

司鹏,罗传军,姜罕盛,等,2018.天津地面相对湿度资料的非均一性检验及订正[J].气象,44(10):1332-1341.

天津地面相对湿度资料的非均一性检验及订正^{*}

司 鹏 罗传军 姜罕盛 徐 梅

天津市气象信息中心,天津 300074

提 要: 研究中利用 NCEP/DOE AMIP-II Reanalysis(R-2)比湿再分析资料和基础观测资料两种参考序列,对天津历史月平均相对湿度数据中存在的非均一性因素进行了检验和订正。结果显示,有 9 个地面站的相对湿度序列存在显著断点,占台站总数的 69%。查阅台站元数据得到导致其突变的主要原因是自动站业务化,其次为迁站和仪器变更。从订正量来看,负订正量比例约占 96.3%,其中分布范围在-5.0%~-1.5%,约占总订正量的 80%以上。对比分析订正前后月平均相对湿度序列的方差和趋势变化,均一性订正基本修正了非均一性因素造成的突变影响,减缓相对湿度序列长期出现异常偏干的趋势变化。同时,与朱亚妮等(2015)研制的同类数据产品误差分析发现,两类数据的误差平均值较小,但由于一些主观因素影响使得个别台站 MAE、SE 误差值达到 3.0%以上,造成 MAE、SE 误差值范围在 0~2%的台站比例分别仅在 84.6%和 76.9%及两者以上。从而,一定程度上能够反映出本研究所采用的数据处理技术手段相对以往具有优越性。

关键词: 天津,相对湿度,参考序列,均一性检验和订正,可用性评估

中图分类号: P413

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2018.10.010

Inhomogeneity Validation and Correction of Monthly Surface Relative Humidity in Tianjin

SI Peng LUO Chuanjun JIANG Hansheng XU Mei

Tianjin Meteorological Information Centre, Tianjin 300074

Abstract: The historical monthly mean surface relative humidity at 13 observation stations in Tianjin are homogenized by two methods establishing reference series of NCEP/DOE AMIP-II Reanalysis (R-2) specific humidity data and observed relative humidity data. The results indicate that nine stations have significant breakpoints, accounting for 69% of Tianjin's total stations. The main reason for the abrupt change is the automation referring to metadata information, and then is the relocation and instrument change. For the correction amplitude, the proportion of negative Quantile-Matching (QM) correction is nearly 96.3%, ranging in -5.0%~-1.5% which accounts for more than 80% of the total correction. Here the changes of variances and trends of monthly mean surface relative humidity series before and after corrections are compared, implying that the artificialities due to some inhomogeneity factors in the series are largely corrected, and have reduced the abnormal dry tendency in relative humidity for a long time. Moreover, error analysis reveals that there is much higher consistency between the two datasets here and the data by Zhu Yani et al. (2015) by setting the latter as the reference. However, due to some subjective factors, the error values of MAE and SE between the two datasets are more than 3.0% at some individual stations, resulting in only above 84.6% and 76.9% stations with error values of MAE and SE from 0 to 2.0%, respectively. Accordingly, the technology of data processing used in this paper is more superior to those before to a certain extent.

Key words: Tianjin, relative humidity, reference series, homogenization, reliability assessment

* 天津市气象局科研项目重点项目(201701zdxm01)资助

2017年3月5日收稿; 2018年8月9日收修定稿

第一作者:司鹏,主要从事气候资料分析处理、气候变化等方面研究. Email: spsbox@163.com

引 言

相对湿度在气候变化检测、灾害性天气监测、大气环境预测等科研业务中起着重要的作用,特别是在雾和霾现象的判别研究中更是具有不可替代的重要地位(邓长菊等, 2014; 司鹏和高润祥, 2015; 马楠等, 2015; 赵玉广等, 2015; 于庚康等, 2015; 杜传耀等, 2015; 许爱华等, 2016; 陶丽等, 2016)。同时,相对湿度也是对大气能见度造成影响而不容小觑的重要因子之一(白永清等, 2016; 樊高峰等, 2016)。然而,随着我国气象观测系统的现代化发展,自动观测逐步取代传统的人工观测,随之带来的却是两者衔接的不一致。人工转自动的过程由于仪器变更、观测原理或物理方法的不同,甚至可能是由于自动观测仪器的相对不完善,往往会造成气候时间序列的不连续。21 世纪初期,我国全面开展了自动与人工观测资料的对比评估工作,王颖等(2007)、沈艳等(2008)及刘小宁等(2008)分别对我国 2005 年前后人工与自动平行观测期间的温、压、湿、风、降水、地温及蒸发量等基础要素进行了对比分析,结果表明自动与人工观测各气象要素均存在一定的差异。连志鸾(2005)对河北石家庄基础气象要素的研究分析也得到了相同的结论。另外,余君和牟容(2008)、苑跃等(2010)分别针对省级自动与人工观测的相对湿度资料分析得到,自动观测数据相对人工观测存在明显的偏干现象。同样,在茆佳佳等(2016)对我国 8 个国家基准站相对湿度资料的对比分析中也得到了该结论,并且还指出随着相对湿度的增加,自动与人工观测的系统偏差也随之增大。杨志彪等(2014)研究指出,温湿度传感器的更换是造成人工转自动过程中相对湿度序列产生跳变的重要因素。

对天津而言,2004 年开始地面气象观测业务全面转入自动化,并且 90% 以上观测台站均经历过 1 次以上的迁站。查阅元数据显示,13 个地面站建站以来各气象要素均存在 10 余次的仪器变更,由此导致的气候时间序列不连续是在所难免的。目前,我国已经初步开展了地面相对湿度的均一化研究工作,朱亚妮等(2015)针对我国 2400 多个地面站月平均相对湿度资料的均一性进行了检验,订正了自动站业务化、迁站和时次变更等对相对湿度序列造成的突变影响。赵煜飞和朱亚妮(2017)基于该数据集

采用薄盘样条法对其进行空间插值,得到了中国地面均一化相对湿度月值 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 格点数据。尽管朱亚妮等(2015)在基础原数据的选取和参考序列的建立都尽量避免了人为因素的影响,但由于人为处理数据的经验或元数据记载的缺失等原因可能会造成对序列断点判断的偏颇。

