

定点连续海洋环境及气象资料的均一性研究

杨扬, 杨锦坤, 苗庆生, 董明媚, 刘玉龙

(国家海洋信息中心 天津 300171)

摘要:目前国内外针对高空和地面气象资料的均一性研究基本成熟,海洋环境资料方面的研究应用亦应得到充分重视。开展多种均一性检验与订正方法联合使用的多模式检验系统研究,将使研究结果更加合理和科学,也可为沿海气候变化研究提供准确的第一手资料。文章在简述非均一性产生原理和均一性检验方法分类的基础上,较为详细地介绍几种常用的均一性检验方法的具体过程和优缺点;基于探空气象资料、地面气象资料和海洋环境资料等3个方面综述不同均一性检验方法的应用研究现状和进展。

关键词:均一性检验;数据处理;水文气象;定点连续观测

中图分类号:P731

文献标志码:A

文章编号:1005-9857(2017)06-0085-07

Homogeneity Study of Fixed-point Continuous Marine Environmental and Meteorological Data

YANG Yang, YANG Jinkun, MIAO Qingsheng, DONG Mingmei, LIU Yulong

(National Marine Data and Information Service, Tianjin 300171, China)

Abstract: In this paper, the principle of inhomogeneity and the classification of homogeneity test methods were briefly described, and several common inhomogeneity methods and relative merits were described in detail. The present status and the progress were reviewed based on the applications of the different homogeneity methods to the radiosonde meteorological data, ground meteorological data, and marine environment data. At present, the homogeneity research of radiosonde and ground meteorological data is mature, and the research and application in marine environmental data should also be given full attention. By carrying out a variety of test and correction methods combined with the use of multi-mode test system, the results would be more reasonable and scientific, and also will provide accurate first-hand information for the coastal climate change researches.

Key words: Homogeneity test, Data processing, Hydrometeor, Fixed-point continuous observation

收稿日期:2016-12-19;修订日期:2017-05-22

作者简介:杨扬,助理研究员,硕士,研究方向为水文气象资料处理、管理、质量控制和方法,电子信箱:yang03034101@126.com

通信作者:杨锦坤,高级工程师,硕士,研究方向为水文气象资料管理和质控方法,电子信箱:yangjk@nmdis.org.cn

长时间序列的海洋气象资料是海洋环境变化、气候变化以及海—气相互作用等领域研究的基础,其中定点连续观测的海洋环境和气象资料是重中之重。由于观测数据在观测记录过程中不可避免地受到诸多主观或客观方面的影响^[1-2](如台站迁移、仪器故障或变更、系统更新升级、观测人员更换或水平不一、观测频次和时间改变、统计分析方法改变等),使得观测数据不仅记录真实的环境气候变化,还隐藏着一些非均一变化,而这些变化将直接影响资料同化研究的发展以及相关业务工作质量和水平的提高^[3]。国外许多专家已经在气象资料序列均一性检验与订正方面做了大量的研究工作并且取得重大进展^[4-8]。近年来,我国科研人员致力于气象资料(尤其是气温资料)的均一性研究和订正并建立均一化数据集^[9-14],而对于气压、降水、风速和相对湿度等资料的均一性研究仍停留于试验性水平;海洋水文环境资料的均一性研究起步更晚,许多科研工作目前仍使用没有经过任何均一性检验和订正的原始数据,使得研究结论中存在相当多的不确定性^[15-16]。使用经过均一化处理的数据进行科学研究更利于真实可靠地评估海洋环境历史气候变化趋势和变化速率,尤其对于气候态和极端事件的研究更加重要^[2,17]。因此,深入研究各类资料尤其是海洋环境水文资料的均一性检验与订正方法,努力发展适用于资料均一性业务化的实施手段,是一个重要课题。

1 资料均一性

时间序列长、连续性强且均一性较好的各种学科数据集是科研工作的基础。均一性的概念最早由 Conrad^[18]于 1950 年提出,他认为只包含天气和气候变化的时间序列才可称之为均一性时间序列。然而许多非气候因素对大多数长时间序列造成不同程度的影响,以至于一些气候因素的真实变化被掩盖。Mitchell^[19]于 1953 年指出,站点迁移以及观测仪器、观测技术、观测时间、计算方法和站点周围环境的改变是影响均一性的主要非气候因素。这些因素可能会导致虚假的、不连续的变化趋势,以至于得出模糊甚至是歪曲的气候变化事实^[20]。因此,对资料进行均一化处理是十分重要和必要的。

