

杨涛,杨莲梅.基于探空资料的1961—2018年新疆高空大气比湿气候特征分析[J].沙漠与绿洲气象,2021,15(3):77-84.

doi: 10.12057/j.issn.1002-0799.2021.03.010

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



# 基于探空资料的1961—2018年新疆高空大气比湿气候特征分析

杨涛<sup>1</sup>,杨莲梅<sup>2\*</sup>

(1.新疆气候中心,新疆 乌鲁木齐 830002;2.中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所,新疆 乌鲁木齐 830002)

**摘要:**利用1961—2018年新疆12个探空气象站逐日观测资料,分析新疆对流层850、700和500 hPa比湿的气候特征,结果表明:新疆大气比湿自西向东、自南向北递减,且随高度增加而减小,新疆比湿远小于东亚季风区;夏季比湿最大,其次为秋季、春季,冬季最小,850和500 hPa各站之间比湿差异较大,而700 hPa各站比湿差异较小;850、700和500 hPa比湿均表现为线性增加趋势,并表现为1967—1986年偏干、1987—2005年偏湿,1987年为突变点;850、700和500 hPa比湿与降水均呈显著正相关关系;夏季暴雨天气对流层中低层比湿最大,发生暴雨时比湿约为气候平均1~2倍,夏季暴雨的动力和不稳定条件更关键,新疆暴雨天气时比湿比东亚季风区显著偏小;冬季暴雪天气比湿是一年中最小的,春、秋季强降水比湿介于夏、冬季之间,但可达气候平均的2~3倍,春、秋季需要更多的水汽产生强降水。

**关键词:**新疆;对流层;比湿;气候变化;暴雨/雪

**中图分类号:**P426.15

**文献标识码:**A

**文章编号:**1002-0799(2021)03-0077-08

21世纪初,施雅风等<sup>[1]</sup>提出1987年起西北气候出现了转向暖湿的强劲信号。21世纪初以来,研究者对新疆不同时间尺度和区域的地面气温、降水、干湿时空变化等开展了大量研究<sup>[2-7]</sup>,加深了对新疆区域暖湿气候变化的认识。还有学者对干旱特征、气候变化对生态环境的影响进行分析和评估<sup>[8]</sup>,已开展的研究主要针对地面气象要素,而对流层水汽是气候的重要变量,是最重要的气候变化正反馈因子之一,也是气候学和天气学研究的重要问题。水汽通常用露点温度、绝对比湿、相对湿度和比湿等表征,气压变化导致的大气膨胀或收缩对比湿的影响很小,

因此,用比湿描述大气水汽的变化尤为重要<sup>[9]</sup>。水汽研究资料通常是基于探空观测、卫星遥感和再分析资料,此外,基于飞机飞艇、微波辐射计等现代观测技术也为高空水汽研究提供新的信息来源,不同探测方法各有优缺点,而探空具有历史序列长、垂直分辨率高、精度高的优点,缺点是站点分布不均且稀疏。

新疆为干旱半干旱区,水资源是重要的制约因素,高空大气水汽来源于水平和垂直方向的输送,气候因子的差异会导致高空大气水汽分布的区域差异。早在20世纪60年代,气象工作者开始对新疆大气水汽的研究,用有限的探空站的短时间资料,给出了新疆比湿空间分布为自西向东与自南向北的递减,季节分布为夏季高、冬季低的特征<sup>[10]</sup>。此后对新疆水汽的研究主要利用NCEP/NCAR再分析资料开展<sup>[11-13]</sup>,而再分析资料对水汽的反演存在较大的误差,因此很有必要利用长时间序列的探空资料对水汽开展研究。中国大气水汽变化与全球或北半球尺度的变化有明显差异,新疆具有独特的地理和气候

收稿日期:2020-08-26;修回日期:2020-12-08

基金项目:国家重点研发计划项目“中亚极端降水演变特征及预报方法研究”(2018YFC1507102)

作者简介:杨涛(1969—),男,高级工程师,主要从事气候研究和气象服务。E-mail: yd\_yang@sina.com

通信作者:杨莲梅(1969—),女,研究员,主要从事天气气候研究。E-mail: yanglm@idm.cn

环境,用长时间序列的探空资料分析对流层不同层次比湿气候特征及其变化,以探讨新疆区域大气水汽变化与其他区域的大气水汽有何差异,是对新疆区域气候变化认识的有益补充。

1 资料和方法

应用 1961—2018 年新疆 12 个探空气象站(阿勒泰、塔城、克拉玛依、伊宁、乌鲁木齐、北塔山、哈密、库尔勒、库车、喀什、和田、若羌)逐日观测资料,其中塔城始于 1966 年,其它站均从 20 世纪 50 年代或 60 年代初开始观测,北塔山 1959 年 11 月起有 07 时观测,1981 年增加 19 时观测,克拉玛依站 1968 年 2 月—1971 年 12 月暂停过观测,总体资料序列比较完整,可以代表当地的气候特点。采集了规定等压面层的气温和露点温度资料,包括近地面层、925、850、700、600、500、400、300、250、200、150、100 hPa。12 个探空气象站的分布见图 1。