因此,为更深入分析相对湿度资料的均一性问题,使其修正后的数据更加合理,研究中从局地角度出发,根据台站实际情况利用不同途径建立参考序列,对天津地区 1951—2015 年月平均相对湿度资料进行均一性分析,并通过订正前后序列方差和趋势对比以及与朱亚妮等(2015)数据产品的比较分析来评估订正后数据的可用性。为得到高质量均一化的地面基础气象要素数据产品提供有价值的科学依据。

1 资 料

文中使用的基础气象资料来自国家气象信息中心研制的“中国地面基本气象要素日值数据集(V3.0)”,该数据集相对以往中国气象局发布的同类数据产品质量有大幅度提高,其研制过程中经过反复的质量检测和质量控制,纠正大量的错误数据以及补录数字化过程中的遗漏数据,最大程度地确保基础研究数据的可靠性,选取时间段为 1951—2015 年。元数据资料来自国家气象信息中心研制的“中国地面气象站元数据数据集(V1.0)”,以及由天津市气象局档案馆提供的各站历史档案信息,作为判断均一性检验结果是否合理及断点订正位置的参考依据。

再分析资料为美国国家海洋大气局/环境科学研究合作协会气候诊断中心研制(<https://www.esrl.noaa.gov/psd/data>)的 NCEP/DOE AMIP-II Reanalysis 2 m 逐日平均比湿数据(以下简称 R-2),时间段为 1979—2015 年,空间格点为 192×94 (全球 T62 高斯网格)。研究中利用反距离加权插值法分别把 R-2 比湿网格数据插值到天津 13 个地面站站点水平(Si et al, 2012),作为待检站的参考序列。

研究中采用算数平均对上述两类日尺度气象资料进行月平均值统计。

2 研究方法

研究采用 RHtestsV4 软件包对天津地区月平

均相对湿度序列进行均一性检验和订正(Wang, 2008a)。检验方法包括两种,一种是惩罚最大 t 检验(PMT)(Wang et al, 2007),其检验过程中需要建立参考序列;另一种是惩罚最大 F 检验(PMF)(Wang, 2008b),适用于无参考序列的检验过程。断点的订正方法采用分位数匹配(QM)(Wang et al, 2007)。RHtestsV4 方法已在天津太阳总辐射和气温等地面观测资料的均一性分析中得到很好的应用(司鹏和解以扬, 2015;司鹏和徐文慧, 2015)。

2.1 参考序列的建立

研究中拟通过利用再分析资料和地面基础观测资料两种途径建立参考序列分别对天津 13 个地面站月平均相对湿度序列进行检验。

2.1.1 再分析资料

比湿与相对湿度同为表征大气中水汽变化的物理量,许多学者均将其作为重要特征变量对大气中的水汽变化进行研究(孙康远等, 2013;郭艳君和丁一汇, 2014;李丽平和白婷, 2014;窦晶晶等, 2014;周顺武等, 2015),为天气气候变化及预报预测提供重要的科学依据。R-2 再分析资料是经过改良的 6 h 全球数据分析序列,其订正了 NECP Reanalysis-1 数据拟合过程中人为因素导致的误差(Kanamitsu et al, 2002)。Trenberth et al (2007)指出目前已有的再分析资料产品,对于短期(1979 年至今)气候序列趋势评估具有一定的可靠性。因此,文中拟采用站点水平的 R-2 月平均比湿序列作为检验相对湿度的参考序列。

为避免参考序列自身导致的非均一性,研究中利用 RHtestsV4 软件包提供的 PMF,在两种显著性水平检验水平(0.05 和 0.01)下分别对 R-2 月平均比湿数据进行了均一性检验,得到 13 个站 R-2 站点插值序列均一性较好,均无显著断点。

2.1.2 地面基础观测资料

基础观测资料参考站主要从京津冀 179 个地面气象站中依据水平距离、海拔高度进行筛选。基于天津地面观测站网(13 个气象站),选取距离每一个待检站周围水平距离 300 km 以内,海拔高度差 ≤ 200 m 的台站作为建立参考序列的候选站,利用 PMF 法结合台站元数据对这些候选站中距离待检站最近的 10 个站月平均相对湿度资料进行均一性检验。检验过程中,同样采用 $\alpha=0.05$ 和 $\alpha=0.01$ 显著性水平检验,最终选取:(1)两种显著性水平下

均无显著断点相对均一的(Li and Dong, 2009);(2)与待检站相关最大并且时间序列长度相当;(3)完整性较好;(4)台站所在环境与待检站基本一致的 3 个参考站来建立各待检站的参考序列。具体建立公式参见朱亚妮等(2015)。

2.2 非均一性检验和订正

为避免天津站(54527)和市区站(54517)在 1992 年之前因站号互换、业务变更等非均一性问题影响原始资料的断点判断,研究中采用司鹏和徐文慧(2015)的方法,在数据分析之前,将 54527 和 54517 建站至 1991 年 12 月 31 日时间段的资料互换,按照现站址信息分别对各站相对湿度序列进行定义。

采用 RHtestsV4 软件包提供的 PMT,利用再分析资料和地面基础观测资料两种参考序列,在 $\alpha=0.05$ 和 $\alpha=0.01$ 显著性水平检验下,分别对天津 13 个地面站月平均相对湿度资料进行均一性检验。保留两类断点进行订正:一类是在两种显著性水平检验下,地面基础观测资料参考序列同时检验得到并且有确切元数据支持的断点;另一类是在两种显著性水平检验下,再分析资料参考序列同时检验得到与地面基础观测资料参考序列一致的并且有确切元数据支持的断点。如果上述两类断点出现的时间与台站元数据记录信息相差一年以内,根据元数据记录时间替换该断点位置。对存在显著断点的台站使用基于地面基础观测资料参考序列进行分位数匹配订正(QM),订正通过 $\alpha=0.05$ 的显著性水平检验。