1.1 非均一性产生原理

以 $\{y_i\}$ ($i=1,2,\dots,n$) 代表某要素的一个长时间序列的数据。若 $\{y_i\}$ 样本取自同一总体,则称为均一性序列;反之,则称为非均一性序列。其典型表现为:

$$E(y_i) = \begin{cases} \mu, & i=1,2,\dots,m \\ \mu + \Delta, & i=m+1,m+2,\dots,n \end{cases} \quad (1)$$

式(1)表明 $\{y_i\}$ 序列在 m 点发生间断,其数学期望值 $E(y_i)$ 在第 m 点前后有明显变化,变化量为 Δ ^[21]。

1.2 均一性检验方法分类

均一性检验的方法有很多种,李庆祥等^[1,22]总结过去几十年来发展起来的资料均一性检验方法,将其大致归纳为 2 类。①直接方法:包括元数据(Metadata)的应用和仪器的平行比较以及统计研究;②间接方法:包括利用单站资料、构造参照序列、主观调整和客观统计。

这种分类方法与郭艳君^[23]提出的均一化方法分类极为吻合,郭艳君认为均一化方法主要有直接修订法和间接修订法(即统计方法)2 类。①直接修订法:包括历史记录法、单点台站的对比观测和不同仪器的统计结果;②间接修订法:利用统计方法检测探空序列中的突变来判定间断点。

目前资料均一化检验方法的发展趋势主要有 2 个方向。①不依赖于参考序列进行的单站待检资料的均一性检验,主要包括惩罚最大 F 检验^[24-26]、F 检验^[27-28]、T 检验^[28-29]、U 检验^[28-29]和偏差检验^[27-28];②通过多站或已均一化的数据集作为参考序列对待检资料进行的均一性检验,主要包括惩罚最大 T 检验^[24-26]、标准正态检验法^[4]、两项回归检验法^[30]、连续 T 检验^[28]和距平累加法^[28]等。

2 几种常用的均一性检验方法

2.1 标准正态检验法

Alexandersson^[4]发展的广泛适用的标准正态检验法(Standard Normal Homogeneity Test, SNHT)是一种最大似然检验方法,利用邻近站的资料构建待检序列的参考序列,对待检序列和参考序列的比值或差值序列进行均一性检验。具体检验过程^[31]如下。

如果 $\{Z_i\}$ 序列无间断点,统计检验为:

零假设 $H_0: z \in N(0,1) \forall_i$ (2)

如果 $\{Z_i\}$ 序列有一间断点且出现在序列 v 处,统计检验为:

H_1 ,对某些 $1 \leq v \leq n$ 和 $\mu_1 \neq \mu_2$ 有

$$\begin{cases} z \in N(\mu_1,1), i \leq v \\ z \in N(\mu_2,1), i > v \end{cases}$$
 (3)

这里 $z \in N(0,1)$ 为正态分布, $\bar{z}_1$ 和 $\bar{z}_2$ 分别为间断点 v 前后 2 个序列的平均值, v 为假设的断点前的样本数。

$$\bar{z}_1 = \frac{1}{v} \sum_{i=1}^v z_i, \bar{z}_2 = \frac{1}{n-v} (\sum_{i=v+1}^n z_i)$$
 (4)

$$\max_{\mu_1, \mu_2, v} \frac{(2\pi)^{-\frac{n}{2}} e^{-\frac{1}{2} [\sum_{i=1}^v (z_i - \mu_1)^2 + \sum_{i=v+1}^n (z_i - \mu_2)^2]}}{(2\pi)^{-\frac{n}{2}} e^{-\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n z_i^2}} > c$$
 (5)

将式(4)带入式(5)得

$$[v \bar{z}_1^2 + (n-v) \bar{z}_2^2] > 2 \ln c = c'$$
 (6)

