

文章编号: 2096-1618(2021)02-0230-08

基于微波辐射计的张掖地区水汽、液态水变化特征分析

程 鹏^{1,2}, 樊 旭³, 胡晓辉⁴, 张文煜^{2,3}, 张丰伟¹, 庞朝云¹

(1. 甘肃省人工影响天气办公室, 甘肃 兰州 730020; 2. 中国气象局云雾物理环境重点实验室, 北京 100081; 3. 兰州大学大气科学学院, 甘肃 兰州 730000; 4. 张掖市气象局, 甘肃 张掖 734000)

摘要:针对张掖地区大气水汽变化特征和分布规律,利用张掖国家气候观象台地基微波辐射计反演数据对大气水汽总量(IWV)和液态水含量(LWP)的变化特征进行分析,并利用探空资料进行检验。结果表明:微波辐射计的反演数据可用性较好,通过了0.05的信度检验,夜间反演效果好于白天。张掖地区 IWV 和 LWP 的最大值分别出现于7月和4月,分别为2.34 cm和0.84 mm;IWV 的日变化“双峰型”特征明显,主峰在17:00,次峰在03:00,LWP 的日变化存在4个峰值,但峰值间数值接近;IWV 和 LWP 的季节日变化均差异明显,IWV 季节日平均值夏季(2.242 cm)>春季(0.975 cm)>秋季(0.893 cm)>冬季(0.320 cm);LWP 主要集中于0.6~1.2 km高度,最大值出现在0.9 km(0.042 mm)。晴空条件下,张掖市观象台所在地区水汽来源以太阳加热地表导致的局地蒸发为主。降水和 IWV 及 LWP 的变化相关,当 IWV 和 LWP 明显增大时降水明显增强,IWV 高值出现时间较降水高值提前1小时。

关 键 词:大气物理与大气环境;大气探测;大气水汽总量;液态水含量;微波辐射计

中图分类号:P407.7

文献标志码:A

doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2021.02.016

0 引言

大气中的水汽和液态水是空中云水资源的重要组成部分,在各种尺度的天气过程中起重要作用,充足的水汽是云形成、降水发生以及人工影响天气的必要条件^[1-3];大气中液态水主要以云、雾形式出现,作为云降水物理过程的重要介质,液态水的时空变化特征是评价人工增雨潜力和增雨作业条件的关键性指标,对于准确识别作业条件有极其重要的意义^[4-5]。

目前应用于水汽和液态水观测的遥感设备包括地基微波辐射计、地基 GPS 遥感、卫星红外遥感等^[6-7],其中地基微波辐射计受云、雾的影响较小,穿透能力强,垂直分辨率高^[8],可通过观测所得的亮温反演得到大气温度、相对湿度、水汽密度廓线和云液态水总量,被广泛应用于强对流天气预报、天气过程分析和人工影响天气等多个领域^[9]。随着微波辐射计的长时间应用,国内外学者利用微波辐射计反演所得的水汽数据研究了不同地区、不同天气背景下大气水汽总量、液态水含量的时空分布及变化特征^[10-15],并取得了诸多成果,如刘红燕等^[16]分析了北京地区水汽在四个

季节的日变化特征及与温度的相关性;敖雪等^[17]利用武汉的地基微波辐射计资料详细分析了大气水汽总量、云中液态水含量的分布演变与降水的关系;田磊等^[18]对银川地区的水汽和液态水含量变化特征进行了分析;Xu 等^[19]指出降雨开始前云中水汽含量和云液水含量均有跃增现象,为不同地区人工增雨潜力和作业指标的建立提供了依据;王黎俊等^[20]利用微波辐射计资料建立了黄河上游人工增雨作业指标。这些研究均表明,地基微波辐射计对监测大气水汽和液态水具有很好的探测能力,有效利用微波辐射计探测研究大气水汽和液态水,了解局地水汽的时空变化特征,对于合理利用当地的空中水资源、指导人影作业具有极其重要的意义。