3 结果分析

3.1 检验出的断点数量及其原因

从表 1 给出的断点信息显示,13 个地面站中,月平均相对湿度序列存在显著断点的台站有 9 个,占台站总数的 69%,表明天津地区相对湿度资料普遍存在非均一性问题。从检验出的断点数来看,断点总个数为 12 个,其中,出现 1 个断点的台站居多,占断点台站的 78%,而出现 2 和 3 个断点的台站分别仅有 1 个。从表 1 中断点原因看出,自动站业务化对相对湿度序列的非均一性影响相对最大,这与朱亚妮等(2015)对全国相对湿度资料的检验结果一

致,其次为迁站和仪器变更的影响。通过统计(表略),自动站业务化、迁站和仪器变更导致相对湿

度序列的断点个数分别约占总断点数的 42%、33%和 25%。

表 1 天津 13 个地面站月平均相对湿度序列非均一性检验信息
Table 1 Inhomogeneity validation information of monthly mean relative humidity series at 13 weather stations in Tianjin

待检站	站名	断点时间/年-月	检验统计量值	0.05 显著性水平检验区间	断点原因
54428	蓟州	1974-12	5.1	4.9~5.6	仪器变更
		1992-5	5.9	4.8~5.6	仪器变更
		2004-1	12.3	4.8~5.6	自动站
54517	市台	1955-1	14.9	7.5~8.6	迁站
		2004-1	17.5	7.5~8.6	自动站
54523	武清	2005-1	9.2	5.2~6.0	迁站
54525	宝坻*	—	—	—	—
54526	东丽	—	—	—	—
54527	天津*	2003-1	13.1	7.0~8.1	自动站
54528	北辰	2004-1	9.8	5.9~6.9	自动站
54529	宁河	2004-1	9.3	6.8~8.0	自动站
54530	汉沽	—	—	—	—
54619	静海	1965-1	16.4	5.3~6.1	仪器变更
54622	津南	—	—	—	—
54623	塘沽*	1983-1	18.7	6.1~7.3	迁站
54645	大港	2003-7	9.4	6.3~7.7	迁站

注:表中*表示台站为基本站,其他均为一般站。

Note: The asterisks indicate national basic weather stations, and the others are national general weather stations.

3.2 造成序列不连续的具体原因分析

图 1 给出代表天津乡村(图 1a)、城市(图 1b)、郊外(图 1c,1d)和集镇(图 1e)环境的待检站相对湿度年平均序列及其对应的两种参考序列。如图 1 所示,各待检站两种参考序列的趋势变化特点基本一致,特别是年代变化,一定程度上表现出参考序列建立的合理性。从待检序列与参考序列对比来看,54428(图 1a)、54517(图 1b)和 54527(图 1c)3 个站 2003—2004 年前后相对湿度逐年值出现了明显低于参考序列的变化特点。而在此期间,天津 13 个地面站均经历了人工站转自动站业务化过程。同样,54528 和 54529(图略)2 个站在 2004 年前后也出现急剧下降的现象。余君和牟容(2008)及苑跃等(2010)的研究表明,相对湿度由人工转自动观测过程中有明显偏干现象。因此,通过 PMT 法检验出自动站业务化导致部分台站在 2003、2004 年出现断点是可靠的(表 1)。

图 1d 所示,54623 站相对湿度的逐年变化值相对参考序列在 1983 年前后出现由高到低的突变现象,54645 站(图 1e)在 2003 年前后也出现相同的序

列突变,但从表 1 给出的检验统计量值来看,其变化幅度相对较小。查阅台站元数据得到,这两个站分别在 1983、2003 年发生过迁站,54623 站(图 1d)在 1983 年由所在的海滨环境迁到了郊区,54645 站(图 1e)在 2003 年由所在的乡村环境迁到了集镇。根据城市气候学研究表明,城区环境的年平均相对湿度要比乡村环境低(周淑贞和束炯,1994),由此,这两个站相对湿度序列因迁站导致的断点是可靠的(表 1)。同样,54523 站(图略)因迁站造成相对湿度序列在 2005 年前后出现显著断点也是如此。

对于仪器变更影响,造成了 54428(图 1a)和 54619(图略)2 个站相对湿度序列出现不连续现象。查阅台站元数据显示,54428 站自建站以来经历了 10 余次干湿球温度表和 8 次毛发湿度表的更换,均更换为国内厂家仪器。根据天津常年气候状况,使用毛发湿度表的情况不多,所以在人工观测时期能够对相对湿度数据造成影响的仪器主要为干湿球温度表,但其对 54428 站序列突变影响幅度较小(表 1 检验统计量值)。同样,根据台站元数据,54619 站(图略)自建站以来也经历了 10 余次干湿球温度表和毛发湿度表的更换,不同的是,除了更换为国内厂

家仪器,在 1965 年前后该站经历了 1 次干湿球温度表由日本生产改为中国上海生产的仪器变换。并且从检验统计量值来看(表 1),仪器变更对 54619 站序列造成的不连续影响相对 54428 站明显,一定程度上说明了仪器规格型号和生产国别的更换对相对

