

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. 气象, 41(11): 1374-1382.

# 1979—2012 年中国探空相对湿度资料的 非均一性检验与订正<sup>\*</sup>

陈 哲<sup>1</sup> 杨 溯<sup>1</sup> 刘靛珂<sup>2</sup>

1 国家气象信息中心, 北京 100081

2 南京信息工程大学, 南京 210044

**提 要:** 利用加拿大环境部气候研究中心研发的 PMTred 非均一性检验方法, 以 ERA-interim 资料作为参考序列, 应用中国区域各探空台站详细的元数据信息为主要断点判断依据, 对 1979—2012 年我国 125 个探空台站各标准等压面月平均探空相对湿度资料进行了非均一性检验和订正。并结合详细的元数据信息分析了造成我国探空相对湿度序列非均一问题形成的主要原因及对资料的影响程度。结果表明: 仪器换型、探测系统资料整理计算方式变化以及辐射订正方法改变和探测系统升级等是造成这一时段中国区域月平均探空相对湿度资料不均一的主要原因。其中, 2002 年以后的 L 波段雷达-电子探空仪换型造成了相对湿度资料非常明显的非连续问题, 这主要是由于早期 59-701 型探空仪穿云挂水, 造成探测到的相对湿度资料明显偏湿。两个观测时次相对湿度序列不均一的台站数和断点数随高度的增加而增加。各标准等压面上月平均相对湿度序列不均一的探空台站平均订正幅度也随着高度的升高而增大, 并且订正量为负值的比例在整套订正资料中所占的比例较高, 说明我国的探空月平均相对湿度原始观测资料有明显高估的问题。1979—2012 年以来, 从全国的情况来看, 订正前全国 850~300 hPa 5 个标准等压面全部为相对湿度降低趋势。但是订正后, 850~300 hPa 这 5 个标准等压面在 1979—2012 年相对湿度的变化趋势均不显著。

**关键词:** 探空资料, 相对湿度, 非均一性检验, 资料订正

**中图分类号:** P412, P413

**文献标志码:** A

**doi:** 10. 7519/j. issn. 1000-0526. 2015. 11. 007

## Inhomogeneity Test and Correction of China Radiosonde Relative Humidity Data from 1979 to 2012

CHEN Zhe<sup>1</sup> YANG Su<sup>1</sup> LIU Liangke<sup>2</sup>

1 National Meteorological Information Centre, Beijing 100081

2 Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

**Abstract:** Using the PMTred method developed by the Environment Canada, ERA-interim reanalysis data as reference series and the detailed metadata of each radiosonde station in China, the inhomogeneity test and corrections are carried out on the monthly relative humidity data at mandatory levels at 125 radiosonde stations in China. Combining with the detailed metadata we analyze the main causes for the inhomogeneity problem of the radiosonde relative humidity data in China. The results show that the shifts of instruments, the changes of data calculating methods and radiation correction method in sounding system and the update of sounding systems are the main reasons for the inhomogeneity in Chinese sounding relative humidity data. The earlier relative humidity data are obviously discontinuous because the 59-701 radiosonde sensors carry more water vapor when they pass through clouds. Therefore, the changes for L-band radar-sounding

\* 国家科技支撑计划项目(2012BAC22B00)、公益性行业(气象)科研专项(GYHY201406016)、中国气象局气候变化专项(CCSF201330)和国家自然科学基金项目(41305104)共同资助

2014 年 3 月 4 日收稿; 2015 年 9 月 12 日收修定稿

第一作者: 陈哲, 主要从事高空资料均一性检验订正与评估工作. Email: chen zhe@ema. gov. cn

system after 2002 lead to the big discontinuous problem in our radiosonde relative humidity data. With the height increasing, both the number of the inhomogeneous stations and break points increase significantly. Also, the mean magnitude of correction increases with height and the correction values are negative at all mandatory levels, which indicates the radiosonde relative humidity data in China are systematically higher. The raw monthly mean relative humidity series of the 125 radiosonde stations in 850—300 hPa mandatory levels from 1979 to 2012 present decreasing trends. After the adjustments, the trends change to insignificant trends.

**Key words:** radiosonde data, relative humidity, inhomogeneity test, data adjustment

## 引 言

全球无线电探空资料最早可以追溯到 1938 年,是一种可以用于气候研究的长序列资料。这其中,通过无线电探空得到的相对湿度资料也是一个重要的站点探空要素。近年来与气候相关的研究,特别是对低温低湿的对流层上部和平流层下部的研究中,相对湿度探空数据的准确度起着举足轻重的作用(曹丽娟等,2010)。然而,探空资料中人为因素造成的资料不均一性对气候变化的研究会产生重要的影响,这一点已经引起越来越多的气候工作者的重视。我国高空测站建站时间较早,最早出现在 1951 年,大部分探空站从 1957 年陆续开始建站。探空资料非均一性研究从 20 世纪 90 年代开始进行,但只有少数台站进行了试验性研究(翟盘茂,1997)。近期对全国多数探空温度序列的非均一性分析证实了辐射订正方法改变、仪器换型等是造成我国探空温度序列非均一性的主要原因(郭艳君,2008;郭艳君等,2008)。实际上,探空相对湿度在不同环境温度下元件的感湿特性曲线不相同,直接给湿度测量带来误差,使得相对湿度探空数据与实际大气湿度差别较大。因此相对湿度探空数据都需要经过温度项订正才更具有实用价值。也就是说,探空温度资料的非均一问题很有可能影响到探空相对湿度资料。并且,为了提高探空相对湿度资料的准确性,我国相对湿度探测元件也在不同的时间经历了多次的换型。很多对比资料分析工作都指出,尤其是 2000 年之后,L 波段雷达-电子探空仪系统替换原有的 59-701 型探空仪的这次换型,在换型前后资料出现了显著的不连续问题(曾红玲等,2010;Dai et al, 2011;Zhao et al, 2012;苑跃等,2014)。另外,诸如 2000—2001 年中国气象局对全国所有台站 59-701

