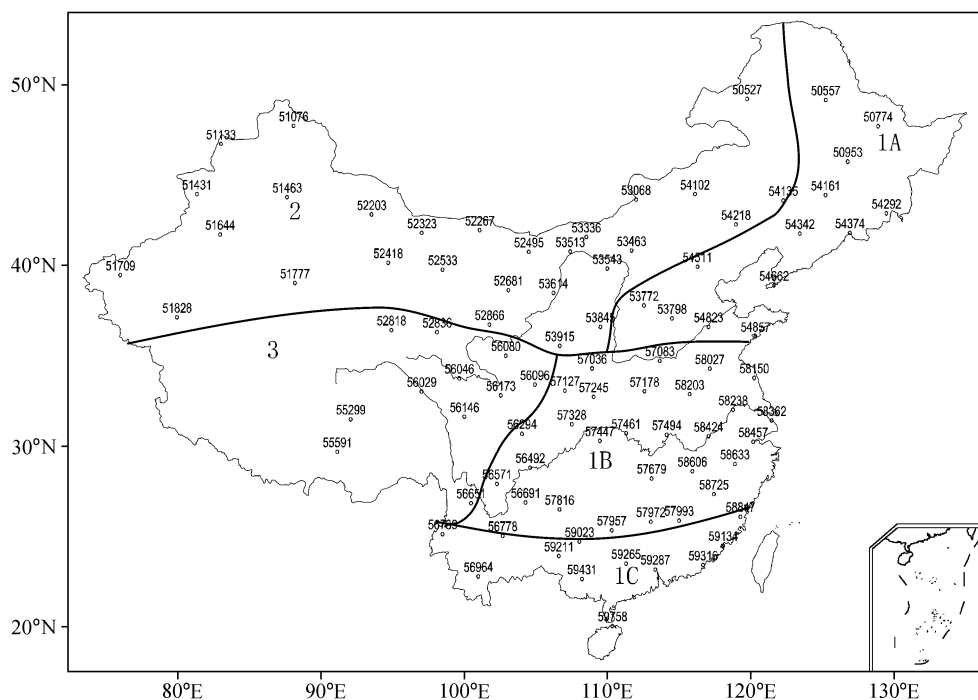


图1 中国探空台站和5个气候分区分布
Fig. 1 Distribution of radiosonde stations and five sub-climatic regions in China

(1997)、Gaffen (1994) 和 Lanzante et al. (2003) 均提示 1960 年代、1970 年代探空温度序列可能有较大的误差。

本文将通过对比原始资料和订正序列，着重分析均一化对中国温度长期变化趋势的影响。原始资料来自中国气象局国家气象信息中心，为全国 116 个探空站 850、700、500、400、300、200、100 hPa 共 7 层 1958 年至 2005 年温度序列。考虑到中国幅员辽阔，探空台站遍及全国（见图 1），不同区域大气环流系统、自然地理条件和人类活动的差异性，分区研究非常必要。根据么枕生（1951）定义的中国气候区划，并参考中国东部季风降水和特点以及各省行政区划，将中国分为 5 个分区：1A：东北和华北，1B：长江流域，1C：华南，2：西北，3：青藏高原。首先对各原始序列进行质量控制、以两相回归法进行间断点探查和订正，讨论均一化处理和缺测率对中国高空温度长期变化趋势的影响，从而客观地揭示中国及各区域高空温度变化趋势。

2 探空温度序列的均一化处理对趋势的影响

2.1 探空温度序列均一化的方法

本文利用大气静力学方法进行探空资料的质量

控制，其基本原理为当两气压层之间的静力学残差超过判据，该记录被认定为错误资料（Collins et al. 1990），翟盘茂（1997）曾利用此方法分析了中国历史探空资料集中的过失误差。

观测序列的间断点可分为有历史记录和无历史记录两种，前者可通过统计其前后的差异得以订正。然而，间断点的形成原因很多，各站历史记录远远不能满足均一化处理的需要（Menne et al., 2005），所以现有探空数据集多采用统计法进行均一化，其原理是以某一时间点前后序列的统计参数作为序列是否存在间断点的判据。本文采用的两相回归法由 Easterling et al. (1995) 发展，首先应用于地面温度的均一化，翟盘茂（1997）和 Guo et al. (2008, 2009) 曾利用此法对中国部分站点的探空序列进行了均一化处理。其基本原理的数学描述如下：

$$\begin{cases} T(i) = T_C - T_R, \\ T(i) = \mu + \alpha i, \end{cases} \quad (1)$$

其中， T_C 和 T_R 是目标序列和参照序列， i 为时间， μ 和 α 是线性模拟系数，在长度为 n 的序列中第 c 处前后分别作线性回归模拟，则

$$T^1(i) = \begin{cases} \mu_1 + \alpha_1 i, & 1 \leq i \leq c. \\ \mu_2 + \alpha_2 i, & c < i \leq n. \end{cases} \quad (2)$$