令 $T_v = [v \bar{z}_1^2 + (n-v) \bar{z}_2^2]$, 则可构造检验统计量

$$T_0 = \max_{1 \leq v \leq n} \{T_v\} = \max_{1 \leq v \leq n} [v \bar{z}_1^2 + (n-v) \bar{z}_2^2]$$
 (7)

根据式(7)可计算出检验统计量 T 序列的最大值 $T_{\max}$ 。当 $T_{\max}$ 大于某临界值水平 T_{95} , 则该序列为该水平上的非均一。其中临界值与序列长度 n 有关。

这种依赖于参考序列进行均一性检验的 SNHT 方法是目前国内外比较常用的方法,但参考序列的选取对检验效果有很大影响,如何选取好的参考序列也是均一化的难点之一^[32]。

2.2 两项回归法

两项回归法(Two-Phase Regression, TPR)由 Solow^[30]于 1987 年提出,1995 年经 Easterling 和 Peterson 等^[6]加以完善,后称之为 E-P 技术。该方法首先被应用于地面温度的均一化检验,其基本原理是以待检序列与参考序列的差作为检测序列,在可能的间断点前后作线性回归,当 2 段线性回归的残差达到最小值时,则该时间点为资料的间断点(非均一点)^[23]。具体检验过程^[33]如下。

对于待检序列 $\{Z_i\}$ 建立模型:

$$Z_t = \begin{cases} \mu_1 t + \alpha_1 t + \epsilon_t, t = 1, 2, \dots, a \\ \mu_2 t + \alpha_2 t + \epsilon_t, t = a + 1, a + 2, \dots, n \end{cases}$$
 (8)

式中: μ_1 和 μ_2 为截距; α_1 和 α_2 为回归趋势系数; $\{\epsilon_t\}$ 代表序列的误差序列。

建立回归模型:

$$F_c = \frac{(SSE_{Red} - SSE_{Full})/2}{SSE_{Full}/(n-4)}$$
 (9)

式中: SSE_{Full} 、 SSE_{Red} 分别为 $\mu_1 \neq \mu_2$ 、 $\alpha_1 \neq \alpha_2$ 和 $\mu_1 = \mu_2$ 、 $\alpha_1 = \alpha_2$ 时的残差平方和。取序列 $\{F_i\}$ 的最大值,即 $F_{\max} = \max_{1 \leq i \leq n} F_c$ 。当 $F_{\max}$ 大于标准值时,就认为 a 是一个间断点,否则为非间断点。

两项回归法是众多均一化检验方法中较为经典的一种方法,是检测待检序列中存在均值及趋势转折点的有效方法,此方法对于序列中由人为原因造成的不连续点有较好的检测效果^[34]。该方法对于中国探空资料序列是较为适用的均一化方法,翟盘茂^[35]对广州和北京等地高空温度的均一化处理也印证了这一观点。

2.3 惩罚最大 F 检验法

惩罚最大 F 检验法(Penalized Maximal F test, PMFT)经验性地考虑时间序列的滞后一阶自相关导致的统计量检验偏差问题,并嵌入回归检验算法,能用于检验并订正序列中一个或多个突变点。通过应用经验的惩罚函数,可使误报警率和检验能力的非均匀分布问题大大减少^[2,24-26,36]。具体检验过程^[3,36]如下。

假设变量 ϵ_t 的平均值为 0、方差为 σ^2 ,对于检验线性趋势为 β 的时间序列 $\{X_i\}$,要检验序列在时间 $t = k$ 时刻是否存在 1 个突变点。原假设为:

$$X_t = \mu + \beta t + \epsilon_t, t = 1, 2, \dots, N$$
 (10)

若存在间断点,假设为:

$$H_a: \begin{cases} X_t = \mu_1 + \beta t + \epsilon_t, t \leq k \\ X_t = \mu_2 + \beta t + \epsilon_t, k + 1 \leq t \leq N \end{cases}$$
 (11)

式中: $\mu_1 \neq \mu_2$, 当 H_a 为真时,则 $t = k$ 为间断点。用 $\Delta = |\mu_1 - \mu_2|$ 来度量突变值的大小。其显著性判据为:

$$F_{\max} = \max_{1 \leq k \leq N-1} [P(k)F_c(k)]$$
 (12)