型探空仪的误差订正方法进行的修正这类探测系统内部计算方法和参数的调整也可能造成探空相对湿度资料的非均一问题。

从上面的分析可以看到,由于探空湿度探测元件换型、探空温度要素引入的辐射误差订正方法改变,以及由于探空业务系统中相对湿度误差订正算法以及参数的改变都可能造成探空相对湿度资料的不均一。究竟上述因素在多大程度上影响我国的探空相对湿度资料?这方面的研究工作还非常少(马颖等,2010)。Zhao 等(2012)利用 Dai 等(2011)制作的全球温度露点差均一化数据集中的中国部分数据分析了我国探空温度露点差资料的非均一性问题,其工作主要从逐日的温度露点差数据入手进行分析,但是目前我国与湿度相关的逐日数据存在较大的问题,早期的大量观测数据在仪器失灵的情况下都记作 20%,在逐日数据的质量控制中,很难区分 20%的数据是真实大气相对湿度测量值还是仪器失灵的预设值。另外,在探空观测中,相对湿度数据是直接观测量,而温度露点差数据是用温度值减去露点温度值,虽然相对湿度受到温度的影响,但是不同时期的探空仪器中都进行过温度项订正,相比温度露点差数据中温度值直接参与运算,探空相对湿度数据较为独立。

因此,本文将利用加拿大环境部气候研究中心研发的 PMTred(Wang 等,2008b)非均一性检验方法,以 ERA-interim 再分析资料做为参考序列,结合国家气象信息中心最新制作的中国区域各探空台站详细的元数据信息对中国区域 1979—2012 年 125 个探空台站各标准等压面层的月平均相对湿度资料进行非均一性检验、订正。最终分析了人为因素对中国区域探空月平均相对湿度资料的影响程度以及我国探空相对湿度序列非均一问题形成的主要原因。

# 1 采用的资料、元数据以及均一化方法

## 1.1 参考序列

探空相对湿度资料参考序列的选取存在困难,目前国际上可以借鉴的经验较少。尝试借鉴地面相对湿度非均一问题检验中普遍采用的邻近站点资料作为参考序列,但是我国探空资料存在全国所有台站同时改变辐射误差订正方法和系统升级的事件,如果采用邻近站点资料作为参考序列,由于辐射误差订正方法改变和系统升级这些时间上的断点检出率非常低,只有 8.23% 的这类断点可以检查到,利用邻近站作为参考序列不合适。GPS 水汽观测资料独立于探空湿度观测资料,是探空湿度资料非均一问题研究中较好的一种参考序列,但是我国 GPS 观测的水汽资料时间长度较短,基本上从 2000 年以后才逐步开始观测,也不适合作为本研究的参考序列。另外,还考虑过其他再分析资料,几套再分析资料中,NCEP-NCAR 中国区域 20 世纪 90 年代资料中存在问题(Liu et al, 2012),因此也不合适作为参考序列。20 世纪再分析资料中不包括探空资料的信息,但是在 300 hPa 以上的层次,相对湿度数值同原始探空资料以及其他几套再分析资料偏差较大,导致订正后的结果不合理。

最终,本工作采用了欧洲中心开发的 ERA-interim 再分析资料做为参考序列,从中选取 850~300 hPa 5 个标准等压面的月平均相对湿度资料。该套再分析资料与 ERA-40 相比,采用了新的湿度分析方法和改进的物理模型,是 ERA-40 再分析资料的升级版本。该套资料的时间长度是从 1979 年 1 月至今,初始场里加入了大量的卫星资料,相对于探空资料较独立,Kishore 等(2011)利用 COSMIC GPS 资料和探空资料对三套再分析资料的湿度资料进行了比对,指出了 ERA-interim 湿度资料与真实观测到的 COSMIC GPS 湿度资料非常接近。Berrisford 等(2011)及 Dee 等(2011)都指出了 ERA-interim 对全球水循环有更好再现。另外,ERA-interim 的输入场中探空资料是利用了维也纳大学 Haimberger(2007)的非均一性检验和订正方法进行了偏差订正后的资料,因此均一性相对较好。进一步,在探空原始资料的断点检验过程中,为了避

免 ERA-interim 再分析资料本身的非均一问题影响探空原始资料的断点判断,首选检验了 ERA-interim 资料的断点,把这些断点记录下来,如果探空原始资料断点检验过程中出现了相同时间的显著断点,若没有确切的元数据支持,这些断点将认为是由于参考序列引入的,这些断点不保留。利用这种做法尽力减少了再分析资料本身非均一问题对原始探空资料断点判断的影响。受到 ERA-interim 资料时间长度的限制,这部分工作中,考察我国探空月平均相对湿度资料的时间段为 1979 年 1 月至 2012 年 12 月。在对 ERA-interim 资料的处理方面,是利用 4 点距离反比例插值法,把 ERA-interim 各标准等压面月平均相对湿度资料插值到我国的 125 个探空站点上,做为待检探空相对湿度资料的参考序列。