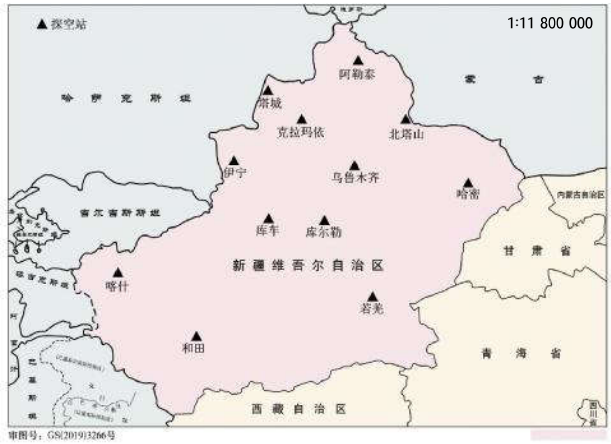


图 1 新疆主要探空气象站分布

利用气温、露点温度、气压等观测资料,按照简化的比湿计算公式<sup>[14]</sup>计算了 850、700、500 hPa 比湿序列,包括上述 12 个站 1961—2018 年逐日 07 时和 19 时 850、700、500 hPa 三层次的值,用两个时次的平均值计算了日均值。

当气温>-40℃时,

$$\begin{cases} E_s=1.000\ 071e^{0.000\ 004\ 5PE} \\ E=6.109\ 4e^{\frac{17.625T}{243.04+T}} \end{cases} \quad (1)$$

在气温<-40℃时,

$$\begin{cases} E_s=0.998\ 82e^{0.000\ 008\ PE} \\ E=6.112\ 1e^{\frac{22.587T}{273.86+T}} \end{cases} \quad (2)$$

其中,T 为气温,P 为气压,E 为水汽压, $E_s$  为饱和水汽压。

$$R_H=\frac{E_s(T_d)}{E_s(T)} \quad (3)$$

$$q=0.622\frac{E_s(T)R_H}{P} \quad (4)$$

其中, $T_d$  为露点温度, $R_H$  为相对湿度,q 为比湿。

研究表明,90% 以上的水汽集中在 500 hPa 以下的大气层<sup>[9]</sup>,400 hPa 比湿仅为 850 hPa 的 10%,300 hPa 以上各层比湿和仅为 850 hPa 的 1%,因此本文主要研究 850、700、500 hPa 层次的比湿,探讨新疆区域比湿气候特征及其变化。

2 新疆对流层中、低层比湿的气候特征及其变化

2.1 比湿的气候特征

各站全年比湿分布(表 1)可以看出,新疆大气的比湿分布呈现自西向东递减、自南向北递减的特征,这是由新疆以西方水汽输入为主所决定的,也与全国比湿的南高北低的纬向分布特点一致。在垂直方向上比湿呈随高度上升而减小的分布。

研究表明,我国 850 和 500 hPa 比湿变化范围分别为 2~12 g·kg<sup>-1</sup> 和 0.1~2.5g·kg<sup>-1</sup><sup>[9]</sup>。由表 1 可知,新疆 850 hPa 比湿年平均值为 3.48 g·kg<sup>-1</sup>,标准差为 0.476 g·kg<sup>-1</sup>,新疆西部的喀什比湿最大为 4.3 g·kg<sup>-1</sup>,新疆东部的哈密比湿最小为 2.81 g·kg<sup>-1</sup>。700 hPa 比湿年平均值为 2.28 g·kg<sup>-1</sup>,标准差为 0.217 g·kg<sup>-1</sup>,新疆西部的喀什比湿最大为 2.62 g·kg<sup>-1</sup>,新疆北部的阿勒泰、东部的哈密比湿最小分别为 1.97 g·kg<sup>-1</sup> 和 1.98 g·kg<sup>-1</sup>。500 hPa 比湿年平均值仅为 0.91 g·kg<sup>-1</sup>,

表 1 新疆 12 个探空站比湿年平均值 g·kg<sup>-1</sup>

| 站名/气压层 | 850 hPa | 700 hPa | 500 hPa |
|--------|---------|---------|---------|
| 阿勒泰    | 3.00    | 1.97    | 0.67    |
| 塔城     | 3.34    | 2.13    | 0.70    |
| 克拉玛依   | 3.13    | 2.26    | 0.78    |
| 伊宁     | 4.05    | 2.50    | 0.86    |
| 乌鲁木齐   | 3.46    | 2.30    | 0.89    |
| 北塔山 *  | /       | 2.09    | 0.73    |
| 哈密     | 2.81    | 1.98    | 0.79    |
| 库尔勒    | 3.48    | 2.47    | 0.98    |
| 库车     | 3.72    | 2.45    | 1.01    |
| 喀什     | 4.30    | 2.62    | 1.21    |
| 和田     | 4.07    | 2.49    | 1.27    |
| 若羌     | 2.96    | 2.06    | 1.00    |
| 全疆     | 3.48    | 2.28    | 0.91    |
| 标准差    | 0.476   | 0.217   | 0.185   |

注:北塔山站海拔高度为 1 654.7 m

各站比湿值差异较小,表明对流层中层水汽少、分布差异也小。新疆由于深处欧亚大陆腹地,为干旱半干旱气候,水汽输送和地表蒸发远小于东亚季风区,新疆比湿及其标准差远小于东亚季风区,且比湿标准差表明其是变化很小的物理量。

