

燕振宁, 马学谦. 青海高原不同地区大气水汽含量对比分析[J]. 干旱气象, 2018, 36(3): 365-372, [YAN Zhenning, MA Xueqian. Comparison and Analysis of Precipitable Water Vapor in Different Regions of the Qinghai Plateau[J]. Journal of Arid Meteorology, 2018, 36(3): 365-372], DOI: 10.11755/j.issn.1006-7639(2018)-03-0365

## 青海高原不同地区大气水汽含量对比分析

燕振宁<sup>1</sup>, 马学谦<sup>2</sup>

(1. 青海省气象服务中心, 青海 西宁 810001; 2. 青海省人工影响天气办公室, 青海 西宁 810001)

**摘要:**利用青海省4个探空站和NCEP格点站的大气水汽含量及对应地面站温度和降水资料,对比分析青海高原不同气候区的大气水汽含量及其与气温、降水之间的相互关系。结果表明:青藏高原地区NCEP水汽含量与L波段探空估算的水汽含量变化趋势基本一致。4站大气水汽含量的季节和旬变化特征有明显差异,测站海拔越低大气水汽含量越高且与所处地理位置和地形有关,测站海拔越高时大气水汽含量与大气环流和天气系统密切相关。大于10 mm降水与水汽含量呈正比关系,水汽转化为降水的转化率高;小降水和无降水与水汽含量关系不明确,水汽转化为降水的转化率低。虽然降水与温度和水汽含量有一定的正比关系,但青海高原地区降水的产生过程复杂,因而不能用温度和大气水汽含量完全确定能否产生降水。

**关键词:**大气水汽含量;不同地区;青海高原

**文章编号:**1006-7639(2018)03-0365-08 DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2018)-03-0365

**中图分类号:**P426

**文献标志码:**A

### 引言

大气水汽含量( $P_{wv}$ ,也称大气可降水量)是地面至大气顶界垂直空气柱中全部水汽凝结后在气柱底面上形成的液态水深度。大气水汽含量直接无法测量,常用地基卫星反演或地基观测估算<sup>[1-4]</sup>,因其观测和分析技术多样,得出的大气水汽含量精度和分辨率也不同。对多种探空仪器估算的大气水汽含量对比表明大气水汽含量受温度、气压等方面影响存在偏差<sup>[5]</sup>,因而应用中需进行质量控制从而改善数据准确性。目前,地基GPS反演大气水汽含量方法被越来越多地应用在气象业务和科研方面<sup>[6]</sup>。研究表明大气水汽含量的月、季变化特征明显<sup>[7]</sup>,大气水汽含量与降水的相关性分析表明不同季节和云系所产生的降水与大气水汽含量有一定的相关性和差异性<sup>[8]</sup>。因此,深入分析大气水汽含量与降水量、气温等气象要素的关系,研究局地环流、地形等对大气水汽含量的影响特征,可以有效提高灾害性天气的预报水平<sup>[9]</sup>。近年来,大气水汽含量反演技术和估算方法的研究成果不仅在天气和气候预测模

式应用方面发挥了作用<sup>[10]</sup>,同时在云水资源研究中也得到了充分应用<sup>[11-12]</sup>。

青海高原是中国主要大江大河的发源地,素称“中华水塔”,也是高原涡、高原切变线等天气系统生成和发展的主要区域,高原天气系统对下游地区的降水具有影响和决定作用。目前,对青海高原柴达木盆地<sup>[13-14]</sup>、黄河上游河曲地区<sup>[15]</sup>的大气水汽含量及其演变特征的深入分析,不仅为提高青海高原中尺度数值预报模式预报能力和灾害性天气预报水平起到重要的作用<sup>[16-18]</sup>,同时对科学开发空中云水资源、保护和改善高原地区生态环境具有重要意义。本文利用青海高原不同气候区探空资料估算的大气水汽含量和美国国家环境预报中心(NCEP)大气可降水量再分析资料,分析青海高原大气水汽含量及其演变特征,探讨降水、温度和大气水汽含量之间的相互关系。

### 1 青海高原地区气候特征

文中青海高原是指除祁连山之外的三江源地区、柴达木盆地、环青海湖地区及其东部河谷地带

收稿日期:2018-02-07;改回日期:2018-04-19

基金项目:国家自然科学基金“三江源地区作业云识别观测验证及其在增水物理检验中的探索研究”(41665008)资助

作者简介:燕振宁(1964—),女,工程师,主要从事气象服务研究。E-mail:1275529751@qq.com。

通信作者:马学谦(1977—),高级工程师,主要从事云和降水物理及其雷达气象研究工作。E-mail:mobllyqxm@126.com。

(图 1)。该地区探空站稀少,能代表青海高原不同天气和气候的大气水汽含量站点缺乏,因而选用西宁、格尔木、玉树、达日 4 个探空站资料和 NCEP 再分析资料。4 站均属于高原大陆性气候,但降水量和气候特征差异明显:西宁站属于东部河谷地带的高原农业区,相对干旱少雨,年降水量在 400 ~ 500 mm,雨热同期,地形影响下降水差异明显;格尔木站处于柴达木盆地西南边缘,干旱少雨,年降水量在 100 mm 左右,虽雨热同期,但太阳辐射强、光照充足、蒸发量大,气候干燥;玉树站处于海拔 3 700 m 以上的高海拔地区,受高原南支槽影响,水汽输送较多,降水量在 600 mm 左右,温度较低;达日站处于青海高原东南边缘,是副热带高压和高原南支槽影响的重点降水区域,年降水量达 700 mm 左右,是青海高原多雨带,降水时空差异较大<sup>[19]</sup>。4 站的天气气候特征有明显的地区差异,通过分析 4 站的大气水汽含量基本能了解青海高原不同气候区的大气水汽含量分布规律。