式中: $P(k)$ 为通过试验得到的经验性的惩罚因子,其建立方法可参照文献[24]和[25]。此外,

$$F_c(k) = \frac{(E_0 - E_A)}{E_A / (N - 3)} \tag{13}$$

$$E_A = \sum_{t=1}^k (X_t - \hat{\mu}_1 - \hat{\beta}t)^2 + \sum_{t=k+1}^N (X_t - \hat{\mu}_2 - \hat{\beta}t)^2 \tag{14}$$

$$E_0 = \sum_{t=1}^N (X_t - \hat{\mu}_0 - \hat{\beta}_0 t)^2 \tag{15}$$

式中： $\hat{\mu}_0$ 和 $\hat{\beta}_0$ 是在约束条件 $\mu_1 = \mu_2 = \mu$ 下的估计值。

通过回归检验算法检验出来多个间断点，计算所有间断点的统计量 $F_{\max}$ ，找出最大的 $F_{\max}$ 对应的间断点，如果是显著的，该突变就被认为是找到的第 1 个间断点；寻找该间断点位置之后每段最可能的间断点，估计其显著性，找出下一个可能的间断点，重复该过程，分步找出所有的间断点；将间断点按照显著性由大到小排列，形成间断点列表，判断最小的间断是否显著，当不显著时即剔除该间断点，再次评估剩余间断的显著性，最终保留统计显著的间断即为序列检验得到的变点^[24-25,36]。

这种方法不依赖参考序列，因而避免由于参考序列非均一带来的检验误差^[24-25]，但必须有完整且详尽的元数据信息作为支持，才能准确判断检验出来的断点是否是真实的非均一性点。此外，大量研究表明，单站检验法并不能完全检验出气候序

列的非均一性^[28]，因其不能去除气候变化本身的变化趋势，会导致在断点判断上存在漏判的现象^[37]，且该方法受分段检验的影响，能检验的最短序列长度是 20^[26]。

2.4 惩罚最大 T 检验法

惩罚最大 T 检验法 (Penalized Maximal T test, PMT) 和 PMFT 是加拿大环境部的 Wang^[24-26] 在 SHNT、TPR 等的基础上发展的 RHtest 序列均一性检验系统中的 2 种不同检验方法，该系统得到国内外很多研究人员的试用和认可。PMT 也是针对正态化的待检序列进行的 (待检序列的构建过程与 SNHT 相同)，与 PMFT 不同的是，PMT 对序列进行均一性检验时需要依赖参考序列。具体检验过程^[3]如下。

假设 $\{X_t\}$ ($t=1, \dots, N$) 为正态分布的序列，即原假设为 $\{X_t\} \sim \text{IID}\lambda(\mu, \sigma^2)$ 。

$$H_a: \begin{cases} \{X_t\} \sim \text{IID}\lambda(\mu_1, \sigma^2), t=1, \dots, k \\ \{X_t\} \sim \text{IID}\lambda(\mu_2, \sigma^2), t=k+1, \dots, N \end{cases} \tag{16}$$

式中： $\mu_1 \neq \mu_2$ ，当 H_a 为真时，则 $t=k$ 为间断点； $\{X_t\} \sim \text{IID}\lambda(\mu, \sigma^2)$ 代表 $\{X_t\}$ 服从高斯分布，其平均值为 μ 、方差为 σ^2 。

对于序列 $\{X_t\}$ ，如果有 1 个出现在 k 点的间断点 ($1 \leq k \leq n$)，则最可能的间断点服从分布：

$$P_t = \max_{1 \leq k \leq n-1} \left[P(k) \frac{n-2}{\left(\sum_{1 \leq t \leq k} (X_t - \mu_1)^2 + \sum_{k+1 \leq t \leq n} (X_t - \mu_2)^2 \right)} \left(\frac{k(n-k)}{n} \right)^{\frac{1}{2}} |\mu_1 - \mu_2| \right] \tag{17}$$

式中： $P(k)$ 为经验性的惩罚因子。

PMT 可消除样本长度不同对检验结果造成的影响，较 SNHT 有较大的改进和提高，均一参考序列的使用能有效提高对真实非气候断点的判断^[25]。此外，由于 $P(k)$ 的引入，使得其结果对序列中部间断点的判断能力增强。