2.2 比湿的季节分布

从四季比湿平均值来看(表 2),各季比湿分布与年分布一致,均呈自西向东递减、自南向北递减,垂直方向上也随高度增加而减小;各层次均表现出夏季最大、冬季最小的特点,秋季略大于春季,夏季比湿为冬季的 3.7~6.3 倍。850 hPa,夏季比湿平均值为  $6.53\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,新疆南部的和田平均值最大为  $8.03\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,哈密最小为  $5.63\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,冬季为  $1.54\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,仅为夏季的 27%,同时各站比湿值为  $1.17\sim1.88\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,表明冬季比湿很小且差异也很小,标准差仅为  $0.2\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,春、秋季平均值分别为  $2.77$  和  $3.13\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,约为夏季的 1/2,可见 850 hPa 比湿的季节分布差异很大。

700 hPa,夏季比湿平均值为  $4.45\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,各站比湿在  $4.11\sim4.87\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,差异较小,表明在 3 000 m 高空,新疆区域比湿空间分布比较均匀一致,东西约 2 000 km 和南北约 1 500 km 广大范围比湿分布比较均匀,这是由于干旱半干旱气候背景所决定的。冬季比湿仅为  $1.01\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,仅为夏季的 23%,同时各站比湿值为  $0.83\sim1.23\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,表明冬季比湿很小且差异也很小,标准差仅为  $0.11\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。春、秋季平均值分别为  $1.75\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  和  $1.95\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,为夏季的 40%左右,

可见 700 hPa 比湿的季节分布差异很大,但各站比湿差异却很小,说明在此层比湿的空间分布差异较小。

500 hPa,夏季比湿平均值为  $1.91\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,约为 850 hPa 比湿的 29%,各站比湿为  $1.35\sim2.75\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,表明在 5 000 m 高空,新疆区域比湿分布差异比 700 hPa 大。冬季比湿为  $0.36\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,仅为夏季的 19%,同时各站比湿值为  $0.27\sim0.48\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,表明冬季比湿很小且差异也很小,标准差仅为  $0.06\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。春、秋季平均值分别为  $0.71$  和  $0.72\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,约为夏季的 37%,可见 500 hPa 比湿的季节分布差异也很大,但各站比湿差异却很小,在此层比湿的空间分布差异比 850 hPa 小,但较 700 hPa 大。

夏季 850、700 和 500 hPa 新疆各站比湿的标准差都是最大的,主要原因是温度高、比湿绝对数值大,也说明各站点之间的离散程度比较高,表明对流层水汽在夏季变化幅度最大,各站点之间比湿差异相对其他季节大,但 700 hPa 比湿的空间差异小于 850 和 500 hPa。

2.3 比湿年际变化及与地面水汽、降水变化的关系

2.3.1 比湿年际变化

由图 2 可见,1961—2018 年 850 hPa 比湿呈现减小趋势,R 值为 0.359,通过 0.05 的显著性检验,这与新疆降水呈显著增加趋势不一致,而 700 和 500 hPa 比湿表现出弱上升趋势,但 R 值均较小,未通过显著性检验。2005 年以前新疆比湿的年代际变化与

表 2 新疆 12 个探空站比湿四季平均值  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$

| 气压层<br>站名 | 850 hPa |       |       |       | 700 hPa |       |       |       | 500 hPa |       |       |       |
|-----------|---------|-------|-------|-------|---------|-------|-------|-------|---------|-------|-------|-------|
|           | 1 月     | 4 月   | 7 月   | 10 月  | 1 月     | 4 月   | 7 月   | 10 月  | 1 月     | 4 月   | 7 月   | 10 月  |
| 阿勒泰       | 1.17    | 2.36  | 6.29  | 2.55  | 0.83    | 1.44  | 4.19  | 1.63  | 0.28    | 0.50  | 1.41  | 0.60  |
| 塔城        | 1.46    | 2.96  | 6.33  | 2.98  | 0.97    | 1.75  | 4.25  | 1.82  | 0.31    | 0.59  | 1.38  | 0.67  |
| 克拉玛依      | 1.53    | 2.63  | 5.66  | 2.94  | 1.03    | 1.84  | 4.39  | 1.93  | 0.33    | 0.62  | 1.58  | 0.68  |
| 伊宁        | 1.85    | 3.79  | 7.00  | 3.65  | 1.11    | 2.27  | 4.56  | 2.17  | 0.37    | 0.77  | 1.60  | 0.77  |
| 乌鲁木齐      | 1.57    | 2.99  | 6.29  | 3.19  | 1.00    | 1.90  | 4.44  | 1.97  | 0.34    | 0.72  | 1.88  | 0.72  |
| 北塔山 *     | /       | /     | /     | /     | 0.84    | 1.66  | 4.46  | 1.68  | 0.27    | 0.56  | 1.60  | 0.61  |
| 哈密        | 1.31    | 1.94  | 5.63  | 2.58  | 0.87    | 1.43  | 4.11  | 1.70  | 0.29    | 0.58  | 1.83  | 0.59  |
| 库尔勒       | 1.57    | 2.59  | 6.50  | 3.26  | 1.02    | 1.91  | 4.75  | 2.24  | 0.36    | 0.75  | 2.16  | 0.72  |
| 库车        | 1.66    | 2.76  | 6.84  | 3.44  | 1.09    | 1.88  | 4.59  | 2.22  | 0.39    | 0.79  | 2.11  | 0.76  |
| 喀什        | 1.88    | 3.46  | 7.41  | 3.98  | 1.23    | 2.12  | 4.51  | 2.41  | 0.48    | 1.02  | 2.34  | 0.98  |
| 和田        | 1.57    | 2.88  | 8.06  | 3.27  | 1.12    | 1.77  | 4.87  | 1.99  | 0.45    | 0.95  | 2.75  | 0.89  |
| 若羌        | 1.42    | 2.10  | 5.89  | 2.58  | 1.02    | 1.47  | 4.22  | 1.66  | 0.40    | 0.70  | 2.28  | 0.67  |
| 全疆        | 1.54    | 2.77  | 6.53  | 3.13  | 1.01    | 1.79  | 4.45  | 1.95  | 0.36    | 0.71  | 1.91  | 0.72  |
| 标准差       | 0.200   | 0.520 | 0.711 | 0.440 | 0.114   | 0.250 | 0.220 | 0.251 | 0.063   | 0.150 | 0.405 | 0.112 |