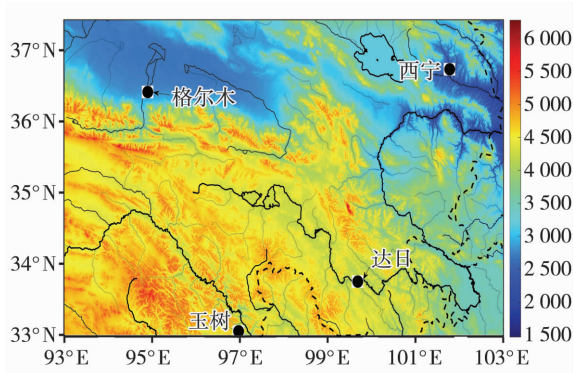


图 1 青海高原地区地形(阴影,单位:m)及探空站点(黑色圆点)分布(黑实线为河流,黑短线为行政边界)

Fig. 1 Terrain (the shaded, Unit:m) and distribution of sounding stations (the black spot) in the Qinghai Plateau (Black line for river, black dash line for administrative boundary)

## 2 方法和资料

### 2.1 方法

大气水汽含量直接无法测量,常通过天基卫星反演或地基估算得出<sup>[20-22]</sup>。地基估算中探空资料精度较高,误差较小,但由于站点偏少,常利用地面水汽压  $e$  与大气水汽含量 ( $P_{wv}$ ) 之间的经验公式估算不同地区的大气水汽含量。我国的地理特点和气候特征差异明显,利用地面水汽压估算大气水汽含量时引入纬度和海拔高度参量,杨景梅等<sup>[23]</sup> 研究发现国内 28 个台站所在地区的整层大气水汽含量与

探空估算的误差小于 20%。为更精确地估算出青海高原地区的大气水汽含量,利用现有的 L 波段探空资料估算,其大气水汽含量从地面气压  $P_0$  到大气顶界  $P(P=0)$  进行水汽累积量计算,具体公式如下:

$$P_{wv} = -\frac{1}{g} \int_{p_0}^p q dp \quad (1)$$

$$q = 622 \frac{e}{p_{ob} - 0.378e} \quad (2)$$

$$e = e_0 \times 10^{\frac{a}{b+t}} \quad (3)$$

式中:  $P_{wv}$  (mm) 为单位面积上空整层大气的总水汽含量;  $q$  ( $g \cdot kg^{-1}$ ) 为各层的比湿;  $p_0$  和  $p$  分别为地面气压和大气顶层气压 (hPa), 由于水汽主要集中在对流层下部,文中仅计算从地面到 300 hPa 的水汽含量;  $e$  (hPa) 为水汽压;  $p_{ob}$  (hPa) 为实测气压;  $t$  ( $^{\circ}C$ ) 为实际露点温度;  $e_0 = 6.11$  hPa,  $a = 7.5$ ,  $b = 237$ 。

### 2.2 资料

利用 2014 年西宁、格尔木、玉树和达日探空站 L 波段 08:00 和 20:00 (北京时,下同) 探空资料,并将地面至高空分成 4 层,分别为地面至 700 hPa、700 ~ 500 hPa、500 ~ 400 hPa、400 ~ 300 hPa,逐层进行大气垂直气柱水汽含量估算,然后用梯形面积叠加求和方法计算整层大气垂直柱内的水汽含量。同步利用美国国家环境预报中心 (NCEP) 再分析资料 FNL 数据 GRIB1 大气可降水量 (水平分辨率为  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ , 时间分辨率 6 h), 对比分析青海高原不同地区的水汽差异及 NCEP 数据在高原地区的适用性。探空资料估算的  $P_{wv}$  是 2 h 内的平均值,分别为 08:00 (07:00—09:00) 和 20:00 (19:00—21:00) 资料, NCEP 资料为 02:00、08:00、14:00 和 20:00, 实测地面 6 h 降水量资料为 20:00 至次日 02:00、02:00—08:00、08:00—14:00、14:00—20:00。为讨论降水转化率问题,用 3 倍探空大气水汽含量与 NCEP 数据及 6 h 地面降水量进行对比分析。此外探空是站点资料, NCEP 是格点资料, 采样以就近格点原则代表站点资料。

## 3 结果分析

### 3.1 地区差异

表 1 是 2014 年青海高原 NCEP 格点站和探空站的年大气水汽含量。可以看出, 2014 年探空站的水汽平均值以格尔木、达日、玉树和西宁的顺序依次增大, 水汽最大值基本类同平均值, 但玉树站水汽最大值更接近西宁站; 水汽最小值以达日、玉树、格尔

木和西宁的顺序依次增大。玉树站水汽最大值接近最高值,但最小值接近最低值,说明高原高海拔地区的水汽含量变化较大,这与玉树站所处的地理位置密切相关,该地区常处于槽前水汽输送的关键区域,印度洋、孟加拉湾等地区的水汽供给充足,同时因冬春季北方干冷空气侵入高寒高海拔地区,导致水汽含量出现最低值。达日站地处青藏高原东南边缘区,既是西南暖湿气流途经区,也是副热带高压边缘东南气流输送区,两股气流虽都有水汽输送,但因海