## 1.2 探空资料

我国探空站点总体上分布比较均一,但在青藏高原地区站点稀少。本工作进行非均一性检验与订正的 1979—2012 年月平均相对湿度数据来自国家气象信息中心经过质量控制、质量状况较好的全国 125 个探空站。探空台站每天分两个时次进行探测,分别为世界时的 00 时和 12 时(下同)。涉及到的标准等压面层包括 300、400、500、700 和 850 hPa。其中,经过质量控制认为错误的每天两次探测的相对湿度资料不参加月平均值的统计,这部分错误资料占总资料的 0.2534%。

## 1.3 元数据

本工作所用的元数据信息来源于国家气象信息中心 2013 年最新整理制作的探空台站历史沿革,其中包括台站仪器变更信息、探测系统资料整理计算方式变更信息和台站迁移信息等。

探空相对湿度的探测元件会受到温度影响,因此我国的相对湿度探测仪在探测前,需要预先对探测系统进行温度订正。我们的工作中,也考虑到了温度非均一问题可能会影响相对湿度资料的均一性,因此,把跟温度资料非均一问题关系最密切的辐射误差订正方法改变的时间点、温度探测仪器换型时间点(和湿度探测仪器换型时间点是保持一致的)都一起在断点判断中综合考虑。辐射误差订正方法和探测系统升级(包括相对湿度计算参数及其他误差订正方法)的变化信息来源于中国气象局大气探测中心。

## 1.4 非均一性检验与订正方法

用于气候资料非均一性检验的方法很多(刘佳等,2012)。本文采用的 RHtests V3(Wang et al, 2010)软件包中的 PMTred 算法来检验中国区域的探空相对湿度资料。RHtests V3 软件包已经被广泛地应用到了气候资料非均一问题的检验上(Wang et al, 2013; Kuglitsch et al, 2012; Zhang et al, 2005; Alexander et al, 2006)。利用该软件包中的 PMFred 方法,Dai 等(2011)、Zhao 等(2012)和陈哲等(2013)分析了全球温度露点差资料及中国探空位势高度资料中的非均一问题。但是 PMFred 方法不使用参考序列,可能会造成某些断点的漏判和误判。而 PMTred 方法需要使用参考序列,该算法是基于最大惩罚  $t$  检验(Wang et al, 2007)而开发的,经验性的考虑了时间序列的滞后一阶自相关,并嵌入递归检验算法(Wang 2008a),被检验的时间序列在整个记录时期可能含有零趋势或者线性趋势。通过应用经验的惩罚函数,误报警率和检验能力的非均匀分布问题得到了改善(Wang et al, 2007; Wang, 2008b)。

另外,对于元数据的应用方面,由于通过几年的元数据上报和核查工作,国家气象信息中心已经较全面地掌握了我国探空台站的元数据信息,而 RHtests V3 软件包在使用过程中可以使用元数据。所以本文主要采用 RHtests V3 软件包中的 PMTred 方法和元数据信息相结合的方法判断资料断点,所确定的断点通过了  $\alpha=0.05$  的显著性水平检验,并且最终保留的断点都是有元数据信息支持的断点,做到了绝不没有根据地订正资料。

在最终确定断点后,主要采用了位数匹配

(QM)法对断点进行订正(Wang et al, 2010),该方法不仅调整了按照断点分成的各数据段的平均值,并且也对各数据段的变率进行了调整。

我们统计了最终采纳的断点数占 PMTred 方法检测的所有显著断点数的百分比,为 91.3%,也就是说有 8.7% 的显著断点没有被采纳,没有采纳这些断点的主要原因是这些显著断点没有元数据支持,通过与台站反复核查这些时间点上是否有元数据的变化,但并没有找到这方面的相关记录,本着宁可不订正也不错地订正断点的原则,最终这些断点没有保留。

## 2 结果分析

### 2.1 个例分析

对 57178 站 00 时次 1979—2012 年月平均相对湿度序列进行非均一性检验,发现该站在 300、400、500、700 和 850 hPa 标准等压面上相对湿度序列都存在非均一问题。图 1 是 57178 站 00 时次 300、500 和 850 hPa 订正前后年平均相对湿度序列及其年平均相对湿度变化趋势。按照 PMTred 方法,首先利用回归检验的方法检测出该站 850 hPa 月平均相对湿度序列在 2005 年 12 月发生间断。该站的元数据信息显示,南阳站在 2006 年 1 月进行过仪器换型。由于允许检测出的断点和元数据信息存在前后 12 个月的偏差,因此对于回归检验检测出的这个间断点,把这个时间点修改为 2006 年 1 月。重新评估这些间断点的显著性,2006 年 1 月这个间断点显著,最终保留这个间断点,其他层次的间断点判断方法与 850 hPa 的间断点判断方法类似。57178 站 00