祁连山对气流的抬升作用为河西走廊带来了丰富的空中云水资源。通过开展人工增雨作业,合理开发空中云水资源,有利于解决黑河中下游水资源短缺等问题,而大气水汽总量和液态水含量的变化特征是人工增雨潜力研究和人工增雨作业指标建立的基础。中国一些学者利用 NCEP 和卫星资料对祁连山山区的水汽含量、水汽输送及变化特征等进行了相关研究^[21-23],但由于观测条件限制,对该区域水汽变化特征认识不足。因此,利用地基微波辐射计观测数据,深入分析该地区大气水汽总量和云液态水含量的分布特征及演变规律十分必要。

收稿日期:2020-04-01

基金项目:中国气象局云雾物理环境重点开放实验室开放课题资助项目(2018Z01603);西北区域人工影响天气能力建设项目研究试验资助项目(ZQC-R18208);甘肃省气象局科研资助项目(Ms2019-19)

1 资料与方法

1.1 资料

探空、地面及微波辐射计资料是张掖国家气候观象台(100°17' E,39°05' N,海拔高度1456 m)2017 年的观测数据。探空资料包括每日 08:00 和 20:00(北京时,下同)从地面到高空的高度、温度和相对湿度等探空秒数据,其中 7 月是加密探空资料,除常规探测时间外增加了 02:00 和 14:00 两个时次。地面降水、气温、风向和风速是张掖观象台逐小时观测资料。所用微波辐射计资料包括亮温、降水探测器资料以及反演所得的水汽和液态水资料等。WVP3000 型地基微波辐射计由 35 个通道组成,其中水汽通道 21 个,频段位于 22 ~ 30 GHz,氧气通道 14 个,频段位于 51 ~ 59 GHz;从地面到距地 500 m,垂直分辨率为 50 m;从 500 m ~ 2 km,垂直分辨率为 100 m;从 2 ~ 10 km,垂直分辨率为 250 m,共 58 个反演层,24 h 连续观测,一个观测周期为 6 min,对 5 个仰角进行观测,研究仅使用天顶角的观测数据。

进行数据分析前,对数据缺失和异常进行了质量控制;考虑到雨滴的散射作用会造成微波辐射计亮温观测误差,雨滴附着在天线疏水罩上也会造成观测亮温的异常升高,因此利用微波辐射计降水探测器资料结合地面测站资料对降水时段的微波辐射计观测资料进行剔除,以保证资料的可靠性。在进行季节分析时,以 3~5 月代表春季,6~8 月代表夏季,9~11 月代表秋季,12 月~2 月代表冬季。

1.2 方法

选取微波辐射计反演的大气水汽总量、液态水含量和水汽密度等物理量对张掖地区水汽分布特征进行分析。微波辐射计反演的大气水汽总量(integrated water vapor,IWV),表示单位面积上的水汽质量,即为大气 10 km 内不同高度上水汽密度对高度的积分,单位为 cm。液态水含量,也称积分液态水含量或液态水路径(liquid water path,LWP)表示 0 ~ 10 km 高度单位面积垂直气柱内积分的液态水含量,单位为 mm。水汽密度(vapor density,VD),表示单位体积湿空气中含有的水汽质量,也称绝对湿度,单位为 $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。文中水汽密度利用式(1)~(2),通过计算得到各高度层水汽密度^[9]。

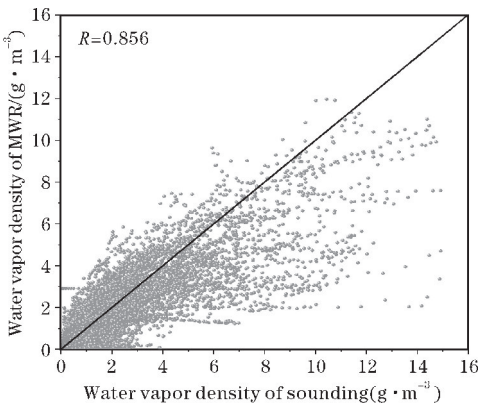
$$e=6.1078 \times U \times \exp \left[17.708 \times \frac{(T-273.16)}{(T+29.3298)} \right] \quad (1)$$

