

吴萍<sup>1,2</sup> 吴裴裴<sup>2</sup> 余忠水<sup>3</sup> 普布次仁<sup>3</sup>

# 拉萨夏季大气可降水量的演变特征 及其与降水的关系

## 摘要

根据拉萨站近 40 a(1969—2008 年)探空观测资料以及同期的地面降水资料,分析了拉萨近 40 a 夏季大气可降水量和地面降水的演变特征及其关系。结果表明:该站夏季大气可降水量和降水存在显著的正相关关系,两者存在相同的年际和年代际变化,均具有准 3 a 年际振荡和准 11 a 左右的年代际振荡;近 40 a 来两者均呈现出上升趋势,其中降水的增加趋势明显,其增幅大于可降水量的增幅。进一步通过对拉萨夏季降水转化率分析得知,拉萨夏季平均降水转化率约为 26.06%,但存在明显的年际差异,夏季降水转化率最大值为最小值的 3 倍;夏季降水转化率正(负)异常年,拉萨地区低层的辐合和高层的辐散均明显增强(减弱),拉萨地区垂直速度将增加(减弱),从而有(不)利于降水形成。

## 关键词

拉萨;可降水量;降水;降水转化率

中图分类号 P426

文献标志码 A

收稿日期 2013-07-16

资助项目 中国气象局成都高原气象研究所开放实验室基金(LPM2011015);国家自然科学基金(41275095);中国气象局气象关键技术集成与应用项目(CMAJG2013M28);西藏自治区科技计划(200910-11)

## 作者简介

吴萍,女,硕士,主要从事区域气候变化。  
nj\_wp@126.com

## 0 引言

一个地区的旱涝状况同该地区水汽状况有直接关系。大气可降水量(又称大气水汽含量,以下简称可降水量)所表示的是单位面积地区上空的整层大气水汽全部凝结并降至地面的降水量。可降水量可表征降水的潜力,与降水范围关系密切,是评估空中水资源的重要依据<sup>[1-2]</sup>。周秀骥等<sup>[3]</sup>指出可降水量是可持续利用的淡水资源最重要的来源,充分开发利用空中水资源,是解决水资源短缺问题的一个重要的组成部分。

我国气象工作者分析了不同区域可降水量的时空分布特征及其与降水的关系<sup>[1,2,4-12]</sup>。翟盘茂等<sup>[1]</sup>分析了我国近 21 a(1970—1990 年)可降水量的分布状况及其与温度和降水的关系。何平等<sup>[13]</sup>根据 GPS 反演大气水汽总量,分析了可降水量与地面降水存在的对应关系。向华等<sup>[14]</sup>分析了湖北省水汽含量与地面降水的关系,发现少雨年与多雨年的差异,水汽含量偏少是一个方面。赵玲等<sup>[11]</sup>分析了乌鲁木齐可降水量与实测降水的相关关系及该地区的降水转化率,指出该地区各月的水汽含量和降水量整体上存在显著的正相关关系。李帅等<sup>[15]</sup>基于 1961—2007 年阿勒泰地区 7 个地面站的平均水汽压资料与降水量资料,采用地面水汽压的经验模式得到反映整层大气可降水量后,分析了该地区的降水转化率,发现该地区的降水转化率在 28.15%~94.03%之间变化。王维佳等<sup>[12]</sup>利用 30 a(1971—2000 年)四川地面水汽压资料,通过计算大气可降水量的经验公式分析了四川地区降水效率的变化,指出降水效率夏季最高,冬季最低,东部盆地区可降水量大于西部高山高原区,西部高原区降水效率高于东部盆地区。

青藏高原是世界上海拔最高和地形最复杂的高原,也是我国长江、黄河的发源地,被称为“中国水塔”或“亚洲水塔”,是我国未来水资源开发、利用的核心地区。高原区域水资源不但对高原本地区经济社会可持续发展关系重大,而且对我国其他地区也有重大影响<sup>[16-17]</sup>。因此,了解高原空中水资源状况和变化趋势,具有十分重要的战略意义。近年来有关高原空中水资源的演变特征已有不少研究<sup>[16,18-22]</sup>。高原夏季降水除了与高原本身的水汽分布有关外,还与阿拉伯海以及印度洋的水汽输送有关<sup>[18]</sup>。黄荣辉等<sup>[16]</sup>在分析高原夏季降水与邻近

1 中国气象局成都高原气象研究所,成都,610072

2 南京信息工程大学 气象灾害省部共建教育部重点实验室,南京,210044

3 西藏自治区气象台,拉萨,850000

地区水汽输送的相关关系时,就曾发现东亚夏季风降水主要是由夏季风带来的水汽平流引起的.梁宏等<sup>[19]</sup>指出地理纬度和海拔高度决定了高原地区南湿北干的水汽分布特征,大气环流变化则是造成高原及周边地区水汽分布季节变化的主要原因.黄玉霞等<sup>[20]</sup>利用青海省24个测站1961—2003年夏季月平均地面降水资料以及同期NECP/NCAR月平均再分析资料,分析了青海高原夏季降水异常及其水汽输送特征.周长艳等<sup>[22]</sup>利用1958—2001年ERA再分析资料,分析了高原东部及邻近地区空中水汽资源的气候变化特征,发现1958—2001年期间该区域年平均可降水量总体呈减少趋势.冯蕾等<sup>[23]</sup>利用高原1961—2005年夏季降水资料及同期NCEP/NCAR再分析资料,指出高原夏季异常旱涝年的水汽输送存在显著差异.

由于青藏高原地区高空观测站资料偏少和观测年限偏短,且主要位于高原东部,以上关于可降水量的研究主要基于的是对各种再分析资料分析的结果,研究的可靠性有待验证.鉴于拉萨站高空观测年限相对较长,且位于西藏雅鲁藏布江中游河谷地区,受青藏高原季风的影响,降水主要集中在夏季(6—8月),降水季节变化异常明显,夏季干旱出现较频繁,对农牧业生产影响很大<sup>[24-29]</sup>.因此,本文利用拉萨站1969—2008年的高空观测的月平均气温和露点温度差资料以及同期的地面月平均降水资料,对该站近40a夏季可降水量的演变特征及其与降水关系进行了研究,并计算和分析了该站夏季降水转化率的变化规律,这对于认识西藏高原腹地的大气可降水量以及旱涝的变化规律以及合理利用空中水资源都有重要的意义.