拔高度明显偏高水汽含量有所减弱,因而造成水汽含量较低。西宁站处于东亚季风和西风带气流的交替控制区,夏季风影响和该地区海拔较低的山谷地形作用,水汽输送厚度和密度明显增大,因而水汽含量比全省其他区域偏高,达到最大值。可以看出,4站大气水汽含量与所处地区的降水分布特征有明显偏差,特别是西宁站降水量偏少,但水汽含量偏高,说明西宁站及其周边大气水汽转化为降水的几率偏低,从而形成明显的差异。

表1 2014年青海高原探空站和NCEP格点站大气水汽含量

Tab.1 The precipitable water vapor at sounding station and NCEP grid station in the Qinghai Plateau in 2014

站点	单位:mm					
	平均值		最大值		最小值	
	探空	NCEP	探空	NCEP	探空	NCEP
格尔木	6.053	4.582	25.28	20.50	0.65	0.10
西 宁	10.390	7.042	35.99	26.70	0.97	0.50
玉 树	7.988	5.963	33.62	19.30	0.55	0.30
达 日	6.841	5.515	22.34	20.90	0.43	0.20

从表1可知NCEP格点站水汽平均值与探空平均值的变化趋势一致,即西宁站最高,格尔木站最低,但NCEP值明显比探空值偏小,平均值差值最大3.3mm左右,最小1.3mm左右。玉树站NCEP最大大气水汽含量值比探空估算值偏低最多,达14.32mm,而玉树和达日站NCEP最小大气水汽含量值比探空估算值偏低最少,分别为0.25mm和0.23mm,表明青海高原南部地区的NCEP大气水汽含量高值偏小幅度比格尔木和西宁大,低值偏小幅度比格尔木和西宁小。说明在青海高原地区NCEP水汽含量数据能够反映出水汽的基本变化特征,但受海拔影响也有一定差异。

图2为青海高原2014年探空站和NCEP格点站水汽含量在有降水 and 无降水条件下的对比。可以看出,在有降水 and 无降水条件下探空水汽含量与NCEP水汽含量的变化趋势基本一致,即NCEP值总体能代表青海高原地区的水汽特征,但也具有一些典型特征:不同的气候区走势不一致,格尔木地区探空水汽含量越大,NCEP的 $P_{wv}$ 偏小越多,小值区两者比较接近。西宁地区探空水汽含量在各区间基本大于NCEP的 $P_{wv}$ ,偶尔大值越大,NCEP值越小。玉树和达日均具有探空水汽含量越大NCEP的 $P_{wv}$ 偏小越大的特点,但在小值区NCEP的 $P_{wv}$ 有偏大的特点,如0~5mm区间,这与表1分析结果一

致。以探空为基准降水出现的水汽含量差异明显,格尔木站出现当地较大降水时水汽含量并不高,如图2(a)中6h降水量大于2.5mm时,水汽含量仅为5~8mm左右,若出现降水量1~1.5mm左右时水汽含量达20mm左右;从有降水 and 无降水的散点分布可知该站出现降水的概率也很低;西宁站不同于格尔木站,其降水量基本与水汽含量成正比关系,降水出现的概率相对较高,且6h降水量达25~30mm时2h水汽含量也在25~35mm左右,说明在强降水时水汽转化为降水的转化率很高,大于10mm降水量均具有以上特征,但小于10mm降水量其水汽含量最大达30mm,即小降水条件下空中水汽转化为降水的转化率较低,最大转化率在25%~30%之间。玉树和达日也具有类同于西宁的特征,达日更明显,但玉树更有局地特点,即小于10mm降水出现的概率相对较低。从以上分析可知大气水汽含量与大于10mm降水有一定的正比关系,但与小于10mm降水关系不明确,也反映出较强的降水其水汽转化为降水的转化率较高,而弱降水天气水汽转化率较低。