湿度序列的非均一性影响要比同类型或更换为国内厂家仪器更为显著。

结合台站元数据信息,不难发现自动站业务化的影响从本质来看也是仪器变更的一种表现,即由传统的干湿球温度表换成了湿敏电容湿度传感器,

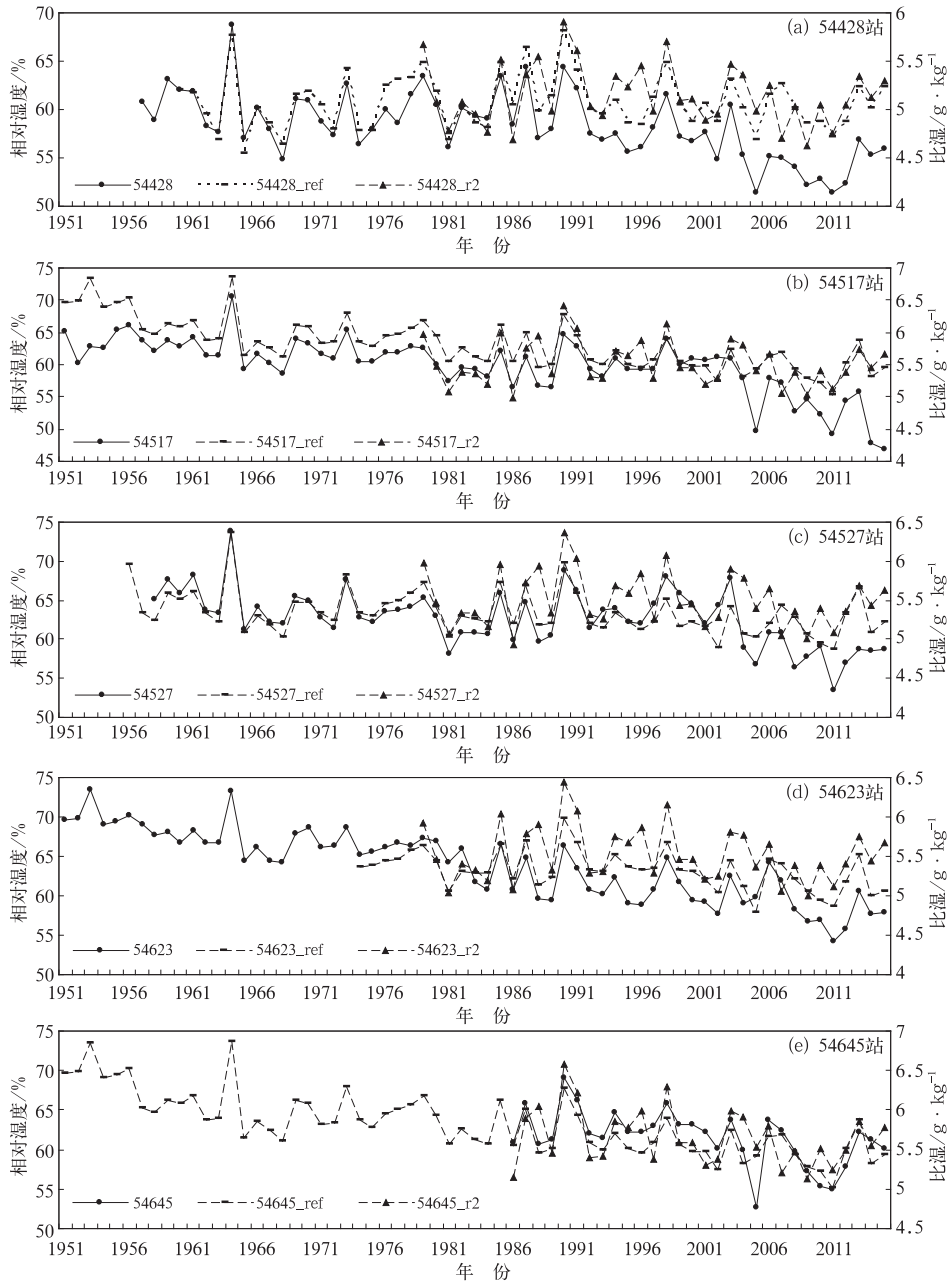


图 1 待检序列及其观测资料和 R-2 再分析资料参考序列

(a) 蓟州站, (b) 市台站, (c) 天津站, (d) 塘沽站, (e) 大港站

Fig. 1 Time series of annual means of the raw and references of observation and R-2 monthly mean relative humidity at (a) Jizhou Station, (b) Urban Station, (c) Tianjin Station, (d) Tanggu Station, and (e) Dagang Station

从观测方式方法上改变了相对湿度的测量结果;再者对于一般站来说,亦表现为均值统计方法的改变,即由日记代替 02 时定时观测数据转变成自动观测得到 02 时定时数据来对日平均值进行统计。为了进一步分析自动站业务化影响的具体原因,研究首先对表 1 中因自动站业务化影响导致时间序列不连续的 5 个台站 2004 年(基本站)和 2005 年(一般站)平行观测期间的自动与人工观测日平均相对湿度进行了比较。

如图 2 所示,5 个台站各个月份的自动观测值均小于人工观测值(除 54528 站的 6—8 月以外),这一特点与上述均一性分析结果一致。两者差值的年均值变化范围为 -5.4%~ -1.6%(图 2a),其中,作为一般站的市台站(54517)差值幅度相对最大为 -5.4%,其次为基本站的天津站(54527)为 -4.6%。但从图 2b 给出的自动与人工观测差值标准差来看,其年均值范围仅为 1.7%~2.5%,幅度变化较小,并且对应 54517、54527 站的差值标准差年均值分别仅为 2.0%、2.4%,说明自动与人工观测差异的平均变化幅度并没有出现明显异常。因此,一定程度上能够得到自动与人工均值统计方法的不同并不是造成台站序列不连续的主要因素。

从而,自动站业务化对 5 个台站(表 1)相对湿度序列的不连续影响可能主要是仪器变更导致。根据《地面气象观测规范》(简称“规范”;中国气象局,2003)结合苑跃等(2010)的分析结果,可以得到对于天津地区人工转自动观测引起的仪器变更造成相对湿度序列产生突变的主要原因在于,首先是干湿球温度表人工读数误差所导致,一方面表现为观测员

没有严格按照规范规定进行观测;另一方面人工观测与自动观测正点数据的时间不一致。其次是干湿球温度表中湿球纱布包扎不规范、纱布不清洁以及湿球溶冰不当等均可能造成了湿球温度表测量值的不准确,进而导致相对湿度计算值的误差。

3.3 QM 订正量的概率密度分布统计

如图 3 所示,相对湿度的订正量比例呈单峰分布,并且以负订正量为主,经统计正、负订正量分别约占 3.7%、96.3%,总的订正范围为 -9.84%~6.97%,均值和中值分别为 -3.26%和 -3.06%。图中正态拟合曲线显示,订正量集中分布在 -5.0%~-1.5%,约占总订正量的 80%以上,概率密度达到 0.1 以上。从不同断点原因导致的订正量来看(表 2),尽管仪器变更导致的序列断点数相对最少,但其导致的序列订正幅度相对最大,并且均为负值,其范围为 -8.53%~-1.89%,订正量均值和中值分别达到 -4.87%和 -4.71%;自动站业务化和迁站造成的序列断点订正幅度基本相当,其均值和中值均约为 -3.0%左右。