## 1 资料介绍与计算方法

### 1.1 资料

本文使用的资料主要包括:1)国家气象信息中心整编后的拉萨站1969—2008年地面及高空各标准等压面上的月平均气温和露点温度差资料,考虑到200 hPa以上水汽含量稀少,文中仅分析从地面到200 hPa各标准等压面上的湿度参量;2)该中心提供的同期拉萨站地面月平均降水资料;3)ERA40再分析(1969—2002年)平均再分析资料<sup>[30]</sup>.

### 1.2 整层大气水汽含量的计算方法

探空观测资料中,大气湿度量通常为各等压面上的温度露点差.在实际应用中需要根据饱和水汽

压与温度的关系,通过温度露点差来确定各个等压面上的水汽压值.首先将由温度和温度露点差得到露点温度( $T_d$ ),再由 $T_d$ 代入饱和水汽压公式得到水汽压( $e$ )<sup>[31]</sup>:

$$e = 0.611 \times \exp\left(\frac{a \times T_d}{273.16 + T_d - b}\right), \quad (1)$$

其中 $a$ 和 $b$ 为常数,对于水面饱和情况取 $a = 17.26$ , $b = 35.86$ ;对于冰面饱和情况取 $a = 21.87$ , $b = 7.66$ .然后再计算出比湿( $q$ ):

$$q = 0.62197 \times \frac{e}{p - 0.378 \times e}, \quad (2)$$

其中 $e$ 为水汽压, $p$ 为气压,最后可以计算出高空大气的水汽含量( $W$ )<sup>[32]</sup>:

$$W = g^{-1} \int_{p_z}^{p_s} q dp, \quad (3)$$

其中 $W$ 为水汽含量(mm), $g$ 为重力加速度( $9.8 \text{ m/s}^2$ ), $q$ 为比湿( $\text{g/kg}$ ), $P_s$ 为地面气压(hPa), $P_z$ 为积分上限,取200 hPa.

文中采用的分析方法主要有滑动平均、相关分析、Mann-Kendall突变检验、Morlet小波变换分析及合成分析等常用气象统计方法<sup>[33-34]</sup>.

## 2 拉萨夏季可降水量和降水的演变特征

### 2.1 可降水量和降水的年际变化特征

图1给出了近40a来拉萨站夏季可降水量和降水距平百分率的年际变化曲线.由图1a可见,该站夏季可降水量和降水均存在明显的年际振荡,且两者的年际变化(图中实线)具有很好的一致性,相关系数高达0.72(通过0.001的显著性水平的检验).可降水量平均为13.33 mm,最大(小)值出现在2000(1983)年,为14.91(10.45) mm.夏季降水(图1b)平均为322.42 mm,最大(小)值出现在1998(1983)年,为456.50(115.10) mm.在长期线性变化趋势上(图中虚直线),两者均呈现出上升趋势,可降水量(降水)的增幅约为每10年增加1.59(4.9)%,其中降水的增幅通过了0.05的显著性水平检验,可见地面降水的增幅比可降水量的增幅大.从9a滑动平均曲线(图中点虚线)可以看出,20世纪90年代中期以前可降水量偏少,90年代末期至今可降水量偏多;降水也由20世纪90年代中期以前的少雨期变为多雨期.综上所述,该站夏季可降水量和降水在年际和年代际变化上均存在一致的对应关系.

### 2.2 可降水量和降水的突变特征

利用Mann-Kendall检验方法分别对拉萨夏季可

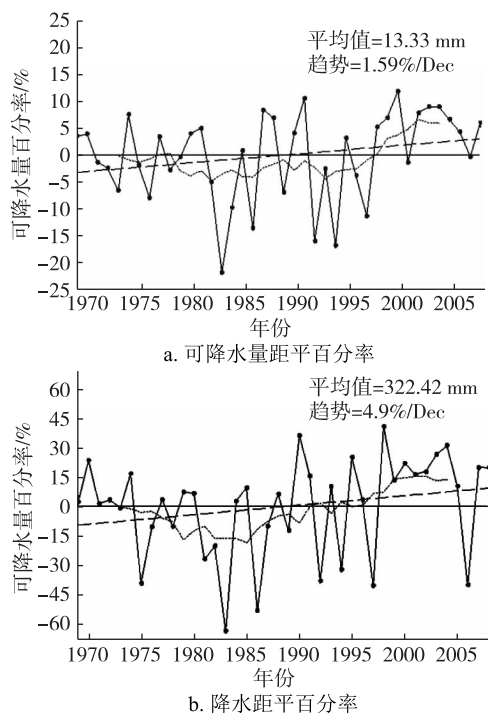


图1 拉萨夏季可降水量和降水距平百分率的年际变化曲线(图中虚直线为线性趋势线,点虚线为9 a 滑动平均,单位:%)

Fig. 1 Inter-annual variation curves of precipitable water and precipitation standardized anomalies in summer in Lhasa

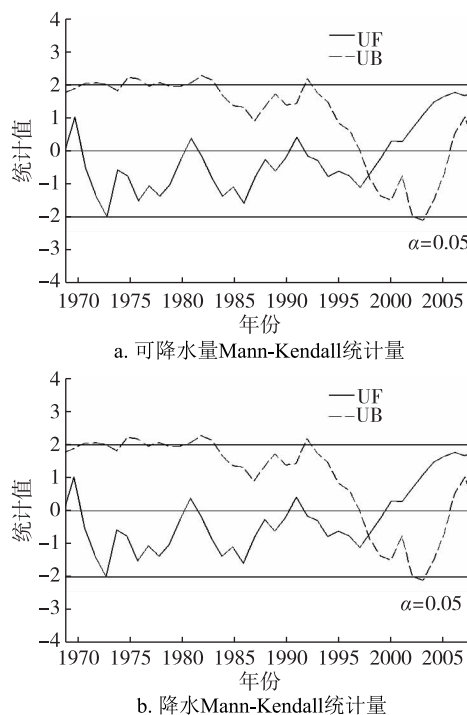


图2 拉萨夏季可降水量和降水的 Mann-Kendall 统计量曲线

Fig. 2 The Mann-Kendall tests of precipitable water and precipitation in summer in Lhasa