### 3.2 旬变化特征

图3为青海高原2014年探空站和NCEP格点站不同月份中各旬的平均大气水汽含量变化。从探空大气水汽含量可以看出,西宁站春季(3—5月)明

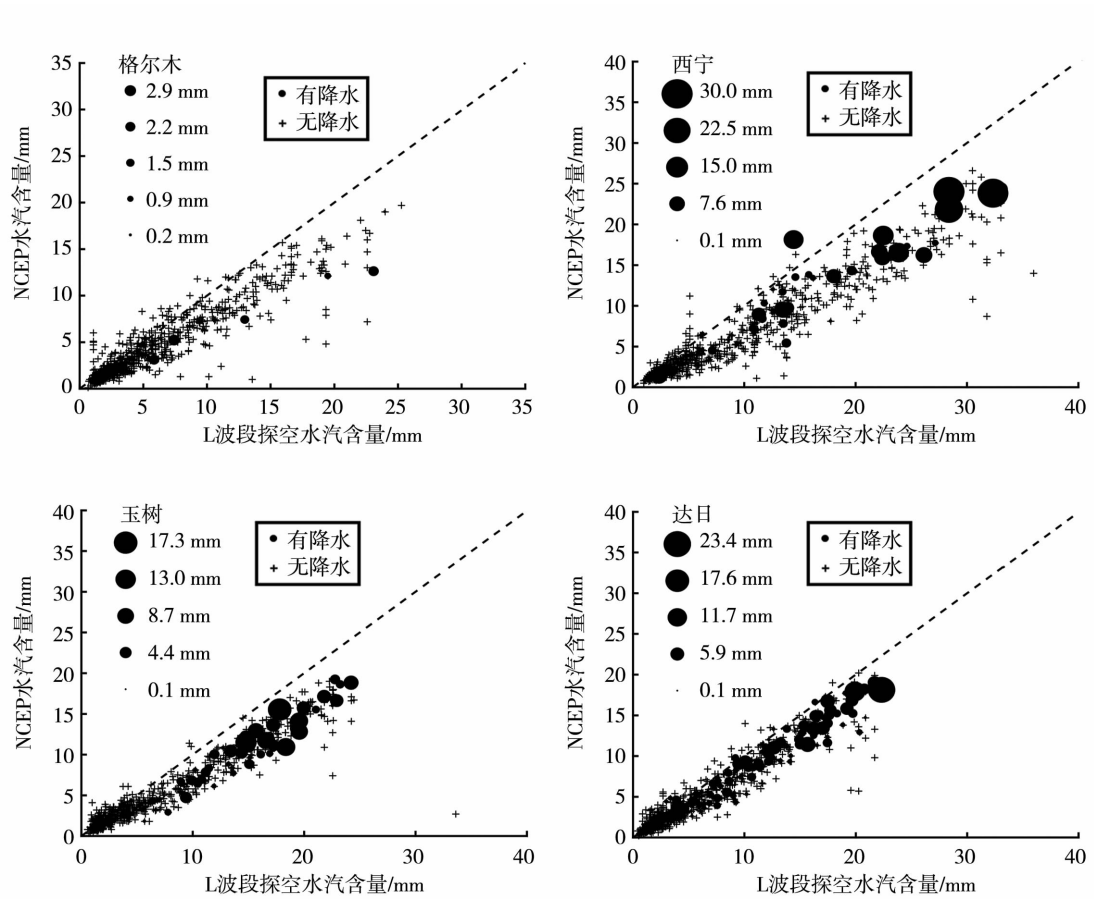


图2 2014年青海高原探空站与NCEP格点站大气水汽含量在有降水 and 无降水条件下的对比  
 Fig.2 Contrast of precipitable water vapor with or without precipitation at sounding station in the Qinghai Plateau in 2014

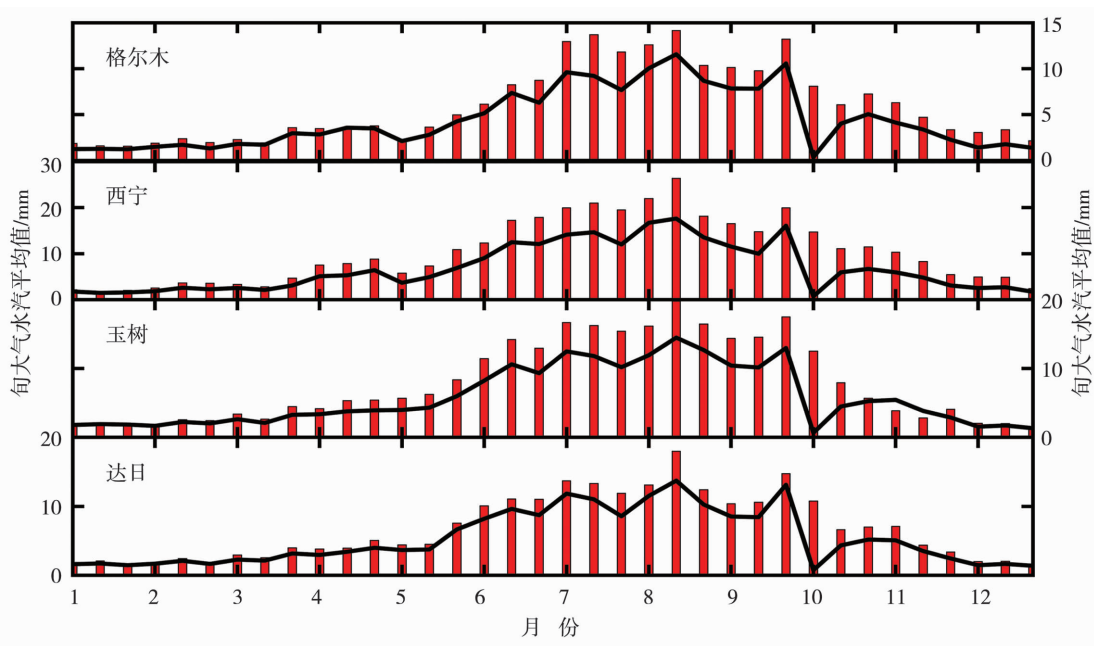


图3 2014年青海高原探空站(红色柱线)和NCEP格点站(黑色实线)旬平均大气水汽含量变化

Fig.3 Variation of ten - day mean precipitable water vapor at sounding station (red bar) and NCEP grid station (black solid line) in the Qinghai Plateau in 2014