3 我国均一化检验方法的研究和应用

国外学者于 20 世纪 80 年代初对气象资料的均一性开展大量的研究工作^[38-42]，结果表明，去除显著间断点的时间序列能更准确且更容易地进行气候要素分析^[4,43]。我国的均一化研究起步较晚，探空观测资料均一化研究始于 20 世纪 90 年代，并且是针对少数台站进行的试验性研究^[35,44]。近年来，很多学者致力于气温、大气压强、降水量、风速风向

等地面观测气象要素的均一性检验及订正分析研究，开展一系列尝试性研究^[35-36,45-48]，尤其是对气温数据的均一性研究已取得突破性进展，建立了 1951—2004 年的中国均一化历史气温数据集，为气候研究应用等工作提供高质量气温数据^[49]。与此同时，对于海洋环境水文与气象要素的均一性研究才刚刚起步，需要大力发展。

3.1 探空气象资料均一性检验的研究和应用

翟盘茂^[35]利用综合静力学质量控制技术，分析中国历史探空资料集中的一些过失和误差情况，结合 E-P 技术着重研究 20 世纪 60 年代探空资料中的不均性问题，结果表明，资料的不均一性与探空仪和辐射订正方法的改变有密切联系。

郭艳君等^[23,32,47]从理论基础入手，系统总结国内

外近年来高空大气温度长期变化趋势的研究成果及其不确定性产生的主要原因,通过静力学质量控制、两项回归法和再分析序列对1958—2005年我国116个探空站的高空温度序列进行均一化处理,结果表明,我国探空温度序列存在明显的间断点,仪器和辐射订正方法的改变等是造成间断点的主要原因,间断点的订正对序列趋势的影响较为显著;两项回归法是适合中国高空温度序列均一化检验的方法,参照序列可选取夜间序列或再分析资料;此外还对序列的不确定性进行探讨,指出造成不确定性的主要原因是原始资料、台站选取和不同均一化方法的选用。

陈哲等^[50-51]先后利用PMFT、PMT(以ERA-interim资料作为参考序列)对中国的位势高度资料和等压面月平均探空温度资料(1979—2012年)进行非均一性检验和订正,发现该资料的非均一性问题。在此基础上,陈哲等^[37]又利用3种不同的均一性检验方法(PMFT、PMT和美国国家气候数据研究中心开发的Pairwise),结合再分析资料和元数据信息,对中国123个探空台站的温度资料(1951—2008年)进行均一性检验和订正,结果表明,3种方法对中国探空温度资料订正的幅度和订正前后的趋势变化存在差异,其中PMT结合再分析资料的客观判断方法较适合中国探空资料的均一性检验和订正。

3.2 地面气象资料均一性检验的研究和应用

远芳等^[52]使用RHtest软件与元数据信息相结合的方法,对中国825个基准/基本站的地面气压月值数据进行均一性检验和订正,取得明显效果,发现有400个站的气压数据均一、425个站存在系统误差,均一化之后,站点气压长期趋势的空间一致性更好。

李金田等^[53]利用SNHT和t检验方法对临河站时间序列长达52年的地面温度资料进行均一化检验,非均一的时间断点分别出现在1980年和1995年,这与站点迁移和高大建筑建设的时间相吻合,在季节上主要表现为冬夏明显、春秋次之。

张卉等^[54]利用1957—2013年五台山气象观测站的地面逐月气温和降水量资料,采用4种不同的均一性检验方法(滑动T检验、回归订正法、线性倾向估计、滑动平均法),全面分析五台山气象站迁站前后气候资料均一性与气候变化特征。

张高杰等^[3]应用RHtest方法结合台站元数据信息对我国1725个气象台站1961—2009年月降水资料进行均一性检验试验和订正,田红等^[31]采用SNHT对江淮流域内苏皖2省的41个代表站1961—2003年逐年降水量序列进行均一性检验,刘小宁等^[55]利用比值法对我国1951—1990年年降水量序列进行均一性检验,以上研究结果均表明,我国降水资料序列均一性良好,绝大部分降水资料基本可靠,站址迁移及雨量器的更换是造成部分降水序列非均一的重要原因,订正后的降水序列均一性有很大改善。