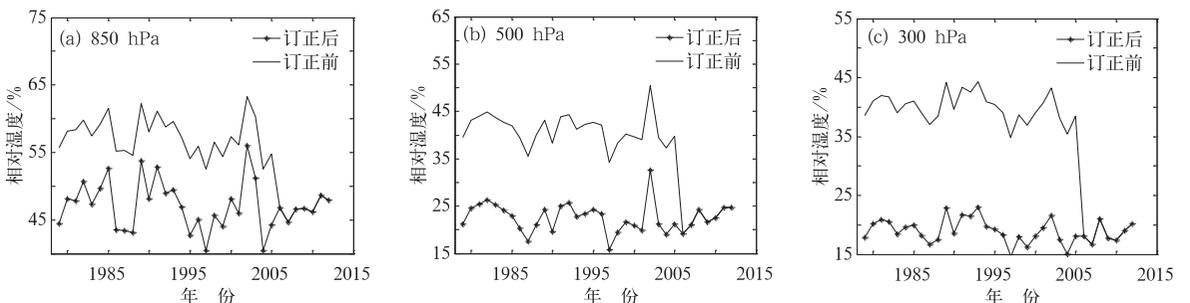


图 1 57178(南阳)站 00 时次订正前后年平均相对湿度序列及其年平均相对湿度变化趋势

(a) 850 hPa, (b) 500 hPa, (c) 300hPa

Fig. 1 The original and adjusted annual mean relative humidity and their trends at Station 57178 (Nanyang) at 00:00 UTC at (a) 850 hPa, (b) 500 hPa, (c) 300 hPa

时次 300、500 及 850 hPa 月平均相对湿度序列订正前平均相对湿度分别为 35.5%、37.3% 和 55.2%，订正后 00 时这三个标准等压面月平均相对湿度序列的平均相对湿度分别为 18.9%、22.6% 和 47.1%，订正后平均相对湿度分别降低了 16.6%、14.8% 和 8.1%。从这些数据可以看出，该站从低层到高层相对湿度的订正值呈现增加的趋势，也就是说 2006 年 1 月由于 59-701 型探空仪换型成 L 波段雷达-电子探空仪系统造成的这个断点从低层到高层，断点前后观测值的差异也逐渐增加。Zhao 等 (2012) 也发现了北京、武汉和昆明站的温度露点差资料在 2002 年之后也出现了较大的不连续问题，这主要是由于 59-701 型探空仪(肠衣或毛发湿度传感器)换型成 L 波段雷达-电子探空仪系统(湿敏电阻传感器)造成的。L 波段雷达-电子探空仪中主要采用湿敏电阻作为相对湿度传感器，该传感器穿云脱水较 59-701 型探空仪灵敏，因此保留 L 波段雷达-电子探空仪换型后的数据，订正早期的数据。另外，从图 1 中该站各标准等压面订正前后的年平均序列相对湿度变化趋势可以发现，订正前的相对湿度明显减弱的趋势在订正后变得不显著。

## 2.2 我国月平均探空相对湿度资料检出的断点情况

表 1 是统计各个标准等压面上月平均相对湿度序列均一的台站数。从表中可以发现，00 和 12 时次各个标准等压面上均一的台站数基本呈现低层至高层减少的趋势。各标准等压面上均一的台站数量较少，均一的台站数最多的 12 时次 700 hPa，均一的台站数只占到总台站数的 34.4%，而均一的台站数最少的 00 和 12 时次 300 hPa，均一的台站数只占到总台站数的 6.4%。可以看出，我国相对湿度资料尤其在高层存在较多的间断点。

图 2 是统计各个标准等压面上的间断点个数。从图中可以看出，00 和 12 时次各标准等压面上的间断点个数呈现低层至高层逐渐增加的趋势。造成这种现象的原因一方面是由于观测误差存在着从低层到高层累计的一个过程，Lanzante 等 (2003) 指出订正值随高度的分布规律与大气密度有关，空气越稀薄探空仪误差越大。另外，前面提到相对湿度探空数据必须经过温度项进行订正，所以这里我们把与温度数据不均一有关的辐射误差订正方

表 1 2 个观测时次 5 个标准等压面上均一的台站数  
Table 1 The number of homogeneous stations on 5 mandatory levels at 00:00 UTC and 12:00 UTC

等压面/hPa	00 时次均一的台站数	12 时次均一的台站数
300	8	8
400	11	14
500	12	18
700	31	43
850	25	30

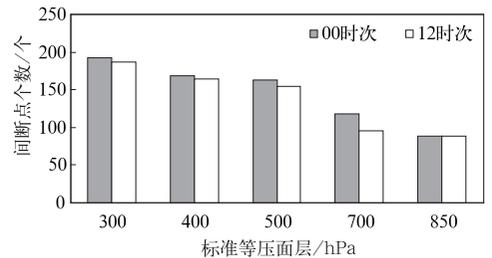


图 2 2 个观测时次 5 个标准等压面上的间断点个数

Fig. 2 The number of break points on 5 mandatory levels at 00:00 UTC and 12:00 UTC

法改变的元数据也考虑在内。而我国的探空资料辐射误差在高层更为明显，这也是造成对流层高层较对流层中低层月平均相对湿度资料间断点多的一个主要原因。

图 3 为各标准等压面探空相对湿度序列中存在 1~4 个断点所占的比例。从图中可以看出，从 300~500 hPa 以及 850 hPa 各站点相对湿度序列中存在 1 个断点的序列所占比例最大，而 700 hPa 各站点相对湿度序列中无断点的序列所占比例最大、