序列在 c 前后的残差和为

$$U(i) = \frac{(R_1 - R_2)/3}{R_2/(n-4)}. \quad (3)$$

R_1 是 1 到 c 的残差和, R_2 是 $c+1$ 到 n 的残差和。若序列在 c 处不连续, 显然其前后的线性模拟效果最好, 即残差和达到最小值。若残差和通过 t 显著性检验 (如 95% 信度), 则 c 被认定为可能间断点。在找出所有可能不连续点后, 用无参数的 MRPP (multiresponse permutation procedure) 技术进一步检验每个可能间断点的显著性, 通过检验的可能间断点才是真实的间断点。间断点前后的线性回归系数可以下式计算:

$$\left\{ \begin{aligned} \alpha_1 &= \frac{\sum_{i=1}^c (i - \bar{i})(T_i - \bar{T})}{\sum_{i=1}^c (i - \bar{i})^2}, \\ \alpha_2 &= \frac{\sum_{i=c+1}^n (i - \bar{i})(T_i - \bar{T})}{\sum_{i=c+1}^n (i - \bar{i})^2}, \end{aligned} \right. \quad (6)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \mu_1 &= (\bar{T} - \alpha_1 \bar{i}), \\ \mu_2 &= (\bar{T} - \alpha_2 \bar{i}). \end{aligned} \right. \quad (7)$$

以系数 $\alpha_2 - \alpha_1$ 和 $\mu_2 - \mu_1$ 订正值用于间断点前所有的点, 去除前后两部分的趋势影响后, 得到新的序列, 这一步骤不断地重复, 直到不再发现有可能间断点。

均一的气候序列只包含天气和气候学事件, 为了将人为因素导致的间断点与气候突变区分开, 统计学方法利用参照序列和目标序列的差异来探查间断点。合理的参照序列既要充分反映区域气候变动的信号, 还要是均一的, 所以选取合适的参照序列是均一化处理的关键。目前, 世界上最为常用的是相邻台站法, 即以相邻的数个台站的平均值作为参照序列。该方法在欧洲应用较多, 历史记录表明中国探空台站的观测仪器更换多同时进行, 所以不适用此方法。再分析温度序列长期变化趋势的代表性虽然尚存疑义, 但是其均一性恰恰符合参照序列的要求。RARBCORE (RAdiosonde Observation Correction using Reanalysis) 数据集便是以 ERA-40 作为参照序列的 (Haimberger, 2007), QUARC (Quantifying Uncertainty in Adjusted Radiosonde Climate records) 选取了 ERA 和 NRA (NCEP/

NCAR 再分析资料) 作为参照序列 (McCarthy et al., 2008)。考虑到 ERA 序列只到 2002, 与本文研究对象序列时段不符, 因此以 NRA 为参照序列。

一些前期研究工作质疑过 NCEP 资料本身存在“均一性”问题 (黄刚, 2006; 赵天保等, 2004, 2006), 然而这些研究均是以探空资料为基准评价 NCEP 资料。本文所强调的是由于存在非均一性, 未经过均一化检验的探空序列不宜做气候分析是目前高空气候变化研究的共识 (如 Lanzante, 2003, 翟盘茂, 1997)。所以, 目前以原始探空观测资料对再分析资料均一性的评价有待进一步商榷。事实上, 寻找准确的参照序列问题一直是均一化处理的难点问题, 我国前期此类的工作基础较为薄弱, 本文从 NRA 的角度进行了尝试, 在今后的工作中将作进一步探讨。

2.2 间断点探查和订正结果

图 2 给出了全国 116 个台站 1958~2005 年发现间断点台站数和相应订正值的平均值与均方差。两相回归法利用 t 检验来评价间断点是否对序列产生显著影响, 否则作为无间断处理, 所以图 2 显示通过显著性检验的间断点而非全部。根据历史台站记录, 中国探空观测网于 1960 年代至 1970 年代和 2002 年后进行了仪器更换, 1999 年和 2001 年订正方法变更, 而且以上变更各站几乎同时进行。另外, 由图 2 可见, 间断点订正值的均方差显示下降趋势, 说明中国探空温度序列中前期的间断点对序列影响的变率较大。Lanzante et al. (2003) 曾肯定了前苏联和中国 1960 年代仪器更换导致的不均一性。Guo et al. (2008) 和 Guo and Ding (2009) 利用两相回归法以夜间序列和 NRA 再分析资料作为参照序列, 分别对中国东部 6 个探空站和全国 116 个探空站温度序列作均一化处理, 均发现了类似的间断点时间分布; Zhai et al. (1997) 也指出辐射影响订正对中国探空温度序列的影响十分显著。

有必要说明的是, 一般认为统计方法间断点探查的时间误差为两年 (Guo et al., 2008), 本文均一化处理的是季平均序列, 所以图 2 中任一时间前后 2 年内的间断点有可能是同一次仪器或订正方法变更造成的, 或者说图 2 中相对连续的台站数分布并非确定每年均有间断点, 而是统计结果误差所造成的假象。我们的前期工作 (郭艳君, 2008; Guo et al., 2008; Guo and Ding, 2009) 曾给出过数个间断