刘小宁等^[45]采用SNHT对1951—1990年我国690个气象观测站年平均风速资料进行均一性检验,曹丽娟等^[36]利用PMFT对1951—2006年我国701个气象观测站年平均风速资料进行均一性检验,得到相似结论,即我国大部分台站风速资料均一性良好,台站迁移和仪器改变是引起年平均风速序列非均一性的主要原因,其中仪器改变是最重要的原因。

朱亚妮等^[56]利用PMT和PMFT,选取均一的邻近站为参考站,使用相关系统权重平均构建参考序列,结合元数据信息,对近64年中国2400余个国家级地面站月平均相对湿度进行非均一性检验与订正,结果表明,中国地面相对湿度资料存在较严重的非均一问题,68%的台站存在断点,人工观测转自动观测、台站迁移和时次变化是造成序列非均一的主要原因。

3.3 海洋环境资料均一性检验的研究和应用

相对于气象观测资料序列的非均一性研究而言,海洋要素(如海平面、海表温度)资料序列的非均一性研究甚少,尚停留在尝试水平且方法单一,仅见在渤海海域的初步研究^[2,57]。

王慧等^[57]主要使用趋势性和周期性信号、显著性检验技术以及相邻站同步资料对比分析等方法对渤海西部海平面资料的均一性进行诊断及订正,李琰等^[2]采用PMFT和PMT对环渤海沿岸具有代表性且资料完整的6个海洋观测站的月平均海表温度(SST)序列作均一性检验和订正。虽然二者的研究方法与研究对象均有不同,但结果相似,即无论是渤海西部的海平面资料序列,还是环渤海地区的

SST 资料序列都存在明显的非均一性,观测站较大距离迁移、观测系统和仪器改变、零点变动、地面沉降以及自然环境变化等都是造成资料序列非均一性的原因,订正之后的资料序列长期变化趋势更加明显、线性相关系数变大。

4 讨论与展望

目前国内外有 10 余种对资料进行均一性检验与订正的方法,多数学者都是用某一种方法对一种或几种要素进行检验,但大量文献表明,不同的均一性检验与订正方法对同一序列的检验是存在差异的。Free 等^[58]和陈哲等^[37]分别采用不同的均一性检验方法对国内外探空温度资料序列进行研究分析,都指出不同均一化方法对研究结果会造成不同程度的不确定性,并简单指出了大致原因。

截至 2016 年,我国有 120 余个海洋观测台站,在国内外针对气象资料的均一性研究基本成熟的基础上,在海洋环境资料方面的研究和应用亦应得到充分重视。为能更加有效、充分地利用越来越多的观测资料,亟待解决对其进行均一化处理并制作形成均一性的科学合理的数据集的重要问题。如何选取最适合中国海洋环境水文与气象资料特点的均一性检验方法,以及如何建立多种均一性检验与订正方法联合使用研究的检验系统,也是今后研究的重点和关键。

参考文献

- [1] 李庆祥,刘小宁,张洪政,等.定点观测气候序列的均一性研究[J].气象科技,2003,31(1):3-10.
- [2] 李琰,牟林,王国松,等.环渤海沿岸海表温度资料的均一性检验与订正[J].海洋学报,2016,38(3):27-39.
- [3] 张高杰,何金海,周自江,等.RHtest 方法对我国降水资料的均一性检验试验[J].气象科技,2012,40(6):915-921.
- [4] ALEXANDERSSON H.A homogeneity test applied to precipitation data[J].International Journal Climatology,1986(6):661-675.
- [5] JONES P D,BRADLEY R S,DIAZ H F,et al.Northern Hemisphere surface air temperature variations:1851-1984[J].Journal of Climate and Applied Meteorology,1986,25:161-179.
- [6] EASTERLING D R,PETERSON T C.A new method for detecting undocumented discontinuities in climatological time series[J].International Journal Climatology,1995,15:369-377.
- [7] HERZOG J,MULLE W G.Homogenization of various climatological parameters in the German weather service[R].In:Pro-