因此,总体来说,自动站业务化、迁站和仪器变更在很大程度上能够造成天津地区相对湿度降低的突变,特别是仪器变更的影响,这与 Wijngaarden and Vincent(2005)对加拿大 75 个地面站相对湿度的非均一性检验结果一致,其认为干湿球温度表的更换使得该地区大部分台站相对湿度减小。但是迁站由于站点周围环境的不同亦会造成局地小气候的改变,导致了相对湿度序列出现增加或减少的突变。

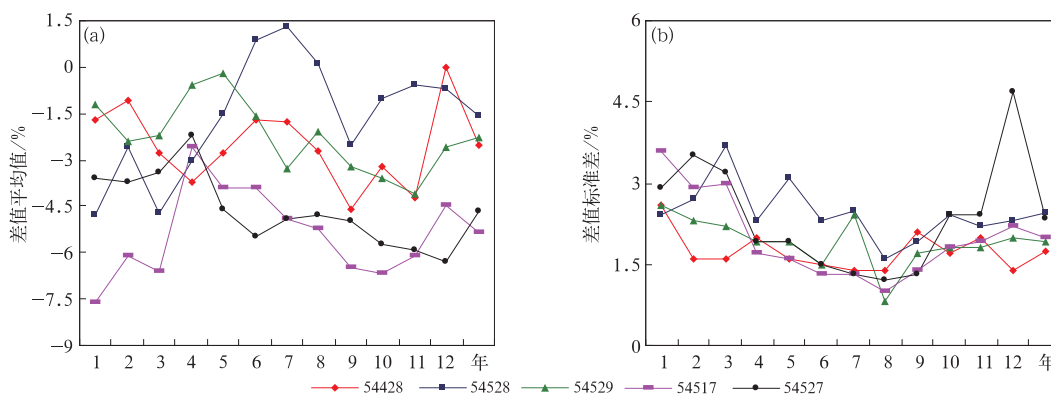


图 2 平行观测期间自动观测与人工观测相对湿度对比差值平均值(a)及差值标准差(b)

Fig. 2 The means (a) and standard deviations (b) of relative humidity differences between automatic and manual observations during the parallel observation period

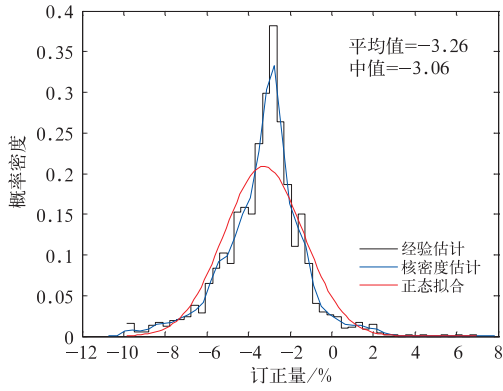


图 3 逐月平均相对湿度序列订正量的概率密度分布

Fig. 3 Probability density function of all QM-adjustments applied to monthly mean relative humidity

表 2 不同断点原因导致的订正量统计(单位: %)

Table 2 Statistics of QM-adjustments amplitude for different discontinuities of monthly mean relative humidity (unit: %)

	自动站	迁站	仪器变更	综合
均值	-3.06	-3.00	-4.87	-3.26
中值	-2.93	-2.72	-4.71	-3.06
范围	-6.66~1.26	-9.84~6.97	-8.53~-1.89	-9.84~6.97

4 订正后资料的可用性评估

4.1 资料订正前后的方差和趋势比较

图 4 给出天津 13 个站基于均一性订正前后相对湿度的年序列方差分布。如图所示,各站订正后(图 4b)的方差均小于订正前(图 4a),利用算术平均求取的天津年平均相对湿度序列订正前后的方差分别为 10.2%、8.1%。最为典型的因仪器变更导致序列突变的 54428 和 54619 两个站,订正后方差均比订正前减少约 6.2%;同样,因迁站导致序列突变的 54623 站订正后的方差比订正前减少 8.6%左右。这种变化特点也体现在各站相对湿度季节序列变化中(图略),特别是春季和冬季。天津受季风环流影响,春季和冬季干旱少降水,所以湿度偏离均值的平均变化幅度相对较大,然而,受非均一性因素影响这种偏离程度可能失去合理性。但从各站订正后相对湿度的方差变化来看,均一性订正似乎减缓了这种异常的离散现象,54428 站春、冬季订正后方差分别减少约 12.3%、9.6%;54619 站春、冬季订正后方差均减少约 6.2%;而 54623 站季节方差减少也较为明显,订正后春、冬季方差分别约减少约 11.9%、6.3%。

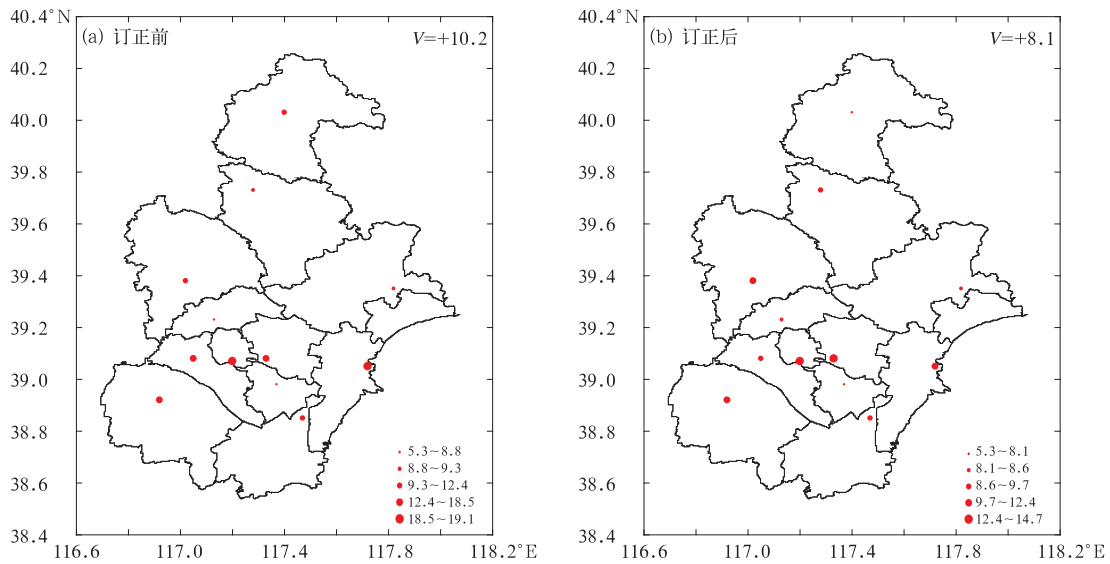


图 4 天津 13 个地面站月平均相对湿度序列订正前(a)、订正后(b)的方差分布(单位: %)