显有异于其他3站,3月下旬至4月下旬其水汽旬平均值明显高于其他站,这与春季西宁地区比较盛行东或东南倒灌气流产生降水天气密切相关。其余3站3月上旬至4月下旬水汽含量逐步升高,5月上旬4站水汽含量差异变小,至5月下旬各站均持续升高,但出现较大差异,特别是格尔木站水汽升高不及其余3站,体现出春末青海高原西北部干旱地区水汽输送尚不足。6月下旬玉树和达日站旬大气水汽含量出现减少,与此阶段该地区天气系统更替密切相关,前期由高原切变线、高原涡等局地小天气系统控制,能量和水汽尚不足,而后期南支槽等相对较强的天气系统控制影响下水汽输送比较充足;西宁和格尔木站水汽含量持续上升,基本与季节的水汽变化相一致。7月中旬始,随着副热带高压的西伸北抬,水汽含量再次持续升高,至8月中旬达到一年中最大值,之后随着副热带高压的减弱和东缩南退,水汽含量出现持续性下降过程,8月下旬成为夏季水汽含量相对较低时段。9月上旬随着大气环流的调整,高原地区出现南支低槽和冷暖气流交替,水汽输送变强,至9月下旬水汽含量达到秋季最高值,之后迅速降低。10月中旬水汽含量有所提高,但变化趋势为持续降低。从以上分析看出一年中各站水汽含量的高低变化与大气环流调整和伴随的天气系统密切相关,这与姚宜斌等<sup>[24]</sup>、刘春蓁<sup>[25]</sup>研究得出

的结论比较一致。

从图3还可知,以旬统计水汽含量,其变化在青海高原具有同步性,只有格尔木站的变化有明显的差异,春季3月其与其他站类同,但4月和5月水汽含量明显降低,这与当地春季风沙天气密切相关,水汽含量很低,空气干燥;5月格尔木站水汽含量旬平均值最高仅为10 mm左右,之后水汽逐步上升,至7月中旬达到旬平均最大值15 mm,这比东部地区大气水汽含量同等值延后近1个月,与戈壁沙滩性地貌以及副热带高压西伸后其边缘水汽输送影响该地区有一定的关系,至9月下旬达到次极值后迅速下降。从全年变化看,格尔木站水汽含量相对比较稳定,水汽升高段比其他站延后,降低段比其他站提前,体现了戈壁干旱性气候条件下水汽的旬分布特征。

NCEP格点站水汽值旬变化基本与探空站变化趋势一致,但变幅较小。NCEP水汽值相对探空值有以下特点:(1)水汽含量越低的地区,两者之间的旬差异越小,反之差异越大,如格尔木和西宁;(2)转季节期间两者同步性优于其他时间段,如5月下旬和9月上至中旬,同步上升和下降且偏差相对较小。

### 3.3 天气过程变化分析

图4为2014年青海高原探空站和NCEP格点站的大气水汽含量及观测的地面降水量逐月变化。

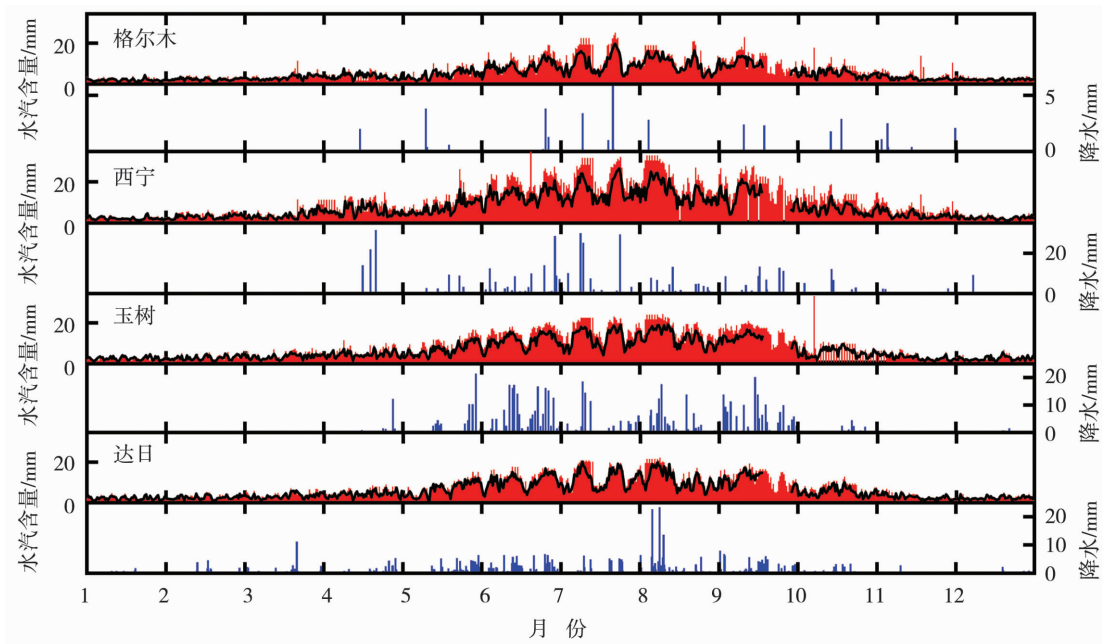


图4 2014年青海高原探空站(红柱)和NCEP格点站(黑实线)大气水汽含量及降水量(蓝柱)的月变化

Fig.4 The monthly changes of precipitable water vapor estimated from sounding station (red bar) and NCEP grid station (black solid line) and observed precipitation (blue bar) in the Qinghai Plateau in 2014

可以看出,格尔木站春季(3—5月)水汽含量较低,从降水情况看出春季水汽整体偏低,水汽含量最高仅为8 mm左右,5月中旬携带的水汽含量微有增加。夏季(6—8月)水汽含量的变化能够明显体现出天气过程,如6月下旬或7月上旬后期和中旬出现的降水过程,降水前期水汽含量为6 mm左右,经过2~3 d左右的逐步积累,达到23 mm左右,降水之后水汽明显回落到6 mm左右,表明在戈壁干旱气候条件下产生降水需要经历水汽累积过程,且降水后大气水汽含量明显降低,突现了戈壁干旱地区降水过程的水汽含量变化特征。夏季6月和7月降水过程的水汽特征表现出天气过程前期水汽累积较快、过程中期水汽稳定、过程后期水汽逐步降低;而8月以后大气水汽含量具有降水过程前期水汽累积快、过程中期水汽达到极值、过程后期迅速降低的变化特征。从各站大气水汽含量和6 h降水量对比可知,格尔木站降水量低于降水天气过程中探空站估算的2 h水汽含量,表明该站降水过程中降水转化率低。