中国1958—2005年比湿变化趋势是一致的<sup>[9]</sup>,中国对流层中低层比湿序列在1965年和1987年出现超过5%显著性检验的突变点,其中1966年中国多数探空站经历了仪器换型和订正方法的重大变更,1966年左右的突变点可能与这些变更相关,而非气候意义的突变点。1987年的突变则无台站变化的影响,属于发生年代际转折。

考虑到2005—2007年期间新疆各探空站经历了仪器换型(普遍从59型探空仪换为GTS1型数字式探空仪),是否也是导致2006年后比湿均值大幅下降的原因呢?按照前期研究<sup>[10]</sup>,探空仪换型后高度、温度具有一致性,湿度则有显著差异。1967—2005年期间的比湿趋势见图3,各层次比湿均表现为显著上升趋势,相关系数均通过0.05的显著性水平检验,各个层次均在1987年开始出现高于均值的变化,1967—1986年新疆对流层中、低层大气比湿

呈现偏“干”时段,1987—2005年为相对偏“湿”时段,如果与图4联系起来看,将2006年前后仪器换型导致的比湿均值变化因素排除,可知从1987年以来新疆地区对流层中低层比湿总体表现为持续上升趋势,与降水增多趋势一致。

将换型后的2007—2018年比湿进行分析,可以看到各层次比湿均呈显著上升趋势(图4),相关系数均通过0.05的显著性检验,说明2007—2018年期间比湿均值虽然较1961—2018年的多年均值下降,但这期间呈现线性上升趋势。

分析1967—2005年四季新疆对流层中、低层比湿的年际和年代际变化趋势,发现夏季上升趋势明显,各高度层均通过0.05的显著性检验,冬、春、秋季则是略有上升,未通过显著性检验;以2007—2018年分析,850 hPa春季和夏季、700 hPa的春季上升趋势通过0.05的显著性检验,其它层次和季节

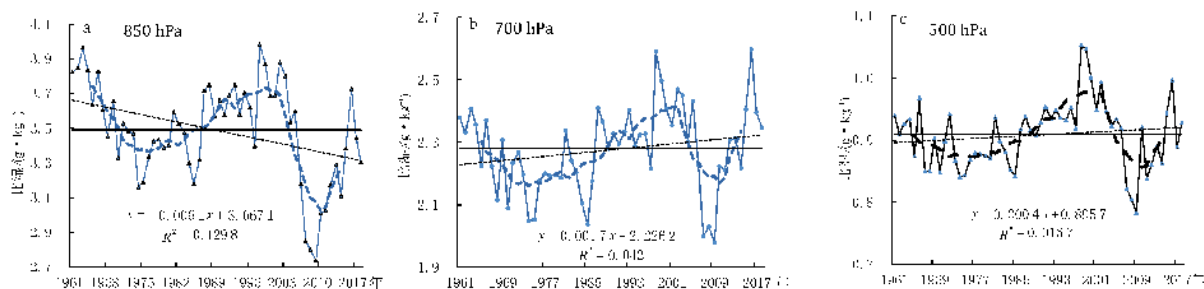


图2 1961—2018年新疆年平均比湿时间序列

(标记实线为逐年比湿;细实线为多年平均比湿;粗长画线为9 a滑动平均;细虚线为比湿趋势)

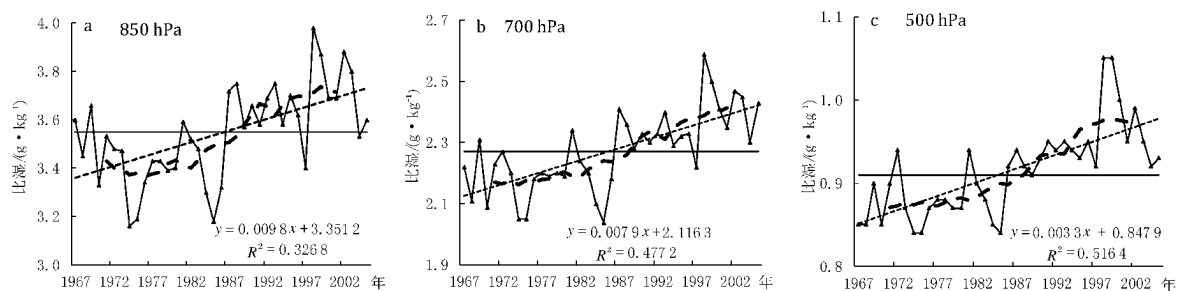


图3 1967—2005年新疆年平均比湿时间序列

(标记实线为逐年比湿;细实线为多年平均比湿;粗长画线为9 a滑动平均;细虚线为比湿趋势)