Fig. 4 Variances in time series of annual means of the raw (a) and adjusted (b) monthly mean relative humidity at 13 stations in Tianjin (unit: %)

如图 5 所示,天津各站订正后(图 5b)相对湿度的年际变化趋势减少幅度明显小于订正前(图 5a)的,这一特点与朱亚妮等(2015)对中国地面相对湿度资料的均一性订正结果基本一致。天津各站年平均相对湿度订正前、后的年际变化趋势变化范围分别为 $-2.147\% \cdot (10 a)^{-1} \sim -0.539\% \cdot (10 a)^{-1}$ 、 $-1.359\% \cdot (10 a)^{-1} \sim -0.157\% \cdot (10 a)^{-1}$,基于算数平均求取的天津年平均相对湿度序列订正前、后的年际变化趋势分别为 $-1.124\% \cdot (10 a)^{-1}$ 、 $-0.738\% \cdot (10 a)^{-1}$,均通过 $\alpha=0.05$ 显著性水平检验。其中,与方差变化一致,54428 站订正前后的序列趋势转变也较为突出,订正后相对湿度年际变化趋势增加约 $1\% \cdot (10 a)^{-1}$;因迁站导致序列突变的 54623、54645 两个站订正后年际变化趋势均增加约 $1\% \cdot (10 a)^{-1}$ 。同样,与全年趋势变化一致,各站季节平均相对湿度序列中(图略),特别是冬季,56%的台站订正后相对湿度序列有小幅度的增加趋势,而各站春、夏、秋季订正后的相对湿度趋势的减少幅度均有所减缓。基于算数平均求取的天津春、夏、秋、冬季相对湿度序列订正后的年际变化趋势分别为 $-1.115\% \cdot (10 a)^{-1}$ 、 $-0.588\% \cdot (10 a)^{-1}$ 、 $-0.573\% \cdot (10 a)^{-1}$ 、 $-0.596\% \cdot (10 a)^{-1}$ (均通过 $\alpha=0.05$ 显著性水平检验),与订正前相比各季节趋势平均幅度均增加了约 0.4%。

4.2 与同类数据产品的误差比较

以朱亚妮等(2015)研制数据为参照对天津订正

后的月平均相对湿度资料进行误差分析,用到的统计量为标准误差(SE)和平均绝对误差(MAE),两者均是统计推断可靠性的指标,具体方法见司鹏和徐文慧(2015)。

从图 6 给出的误差概率密度分布来看,本研究与朱亚妮等(2015)的年、季节 MAE 值(图 6b)均小于 SE 值(图 6a),说明本研究得到的均一化相对湿度数据比朱亚妮等(2015)的误差平均值较小,具有一定的可靠性。表 3 统计结果显示,两类相对湿度数据的年、月 MAE 值在 $[0,2\%]$ 的台站数除 1 月仅为 84.6%以外,其他月份和年均达到 92.3%及以上;而 SE 值在该范围的台站比例相对较少,但也均达到了 76.9%及以上。其中出现误差较大的台站主要表现在 54517、54527 和 54623 这 3 个站,其 SE、MAE 值均达到了 2.5%左右。54623 站春、冬季的 SE、MAE 值达到 3.0%以上,这也是造成图 5 中 SE、MAE 的年误差值均出现大于 3.0%现象的原因。54517、54527 站出现误差较大的原因可能主要如前文所述,两类资料的预处理方式不同,造成均一性检验过程中断点判断的不同,进而导致数据订正结果的差异。在资料处理过程中,由于人为经验的不同或是台站元数据信息记载的不够全面等主观因素的影响,可能会造成个别断点位置判断的失误,导致序列订正的偏差,而 54623 站两类订正数据的明显差异可能因为如此。另外,朱亚妮等(2015)的订正数据是保留了有元数据和没有详尽元数据印证的断点,而本研究仅保留有确切元数据支持的断点

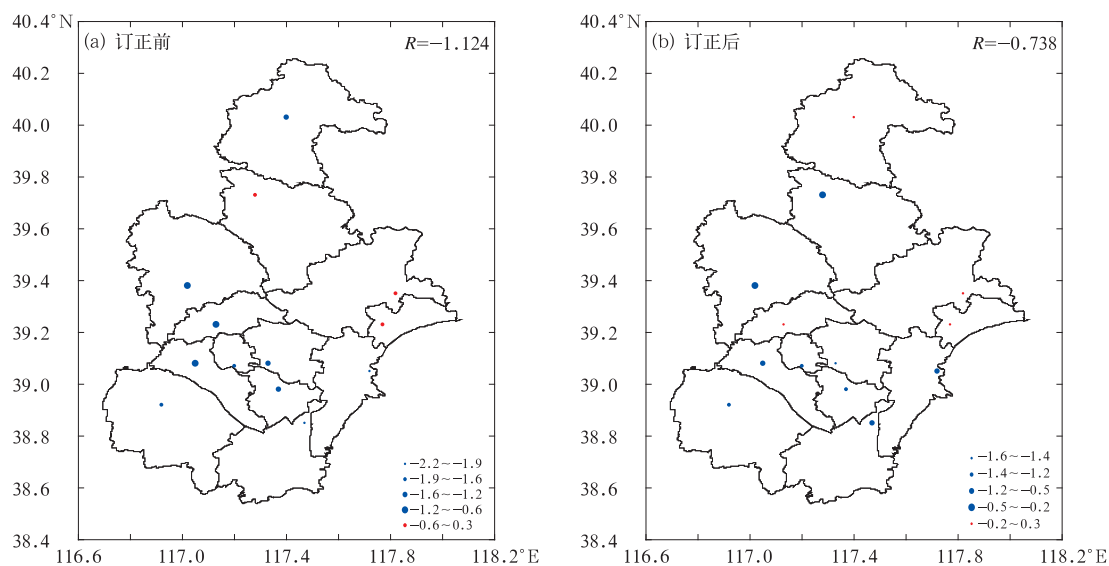


图 5 同图 4,但为年际变化趋势分布[单位: $\% \cdot (10 a)^{-1}$]