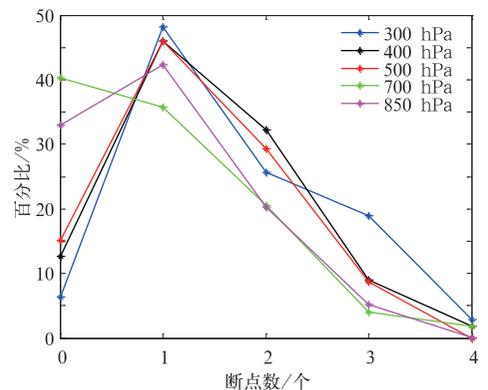


图 3 5 个标准等压面探空相对湿度序列中存在 1~4 个断点所占的比例

Fig. 3 The percentages of 1-4 breakpoints in all relative humidity data series on 5 mandatory levels

一个断点次之;各标准等压面上以 4 个断点所占的比例最少。

### 2.3 探空相对湿度资料的订正幅度

这里定义某探空站在某标准等压面上的订正值为:这个台站订正后多年平均的相对湿度值减去订正前多年平均的相对湿度值。某标准等压面上平均订正值的计算规定为:该标准等压面上不均一的相对湿度序列订正值的算术平均。把订正值小于零的订正简称为负订正,订正值大于零的订正简称为正订正。图 4 中两个时次相对湿度值的平均订正值随气压的降低呈负增加的趋势,300 hPa 两个时次平均订正量可以达到 -13.6%。另外,从图 4 中可以看出,850~300 hPa 上所有标准等压面的订正量均为负值,显示了我国探空相对湿度序列存在着系统性偏高的问题。而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,它随着高度的增加反映了均一性订正对探空相对湿度序列的影响随高度增加而增加。而均方差的廓线也反映出订正值的变率从低层到高层呈现出增加的趋势。

图 5 给出了各标准等压面探空序列订正值的频率分布情况,订正值的变化范围为 -34.3%~5.7%。其中,850 和 700 hPa 频率分布的最大值位于

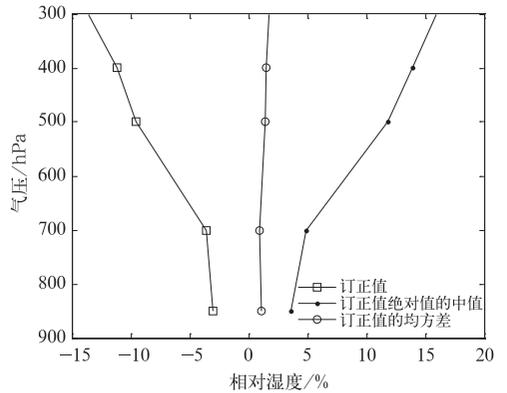


图 4 2 个时次 5 个标准等压面上探空月平均相对湿度订正值、订正值绝对值的中值以及订正值的均方差

Fig. 4 The mean adjustment values, median of adjustment absolute value, and standard deviation of adjustment absolute value, and standard deviation for the radiosonde monthly mean relative humidity series on 5 mandatory levels at 00:00 UTC and 12:00 UTC

于 -3%~1% 处,500 hPa 的频率分布的最大值位于 -15%~-11% 处,而 300 hPa 的频率分布的最大值位于 -19%~-15% 处,频率最多出现的相对湿度订正值随高度增加不断降低。总体上讲,5 个标准等压面上出现负订正值的概率较大,占 75.8%,明显高于正订正值的分布频率。

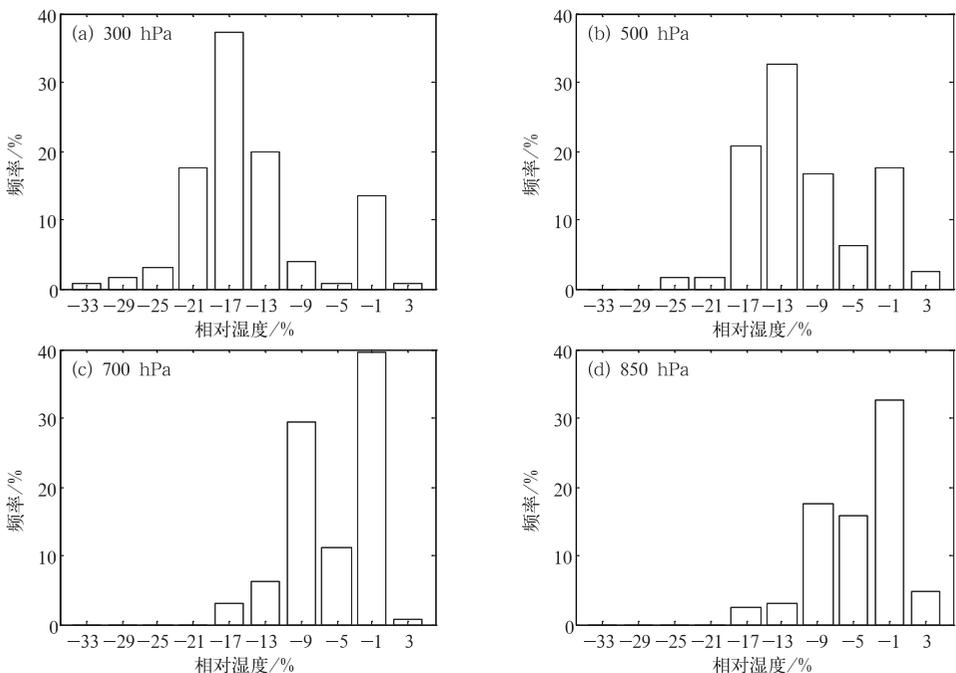


图 5 4 个标准等压面上月平均相对湿度序列平均订正值的百分比分布 (横坐标范围为 -35%~5%,订正值以 4%为间隔,分为 10 段)