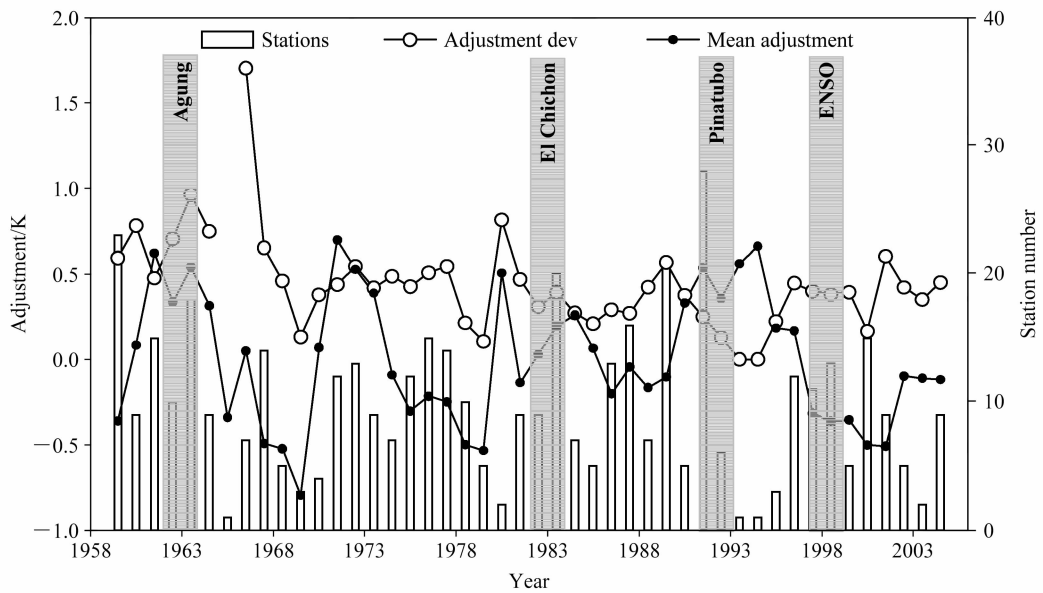


图 2 1958~2005 年间中国 116 个探空站发现间断点台站数与相应订正值的平均值和均方差
Fig. 2 The number of stations with break points of 116 Chinese stations during 1958–2005, and the corresponding mean and standard deviation of adjustments

点探查结果的个例分析，结果显示了台站历史记录
的间断点绝大部分均被统计方法所证实，即探查到
的间断点与台站历史记录具有时间相关性。与历史
记录无关联的间断点（即无历史记录的间断点），
其时间分布恰恰说明了统计方法的优越性——能够
探查到无台站历史记录的间断点，而台站历史记
录的不完备性也是各国高空气候变化研究共同面
临的问题（Peterson et al., 1994）。

探空气温序列均一化的另一难点是区分间断点
和自然气候事件所造成的温度跃动。为避免将自然
温度变化也错判成间断点，大量研究致力于甄别间
断的真伪。普遍结论认为 20 世纪后半叶三次火山
爆发和有记录以来最强的 ENSO 可导致与间断点
相混淆的温度跃动（Gaffen et al., 2002; Free and
Angell, 2002; Lanzante et al., 2003; Free and Sei-
del 2005），影响时间大致为两年，期间探查到的间
断点亦不作修正。本文亦沿用该结论，图 2 所示四
个阴影部分时段的间断点是虚假间断点的可能性比
较大，计算中作为自然温度波动处理。

中国台站温度序列中的间断点个数的频率分布
（图 3）以 3 个为中心，呈不规则的正态分布。无
间断点的频率为 0 显示所有探空温度序列均有间
断点；有 3 个间断点的台站占 30%，有 2~4 个间
断点的台站最为普遍，占 72%，最大值为 6，仅一个

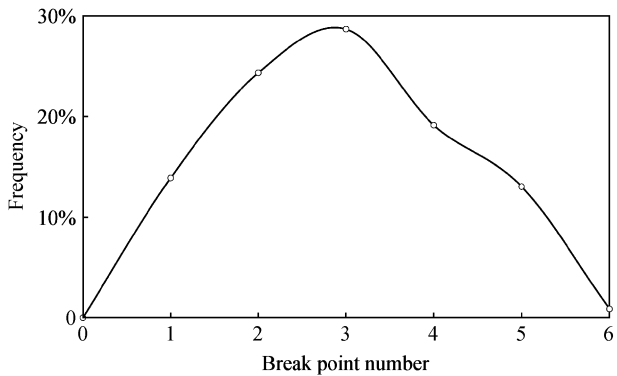


图 3 中国 1958~2005 年单个探空温度序列包含间断点个数的
频率分布
Fig. 3 Frequency distribution of break point number in the ra-
diosonde temperature time series during 1958–2005 in China

站出现。

应用两相回归技术在探查到间断后对其进行了
订正调整，图 4a 给出了中国 1958~2005 年探空序
列订正值的频率分布。订正值的变化范围为−1.6~
1.8 K，其大小呈双峰频率分布（类似于地面气温
的情况（Li et al., 2004）），两个极值分别位于−0.4 K
和 0.6 K 处。分布于−0.6~−0.2 K 和 0.4~0.8 K
区间的订正值接近一半，分别占 29%和 19%，而且
负订正值的分布频率明显高于正订正值。