Fig. 5 Same as Fig. 4, but for trends in time series [unit: $\% \cdot (10 a)^{-1}$]

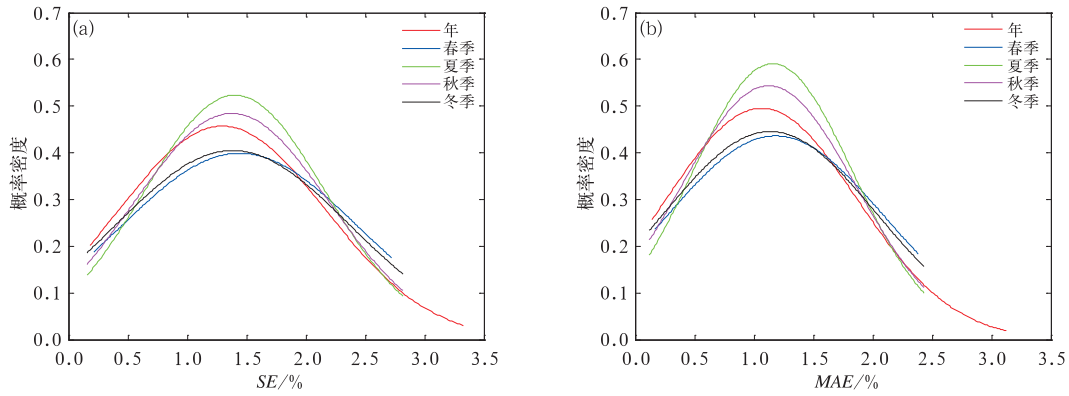


图 6 本研究与朱亚妮等(2015)订正后资料的 SE(a) 和 MAE(b) 概率密度分布

Fig. 6 Probability density function of standard errors (a) and mean absolute errors (b) between the 13 stations adjusted here and those from 朱亚妮等(2015)

表 3 本研究与朱亚妮等(2015)订正后资料误差在 0~2% 的台站比例(单位: %)
Table 3 Probability of errors covering 0 to 2 % between the 13 stations adjusted here and those from 朱亚妮等(2015) (unit: %)

	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	年
SE	76.9	76.9	76.9	76.9	76.9	84.6	76.9	84.6	84.6	84.6	84.6	76.9	84.6
MAE	84.6	92.3	92.3	92.3	92.3	92.3	92.3	100	100	92.3	100	92.3	100

进行的订正,所以,一定程度上也会造成两类数据 54517、54527 和 54623 站订正后的月平均相对湿度数据存在明显误差。

同时,这一差异一定程度上也影响了对天津近 60 多年相对湿度趋势变化的评估。尽管两类数据统计得到天津地区年、季节平均相对湿度均呈显著的减少趋势(均通过 $\alpha=0.05$ 的显著性水平检验),但是从变化幅度来看,本研究的订正结果均小于朱亚妮等(2015),后者年、春、夏、秋、冬季平均相对湿度变化趋势分别为 $-0.864\% \cdot (10 a)^{-1}$ 、 $-1.281\% \cdot (10 a)^{-1}$ 、 $-0.629\% \cdot (10 a)^{-1}$ 、 $-0.758\% \cdot (10 a)^{-1}$ 、 $-0.697\% \cdot (10 a)^{-1}$ 。然而,从 4.1 节的分析结果来看,本研究的订正结果可能更符合天津的实际气候变化特点。

5 结 论

本文对天津 13 个地面站 1951—2015 年月平均相对湿度资料进行了均一性检验和订正,得到以下结论:

(1) 通过检验发现,天津地区相对湿度资料普遍存在非均一性问题,存在显著断点的台站占台站

总数的 69%。结合元数据分析显示,自动站业务化是造成相对湿度序列出现非均一的主要因素,其次为迁站和仪器变更的影响。

(2) 从断点的 QM 订正来看,相对湿度的订正量比例呈单峰分布,并且以负订正量为主,80%以上集中分布在 $-5.0\% \sim -1.5\%$ 。其中,仪器变更导致的序列订正幅度相对最大,并且均为负值,订正量均值和中值分别达 -4.87% 和 -4.71% 。

(3) 研究中比较分析了均一性订正前后月平均相对湿度的方差和趋势变化得到,序列订正减小了非均一性因素导致的相对湿度离散程度较大影响,并且各站订正后的年和季节相对湿度趋势减少幅度均有所减缓,特别是冬季,56%的台站订正后有小幅度的增加趋势。

(4) 与朱亚妮等(2015)同类数据产品的误差比较得到,各站年和季节 MAE 值均小于对应 SE 值,说明两类相对湿度数据误差平均值较小。但由于一些主观因素影响,造成了两类资料中个别台站 MAE、SE 误差值达到 3.0% 以上,使得 MAE、SE 误差值范围在 0~2% 的台站比例仅在 84.6%、76.9% 及两者以上。