Fig. 5 The frequency distribution of the radiosonde monthly mean relative humidity series on 5 mandatory levels (The range of abscissa is from -35% to 5%; the adjusted values are divided into 10 sections with 4% as interval)

## 2.4 订正前后月平均相对湿度探空资料趋势分析

图 6 中参加统计的时间段为 1979—2012 年。订正前全国 850~300 hPa 5 个标准等压面全部为显著的相对湿度降低趋势,并且随着气压的降低,相对湿度降低趋势明显增加。但是订正后,850~300 hPa 这 5 个标准等压面 1979—2012 年平均相对湿度的变化趋势均不显著。Zhao 等(2012)的工作中也指出订正后中国区域年平均相对湿度变化趋势较弱。IPCC(2007)总结全球高空水汽变化研究成果时指出,20 世纪 70 年代以来对流层低层大气水汽全球总体呈上升趋势,对流层中上层相对湿度无明显趋势,这与本研究订正结果一致。

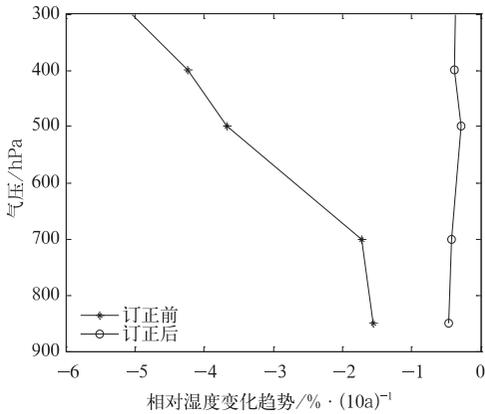


图 6 订正前后 5 个标准等压面上年平均相对湿度变化趋势的分布

Fig. 6 The trends of original and adjusted yearly mean relative humidity data series on 5 mandatory levels

## 2.5 月探空相对湿度资料非均一问题产生原因

我国高空探空站建站时间最早出现在 20 世纪 50 年代,大部分探空站从 20 世纪 60 年代陆续开始建站。20 世纪 50 年代中国探空观测仪器和规范变化较大,1999 年 7 月 1 日后又经历了辐射误差订正方法的变化,2001 年以后,我国高空的一些探测站又陆续更换了探空仪器。从图 7 检测出的断点结果和元数据分析情况看,检测出的结果与元数据有很好的对应关系,断点的峰值年份可以与仪器换型、探测系统资料记录整理方式变化、辐射误差订正方法改变及系统升级的年份相符合。这也说明了我们的订正数据是得到了元数据支持的,可信度较高。

图 7 中断点比较集中的时间段出现在了 2002 年以后,这个时段我国的探空仪经历了由 59-701 型探空仪换型成 L 波段雷达-电子探空仪的这一过程,各站更换仪器时间点不同。图 1 中南阳站相对湿度个例中 2006 年 1 月由于 L 波段雷达-电子探空仪仪器换型造成的换型前后相对湿度资料明显的不连续问题在我国的其他探空台站中同样存在。图 8a、8b 和 8c 分别是 300、500 和 850 hPa 三个标准等压面上从 2002 年开始进行过 L 波段雷达-电子探空仪换型的探空台站的分布情况。从图中可以清楚地看出,除了 850 hPa 的个别台站外,从 850~300 hPa 所有台站该差值均为正值,并且对于一个台站而言,从 850~300 hPa 各标准等压面该差值是从低层至高层增加的,且差值数值较大。从全国平均情况看,300、500 和 850 hPa 该差值的全国平均值分别为 16.7%、14.5% 和 6.9%。而参考序列各探空台站的相对应差值却没有出现这么明显的数值,这也反映出 L 波段雷达-电子探空仪的换型确实造成了我国 2002 年以后的相对湿度资料显著的不连续问题,这也正是图 6 中各标准等压面订正前后年平均相对湿度变化趋势显著差异的主要原因。另一个比较集中的时间段是图 7 中黑色虚线指代的 1999 年辐射误差订正方法改变的时间点、以及 2000 和 2001 年探测系统升级的时间点,这 3 个元数据变化的时间点也检测出了较多的资料断点,反映出这 3 次事件也造成了我国相对湿度资料较明显的不均一问题。

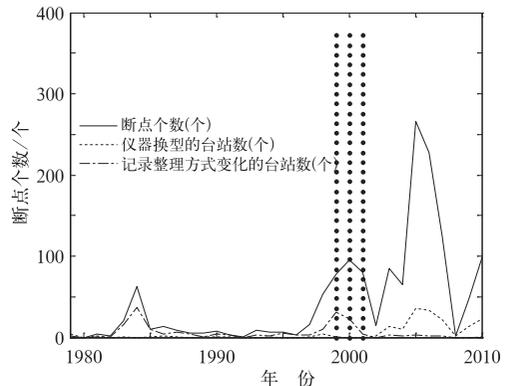


图 7 元数据与检测出的断点个数随时间的变化 (黑色虚线为 1999 年辐射误差订正方法改变、2000 年和 2001 年探测系统升级的时间点)