西宁地区降水过程的出现与大气水汽含量密切

相关,特别是夏季产生强降水时,水汽含量也呈现出较高值,且6 h降水量接近于2 h探空水汽含量,偶有超过,表明西宁地区夏季强降水发生时水汽转化为降水的转化率较高,而春季产生的强降水基本大于水汽含量,说明低海拔地区地形作用影响下形成的倒灌气流在降水产生过程中输送的水汽含量较强,为产生持续性的降水提供了充沛水汽。6 h降水量小于10 mm的降水天气,其水汽含量为降水量的1~2倍左右,降水转化率较低。玉树降水量与水汽含量之间的关系类同于西宁地区,而达日水汽含量与降水量的关系介于玉树和格尔木地区且更倾向于玉树地区特征,说明在高海拔高寒地区降水的强弱与水汽含量有一定关系,且强降水与水汽含量呈明显的正比关系。另外,产生较强降水时探空站大气水汽含量明显高于NCEP值,表明高原地区在较强降水条件下NCEP水汽含量估算值偏低。

### 3.4 大气水汽含量与温度、降水的关系

#### 3.4.1 季节变化

图5为2014年青海高原不同季节4站探空大气水汽含量与对应地面站温度和降水的关系。可以

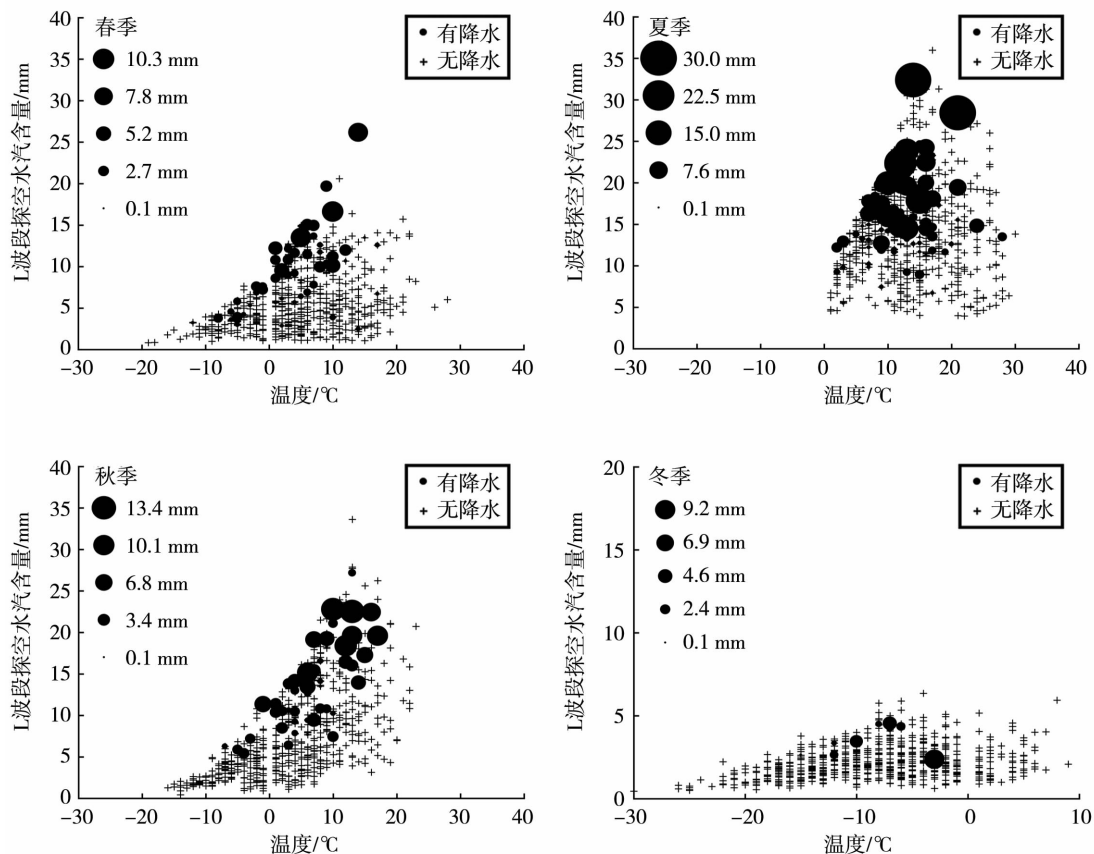


图5 2014年青海高原不同季节探空站大气水汽含量与地面站温度和降水的关系

Fig. 5 Relationship between precipitable water vapor and air temperature, precipitation in different seasons in the Qinghai Plateau in 2014

看出,温度越低水汽含量越小,温度在  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  时水汽含量仅为  $3\text{ mm}$  左右,随着温度升高水汽含量明显升高,最大达  $37\text{ mm}$  左右。但温度升高并非水汽含量一定很高,也有高温下的低水汽含量,表现为干燥天气,如  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  时仅为  $8\text{ mm}$  左右。