$$\rho=\frac{e}{0.004615 \times T} \quad (2)$$

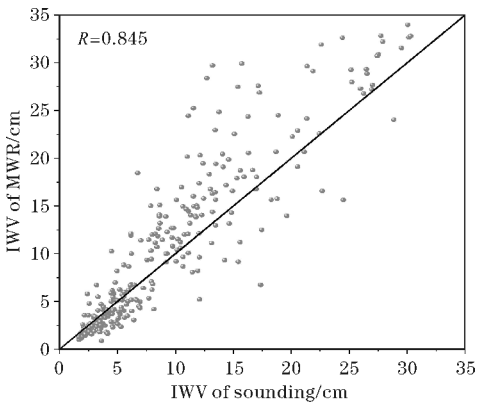
式中: e 为水汽压, T 为温度, U 为相对湿度, ρ 为水汽密度。

2 微波辐射计反演数据检验

由于地基微波辐射计水汽资料是通过亮温观测值反演所得,其资料有两个主要误差来源,分别为仪器本身的亮温观测误差和反演算法所带来的误差。为检验水汽资料的可靠性,利用张掖站的探空数据,根据式(1)~(2)得到对应高度层水汽密度,对微波辐射计对应探空(08:00,20:00)和 7 月加密探空时次(14:00,02:00)的水汽密度和大气水汽总量反演资料进行检验。经质量控制后,共得到对应时次微波辐射计水汽资料样本各 269 个,数据层数为 58 层。由图 1 可以看出,微波辐射计反演所得的水汽密度、大气水汽总量数据与探空资料计算所得的数据相关系数分别为 0.856 和 0.845,并通过了 0.05 信度的显著性检验。



(a) 水汽密度



(b) 大气水汽总量

图 1 地基微波辐射计与探空资料的水汽密度和大气水汽总量的相关性

通过对不同时次两种探测方式所得的水汽密度和大气水汽总量相关性分析可以看出(表 1),不同时次

水汽密度的相关系数均大于0.82且差异不大,02:00的相关系数最大,08:00的相关系数最小;相较于水汽密度,不同时次大气水汽总量的相关系数具有明显差异,其中02:00相关系数最大为0.906,14:00的相关系数最小为0.734。水汽密度和大气水汽总量的夜间时次的相关系数均大于日间,这可能是由于水汽主要存在于边界层内,对流旺盛,边界层内的水汽传输导致垂直方向上水汽变化较大,而微波辐射计反演算法是由常规探空资料训练所得,存在对日间水汽垂直输送响应不足。

表1 不同时次地基微波辐射计与探空资料 VD 和 IWV 的相关性对比

参数	08:00	14:00	20:00	02:00
VD	0.826	0.842	0.852	0.891
IWV	0.826	0.734	0.871	0.906

3 结果分析

3.1 大气水汽总量的变化特征

3.1.1 年内变化特征

将微波辐射计 IWV 分钟资料和地面测站的温度、降水资料取小时平均值,以获得全年 IWV、温度和降水量日变化特征。由图2可以看出,IWV日变化存在“双峰型”变化特征,峰值分别位于17:00和03:00,分别为1.13 cm和1.08 cm,谷值位于10:00(1.02 cm)。03:00后IWV逐渐降低,在10:00 IWV达到最小值;之后逐渐升高,在12:00–14:00 IWV出现了明显的跳跃并进一步升高,在17:00达到一天中的最大值。IWV在14:00–22:00维持在高值区,从22:00开始逐渐减小。IWV的低值出现在10:00,最高值出现在17:00。