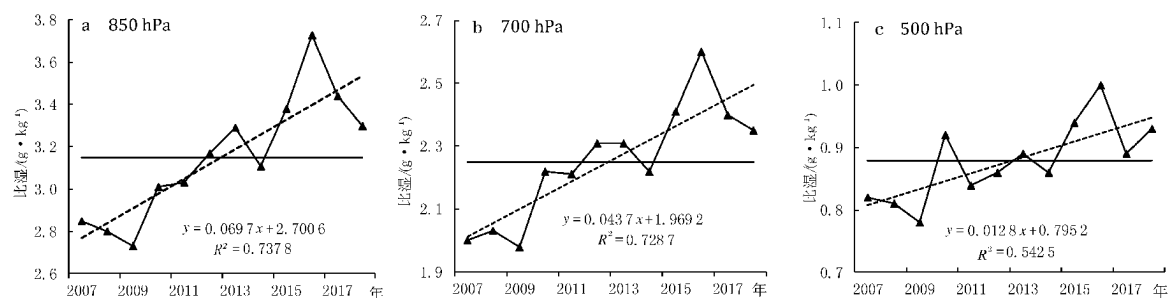


图4 2007—2018年新疆年平均比湿时间序列

(标记实线为逐年比湿;细实线为多年平均比湿;细虚线为比湿趋势)

也是略有上升,但未通过显著性检验。

### 2.3.2 地面水汽压年际变化、比湿与降水量相关分析

新疆 12 个探空站年平均地面水汽压变化见图 5,1967 年以来新疆地面水汽压呈显著增加趋势, $R$  为 0.73,通过 0.05 的显著性检验,这与地面降水增多趋势一致<sup>[5,7]</sup>。地面水汽压年际变化可见,1960 年代中期—1980 年代中期表现为偏干趋势,1987 年出现突变,1980 年代后期到 2000 年代中期呈现偏湿趋势,与对流层各层比湿的变化阶段基本一致,2006 年以后的地面水汽压趋势不明显。地面水汽压的趋势变化图说明对流层中低层的比湿与地面水汽压年代际变化是一致的。地面水汽压四季的年际变化特征与年变化一致。

对 1967—2005 年新疆年降水量与 850、700 和 500 hPa 比湿进行了线性相关分析,相关系数分别为 0.732、0.784 和 0.672,相关系数均通过 0.05 的显著性检验;2007—2018 年新疆年降水与 850、700 和 500 hPa 比湿线性相关系数分别为 0.54、0.565 和 0.76,相关系数均通过 0.1 的显著性检验,表明降水与比湿关系密切。

### 2.4 暴雨/雪过程比湿特征

从现有成果中选择出 12 个探空站,均出现暴雨<sup>[6]</sup>、暴雪<sup>[7]</sup>天气的个例,共选择 1961—2018 年期间各探空站  $\geq 24.1$  mm 的暴雨个例 67 次,选择 1961—2017 年期间各探空站  $\geq 12.1$  mm 的暴雪个例 28 次,用暴雨/雪天气发生时比湿最大值(从降水前后各一天及降水当日的 07、19 时值中选出最大)与该季节的多年均值进行对比(表 3~6)。春季,暴雨/雪天气过程 850、700 和 500 hPa 比湿依次减小,850 hPa 比湿为 4.49~9.37  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,各站比湿差异较大,但明显大于春季气候平均值,可达气候平均的 1.4~3.3 倍,大多为 2~3 倍,表明发生暴雨/雪时 850 hPa 比湿明显增大;700 hPa 比湿为 3.65~6.24  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,各站比湿小于 850 hPa,可达气候平均的 1.9~3.4 倍,大多为 2~3 倍,表明发生暴雨/雪时 700 hPa 比湿明显增强;500 hPa 比湿为 1.34~2.93  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,各站比湿小于 700 hPa,可达气候平均的 1.8~4.0 倍,表明发生暴雨/雪时 500 hPa 比湿也明显增强,可见发生暴雨/雪时对流层 850~500 hPa 比湿均出现明显的增加特征。新疆秋季秋高气爽,强降水天气少,比湿特征与春季一致,只是秋季比湿值小于春季。

夏季,暴雨天气发生时 850 hPa 比湿在一年中最大,约为 6.88~12.99  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,各站的差异还是比较

大的,为季节平均的 1.1~2.3 倍,700 hPa 比湿约为 4.60~11.08  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,约为季节平均的 1.0~2.3 倍,500 hPa 比湿为 2.01~6.25  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,各站比湿 < 700 hPa,可达气候平均的 1.2~2.6 倍,夏季比湿为一年中最高的,说明水汽相对丰富,而发生暴雨时比湿增多比例却比春、秋和冬季少,表明夏季暴雨的发生由产生降水的动力和不稳定条件决定。