春季,温度在  $-10\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$  且水汽含量在  $4\sim 8\text{ mm}$  时,产生小于  $10\text{ mm}$  以下的降水,且水汽含量与温度和降水呈正比关系;而温度在  $0\sim 18\text{ }^{\circ}\text{C}$  且水汽含量在  $6\sim 25\text{ mm}$  时,降水出现较多,同样,水汽含量与温度和降水量呈正比关系,此外,基本未产生降水,说明春季高原地区天气系统比较稳定,局地性对流降水天气系统稀少。夏季特征类同于春季,但温度大于  $13\text{ }^{\circ}\text{C}$  且水汽含量小于  $10\text{ mm}$  时,也能产生弱降水,甚至温度在  $28\text{ }^{\circ}\text{C}$  且水汽含量仅为  $15\text{ mm}$  时也产生降水,表明夏季局地性对流降水天气时有发生。以上分析表明降水的产生与水汽含量和温度均有相关性,但由于降水产生是很复杂的过程,因此用水汽含量和温度很难确定降水是否产生。秋季特征更类同于春季,即天气系统稳定、局地对流性降水

偏少。冬季产生降水的概率更低,且低水汽含量特征明显,最大仅为  $7\text{ mm}$ 。

### 3.4.2 地区变化

图6为2014年青海高原不同探空站大气水汽含量与地面温度、降水的关系。可以看出,格尔木站与其他站温度相同、大气水汽含量相同的条件下,出现降水的概率很低,且降水量很小,是典型的高原戈壁干旱地区的水汽含量、温度和降水的关系。西宁站降水的产生明显与温度和水汽含量存在正比关系,但也有部分高温和低水汽含量条件下产生降水,这与河谷地形易引起局地对流性降水天气有关。玉树站降水的产生与西宁站总体相似,但与西宁站不同的是在高温低水汽含量情况下玉树站产生降水较少,可见局地地形对对流降水形成作用不明显,此外  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  以下玉树基本无降水产生。达日与玉树海拔高度相近,但  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  以下低水汽含量条件下能产生降水,对比图5可知,  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  以下能产生降水的季节为春季和秋季,与产生降水时水汽来源不同和输送强弱有关。玉树水汽主要来自西南方向,经过高原地区低

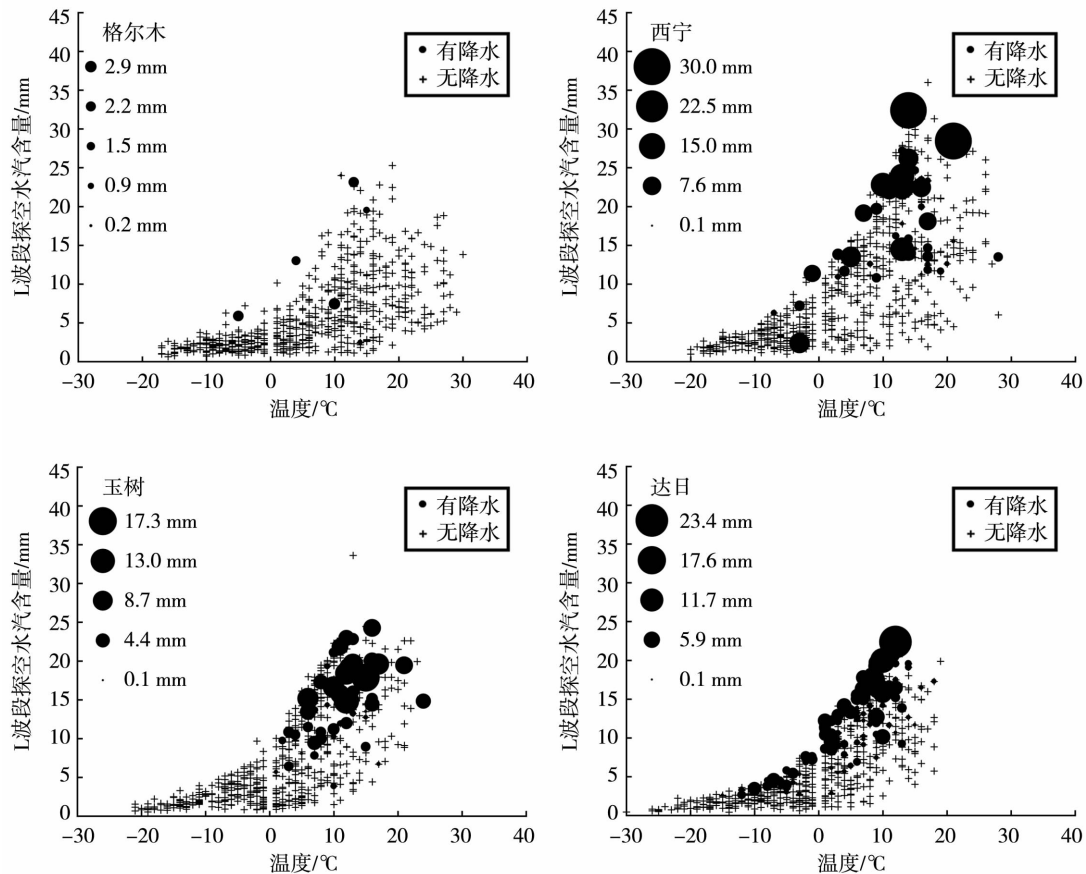


图6 2014年青海高原不同探空站大气水汽含量与地面温度、降水的关系  
Fig.6 Relationship between precipitable water vapor at sounding station and ground temperature, precipitation in different regions in Qinghai Plateau in 2014