降水量序列和降水序列的突变特征进行分析(图2).由图2a可见,在20世纪90年代中期以前(后)可降水量基本呈减少(增加)的趋势,在临界区域内UF曲线和UB曲线在1997年前后存在交点,表明拉萨夏季可降水量在1997年前后发生突变,可降水量由偏少转为偏多.由图2b可见,该站地面降水在20世纪90年代中期以前(后)以偏少(多)为主,且同样在1997年前后,该站夏季降水由少雨期跃变为多雨期.由此可知,拉萨夏季可降水量和降水量不仅存在相同的年际和年代际变化,且突变时间也几乎一致.

### 2.3 可降水量和降水的周期变化特征

利用Morlet小波变换分析两者的周期演变特征.夏季可降水量小波分析的结果表明,在20世纪80年代中期到90年代中期存在一个准3 a的年际振荡(图3a),此外在整个分析时段内还普遍存在10~12 a的年代际振荡.夏季降水在20世纪80年代以来存在着3~5 a的年际振荡,同样在年代际尺度上也存在10~12 a的年代际振荡(图3b).由此可知,拉萨夏季可降水量的振荡周期和降水非常接近,其表现出的10~12 a的年代际周期可能是对太阳活动

准11 a 周期的响应<sup>[35]</sup>.

### 2.4 可降水量异常年降水的差异

进一步分析拉萨夏季可降水量典型正(负)异常年地面降水的差异,由夏季可降水量距平的时间序列(图1a),以1个标准差为标准,选择>( <)1倍标准差(-1倍标准差)的年份为可降水量正(负)异常年,得到5个正异常年:1987、1991、2000、2003和2004年以及5个负异常年:1983、1986、1992、1994和1997年,对可降水量正(负)异常年的夏季降水进行平均值差异的显著性检验(表1),由表1可见,可降水量正(负)异常年的降水差异明显,可降水量正(负)异常年,地面降水偏多(少),且通过了0.001的显著性水平检验.因此,拉萨夏季可降水量异常偏高(低)年,地面降水明显偏多(少).

### 3 拉萨夏季降水转化率

某地气柱中的可降水量仅表示该地降水的潜力.一般某地气柱中的可降水量只有一部分能转化为实际降水,不同地区所具有的可降水量向降水转换的能力是不同的,降水转化率表明可降水量能够

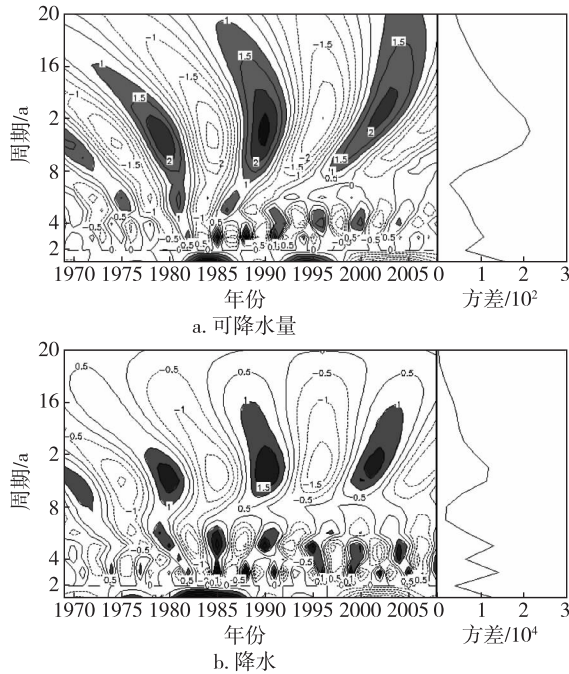


图3 拉萨夏季可降水量和降水 Morlet 小波变换实部和方差分布  
Fig. 3 The real part and variance distribution of Morlet wavelet transform of precipitable water and precipitation in summer in Lhasa

表1 拉萨夏季可降水量正(负)异常年降水平均值的显著性检验

Table 1 Significance test of annual mean precipitation in summer of positive(negative) precipitable water anomaly in Lhasa

正异常年	可降水量/ mm	降水/ mm	负异常年	可降水量/ mm	降水/ mm
1987	14.45	290.20	1983	10.45	115.10
1991	14.74	374.00	1986	11.54	149.00
2000	14.91	395.10	1992	11.22	198.60
2003	14.53	409.70	1994	11.11	217.50
2004	14.52	424.50	1997	11.84	190.70
平均	14.63	378.70	平均	11.23	174.18

注: t 检验值为 6.81, 通过 0.001 显著性水平检验.

转化成降水的比率,可大致衡量一个地区一段时间可降水量向降水转化效率的高低.王霄等<sup>[21]</sup>研究发现在对流层中层的高原上空,夏季是一个明显的水汽含量高中心.蔡英等<sup>[36]</sup>分析了高原及周围地区气柱可降水量的多年平均特征及其季节变化,指出我国各地夏季平均降水转化率明显不同,其中青藏高原最高,东亚季风区次之,南疆盆地最低.