- ceedings of the first seminar for homogenization of surface climatological data,1996:101-111.
- [8] PETERSON T C,EASTERLING D R,KARL T R,et al.Homogeneity adjustments of in situ atmospheric climate data: a review[J].International Journal of Climatology,1998,18:1493-1517.
- [9] LI Q X,LIU X N,ZHANG H Z,et al.Detecting and adjusting on temporal inhomogeneity in Chinese mean surface air temperature dataset[J].Advance in Atmospheric Sciences,2004,21(2):260-268.
- [10] 李庆祥,李伟.近半个世纪中国区域历史气温网格数据集的建立[J].气象学报,2007,65(2):293-300.
- [11] LI Q X,PENG J D,SHEN Y.Development of China homogenized monthly precipitation dataset during 1900-2009[J].Journal of Geographic Science,2012,22(4):579-593.
- [12] CAO L J,ZHAO P,YAN Z W,et al.Instrumental temperature series in eastern and central China back to the nineteenth century[J].Journal of Geophysical Research:Atmospheres,2013,118(15):8197-8207.
- [13] XU W H,LI Q X,WANG X L,et al.Homogenization of Chinese daily surface air temperature and analysis of trends in the extreme temperature indices[J].Journal of Geophysical Research:Atmospheres,2013,118(17):9708-9720.
- [14] ZHANG L,REN G Y,REN Y Y,et al.Effect of data homogenization on estimate of temperature trend:a case of Huairou station in Beijing municipality[J].Theoretical and Applied Climatology,2014,115(34):365-373.
- [15] 方国洪,王凯,郭丰义,等.近 30 年渤海水文和气象状况的长期变化及其相互关系[J].海洋与湖沼,2002,33(5):515-525.
- [16] YAN Z W,YANG C.Influence of Inhomogeneity on the Estimation of mean and extreme temperature trends in Beijing and Shanghai[J].Advances in Atmospheric Sciences,2001,18(3):309-322.
- [17] 肖冰霜,马玉霞,赵天保,等.基于均一化资料的中国大陆极端温度的长期趋势[J].气象,2016,42(3):339-346.
- [18] CONRAD V,POLLAK C.Methods in Climatology[M].2nd ed.Cambridge:Harvard University Press,1950:459.
- [19] MITEHELL J M.On the causes of instrumentally observed secular temperature trends[J].J Meteor,1953,10(4):244-261.
- [20] 郭宏,张称意,王立新,等.近 50 年中国东部林区最高气温序列[J].林业科学,2013,49(8):1-9.
- [21] 宋超辉,刘小宁,李集明.气温序列非均一性检验方法的研究[J].应用气象学报,1995,6(3):289-296.
- [22] 李庆祥.气候资料均一性研究导论[M].北京:气象出版社,2011:11-12.
- [23] 郭艳君.高空大气温度变化趋势不确定性的研究进展[J].地