图 4b 是所有间断点订正值中值和均方差的平

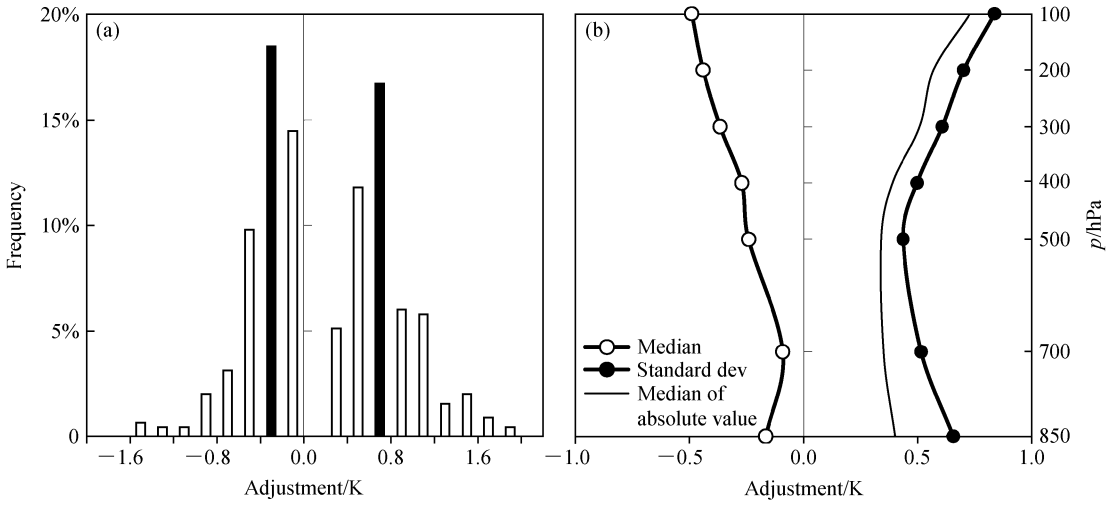


图 4 1958~2005 年中国平均的探空温度序列订正值的 (a) 频率分布以及 (b) 中值、绝对值中值和均方差的垂直廓线

Fig. 4 (a) Frequency distribution of the adjustment and (b) vertical profiles of the adjustment median, median of adjustment absolute value, and standard deviation for the radiosonde temperature time series averaged over China during 1958–2005

均垂直廓线。从 100~850 hPa 订正值的中值均为负值显示订正过程降低升温或降温趋势,各等压面订正变化幅度很大(接近 4 K)。订正值绝对值的中值反映了订正过程对原始序列的影响程度,它随高度的增加反映了均一化对探空气温序列的影响随高度增加而增加,订正值中值廓线也间接证明了这一点,Lanzante et al. (2003) 指出订正值随高度的分布规律与大气密度有关,空气越稀薄探空仪器误差越大。显然订正值中值与绝对值中值的廓线有差异导致均方差的平均垂直廓线在 500 hPa 处最小,近地面和平流层低层的订正值变率较大。总体上,中国探空序列均一化订正值的统计学特征均小于全球尺度的结果,Lanzante et al. (2003) 统计 RARB-CORE 数据集订正值绝对值中值 850 hPa 大于 0.5 K、100 hPa 接近 1.0 K,均大于图 4b 显示的结果。

2.3 均一化处理对趋势计算的影响

图 5 显示了中国 1958~2005 年探空温度订正前、后序列趋势的差值,负值表示均一化处理降低(增加)原始序列的升温(降温)趋势。从各等压面上趋势差值分布可见,中国探空温度序列的趋势对于均一化处理的敏感性具有显著空间差异。平流层下部的 100 hPa 上,均一化对各台站趋势的影响值在 -0.65~0.75 K/10 a 之间,其中 60% 为正差值,即削弱了原始序列降温趋势,负值主要分布于西北地区。对流层顶附近 200 hPa 上,负值分布较 100 hPa 更广泛,从中国西北部延伸至中部,正值的比例降

至 53%,正负极值分别为 -0.44 K/10 a 和 0.54 K/10 a。300 hPa 正负差值的分布、极值与 200 hPa 极为相似,但华南地区的正差值更为显著。500 hPa 的正负差值的分布基本相当,且延伸至对流层下部的 700 hPa 和 850 hPa。500 hPa、700 hPa、850 hPa 负极值分别为 -0.47、-0.58、-0.75,正极大值则为 0.47、0.42、0.56,说明对流层中、下层对于均一化处理的响应程度不同。

3 探空温度序列的缺测率对趋势计算的影响

对于区域平均的气候变化趋势的认识,与观测网络的空间代表性密切相关。探空资料数据集收录的台站数直接影响到区域平均大气温度趋势(Seidel et al., 2004),计算区域平均趋势时,站点稀少显然影响结果的代表性和可信度。中国气象观测台站及气象观测资料的情况非常复杂,不同时期、不同区域资料的质量也存在很大差别,地表气温趋势研究中也存在此类问题(唐国利等, 2005)。事实上,探空数据集的台站取舍往往是以资料序列的缺测率决定的,Gaffen et al. (2000) 认为对于全球探空温度数据集,20% 的缺测率是趋势计算的最小资料需求率。对区域尺度,标准可适当降低。我们定义探空站 7 个等压面的最大缺测率作为台站缺测率。116 个探空观测站 1958~2005 年台站缺测率与台站数的关系(表 1)表明,缺测率 < 30% 时,台