冬季暴雪天气比湿是最小的,850 hPa 比湿为 1.73~5.15  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,为季节平均的 1.5~3.5 倍;700 hPa 比湿约为 1.60~3.36  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,约为季节平均的 1.6~3.8 倍,500 hPa 比湿较小大多在 1.5  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  以下,但仍可达气候平均的 1.9~4.8 倍,表明冬季暴雪水汽由外部水汽输送和聚集所致。

用 NCEP/NCAR 等资料分析新疆暴雪/雨天气过程的研究<sup>[18-25]</sup>指出,冬季出现暴雪时 850 hPa 比湿最大值可达 2.5~3  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,可见再分析资料比探空资料计算的比湿小一些;夏季暴雨天气 850 hPa 比湿可达 9~15  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,再分析资料比探空资料计算的比湿又偏大;春、秋季暴雨天气 850 hPa 比湿约为 6~9  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,再分析资料与探空资料计算的比湿范围比较一致。

北京“7.21”特大暴雨过程<sup>[26]</sup>中,累计最大降水量最大值为 541 mm,出现在房山的河北镇水文站,气象站观测到的最大值为门头沟龙泉(408.2 mm),城区最大降水量石景山模式口(328 mm)。该暴雨过程中的水汽情况如下:7 月 21 日 14 时低层对流层 850 hPa 以下比湿首先达到最大值 16~19  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,此后中高层的比湿也迅速增大,850~600 hPa 各层均在 20 时达到最大值,在 10~15  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。可见,东亚

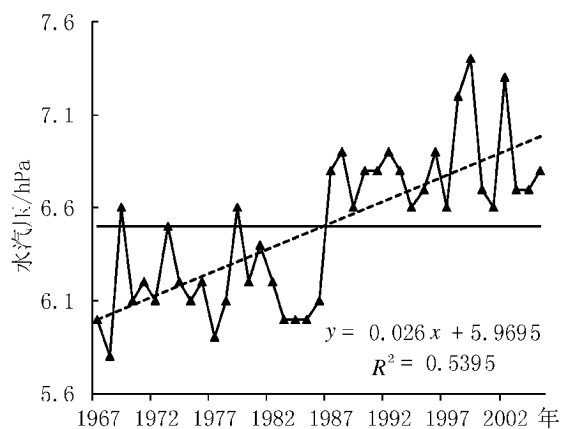


图 5 1967—2005 年新疆年平均地面水汽压变化  
(单位:hPa)

(标记实线为逐年水汽压;细实线为多年平均水汽压;  
细虚线为水汽压趋势)

表3 新疆暴雨、暴雪天气比湿特征(春季)  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 

| 气压层<br>站名 | 850 hPa   |         | 700 hPa   |         | 500 hPa   |         |
|-----------|-----------|---------|-----------|---------|-----------|---------|
|           | 比湿        | 与季均值比   | 比湿        | 与季均值比   | 比湿        | 与季均值比   |
| 塔城        | 7.15~8.25 | 2.4~2.8 | 5.01~5.98 | 2.9~3.4 | 2.02~2.18 | 3.4~3.7 |
| 克拉玛依      | 5.72~6.54 | 2.2~2.5 | 4.40~4.95 | 2.4~2.7 | 1.44~1.88 | 2.3~3.0 |
| 乌鲁木齐      | 4.14~7.15 | 1.4~2.4 | 3.65~4.88 | 1.9~2.6 | 1.34~2.86 | 1.9~4.0 |
| 库尔勒       | 4.49      | 1.7     | 3.82      | 2.0     | 1.53      | 2.0     |
| 喀什        | 6.49~7.98 | 1.9~2.3 | 4.47~6.24 | 2.1~2.9 | 1.88~2.64 | 1.8~2.6 |
| 和田        | 9.37      | 3.3     | 5.90      | 3.3     | 2.93      | 3.1     |

表4 新疆暴雨天气比湿特征(夏季)  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 

| 气压层<br>站名 | 850 hPa     |         | 700 hPa   |         | 500 hPa   |         |
|-----------|-------------|---------|-----------|---------|-----------|---------|
|           | 比湿          | 与季均值比   | 比湿        | 与季均值比   | 比湿        | 与季均值比   |
| 阿勒泰       | 8.48~10.22  | 1.3~1.6 | 5.21~7.19 | 1.2~1.7 | 2.27~3.72 | 1.6~2.6 |
| 塔城        | 8.09~11.20  | 1.3~1.8 | 5.18~6.70 | 1.2~1.6 | 2.01~3.20 | 1.5~2.3 |
| 北塔山       | /           | /       | 6.70~7.24 | 1.5~1.6 | 3.30~3.50 | 2.1~2.2 |
| 克拉玛依      | 6.68~7.20   | 1.2~1.3 | 4.60~5.65 | 1.0~1.3 | 2.26~2.53 | 1.4~1.6 |
| 伊宁        | 7.82~10.63  | 1.1~1.5 | 5.89~7.93 | 1.3~1.7 | 2.83~4.62 | 1.8~2.9 |
| 乌鲁木齐      | 6.91~11.72  | 1.1~1.9 | 4.71~8.16 | 1.1~1.8 | 2.41~4.69 | 1.3~2.5 |
| 库尔勒       | 6.86~10.42  | 1.1~1.6 | 5.14~8.44 | 1.1~1.8 | 2.59~3.60 | 1.2~1.7 |
| 喀什        | 11.35~12.11 | 1.5~1.6 | 7.09~7.93 | 1.6~1.8 | 3.41~3.46 | 1.5     |
| 和田        | 10.98       | 1.4     | 7.09      | 1.5     | 3.30      | 1.2     |
| 若羌        | 11.65~12.26 | 1.8~1.9 | 7.61~8.86 | 1.6~1.9 | 4.45~4.80 | 2.1~2.2 |