由于本文分析的是季节降水转化率,其公式为

$$\text{降水转化率} = \frac{\text{季降水量}}{\text{日可降水量} \times (\text{季天数})} \times 100\%$$

### 3.1 降水转化率的年际变化

图4为近40a拉萨夏季降水转化率的年际变化曲线.由图4可见:该站夏季降水转化率存在明显的年际变化,且与降水的年际变化(图1b)非常一致;夏季降水转化率多年平均值约为26.06%,这期间降水转化率最大值和最小值分别出现在1998年(35.37%)和1983年(11.97%),分别对应降水最大值年和降水最小值年,最大与最小降水转化率相差23.40%,降水转化率最大值约为最小值的3倍,这表明拉萨夏季降水转化率的年际差异非常明显.与拉萨夏季降水在20世纪90年代中期以前的少雨期变为90年代中期以后的多雨期相对应,降水转化率的9a滑动平均曲线(图中点虚线)也由偏低值转变为偏高值.由此可知,降水转化率在一定程度上决定了该地区降水的多寡,同时由于该站近40a来夏季降水转化率呈上升趋势(约为0.84%/(10a)),从而导致地面降水的增幅超过了可降水量的增幅.

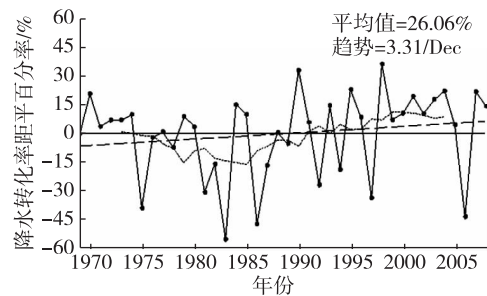


图4 拉萨夏季降水转化率的年际变化(图中虚直线为线性趋势线,点虚线为9a滑动平均,单位:%)

Fig. 4 Inter-annual variation curve of precipitation conversion efficiency in summer in Lhasa

### 3.2 降水转化率的突变特征和周期特征

由拉萨夏季降水转化率序列的Mann-Kendall检验曲线(图5)可见,20世纪70年代中期以前降水转化率呈增加趋势,70年代中期到90年代中期呈减少趋势,90年代中期以后又呈增加趋势,在临界区域内UF曲线和UB曲线在1997—1998年之间存在交点.结合以上分析(图2)可知,拉萨夏季降水转化率与可降水量以及降水突变特征一致,三者均在20世纪90年代中期前后发生突变.

由拉萨夏季降水转化率的Morlet小波变换分析(图略)的结果可知,降水转化率在年际变化时间尺度上存在准3~5a的年际振荡,而在年代际时间尺

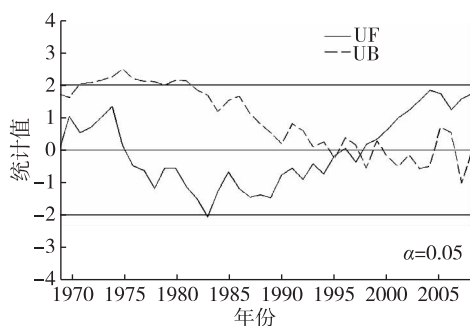


图5 拉萨夏季降水转化率的 Mann-Kendall 统计量曲线

Fig. 5 The Mann-Kendall test of precipitation conversion efficiency in summer in Lhasa

度上存在 11 a 左右的年代际振荡。

### 3.3 降水转化率异常年散度场的差异

为了分析拉萨夏季降水转化率典型正(负)异常年地面降水的差异,由夏季降水转化率距平的时间序列(图4),以1个标准差为标准,选择>( <) 5.68%(-5.68%)的年份为降水转化率正(负)异常年,得到5个正异常年:1990、1995、1998、2004和2007年以及5个负异常年:1975、1983、1986、1997和2006年,对降水转化率正(负)异常年的夏季降水进行平均值差异的显著性检验(表2),由表2可见,降水转化率正(负)异常年的降水差异明显,降水转化率正(负)异常年,地面降水偏多(少),降水转化率正异常年的平均降水量(422.96 mm)几乎是降水转化率负异常年平均降水量(163.80 mm)的3倍,并且通过了0.001的显著性水平检验。由表2可见,降水转化率异常明显影响着夏季旱涝异常。

夏季旱涝异常与相应的环流异常有关,而降水转化率异常影响着夏季旱涝异常,各地不同季节不同的降水转化率由天气系统影响。由于天气系统以及天气系统出现的时间、强弱、移动路径、水汽条件、垂直运动的不同<sup>[37]</sup>,形成了各地各时不同的降水转化率。因此以下分析降水转化率正负异常年高原区域的有关环流场的差异。鉴于在青藏高原地区夏季ERA40具有相对较好的适用性<sup>[38]</sup>,同时考虑到ERA40截止到2002年8月,为此选取降水转化率3个正异常年(1990、1995和1998年)和4个负异常年(1975、1983、1986和1997年)对高低层散度场进行合成分析。

夏季高原主体地区呈现整层上升运动,上升气流区域对应着低层辐合和高层辐散<sup>[39]</sup>。因此在多年夏季平均的高原区对流层中层(500 hPa,图6a)和对

表2 拉萨夏季降水转化率正(负)异常年降水平均值的显著性检验

Table 2 Significance test of annual mean precipitation in summer of positive(negative) precipitation conversion efficiency in Lhasa

正异常年	降水转化率/%	降水/mm	负异常年	降水转化率/%	降水/mm
1990	34.55	441.20	1975	16.16	194.60
1995	31.99	405.00	1983	11.97	115.10
1998	35.37	456.50	1986	14.03	149.00
2004	31.76	424.50	1997	17.51	190.70
2007	31.68	387.60	2006	15.00	192.10
平均	33.07	422.96	平均	14.934	168.30

注:t检验值为12.74,通过0.001显著性水平检验。

流层上层(200 hPa,图7a)的散度场图上,低层500 hPa为明显辐合区,而在高层200 hPa为异常的辐散区,这表明夏季高原主体上维持着强烈的大气和水汽的垂直输送。在降水转化率正异常散度场合成距平图上,青藏高原(包括拉萨)500 hPa为负距平区(图6b),在200 hPa为正距平区(图7b),表明降水转化率偏高年高原地区低层的辐合和高层的辐散均比常年有所增强。相反在降水转化率负异常年的高低层散度场合成距平分布则表现出反相分布:在500 hPa散度场合成距平图(图6c)高原腹地为正距平,而200 hPa散度场合成距平图(图7c)为负距平,即说明降水转化率偏低年高原区低层的辐合和高层的辐散均较常年明显减弱。进一步分析500 hPa(图6d)和200 hPa(图7d)散度场的合成差值图,可见拉萨夏季降水转化率正异常较负异常年更有利于拉萨地区维持强烈的上升运动,而垂直速度的增加将导致降水转化率的增大<sup>[40]</sup>,从而导致降水的增加。