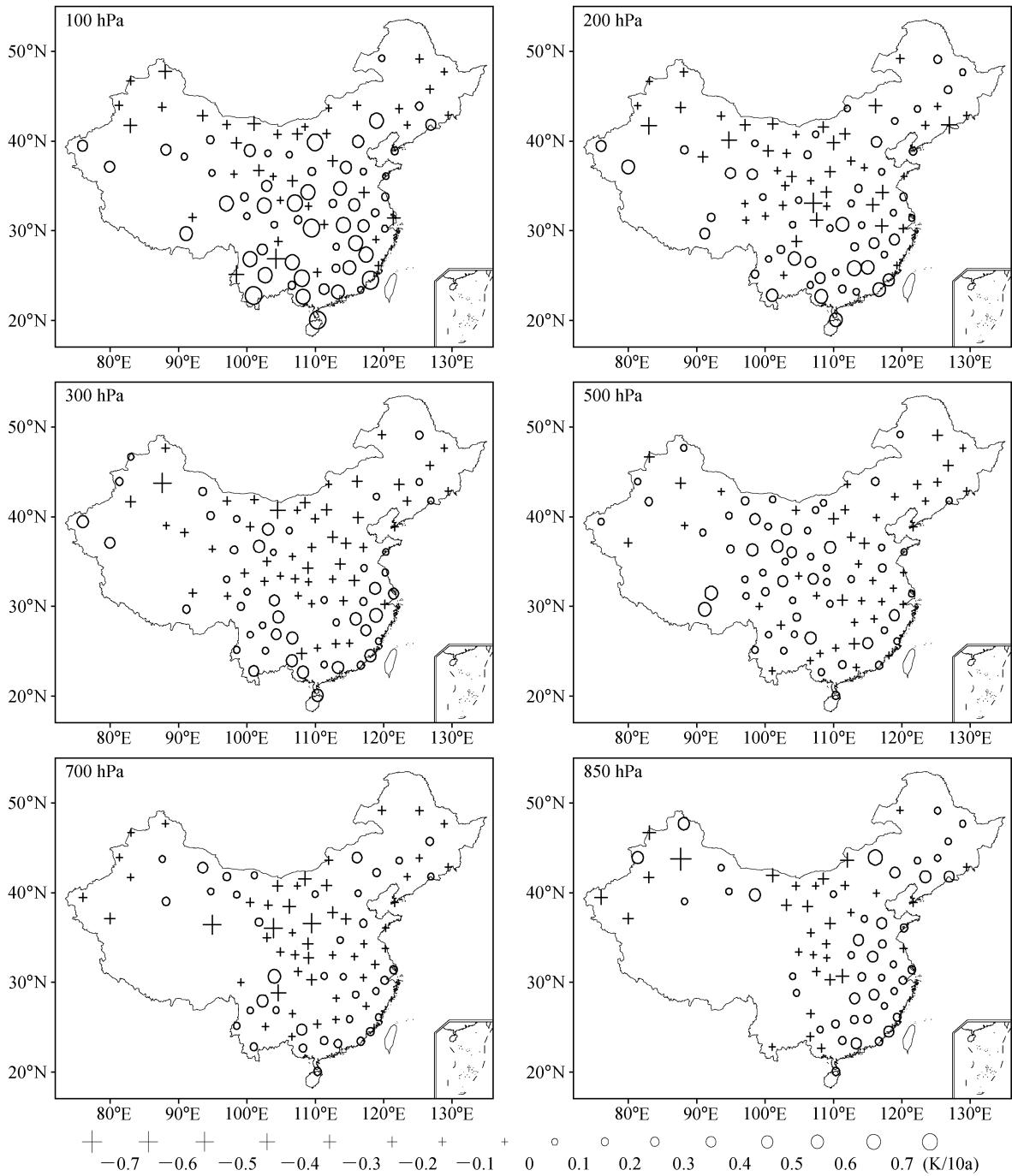


图 5 1958~2005 中国探空温度订正后与原始序列的趋势差值 (单位: K/10 a)

Fig. 5 Trend differences between adjusted and original radiosonde temperature time series in China during 1958–2005

站数随缺测率变化明显；缺测率 $>30\%$ 时，台站数无显著变化，如缺测率从 1% 升至 30% 时；台站个数增加了 75 个，从 30% 升至 70% 时，台站个数仅增加 24 个。

台站取舍除了要研究资源的利用效率外，更重要的是考虑对区域平均趋势的影响。通过不同

缺测率的 1958~2005 年订正后的中国平均的高空温度趋势廓线的比较表明，不同缺测率条件下资料选取的差别可造成趋势廓线的明显差别：如缺测率由 1% 变化为 30% ，台站数由 17 增加为 92 个，对应的 850、700、500、400、300、200、100 hPa 趋势值分别相差 0.05、 -0.01 、 -0.03 、 -0.08 、 -0.02 、