表5 新疆暴雨、暴雪天气比湿特征(秋季)  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 

| 气压层<br>站名 | 850 hPa   |         | 700 hPa   |         | 500 hPa   |         |
|-----------|-----------|---------|-----------|---------|-----------|---------|
|           | 比湿        | 与季均值比   | 比湿        | 与季均值比   | 比湿        | 与季均值比   |
| 塔城        | 6.05~6.18 | 2.0~2.1 | 3.36~3.94 | 1.8~2.2 | 1.24~1.27 | 1.9     |
| 北塔山       | /         | /       | 4.92      | 2.9     | 1.34      | 2.2     |
| 克拉玛依      | 6.36      | 2.2     | 5.25      | 2.7     | 1.80      | 2.6     |
| 乌鲁木齐      | 5.56~5.80 | 1.7~1.8 | 3.91~5.14 | 2.0~2.6 | 1.68~1.88 | 2.3~2.6 |

表6 新疆暴雪天气比湿特征(冬季)  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 

| 气压层<br>站名 | 850 hPa   |         | 700 hPa   |         | 500 hPa   |         |
|-----------|-----------|---------|-----------|---------|-----------|---------|
|           | 比湿        | 与季均值比   | 比湿        | 与季均值比   | 比湿        | 与季均值比   |
| 阿勒泰       | 1.73~3.74 | 1.5~3.2 | 1.60~3.18 | 1.9~3.8 | 0.52~1.06 | 1.9~3.8 |
| 塔城        | 3.08~5.15 | 2.1~3.5 | 2.27~3.36 | 2.3~3.5 | 0.66~1.20 | 2.1~3.9 |
| 伊宁        | 3.05~4.20 | 1.6~2.3 | 2.23~3.02 | 2.0~3.6 | 0.75~1.77 | 2.0~4.8 |
| 乌鲁木齐      | 2.79~4.05 | 2.1~2.6 | 2.27~2.68 | 2.3~2.7 | 1.10~1.22 | 3.2~3.6 |
| 库尔勒       | 3.05~4.08 | 1.9~2.6 | 1.71~2.48 | 1.7~2.4 | 0.51~1.53 | 1.4~4.3 |
| 喀什        | 3.32~4.26 | 1.8~2.3 | 1.95~2.64 | 1.6~2.1 | 0.79~1.06 | 1.6~2.2 |
| 和田        | 4.23      | 2.7     | 2.72      | 2.4     | 1.35      | 3.0     |

季风区的华北区域极端降雨量可达新疆地区的10倍左右,而对流层中低层比湿较新疆偏大1倍左右。

### 3 结论

利用1961—2018年新疆12个探空站逐日资料计算了对流层中低层比湿,研究了新疆58 a来对流层中低层大气比湿气候特征及其变化,得到以下结论:

(1)新疆大气比湿自西向东、自南向北递减,在垂直方向上随高度增加而减小,新疆比湿远小于东亚季风区。新疆夏季比湿最大,其次为秋季、春季,冬季最小。850和500 hPa夏季新疆各站之间比湿差异较大,春、秋季次之,冬季最小,而700 hPa各站比湿差异较小。

(2)排除1966年、2006年前后两次探空站仪器全面换型影响,分析了新疆比湿1967—2005年、2007—2018年两个阶段的变化趋势,表明这两个阶段各层次均呈线性上升趋势,1967—1986年、1988—2005年新疆对流层中、低层大气比湿呈“干—湿”显著变化,突变点为1987年;地面水汽压年际变化与比湿基本一致。对流层中低层各层次比湿与降水呈显著正相关。

(3)夏季暴雨天气时比湿最大,尤其850 hPa比湿最大可达 $6.88 \sim 12.99 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,700 hPa为 $4.60 \sim 11.08 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,500 hPa为 $2.01 \sim 6.25 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,夏季发生暴雨时比湿约为气候平均的1~2倍,表明夏季暴雨的动力和不稳定条件更关键,新疆暴雨天气比湿远比东亚季风区小。冬季暴雪天气比湿是一年中最小的,但仍可达气候平均的1.9~4.8倍,冬季暴雪水汽由外部水汽输送和聚集所致。春、秋季强降水比湿介于夏、冬季之间,但可达气候平均的2~3倍,说明春、秋季需要更多的水汽产生强降水。

### 参考文献:

- [1] 施雅风,沈永平,胡如骥.西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨[J].冰川冻土,2002,24(3):219~226.
- [2] 姜大膀,苏明峰,魏荣庆.新疆气候的干湿变化及其趋势预估[J].大气科学,2009,33(1):90~98.
- [3] 普宗朝,张山清,王胜兰,等.近48 a新疆干湿气候时空变化特征分析[J].中国沙漠,2011,31(6):1563~1572.
- [4] 辛渝,陈洪武,张广兴,等.新疆年降水量的时空变化特征[J].高原气象,2011,27(5):993~1003.
- [5] 江远安,刘精,邵伟玲,等.1961—2013年新疆不同时间尺度降水量的气候特征及其历史演变规律[J].冰川冻土,2014,36(6):1363~1375.
- [6] 普宗朝,张山清,李景林,等.近47a塔克拉玛干沙漠周边