## 4 结论

根据拉萨站1968—2008年的探空及地面观测资料,通过对近40 a该站夏季降水量、降水及降水转化率的演变特征进行分析和比较,可以得出:

- 1) 拉萨夏季可降水量和降水存在明显的正相关关系,可降水量偏多(低)异常年,降水偏多(少)。
- 2) 近40 a来,夏季可降水量以准3 a的年际振荡为主,降水和降水转化率以准3 a和准5 a的年际振荡为主,同时可降水量、降水和降水转化率都存在准10~12 a的年代际振荡。
- 3) 该站夏季可降水量、降水和降水转化率均在20世纪90年代后期发生突变。1997年以前(后)拉

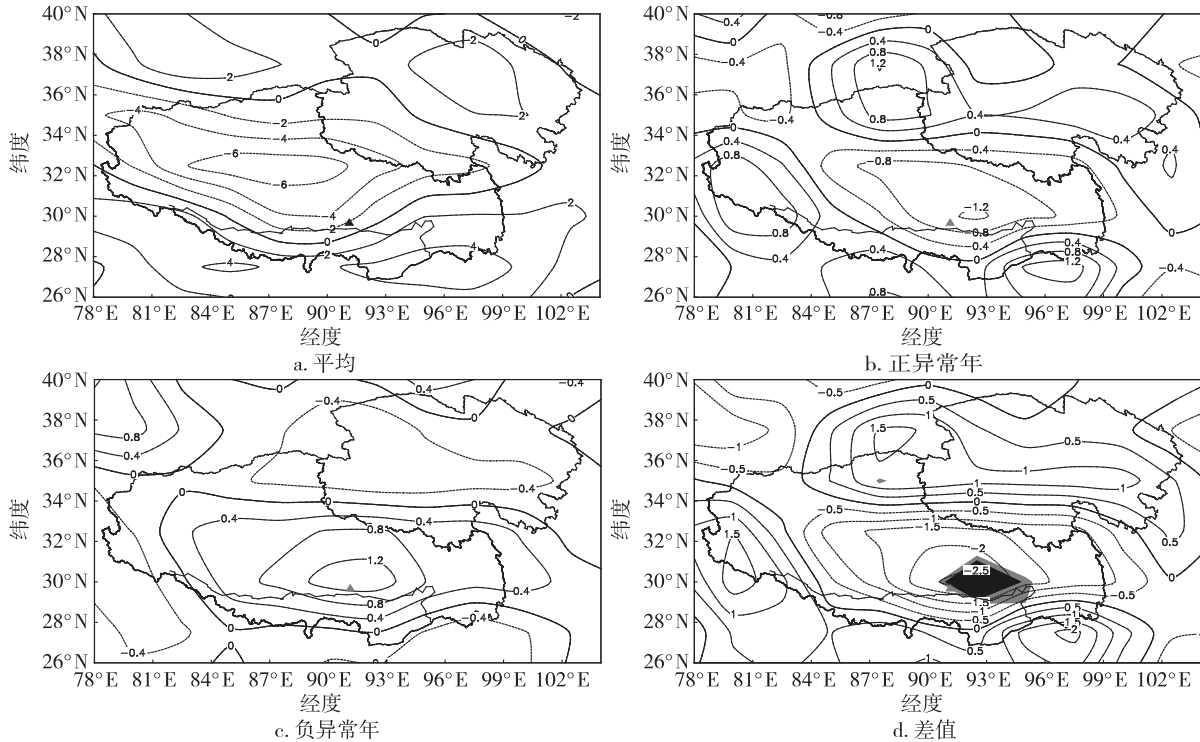


图6 高原附近夏季 500 hPa 多年平均散度场,降水转化率偏高、偏低异常年 500 hPa 散度场以及偏高减去偏低年 500 hPa 散度场合成差值

(▲代表拉萨站,单位: $10^{-6} \cdot s^{-1}$ ,图 d 中浅色和深色阴影区分别通过 0.05 和 0.01 的显著性检验)

Fig. 6 Distribution of divergence at 500 hPa in summer over the Tibetan Plateau, annual mean divergence, and divergence in the positive/negative precipitation conversion efficiency anomaly years respectively, and difference of minus(Units in  $10^{-6} \cdot s^{-1}$ . Note that ▲ denotes Lhasa station, and the light and dark shaded areas in figure denote that data are statistically significant at 95% and 99% confidence levels, respectively)

萨夏季可降水量偏少(多),降水转化率也由低值期转变为高值期,分别对应该站夏季降水少雨期和多雨期.近 40 a 来可降水量、降水和降水转化率均呈现出上升趋势,其中降水的增幅超过了可降水量的增幅.

4) 对降水转化率典型异常年进行合成分析的结果表明,降水转化率偏高(低)年,青藏高原低层辐合和高层辐散均增强(减弱),高原主体垂直速度将增加(减弱),从而有(不)利于降水形成.