Fig. 7 The change with time for metadata and break points

(Black dotted lines are the time point for the change of radiation error correction method in 1999 and system update in 2000 and 2001)

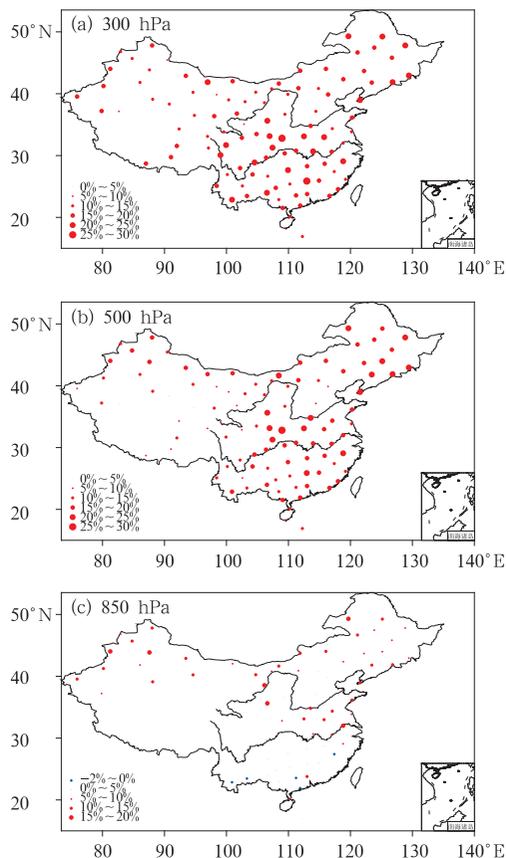


图 8 3 个标准等压面上从 2002 年开始进行过 L 波段换型的探空台站的分布情况

(圆点代表该站从 2002 年至 L 波段探空仪换型后的多年平均相对湿度值与 L 波段探空仪换型后一年至该站下一次元数据发生变化年份的多年平均相对湿度值的差值)

Fig. 8 The distribution of radiosonde stations which change for L-band sounding system after 2002

(The dots represent the difference between the mutiple-yearly mean relative humidity from 2002 to its L-band change year and from the next year after its L-band change year to its next metadata change year)

由于探空元数据中,系统升级包括了辐射误差订正方法的变化升级,因此我们把造成我国探空相对湿度资料非均一问题的主要原因归为 3 种,即,仪器换型、探测系统资料记录整理方式变化和辐射误差订正方法改变及系统升级。图 9 统计了这 3 种人为因素在 5 个标准等压面上造成的间断点个数,从图中可以看出,我国探空相对湿度资料的非均一性问题主要来源于观测仪器变化,其次是探测系统资料记录整理方式变化和辐射误差订正方法的改变(包括系统升级),在 5 个标准等压面上由于仪器换型造成的间断点平均可以达到 64.5%,而由于探测系统资料记录整理方式变化造成的间断点和由于辐射误差订正方法改变造成的间断点分别可以占到

24.8%和 10.7%。

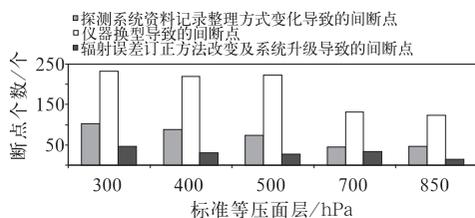


图 9 3 种人为因素在 5 个标准等压面上导致的间断点个数

Fig. 9 The number of breakpoints caused by three kinds of reasons on 5 mandatory levels

### 3 结 论

本文利用中国区域所有探空台站逐站详细的元数据信息为主要断点判断依据,结合 PMTred 非均一性检验方法,并以 ERA-interim 资料做为参考序列,对 1979—2012 年我国 125 个探空台站 5 个标准等压面月平均探空相对湿度资料进行了非均一性检验、订正。通过订正效果分析,证明了该方法可以有效地检测出我国探空相对湿度资料中存在的断点,并且通过与可靠的元数据信息进行核对,确保了资料订正的可信度。

通过本文的统计和分析表明,我国探空相对湿度资料中存在由于人为因素造成的资料不连续问题,且:

(1) 不均一的台站和断点数所占的百分比随高度基本呈现增加的趋势。一方面这主要是由于订正值随高度的分布规律与大气密度有关,空气越稀薄探空仪误差越大,另一方面探空相对湿度需要经过温度项订正,因此影响探空温度不均一的辐射误差订正方法改变也在高层造成探空相对湿度资料的不均一。

(2) 1 个间断点在整套资料中出现资料不连续的台站中所占的比例最大。

(3) 订正量为负值的比例在整套订正资料中所占的比例较高,说明我国的探空月平均相对湿度原始观测资料有明显高估的问题。

(4) 1979—2012 年以来,从全国的情况来看,订正前全国 850~300 hPa 5 个标准等压面全部为相对湿度降低趋势。但是订正后,850~300 hPa 这 5 个标准等压面在 1979—2012 年相对湿度的变化