- 地区气候变化[J].中国沙漠,2010,30(2):413-421.
- [7] 谢培,顾艳玲,张玉虎,等.1961—2015 年新疆降水及干旱特征分析[J].干旱区地理,2017,40(2):332-339.
- [8] 王玉洁,秦大河.气候变化及人类活动对西北干旱区水资源影响研究综述 [J]. 气候变化研究进展,2017,13(5):483-493.
- [9] 郭艳君,丁一汇.1958—2005 年中国高空大气比湿变化[J].大气科学,2014,38(1):1-12.
- [10] 张家宝,邓子凤.新疆降水概论[M].北京:气象出版社,1987:70-73.
- [11] 史玉光,孙照渤.新疆大气可降水量的气候特征及其变化[J].中国沙漠,2008,28(3):519-525.
- [12] 史玉光,孙照渤.新疆水汽输送的气候特征及其变化[J].高原气象,2008,27(2):310-319.
- [13] 刘蕊,杨青.新疆大气水汽通量及其净收支的计算和分析[J].中国沙漠,2010,30(5):1221-1228.
- [14] 翟盘茂,周琴芳.中国大气水分气候变化研究[J].应用气象学报,1997,8(3):341-351.
- [15] 伊里哈木,刘卫平,胡义成,等.新疆探空仪器换型前后资料对比分析[J].沙漠与绿洲气象,2013,7(2):61-67.
- [16] 杨莲梅,陈方.新疆暴雪年鉴(1953-2017)[M].北京:气象出版社,2018:2-542.
- [17] 张云惠,胡顺起.新疆暴雨(1961-2018)[M].北京:气象出版社,2020:3-254.
- [18] 于碧馨,张云惠,宋雅婷.2012 年前冬伊犁河谷持续性大暴雪成因分析[J].沙漠与绿洲气象,2016,10(5):44-51.
- [19] 许婷婷,张云惠,于碧馨,等.2015 年 12 月乌鲁木齐极端暴雪成因分析[J].沙漠与绿洲气象,2017,11(5):23-29.
- [20] 刘晶,于碧馨,赵克明,等.乌鲁木齐“2·24”短时降水和冰雹中小尺度特征对比分析[J].暴雨灾害,2018,37(4):347-355.
- [21] 刘晶,杨莲梅.一次中亚低涡造成的天山北坡暴雨 GPS 大气水汽总量演变特征[J].气象,2017,43(6):724-734.
- [22] 张云惠,于碧馨,王志楷,等.伊犁河谷夏季两次极端暴雨过程的动力机制与水汽输送特征 [J]. 暴雨灾害,2018,37(5):435-444.
- [23] 张云惠,李海燕,蔺喜禄,等.南疆西部持续性暴雨环流背景及天气尺度的动力过程分析[J].气象,2015,41(7):816-824.
- [24] 曾勇,杨莲梅.南疆西部两次短时强降水天气中尺度特征对比分析[J].暴雨灾害,2017,36(5):410-421.
- [25] 刘晶,周雅蔓,杨莲梅,等.2016 年伊犁河谷大气可降水量变化特征及其与降水的关系 [J]. 干旱气象,2019,37(4):565-576.
- [26] 廖晓农,倪允琪,何娜,等.导致“7·21”特大暴雨过程中水汽异常充沛的天气尺度动力过程分析研究[J].气象学报,2013,71(6):997-1011.

# Climatic Characteristics of Atmosphere Specific Humidity in Xinjiang from 1961 to 2018 Based on Radiosonde Observation Data

YANG Tao<sup>1</sup>, YANG Lianmei<sup>2</sup>

(1. Xinjiang Climate Center, Urumqi 830002, China;

2. Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi 830002, China)

**Abstract** Based on the daily observation data of 12 radiosonde weather stations in Xinjiang from 1961 to 2018, the climate characteristics of specific humidity (SH) in the 850, 700 and 500 hPa were analyzed. The results showed that the SH of atmosphere in Xinjiang decreased from west to east and from south to north, and decreased with the increasing of altitude. The SH in Xinjiang was far less than that in East Asian monsoon region, and the largest in summer, followed by autumn and spring, and the minimum in winter. The SH of 850 hPa and 500 hPa stations had a great difference, while the SH of 700 hPa stations had a little difference, all appeared a linear increasing trend and positively correlated with precipitation. The SH was drier during 1967–1986, wetter during 1987–2005, and had a abrupt point in 1987. The SH in the middle and lower troposphere was the largest during rainstorm weather in summer and 1–2 times of the climatic average during the rainstorm. The dynamic and unstable conditions of rainstorm were more critical. The SH of rainstorm in Xinjiang was significantly smaller than that in East Asia monsoon region. The SH of snowstorm in winter was the smallest in the year, and the SH of heavy rainfall in spring and autumn was between summer and winter, but it could reach 2–3 times of the average climatic. In spring and autumn, more water vapor was needed to produce heavy precipitation.

**Key words** Xinjiang; troposphere; specific humidity; climate change; rainstorm/snow