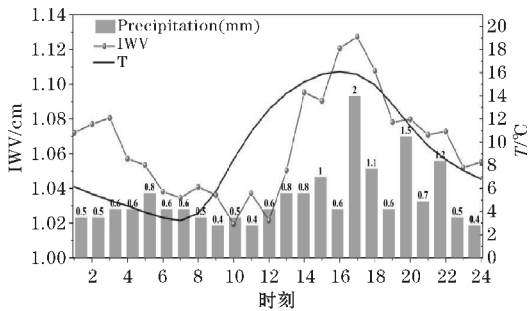


图2 张掖地区大气水汽总量、温度和降水量日变化特征

从IWV的日变化与温度日变化可以看出(图2),IWV最大值出现在日最高温度1 h后,而IWV最低值出现在日最低温度3 h后,出现在气温上升阶段。相对

气温,IWV与日降水量的变化更为密切。由图2可以看出降水量的日变化有明显的波动特征,小时平均降水量在0.4–2.0 mm,平均雨强不大,降水量最大值出现在17:00(2.0 mm),最小值出现在09:00、11:00和24:00(0.4 mm)。01:00–12:00降水量呈波动变化,降水量较小;12:00以后,降水量逐渐增大,并在17:00达到一天最大值;17:00–22:00降水量明显高于其他时段,降水量有明显的跳跃,降水量在17:00、20:00、22:00有3个峰值,对应降水量分别为2.0 mm、1.5 mm和1.2 mm。对应IWV此时段的变化,与降水量变化一致,在IWV出现第一次跳跃时(14:00),1 h后降水量出现了明显的增大;在IWV出现第二次跳跃时(16:00),1 h后降水明显增强。在降水量的3个峰值,对应IWV出现了明显的跳跃和增大,降水在IWV日最大值时,出现了日降水量最高值;在IWV谷值时,出现了降水量低值段(09:00–11:00)。可见,当IWV明显增大的时候,降水将会明显增加,IWV能很好地预测降水变化;IWV减小时,对应降水量明显减小。

3.1.2 季节变化特征

按季节划分把一年的微波辐射计数据分为四组,并将同一季节所有同时刻的IWV再次取平均得到该季节在此时刻的平均大气水汽总量,从而得到该季节IWV的日变化。张掖地区四季水汽的日变化具有明显的差异,季节日平均值夏季(2.242 cm)>春季(0.975 cm)>秋季(0.893 cm)>冬季(0.320 cm),夏季明显高于其他季节。

春季(图3a)IWV在10:00出现日变化最小值0.85 cm,之后逐渐上升,在18:00达到最大值1.11 cm后逐渐下降,夜间IWV下降趋势较为平缓,平均日较差为0.26 cm。夏季明显的特征是IWV在夜间日出前后迅速下降(图3b),在09:00达到最小值为2.15 cm,09:00–14:00呈现波动变化特征,14:00后总体为上升趋势,18:00–24:00上升趋势尤为明显,并在24:00达到最大值2.37 cm,IWV在夜间维持一个较高的区间,平均日较差为0.22 cm。秋季IWV在01:00–12:00变化平缓(图3c),在12:00达到最小值为0.85 cm,在14:00–23:00总体呈现上升趋势,在23:00达到最大值0.97 cm,之后逐渐下降,平均日较差为0.12 cm;冬季IWV远低于其他三个季节(图3d),变化趋势相对平缓,不存在日出后IWV下降的现象,在01:00–11:00 IWV逐渐上升,11:00达到最大值为0.33 cm并持续维持,19:00后逐渐降低,最低值出现在23:00为0.31 cm,平均日较差0.02 cm,是四个季节中IWV日较差最小的季节。