0.09、−0.01 K/10 a；当缺测率由 1%变化为 70%，台站数由 17 增长为 116 个，相应的趋势差别为 0.02、−0.04、−0.05、−0.10、−0.06、0.10、0.07 K/10 a。因此，台站数对中国高空气温区域平均趋势的估算结果影响显著。以台站缺测率阈值作为取样标准，降低阈值（台站数增多）使 1958~2005 年间对流层中下层增温趋势加强、对流层上层和平流层下层趋势加强。相反，当提高阈值（台站数减少）时，对流层上层和平流层下层的降温趋势减弱。Gaffen et al. (2000) 以 15%的缺测率阈值评价 GCOS 数据集的 180 个台站 850~100 hPa 温度序列，满足阈值的台站数为 74；而 50 hPa 序列满足阈值的台站数为 22。分别以 74 和 22 个台站计算 1959~1997 年全球平均气温趋势相差 0.10 K/10 a 左右，最大可达 0.15 K/10 a (700 hPa)。王绍武等 (1996) 以 21 个站计算中国的对流层平均温度，认为 1958~1993 年降温 0.29 °C，平流层下降 2.2 °C，结果与 Gaffen et al. (2000) 得到的北半球结果差别很大。结合图 5 和表 1，30%的缺测率阈值可以作为中国探空气温序列质量较为客观的评价标准，

表 1 中国台站探空气温的缺测率与台站数的关系
Table 1 Missing rates of radiosonde temperature time series (RTTS) and corresponding station numbers in China

时段	资料缺测率							
	1%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%
1958~2005 年	17	68	79	92	103	111	115	116
1958~1978 年	19	47	69	76	78	84	89	97
1979~2005 年	84	105	109	112	114	116		

表 2 1958~2005 中国及各分区区域平均原始温度序列和订正后的探空温度序列趋势的比较 (单位: K/10 a)

Table 2 Comparison of trend between original and adjusted RTTS averaged over China and five sub-climatic regions during 1958–2005 (units: K/10 a)

	全国		1A 区		1B 区		1C 区		2 区		3 区	
	原始	订正	原始	订正	原始	订正	原始	订正	原始	订正	原始	订正
100 hPa	−0.20	−0.08	−0.22	−0.17	−0.29	−0.14	−0.30	0.06	−0.12	−0.12	−0.09	0.14
200 hPa	−0.14	−0.13	−0.08	−0.10	−0.22	−0.15	−0.26	−0.04	−0.08	−0.20	−0.10	−0.06
300 hPa	−0.24	−0.24	−0.21	−0.31	−0.23	−0.16	−0.24	−0.07	−0.27	−0.34	−0.23	−0.28
400 hPa	−0.06	−0.07	−0.01	−0.11	−0.08	−0.11	−0.08	0.04	−0.05	−0.08	−0.09	−0.02
500 hPa	−0.02	0.00	0.05	−0.03	−0.04	−0.04	−0.03	−0.02	−0.01	0.01	−0.07	0.10
700 hPa	0.10	0.06	0.16	0.11	0.07	0.07	0.03	0.11	0.10	0.02	0.13	0.03
850 hPa	0.18	0.19	0.22	0.30	0.11	0.16	0.11	0.19	0.24	0.15		
地面*		0.24		0.35		0.15		0.19		0.34		0.17

*：地面气温趋势引自 Li et al. (2004)。

以此为标准取舍台站来估算中国高空气温区域平均趋势既可较大限度地利用研究资源，又保证了结果的代表性。本文选满足这一标准的 92 个站研究中国区域的高空气温变化。

4 中国高空温度 1958 年以来的变化趋势及其区域差异

IPCC AR4 (IPCC, 2007) 指出近 50 年来全球和北半球高空大气对流层下部升温幅度最大，升温趋势随高度减小至对流层上部转为降温趋势，且降温幅度随高度增加，平流下部 (100 hPa) 降温幅度大于对流层上部。本文的结果表明，中国与全球或北半球高空大气温度趋势垂直变化大体一致，但也有不同的特点：以 500 hPa 为转折点，下部大气为升温，上部降温，最大降温趋势位于对流上部的 300 hPa (表 2)。

对近 50 年中国各个分区的趋势研究的结果表明，1958 年以来中国对流层 500 hPa 以下呈升温趋势，接近地面部分升温幅度最大，升温趋势随高度减小至对流层上部转为降温趋势。值得强调的是，所有区域和全国平均的趋势廓线都显示最大降温带不是平流层而是对流层上部 (300 hPa)，这与全球尺度的结论不同 (IPCC, 2007)。无论下部的升温或上部的降温，其变化趋势的区域差异都十分明显。对流层中低层升温最为显著的是 1A 区 (东北和华北)，而且 1A 区上部的降温亦非常显著，使 1A 区成为高空大气上下温度变化差别最大的区域。1C 区 (华南) 和 3 区 (青藏高原) 的趋势随高度变

化规律性很复杂, 虽然其对流层中、下层显示升温趋势, 但是对流层上部显示升温, 这与这两区的原始序列趋势以及全球、北半球和全国平均的趋势相反, 这与选用的参照序列有关。