参考文献

References

[ 1 ] 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):342-351  
ZHAH Panmao,ZHOU Qinfang.A study of climate changes of atmospheric water vapor in China[J].Quarterly Journal of Applied Meteorology,1997,8(3):342-351  
[ 2 ] 杨红梅,葛润生,徐宝祥.用单站探空资料分析对流层气柱水汽总量[J].气象,1998,24(9):8-11

YANG Hongmei, GE Rensheng, XU Baoxiang. Analysing troposphere air moisture content with single radiosonde station data[J].Meteorological Monthly,1998,24(9):8-11  
[ 3 ] 周秀骥,陶善昌,姚克亚.高等大气物理学[M].北京:气象出版社,1991  
ZHOU Xiuji, TAO Shanchang, YAO Keya. Advanced atmospheric physics [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1991  
[ 4 ] 曾光平,方世珍,林芬.福建省夏旱期间空中水资源及人工降雨条件[J].气象,1993,19(11):25-30  
ZENG Guangping, FANG Shizhen, LIN Fen. The air water resources and the conditions for artificial precipitation in the summer drought periods in Fujian province[J].Meteorological Monthly,1993,19(11):25-30  
[ 5 ] 龚佃利,刘诗军,边道相.山东省不同降水强度条件下的空中水汽资源量分析[J].干旱区资源与环境,2002,16(3):57-63  
GONG Tianli, LIU Shijun, BIAN Daoxiang. Analysis on water vapour resources transportation at different precipitation intensities in Shandong province [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2002, 16(3): 57-63  
[ 6 ] 李霞,张广兴.天山可降水量和降水转化率的研究

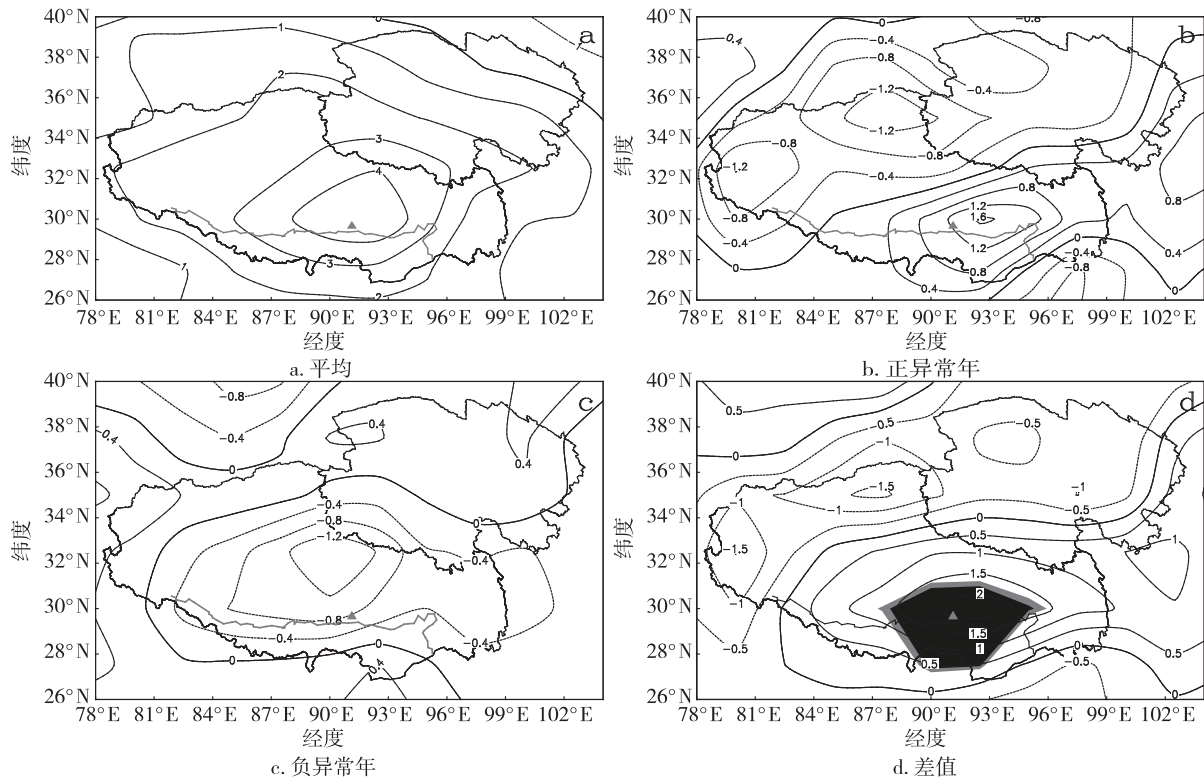


图7 高原附近夏季 200 hPa 多年平均散度场,降水转化率偏高、偏低异常年 200 hPa 散度场以及偏高减去偏低年 200 hPa 散度场合成差值

(▲代表拉萨站,单位: $10^{-6} \cdot s^{-1}$ ,图 d 中浅色和深色阴影区分别通过 0.05 和 0.01 的显著性检验)

Fig. 6 Distribution of divergence at 200 hPa in summer over the Tibetan Plateau, annual mean divergence, and divergence in the positive/negative precipitation conversion efficiency anomaly years respectively, and difference of minus (Units in  $10^{-6} \cdot s^{-1}$ . Note that ▲ denotes Lhasa station, and the light and dark shaded areas in figure denote that data are statistically significant at 95% and 99% confidence levels, respectively)

[J].中国沙漠,2003,23(5):509-513  
 LI Xia, ZHANG Guangxing. Research on precipitable water and precipitation conversion efficiency around Tianshan mountain area[J].Journal of Desert Research, 2003,23(5):509-513

[7] 王秀荣,徐祥德,苗秋菊.西北地区夏季降水与大气水汽含量状况区域性特征[J].气候与环境研究,2003,8(1):35-42  
 WANG Xiurong, XU Xiangde, MIAO Qiuju. Regional characteristics of summer precipitation and water vapor amount in northwest China [J]. Climatic and Environmental Research, 2003, 8(1): 35-42

[8] 陈楠,陈豫英,彭维耿,等.宁夏近 44 年水汽时空分布及环流差异特征分析[J].干旱区资源与环境,2008,22(7):49-54  
 CHEN Nan, CHEN Yuying, PENG Weigeng, et al. Characteristics of spacial-temporal distribution of water vapor and circulation difference in Ningxia in the past 44 years [J].Journal of Arid Land Resources and Environment, 2008,22(7):49-54

[9] 苏立娟,达布希拉图,卢士庆,等.用 GPS 遥感资料分析大气水汽特征及与降水的关系[J].干旱区资源与环境,2010,24(6):103-107  
 SU Lijuan, Dabuxilatu, LU Shiqing, et al. Analysis on air vapor feature and its relationship with precipitation based on GPS and RS[J].Journal of Arid Land Resources and Environment, 2010,24(6):103-107