温输送和凝华等过程后至玉树时含量很低,因而产生降水的水汽供给不足;但达日处于高原东南边缘,东南气流抬升凝华等过程后水汽输送相对比较充足,且春秋季节天气系统在此地移经较多,冷暖气流交替频繁,因而极易产生降水。

## 4 结 论

(1) NCEP水汽值与探空水汽含量变化趋势基本一致,但 NCEP水汽值在青海高原不同地区均偏小,且对水汽含量的极值变幅估值不足,精度不高。

(2) 青海高原不同地区水汽含量的均值、最大值和最小值差异较大,高原东部海拔较低地区水汽含量较高,西北部戈壁沙滩地区水汽含量较低。大于 10 mm 降水的产生与水汽含量具有明显的正比关系,而小于 10 mm 降水与水汽含量关系不明确。

(3) 水汽含量与高原地区大气环流的调整、天气系统的更替、局地性对流系统的生成以及水汽输送有密切关系,特别是降水天气过程,强降水天气过程水汽转化为降水的几率较高,而弱降水天气过程转化几率较低。

(4) 高原地区降水的产生过程复杂,虽与温度和水汽含量有一定的关系,但需要通过对天气过程的背景场、天气系统、局地特征等方面深入分析,才能确定降水是否产生和量级大小。

### 参考文献:

- [1] KING M D, KAUFMAN Y J, MENZEL W P, et al. Remote sensing of cloud, aerosol, and water vapor properties from the moderate resolution imaging spectrometer (MODIS)[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 1992,30(1):2-27.
- [2] BEVIS M. GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using GPS[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1992,97(D14):15787-15801.
- [3] BALDOCCHI D, FALGE E, GU L, et al. FLUXNET: A new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2001,82:2415-2434.
- [4] FRATE F D, SCHIAVON G. Neural networks for the retrieval of water vapor and liquid water from radiometric data[J]. Radio Science, 2016,33(5):1373-1386.
- [5] 郭巍,尹球,杜明斌,等. 利用地基北斗站反演大气水汽总量的精度检验[J]. 应用气象学报,2015,26(3):346-353.
- [6] 向玉春,陈正洪,徐桂荣,等. 三种大气可降水量推算方法结果的比较分析[J]. 气象,2009,35(11):48-54.
- [7] 任菊章,孙绩华,李建,等. 云南地区 GPS 探测与 3 类再分析可降水量的对比分析[J]. 高原气象,2014,33(6):1480-1489.
- [8] 李国翠,李国平,连志鸾,等. 不同云系降水过程中 GPS 可降水量的特征——华北地区典型个例分析[J]. 高原气象,2008,27(5):1066-1073.
- [9] 郭洁,李国平. 地基 GPS 探测水汽的发展与气象业务应用[J]. 大地测量与地球动力学,2007,27(专刊):35-42.
- [10] 李国平. 地基 GPS 水汽监测技术及气象业务化应用系统的研究[J]. 大气科学学报,2011,34(4):385-392.
- [11] 张小军,马学谦,田建兵. 1961—2015 年青海省总云量时空变化特征及影响因子[J]. 干旱气象,2017,35(4):694-701.
- [12] 徐栋,孔莹,王澄海. 西北干旱区水汽收支变化及其与降水的关系[J]. 干旱气象,2016,34(3):431-439.
- [13] 张娟,肖宏斌,徐维新,等. 1971—2010 年柴达木盆地可降水量变化特征及其与气象条件分析[J]. 资源科学,2013,35(11):2289-2297.
- [14] 校瑞香,祁栋林,周万福,等. 1971—2010 年青海高原不同功能区可降水量的变化特征[J]. 冰川冻土,2014,36(6):1456-1464.
- [15] 康晓燕,马学谦,韩辉邦,等. 1981—2015 年黄河上游河曲地区大气可降水量变化特征[J]. 干旱气象,2017,35(6):975-983.
- [16] 施晓晖. 青藏高原东缘对流云和水汽观测试验简介[J]. 气象科技进展,2014,4(5):48-53.
- [17] 梁潇云,钱正安,李万元. 青藏高原东部牧区雪灾的环流型及水汽场分析[J]. 高原气象,2002,21(4):359-367.
- [18] 袁野,王成章,蒋年冲,等. 不同云天条件下水汽含量特征及其变化分析[J]. 气象科学,2005,25(4):394-398.
- [19] 王江山. 青海天气气候[M]. 北京:气象出版社,2004.
- [20] ATWATER M A, BALL J T. A numerical solar radiation model based on standard meteorological observations[J]. Solar Energy, 1978,21(3):163-170.
- [21] 苗运玲,李如琦,卓世新. 天山北坡东段 GPS 反演的大气可降水量变化特征及其与降水的关系[J]. 干旱气象,2016,34(6):989-994.
- [22] 李军霞,李培仁,晋立军,等. 地基微波辐射计在遥测大气水汽特征及降水分析中的应用[J]. 干旱气象,2017,35(5):767-775.
- [23] 杨景梅,邱金桓. 用地面湿度参量计算我国整层大气可降水量及有效水汽含量方法的研究[J]. 大气科学,2002,26(1):9-22.
- [24] 姚宜斌,雷祥旭,张良,等. 青藏高原地区 1979—2014 年大气可降水量和地表温度时空变化特征分析[J]. 科学通报,2016,61(13):1462-1477.
- [25] 刘春蓁. 气候变化对陆地水循环影响研究的问题[J]. 地球科学进展,2004,19(1):115-119.

(下转至 422 页)