参考文献

- 白永清, 祁海霞, 刘琳, 等, 2016. 武汉大气能见度与 $PM_{2.5}$ 浓度及相对湿度关系的非线性分析及能见度预报[J]. 气象学报, 74(2): 189-199.
- 邓长菊, 尹晓惠, 甘璐, 2014. 北京雾与霾天气大气液态水含量和相对湿度层结特征分析[J]. 气候与环境研究, 19(2): 193-199.
- 窦晶晶, 王迎春, 苗世光, 2014. 北京城区近地面比湿和风场时空分布特征[J]. 应用气象学报, 25(5): 559-569.
- 杜传耀, 于丽萍, 王緬, 等, 2015. 对雾-霾过程的综合探测[J]. 气象, 41(12): 1525-1530.
- 樊高峰, 马浩, 张小伟, 等, 2016. 相对湿度和 $PM_{2.5}$ 浓度对大气能见度的影响研究: 基于小时资料的多站对比分析[J]. 气象学报, 74(6): 959-973.
- 郭艳君, 丁一汇, 2014. 1958~2005 年中国高空大气比湿变化[J]. 大气科学, 38(1): 1-12.
- 李丽平, 白婷, 2014. 华南夏季多年平均降水低频特征及其与低频水汽输送关系[J]. 大气科学学报, 37(3): 323-332.
- 连志鸾, 2005. 自动站与人工站观测记录的差异分析[J]. 气象, 31(3): 48-60.
- 刘小宁, 任芝花, 王颖, 2008. 自动观测与人工观测地面温度的差异及其分析[J]. 应用气象学报, 19(5): 554-563.
- 马楠, 赵春生, 陈静, 等, 2015. 基于实测 $PM_{2.5}$ 、能见度和相对湿度分辨雾霾的新方法[J]. 中国科学: 地球科学, 45(2): 227-235.
- 郝佳佳, 莫月琴, 张雪芬, 等, 2016. 自动观测与人工观测相对湿度对比分析[J]. 应用气象学报, 27(3): 370-379.
- 沈艳, 任芝花, 王颖, 等, 2008. 我国自动与人工蒸发量观测资料的对比分析[J]. 应用气象学报, 19(4): 463-470.
- 司鹏, 高润祥, 2015a. 天津雾和霾自动观测与人工观测的对比评估[J]. 应用气象学报, 26(2): 240-246.
- 司鹏, 解以扬, 2015b. 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.
- 司鹏, 徐文慧, 2015c. 利用 RHtestsV4 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, 20(6): 663-674.
- 孙康远, 阮征, 魏鸣, 等, 2013. 风廓线雷达反演大气比湿廓线的初步试验[J]. 应用气象学报, 24(4): 407-415.
- 陶丽, 周宇桐, 李瑞芬, 2016. 我国霾日和 API 分布特征及典型大城市中它们与气象条件关系[J]. 大气科学学报, 39(1): 110-125.
- 王颖, 刘小宁, 鞠晓慧, 2007. 自动观测与人工观测差异的初步分析[J]. 应用气象学报, 18(6): 849-855.
- 许爱华, 陈翔翔, 肖安, 等, 2016. 江西省区域性平流雾气象要素特征分析及预报思路[J]. 气象, 42(3): 372-381.
- 杨志彪, 李中华, 何菊, 2014. 自动气象站温湿度传感器更换的影响评估[J]. 应用气象学报, 25(2): 135-142.
- 于庚康, 王博妮, 陈鹏, 等, 2015. 2013 年初江苏连续性雾-霾天气的特征分析[J]. 气象, 41(5): 622-629.
- 余君, 牟容, 2008. 自动站与人工站相对湿度观测结果的差异及原因分析[J]. 气象, 34(12): 96-102.
- 苑跃, 赵晓莉, 王小兰, 等, 2010. 相对湿度自动与人工观测的差异分析[J]. 气象, 36(2): 102-108.
- 周淑贞, 束炯, 1994. 城市气候学[M]. 北京: 气象出版社: 418-443.
- 周顺武, 马悦, 宋瑶, 等, 2015. 中国东部地区冬季和夏季地面湿度空间分布特征的对比分析[J]. 气候与环境研究, 20(5): 589-599.
- 赵玉广, 李江波, 李青春, 2015. 华北平原 3 次持续性大雾过程的特征及成因分析[J]. 气象, 41(4): 427-437.
- 赵煜飞, 朱亚妮, 2017. 中国地面均一化相对湿度月值格点数据集的建立[J]. 气象, 43(3): 333-340.
- 朱亚妮, 曹丽娟, 唐国利, 等, 2015. 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, 11(6): 379-386.
- Kanamitsu M, Ebisuzaki W, Woollen J, et al, 2002. NCEP - DOE AMIP - II reanalysis (R - 2) [J]. Bull Amer Meteor Soc, 83(11): 1631-1643.
- Li Qingxiang, Dong Wenjie, 2009. Detection and adjustment of undocumented discontinuities in Chinese temperature series using a composite approach[J]. Adv Atmos Sci, 26(1): 143-153.
- Si Peng, Ren Yu, Liang Dongpo, et al, 2012. The combined influence of background climate and urbanization on the regional warming in Southeast China[J]. J Geogr Sci, 22(2): 245-260.
- Trenberth K E, Jones P D, Ambenje P, et al, 2007. Observations: surface and atmospheric climate change[M] // Solomon S, Qin D, Manning M, et al. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom, New York: Cambridge University Press, 237, 243-245.
- Wang X L, 2008a. Accounting for autocorrelation in detecting mean shifts in climate data series using the penalized maximal t or F test[J]. J Appl Meteor Climatol, 47(9): 2423-2444.
- Wang X L, 2008b. Penalized maximal F test for detecting undocumented mean shift without trend change[J]. J Atmos Oceanic Technol, 25(3): 368-384.
- Wang X L, Chen Hanfeng, Wu Yuehua, et al, 2010. New techniques for the detection and adjustment of shifts in daily precipitation data series[J]. J Appl Meteor Climatol, 49(12): 2416-2436.
- Wang X L, Wen Q H, Wu Yuehua, 2007. Penalized maximal t test for detecting undocumented mean change in climate data series[J]. J Appl Meteor Climatol, 46(6): 916-931.
- van Wijngaarden W A, Vincent L A, 2005. Examination of discontinuities in hourly surface relative humidity in Canada during 1953-2003[J]. J Geophys Res, 110(D22): D22102. DOI: 10.1029/2005JD005925.