趋势均不显著。

另外,通过与详细的元数据信息进行比对和分析可知:1979—2012年我国探空月平均相对湿度资料的非均一问题主要来源于观测仪器变化,其次是数据整理方式的改变和辐射误差订正方法的改变。其中,2002年以后的L波段探空仪换型造成了相对湿度资料明显的不连续问题,这只要是由于59-701型探空仪采用毛发或肠衣作为传感器,该传感器穿过云层时传感器上的水汽不能及时蒸发,造成了探测到的湿度数值偏高,而L波段雷达-电子探空仪中主要采用湿敏电阻作为相对湿度传感器,该传感器脱水较为灵敏。因此,我们在对该断点的订正过程中保留L波段雷达-电子探空仪换型后的数据,对早期数据给予了较为合理的订正。

## 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. *气象*, 36(10):52-56.
- 陈哲,吴茜,熊安元,等. 2013. 中国探空位势高度资料的非均一性检验与订正. *气象*, 39(10):1-7.
- 郭艳君. 2008. 高空大气温度变化趋势不确定性的研究进展. *地球科学进展*, 23(1):24-29.
- 郭艳君,丁一汇. 2008. 近50年我国探空温度序列均一化及变化趋势. *应用气象学报*, 19(6):646-653.
- 刘佳,马振峰,范广洲,等. 2012. 多种均一性检验方法比较研究. *气象*, 38(9):1121-1128.
- 马颖,姚雯,黄炳勋. 2010. 59型与L波段探空仪温度和相对湿度记录对比. *应用气象学报*, 21(2):214-220.
- 苑跃,陈中钰,赵晓莉,等. 2014. L波段与59-701探空系统观测资料差异评估. *气象*, 40(2):238-246.
- 曾红玲,张强,祝昌汉. 2010. 三峡库区气压资料的不均一性检验与订正. *气象*, 36(10):57-61.
- 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. *气象学报*, 55(5):563-572.
- Alexander L V. 2006. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *J Geophys Res*, 111 (D05109), doi:10.1029/2005JD006290.
- Berrisford P, Kallberg P, Kobayashi S, et al. 2011. Atmospheric conservation properties in ERA-Interim. *Quart J Roy Meteor Soc*, 137:1381-1399.
- Dai Aiguo, Wang J, Thorne P W, et al. 2011. A new approach to homogenize daily radiosonde humidity data. *J Climate*, 24:965-991.
- Dee D, Coauthors. 2011. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quart J Roy Meteor Soc*, 137: 553-597.
- Haimberger L. 2007. Homogenization of radiosonde temperature time series using innovation statistics. *J Climate*, 20:1377-1403.
- Kishore P, Venkat Ratnam M, Namboothiri S P, et al. 2011. Global (50°S-50°N) distribution of water vapor observed by COSMIC GPS RO: Comparison with GPS radiosonde, NCEP, ERA-Interim, and JRA-25 reanalysis data sets. *J Atmos Solar-Terrestrial Physics*, 73(13): 1849-1860.
- Kuglitsch F G, Auchmann R, Bleisch R. 2012. Break detection of annual Swiss temperature series. *J Geophys Res*, 117. doi:10.1029/2012JD017729.
- IPCC. 2007. *Climate Change, 2007. The Physical Science Basis*. Cambridge. Cambridge University Press, 996.
- Lanzante J R, Klein S A, Seidel D J. 2003. Temporal homogenization of monthly radiosonde temperature data. Part I: Methodology. *J Climate*, 16: 224-240.
- Liu G, Zhao P, Wu R, Chen J. 2012. Potential flaws of interdecadal changes over eastern China around the early 1990s in the National Centers for Environmental Prediction-National Center for Atmospheric Research reanalysis. *J Geophys Res*, 117 (D02111), doi:10.1029/2011JD016327.
- Wang Xiaolan. 2008a. Penalized maximal F-test for detecting undocumented mean-shifts without trend change. *J Atmos Ocean Technol*, 25:368-384.
- Wang Xiaolan. 2008b. Accounting for autocorrelation in detecting mean shifts in climate data series using the penalized maximal t or F test. *J Appl Meteor Climatol*, 47:2423-2444.
- Wang Xiaolan, Feng Yang. 2010. RHtestsV3 User Manual, User-Manual.doc. <http://cccma.seos.uvic.ca/ETCCDMI/RHtest/RHtestsV3>.
- Wang Xiaolan, Feng Yang, Vincent L A. 2013. Observed changes in one-in-20 year extremes of Canadian surface air temperatures. *Atmos-Ocean*, doi:10.1080/07055900.2013.818526.
- Wang Xiaolan, Wen Qiuzi H, Wu Yuehua. 2007. Penalized maximal t test for detecting undocumented mean change in climate data series. *J Appl Meteor Climatol*, 46:916-931.
- Zhang Xuebin, Gabriele Hegerl, Francis W Z. 2005. Avoiding inhomogeneity in percentile-based indices of temperature extremes. *J Climate*, 18:1641-1651.
- Zhao Tianbao, Dai Aiguo, Wang Junhong. 2012. Trends in tropospheric humidity from 1970 to 2008 over China from a homogenized radiosonde dataset. *J Climate*, 25(13):4549-4567.