[10] 梁宏,刘晶森,张人禾,等.拉萨河谷大气水汽日变化特征[J].水科学进展,2010,21(3):335-342  
 LIANG Hong, LIU Jingmiao, ZHANG Renhe, et al. Diurnal variations of atmospheric water vapor in Lhasa river valley[J].Advances in Water Science, 2010,21(3):335-342

[11] 赵玲,安沙舟,杨莲梅,等.1976—2007 年乌鲁木齐可降水量及其降水转化率[J].干旱区研究,2010,27(3):433-437  
 ZHAO Ling, AN Shazhou, YANG Lianmei, et al. Study on precipitable water and precipitation conversion efficiency in Urumqi during the period of 1976—2007 [J]. Arid Zone Research, 2010, 27(3): 433-437

[12] 王维佳,陈碧辉.四川上空大气可降水量时空分布特征[J].高原山地气象研究,2010,30(3):52-57  
 WANG Weijia, CHEN Bihui. Spatial-temporal characteristics of precipitable water over Sichuan [J]. Plateau and

- Mountain Meteorology Research, 2010, 30(3):52-57
- [13] 何平,徐宝祥,周秀骥,等.地基GPS反演大气水汽总量的初步试验[J].应用气象学报,2002,13(2):179-183  
HE Ping, XU Baoxiang, ZHOU Xiuji, et al. The preliminary experiment on deriving integrated atmospheric water vapor from ground-based GPS[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2002, 13(2):179-183
- [14] 向华,周月华,王海军.湖北省空中水资源分析[J].暴雨灾害,2007,26(2):134-138  
XIANG Hua, ZHOU Yuehua, WANG Haijun. A climatic research of cloud-water resources in Hubei province[J]. Torrential Rain and Disasters, 2007, 26(2):134-138
- [15] 李帅,谢国辉,何清,等.阿勒泰地区降水量、可降水量及降水转化率分析[J].冰川冻土,2008,30(4):675-680  
LI Shuai, XIE Guohui, HE Qing, et al. Research on precipitation, precipitable water and the precipitation conversion efficiency of Altay prefecture [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2008, 30(4):675-680
- [16] 黄荣辉,张振洲,黄刚,等.夏季东亚季风区水汽输送特征及其与南亚季风区水汽输送的差别[J].大气科学,1998,22(4):460-469  
HUANG Ronghui, ZHANG Zhenzhou, HUANG Gang, et al. Characteristics of the water vapor transport in east Asian monsoon region and its difference from that in south Asian monsoon region in summer[J]. Scientia Atmospherica Sinica, 1998, 22(4):460-469
- [17] 徐祥德,陶诗言,王继志,等.青藏高原:季风水汽输送“大三角扇型”影响域特征与中国区域旱涝异常的关系[J].气象学报,2002,60(3):257-266  
XU Xiangde, TAO Shiyan, WANG Jizhi, et al. The relationship between water vapor transport features of Tibetan Plateau-Monsoon “Large Triangle” affecting region and drought-flood abnormality of China [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2002, 60(3):257-266
- [18] 卓嘎,徐祥德,陈联寿.青藏高原夏季降水的水汽分布特征[J].气象科学,2002,22(1):1-8  
ZHUO Ga, XU Xiangde, CHEN Lianshou. Water feature of summer precipitation on Tibetan Plateau[J]. Scientia Meteorologica Sinica, 2002, 22(1):1-8
- [19] 梁宏,刘晶淼,李世奎.青藏高原及周边地区大气水汽资源分布和季节变化特征分析[J].自然资源学报,2006,21(4):526-534  
LIANG Hong, LIU Jingmiao, LI Shikui. Analysis of precipitable water vapor source distribution and its seasonal variation characteristics over Tibetan Plateau and its surroundings [J]. Journal of Natural Resources, 2006, 21(4):526-534
- [20] 黄玉霞,王宝鉴,王鹏祥.青海高原夏季降水异常及其水汽输送特征分析[J].气象,2006,32(1):18-23  
HUANG Yuxia, WANG Baojian, WANG Pengxiang. Analysis of summer precipitation anomaly and water vapor transport in Qinghai Plateau[J]. Meteorological Monthly, 2006, 32(1):18-23
- [21] 王霄,巩远发,岑思弦.夏半年青藏高原“湿池”的水汽分布及水汽输送特征[J].地理学报,2009,64(5):601-608  
WANG Xiao, GONG Yuanfa, CEN Sixian. Characteristics of the moist pool and its moisture transports over Qinghai-Xizang Plateau in summer half year [J]. Acta Geographica Sinica, 2009, 64(5):601-608
- [22] 周长艳,李跃清,李薇,等.青藏高原东部及邻近地区水汽输送的气候特征[J].高原气象,2005,24(6):880-888  
ZHOU Changyan, LI Yueqing, LI Wei, et al. Climatological characteristics of water vapor transport over eastern part of Qinghai-Xizang Plateau and its surroundings [J]. Plateau Meteorology, 2005, 24(6):880-888
- [23] 冯蕾,魏凤英.青藏高原夏季降水的区域特征及其与周边地区水汽条件的配置[J].高原气象,2006,27(3):491-499  
FENG Lei, WEI Fengying. Regional characteristics of summer precipitation on Tibetan Plateau and its water vapor feature in neighboring areas [J]. Plateau Meteorology, 2006, 27(3):491-499
- [24] 叶笃正,高由禧.青藏高原气象学[M].北京:科学出版社,1979:54-59  
YE Duzheng, GAO Youxi. Qinghai-Tibet Plateau climate [M]. Beijing: Science Press, 1979:54-59
- [25] 戴加洗.青藏高原气候[M].北京:气象出版社,1990:171-175  
DAI Jiashi. Climate of the Tibetan Plateau [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1990:171-175
- [26] 周顺武,普布卓玛,假拉.西藏高原汛期降水类型的研究[J].气象,2000,26(5):39-45  
ZHOU Shunwu, PUBU Zhuoma, JIA La. Analysis of rainfall patterns during rainy season over the Tibetan Plateau [J]. Meteorological Monthly, 2000, 26(5):39-45
- [27] 周顺武,假拉.印度季风的年际变化与高原夏季旱涝[J].高原气象,2003,22(4):410-415  
ZHOU Shunwu, JIA La. Interannual variation of Indian monsoon and summer flood/drought over Tibetan Plateau [J]. Plateau Meteorology, 2003, 22(4):410-415
- [28] Niu T, Chen L X, Zhou Z J. The characteristics of climate change over the Tibetan Plateau in the last 40 years and the detection of climatic jumps [J]. Advances in Atmospheric Science, 2004, 21(2):193-203
- [29] 李生辰,徐亮,郭英香,等.近34 a青藏高原年降水变化及其分区[J].中国沙漠,2007,27(2):307-314  
LI Shengchen, XU Liang, GUO Yingxiang, et al. Change of annual precipitation over Qinghai-Xizang Plateau and sub-regions in recent 34 years [J]. Journal of Desert Research, 2007, 27(2):307-314
- [30] Uppala S M, Kallberg P W, Simmons A J, et al. The ERA-40 reanalysis [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2005, 131(612):2961-3012
- [31] 丁一汇.天气动力学中的诊断分析方法[M].北京:科学出版社,1989  
DING Yihui. Diagnostic analysis methods in synoptic dynamics [M]. Beijing: Science Press, 1989
- [32] 邹进上,江静,王梅花.高空气候学[M].北京:气象出版社,1990:251  
ZOU Jinshang, JIANG Jing, WANG Meihua. Aeroclimatology [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1990:251
- [33] 黄嘉佑.气象统计分析与预报方法[M].北京:气象出