5 结论和讨论

本文均一化处理了中国 116 个台站 7 个层次的探空温度序列, 揭示了中国高空温度变化特点, 并讨论了均一化和序列缺测率对中国和各分区高空温度长期变化趋势的影响, 得出如下结论:

中国探空温度序列中普遍存在与仪器和方法变化明显相关的间断点, 时间分布与台站的历史记录具有一定的相关性; 相应的订正对趋势的影响十分显著: 订正值均方差 1958 年以来呈下降趋势, 说明前期的间断点对序列影响的变率较大; 各站温度变化趋势对于均一化的响应差异明显: 均一化大致降低了 1958 年以来平流层低层的降温, 对对流层的影响有明显的区域差异。

台站数对中国高空气温区域平均趋势的估算结果影响显著。台站缺测率对区域高空平均温度趋势影响很大, 降低取样标准(台站数增多)使 1958~2005 年间对流层中下层增温趋势及对流层上层和平流层下层降温趋势加强; 相反, 台站数减少, 对流层上层和平流层下层的降温趋势减弱。

中国与全球或北半球年高空大气温度趋势垂直变化大体一致, 但也有自身特点: 500 hPa 以下大气趋于升温, 以上则趋于降温, 最大降温趋势位于对流上部的 300 hPa。受大气环流系统和区域自然地理条件的影响, 中国高空气温变化趋势具有显著的区域性差异, 青藏高原低层升温趋势较其他区域明显偏高。

Gaffen et al. (2000) 指出全球尺度的均一化处理多降低对流层的升温趋势, 表 2 的结果显示均一化处理对区域规模平均变化的影响呈现明显的区域性差异, 中国和各气候区高空探空序列的趋势对于均一化处理的响应不一。间断点的订正总体使平流层的降温减小, 但影响幅度差别很大。1958~2005 年华南区(1C) 100 hPa 订正前后 1958~2005 年的趋势相差 0.28 K/10 a, 而 1A 区(东北华北) 只有 0.03 K/10 a; 3 区(青藏高原) 100 hPa 订正前 1958~2005 年趋势为降温, 订正后为升温。

各气候区对流层低层的气温变化趋势对均一化

处理的敏感性亦有明显差异: 以 1958~2005 年为例, 除 2 区(西北地区) 外各区, 均一化增加了 850 hPa 升温趋势, 其中东北华北区 850 hPa 上增加了 0.08 K/10 a。总体上, 1958~2005 年的探空温度趋势对均一化处理的敏感性随高度增加而增加, 对平流层低层温度趋势的影响明显高于对流层。

王颖等(2005) 曾利用原始的探空温度序列研究中国高空气温变化, 得出 1960 年以来中国对流层温度变化呈微弱降温趋势, 对流层中下层微弱增温 (0.05 K/10 a), 较地面气温增暖明显偏弱; 对流层上层和平流层低层明显降温, 趋势分别为 -0.17 K/10 a 和 -0.22 °C/10 a。本文利用均一化的探空温度序列得到完全不同结论: 中国对流层下层温度 1958 年以来显著变暖, 850 hPa 的升温趋势可达 0.19 K/10 a, 而平流层底层的降温趋势为 -0.08 K/10 a, 明显小于原始序列的变化趋势; 除西北地区外, 850 hPa 与地面气温的升温幅度十分接近。IPCAR4 亦强调全球对流层下部的升温幅度要高于地面气温, 从这一点也可证明本文在人为误差的订正具有一定的合理性和必要性。

参考文献 (References)

- Aguilar E, Auer I, Brunet M, et al. 2003. Guidelines on climate metadata and homogenization [R]. WMO, WMO-TD No. 1186, WCDMP No. 53, Geneva, Switzerland
- Collins W G, Gandin L S. 1990. Comprehensive hydrostatic quality control at the National Meteorological Center [J]. Mon. Wea. Rev., 118: 752-767.
- Easterling D R, Peterson T C. 1995. A new method for detecting undocumented discontinuities in climatological time series [J]. Int. J. Climatol. 15: 369-377.
- Free M, Angell J K. 2002. Effect of volcanoes on the vertical temperature profile in radiosonde data [J]. J. Geophys. Res., 107: 4101, doi: 10.1029/2001JD001128.
- Free M, Seidel D J. 2005. Causes of differing temperature trends in radiosonde upper air data sets [J]. J. Geophys. Res., 110: D07101, doi: 10.1029/2004JD005481.
- Feng S, Hu Q, Qian W. 2004. Quality control of daily meteorological data in China 1951-2000: A new dataset [J]. Int. J. Climatol., 24: 853-870.
- Gaffen D J, Santer B D, Boyle J S, et al. 2000. Multidecadal changes in the vertical temperature structure of the tropical troposphere [J]. Science, 287: 1242-1245.
- Gaffen D J, Sargent M A, Habermann R E, et al. 2000. Sensitivity of tropospheric and stratospheric temperature trends to radiosonde data quality [J]. J. Climate, 13: 1776-1796.