- 球科学进展,2008,23(1):24—30.
- [24] WANG X L. Penalized maximal F-test for detecting undocumented mean-shifts without trend-change[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2007, 25(3): 368—384.
- [25] WANG X L, WEN Q H, WU Y. Penalized maximal t test for detecting undocumented mean change in climate data series[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2007, 46(6): 916—931.
- [26] WANG X L. Accounting for autocorrelation in detecting mean shifts in climate series using the penalized maximal T or F test[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2008, 47(9): 2423—2444.
- [27] 王树廷,王伯民,等.气象资料的整理和统计方法[M].北京:气象出版社,1982:34—35.
- [28] 吴利红,毛裕定,胡德云,等.地面气候资料序列均一性检验与订正系统[J].浙江气象,2005,26(4):40—44.
- [29] 屠其璞,王俊德,丁裕果,等.气象应用概率统计学[M].北京:气象出版社,1984:22—23.
- [30] SOLOW A. Testing for climatic change: an application of the two-phase regression model[J]. J Appl Meteorol, 1987, 26: 1401—1405.
- [31] 田红,江双五,鲁俊.江淮流域年降水量和温度的均一性检验[J].气象科学,2008,28(2):227—231.
- [32] 郭艳君,李庆祥,丁一汇.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,2009,33(6):1309—1318.
- [33] 张高杰,曹丽娟,李亚丽.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,2013,3(2/3):27—32.
- [34] 魏娜,孙炯,姜创业,等.台站迁移对陕西省气温资料均一性的影响及其偏差订正[J].气象,2012,38(12):1532—1537.
- [35] 翟盘茂.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,1997,55(5):563—572.
- [36] 曹丽娟,鞠晓慧,刘小宁. PMFT 方法对我国年平均风速的均一性检验[J].气象,2010,36(10):52—56.
- [37] 陈哲,杨旭,刘靓珂,等.3种方法对中国探空温度资料均一性检验对比分析[J].气象与环境学报,2014,30(6):141—146.
- [38] QUAYLE R G, EASTERLING D R, KARL T R, et al. Effects of recent thermometer changes in the cooperative station network[J]. Bull Amer Meteor Soc, 1991, 72(11): 1718—1723.
- [39] CHENOWETH M. A possible discontinuity in the U.S. historical temperature record[J]. J. Climate, 1992, 5(10): 1172—1179.
- [40] PETERSON T C. Assessment of urban versus rural in situ surface temperatures in the contiguous United States: No difference found[J]. J. Climate, 2003, 16(18): 2941—2959.
- [41] WIJINGAARD J B, KLEIN T A M G, KONNEN G P. Homogeneity of 20th century European daily temperature and precipitation series[J]. International Journal of Climatology, 2003, 23(6): 679—692.
- [42] DELLA-MARTA P M, WANNER H. A method of homogenizing the extremes and mean of daily temperature measurements[J]. J. Climate, 2006, 19(17): 4179—4197.
- [43] WINKLER J A, SKAGGS R H, BAKER D G. Effect of temperature adjustments on the Minneapolis—St. Paul urban heat island[J]. J Appl Meteor, 1981, 20(11): 1295—1300.
- [44] ZHAI P M, ESKRIDGE R E. Analyses of inhomogeneities in radiosonde temperature and humidity time series[J]. J Climate, 1996, 9: 884—894.
- [45] 刘小宁.我国 40 年年平均风速的均一性检验[J].应用气象学报,2000,11(1):27—34.
- [46] 吴必文,温华洋,惠军.基于 Γ 分布的气压序列非均一性检验方法初探[J].应用气象学报,2008,19(4):496—501.
- [47] 郭艳君,丁一汇.近 50 年我国探空温度序列均一化及变化趋势[J].应用气象学报,2008,19(6):646—654.
- [48] 李庆祥,彭嘉栋,沈艳.1900—2009 年中国均一化逐月降水数据集研制[J].地理学报,2012,67(3):301—311.
- [49] 司鹏,徐文慧.利用 RHtest V4 软件包对天津 1951—2012 年逐日气温序列的均一性分析[J].气候与环境研究,2015,20(6):663—673.
- [50] 陈哲,吴茜,熊安元,等.中国探空位势高度资料的非均一性检验与订正[J].气象,2013,39(10):1337—1343.
- [51] 陈哲,杨溯.1979—2012 年中国探空温度资料中非均一性问题的检验与分析[J].气象学报,2014,72(4):798—804.
- [52] 远芳,曹丽娟,唐国利,等.中国 825 个基准、基本站地面气压系统误差的检验与订正[J].气候变化研究进展,2015,11(5):331—336.
- [53] 李金田,李福平,段心灵,等.临河站温度资料的均一性分析[J].内蒙古气象,2010(6):14—17.
- [54] 张卉,程永明,杨梅红.五台山站气候资料均一性检验及气候变化趋势分析[J].中国农学通报,2016,32(7):168—173.
- [55] 刘小宁,孙安建.年降水量序列非均一性检验方法探讨[J].气象,1995,21(8):3—6.
- [56] 朱亚妮,曹丽娟,唐国利,等.中国地面相对湿度非均一性检验及订正[J].气候变化研究进展,2015,11(6):379—386.
- [57] 王慧,刘克修,范文静,等.渤海西部海平面资料均一性订正及变化特征[J].海洋通报,2013,32(3):256—264.
- [58] FREE M, DUNE I, AGUILAR E, et al. Creating climate reference datasets: CARDS workshop on adjusting radiosonde temperature data for climate monitoring[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2002, 83: 891—899.