- 版社,2004  
HUANG Jiayou. Statistic analysis and forecast methods in meteorology [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2004
- [34] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术 [M]. 北京: 气象出版社, 2007  
WEI Fengying. Modern climate statistic diagnosis and predictive technology [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2007
- [35] 孙艳青. 器测时期青藏高原降水时空变化规律探讨 [D]. 青岛: 山东师范大学环境科学与工程学院, 2004: 33  
SUN Yanqing. Spatio-temporal characteristics of precipitation over the Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau during the modern instrumental observation period [D]. Qingdao: School of Environmental Science and Engineering, Shandong Normal University, 2004: 33
- [36] 蔡英, 钱正安, 吴统文, 等. 青藏高原及周围地区大气可降水量的分布变化与各地多变的降水气候 [J]. 高原气象, 2004, 23(1): 1-10  
CAI Ying, QIAN Zheng'an, WU Tongwen, et al. Distribution, changes of atmospheric precipitable water over Qinghai-Xizang Plateau and its surroundings and their changeable precipitation climate [J]. Plateau Meteorology, 2004, 23(1): 1-10
- [37] 张连云, 王以琳, 龚佃利. 山东沿海降雨云系宏观特征及人工增雨潜力的估算 [J]. 气象, 1996, 22(10): 35-38  
ZHANG Liyun, WANG Yilin, GONG Dianli. The characteristics of rainfall clouds and the evaluation of artificial precipitation enhancement potency in the coastland of Shandong province [J]. Meteorological Monthly, 1996, 22(10): 35-38
- [38] 高庆九, 管兆勇, 蔡佳熙, 等. 两种再分析资料中夏季地表气温与中国测站资料的差异 [J]. 大气科学, 2010, 34(4): 471-482  
GAO Qingjiu, GUAN Zhaoyong, CAI Jiayi, et al. Differences in 1958—2001 summertime surface air temperatures between two reanalysis data and observations in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2010, 34(4): 471-482
- [39] 杨伟愚, 叶笃正, 吴国雄. 夏季青藏高原气象学若干问题的研究 [J]. 中国科学: 化学, 1990, 20(10): 1100-1111  
YANG Weiyu, YE Duzheng, WU Guoxiong. Several studies of the Tibetan Plateau meteorology in summer [J]. Scientia Sinica: Chimica, 1990, 20(10): 1100-1111
- [40] 周顺武, 吴萍, 王传辉, 等. 青藏高原夏季上空水汽含量演变特征及其与降水的关系 [J]. 地理学报, 2011, 66(11): 1466-1478  
ZHOU Shunwu, WU Ping, WANG Chuanhui, et al. Spatial distribution of atmospheric water vapor and its relationship with precipitation in summer over the Tibetan Plateau [J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(11): 1466-1478

## Evolution characteristics of summer precipitable water and precipitation conversion efficiency in Lhasa

WU Ping<sup>1,2</sup> WU Peipei<sup>2</sup> YU Zhongshui<sup>3</sup> PUBU Ciren<sup>3</sup>

1 Chengdu Institute of Plateau Meteorology, China Meteorological Administration, Chengdu 610072

2 Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

3 Meteorological Observatory of Tibet Autonomous Region, Lhasa 850000

**Abstract** By using the radiosonde data and precipitation data in Lhasa station from 1969 to 2008, the evolution characteristics of precipitable water and precipitation in summer are discussed. The statistic results indicate that there is a significantly positive correlation between precipitable water and precipitation in summer. The precipitable water and precipitation have the same inter-annual variation and inter-decadal variation, having the periodic oscillation of 3-years and quasi-11-years respectively. In addition, both precipitable water and precipitation show increasing trend in the last 40 years. But the increasing of the precipitation is more obvious and the growth of precipitation is greater than that of precipitable water. The analysis of precipitation conversion efficiency showed that the mean summer precipitation conversion efficiency is 26.06% with evident inter-annual difference. The maximum conversion efficiency value is about three times of the minimum value. In the years with high precipitation conversion efficiency, both the convergence in the low levels and divergence in the high levels are strong, resulting in the strong vertical velocity in Lhasa, thus favors the precipitation formation, and vice versa.

**Key words** Lhasa; precipitable water; precipitation; precipitation conversion efficiency