- Gaffen D J. 1994. Temporal inhomogeneities in radiosonde temperature records [J]. *J. Geophys. Res.*, 99: 3667–3676.
- 郭艳君. 2008. 高空大气温度变化趋势不确定性的研究进展 [J]. *地球科学研究进展*, 23: 24–29. Guo Y. 2008. Advances in uncertainties in upper air temperature trends [J]. *Advances in Earth Science (in Chinese)*, 23: 24–29.
- Guo Y, Thorne P, McCarthy P, et al. 2008. Radiosonde temperature trends and their uncertainties over eastern China [J]. *Int. J. Climatol.*, 28: 1269–1281.
- Guo Y, Ding Y. 2009. Long-term free-atmosphere temperature trends in China derived from homogenized in situ radiosonde temperature series [J]. *J. Climate*, 22: 1037–1051.
- Haimberger L. 2007. Homogenization of radiosonde temperature time series using innovation statistics [J]. *J. Climate*, 20: 1377–1403.
- 黄刚. 2006. NCEP/NCAR 和 ERA-40 再分析资料以及探空观测资料分析中国北方地区年代际气候变化 [J]. *气候与环境研究*, 11: 310–320. Huang G. 2006. The assessment and difference of the interdecadal variations of climate change in northern part of China with the NCEP/NCAR and ERA-40 reanalysis data [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 11: 310–320.
- IPCC. 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis* [M]. Solomon S D, Qin M, Manning Z, et al., Eds. Cambridge, United Kingdom and New York, USA: Cambridge University Press, 996pp.
- Lanzante J R, Klein S A, Seidel D J. 2003. Temporal homogenization of monthly radiosonde temperature data. Part I: Methodology [J]. *J. Climate*, 16: 224–240.
- Li Q, Liu X, Zhang H, et al. 2004. Detecting and adjusting temporal inhomogeneity in Chinese mean surface air temperature data [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 21 (2): 260–268.
- McCarthy M P, Titchner H A, Thorne P W, et al. 2008. Assessing bias and uncertainty in the HadAT adjusted radiosonde climate record [J]. *J. Climate*, 21 (4): 817–832.
- Menne M J, Williams C N Jr. 2005. Detection of undocumented change points using multiple test statistics and composite reference series [J]. *J. Climate*, 18: 4271–4286.
- Peterson T C, Easterling D R. 1994. Creation of homogeneous composite climatological reference series [J]. *Int. J. Climatol.*, 14: 671–680.
- Seidel D J, Angell J K, Christy J, et al. 2004. Uncertainty in signals of large-scale climate variations in radiosonde and satellite upper-air temperature datasets [J]. *J. Climate*, 17: 2225–2240.
- 唐国利, 任国玉. 2005. 近百年中国地表气温变化趋势的再分析 [J]. *气候与环境研究*, 10: 791–798. Tang G, Ren G. 2005. Reanalysis of surface air temperature change of the last 100 years over China [J]. *Climatic and Environment Research (in Chinese)*, 10: 791–798.
- 王绍武, 朱锦红, 裘伟光, 等. 1996. 北半球及中国上空自由大气温度的变化 [C]//气候变化及其数值模拟研究论文 (第三集). 北京: 气象出版社, 12–16. Wang S W, Zhu J H, Qiu W G, et al. 1996. Free air temperatures change in the Northern Hemisphere and China [C]//Research Papers on Climate Change and Numerical Modelling (3). Beijing: China Meteorological Press, 12–16.
- 王颖, 任国玉. 2005. 中国高空温度变化初步分析 [J]. *气候与环境研究*, 10: 780–790. Wang Y, Ren G. 2005. Change in free atmospheric temperature over China during 1961–2004 [J]. *Climatic and Environment Research (in Chinese)*, 10: 780–790.
- Wang J X L, Gaffen D J. 2001. Late-twentieth-century climatology and trends of surface humidity and temperature in China [J]. *J. Climate*, 14: 2833–2845.
- 么枕生. 1951. 由气温变化之谐波分析论中国气候 [J]. *地理学报*, 18: 41–68. Yao Z. The climate of China as based upon the analysis of monthly temperatures [J]. *J. Geogr. Sci.* 18: 41–68.
- Zhai P M, Eskridge R E. 1996. Analyses of inhomogeneities in radiosonde temperature and humidity time series [J]. *J. Climate*, 9: 884–894.
- 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: 564–572. Zhai P M. 1997. Some gross errors and biases in China's historical radiosonde data [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 55: 563–572.
- 赵天保, 符淙斌. 2006. 中国区域 ERA-40、NCEP-2 再分析资料与观测资料的初步比较与分析 [J]. *气候与环境研究*, 11: 14–32.
- Zhao T B, Fu C B. 2006. Preliminary comparison and analysis between ERA-40, NCEP-2 reanalysis and observations over China [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 11: 14–32.
- 赵天保, 艾丽坤, 冯锦明. 2004. NCEP 再分析资料和中国站点观测资料的分析和比较 [J]. *气候与环境研究*, 9: 278–294. Zhao T B, Ai Likun, Feng J M, et al. 2004. An intercomparison between NCEP reanalysis and observed data over China [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 9: 278–294.