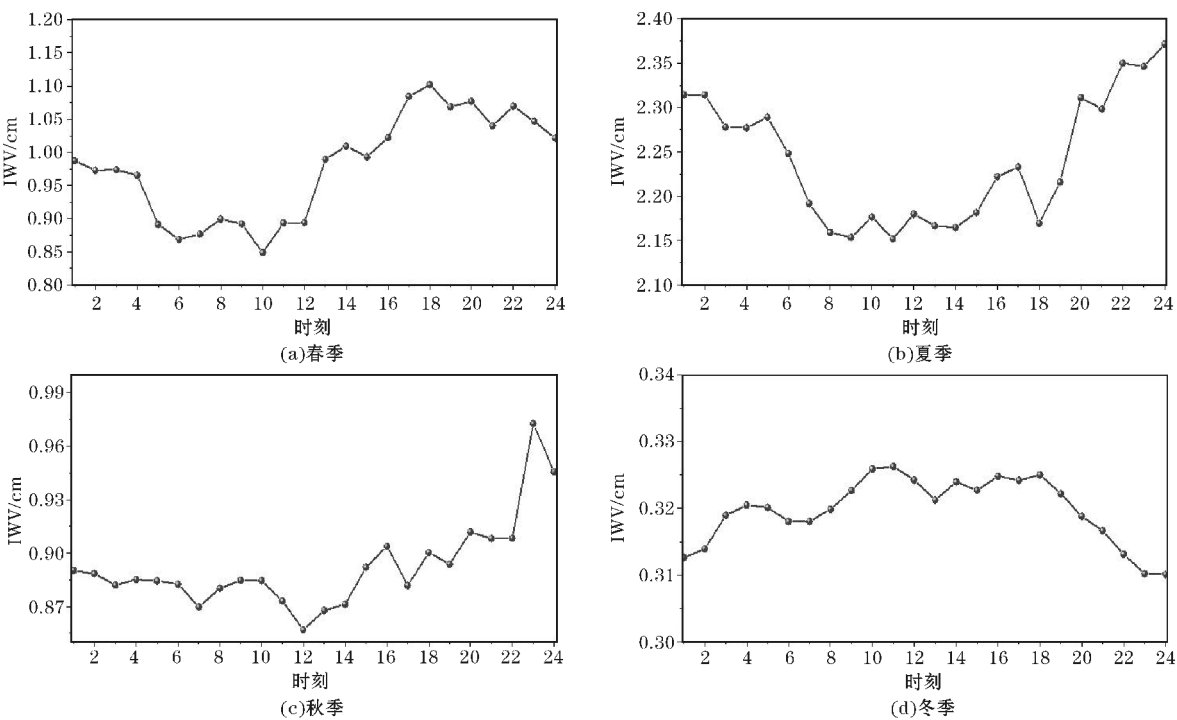


图3 张掖地区四季大气水汽总量变化特征

从四季及全年水汽密度(VD)的垂直变化特征可以看出(图4),VD随高度上升逐渐下降,主要分布在3 km以下;夏季和秋季随高度变化趋势与全年变化趋势一致,但是冬季在低层0.5 km以下存在VD随高度先增高后下降的现象,在0.5 km以上是随高度逐渐减小;而春季则存在随高度先减小再增大后又减小的变化特征,在0.1~0.5 km,VD随高度升高而逐渐减小,0.5~2 km随高度逐渐增加并在2 km达到最大值,2 km以上随高度再减小。年平均VD最大值出现在地面(4.45 g/m³),夏季各个高度层VD均大于年平均,冬季各个高度层上VD均明显小于其他季节;春季VD在2 km以上接近于年平均,2 km以下小于年平均;秋季在2 km以下VD与年平均接近,2 km以上小于年平均。

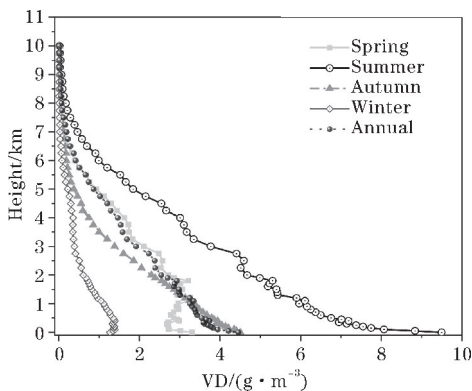


图4 张掖地区不同季节及全年水汽密度的垂直变化特征

总体而言,张掖地区大气水汽总的高值区出现在正午到傍晚时段,夜间均存在大气水汽总量逐渐下降的趋势;春、夏、秋三季日出前后IWV有明显的下降趋

势,日间IWV变化较夜间更为剧烈。这种变化特征与处于同纬度的银川地区的观测结果有所不同^[18],银川地区的大气水汽总量低值区出现在日出前后,高值区出现正午到傍晚阶段。这种差别可能与两地地理环境及所受天气系统影响的差异有关。VD的垂直变化总体呈现随高度逐渐降低的特征,春、秋两季在低层出现随高度增大的“逆湿”现象,夏季各个高度层VD均高于其他季节。

3.1.3 月变化特征

将微波辐射计IWV资料取小时平均值,对每个月所有时刻的IWV进行平均得到全月平均IWV。图5为张掖地区IWV、降水量月变化特征,可以看出张掖地区IWV分布具有明显的月变化特征,呈现“单峰型”的分布特征。IWV的月平均值从3月开始逐月增加,高值出现在6~8月,IWV平均值≥2.1 cm,其中7月最大,为2.34 cm;其余月份IWV平均值在1.25 cm以下,特别是在冬季,IWV平均值月平均值在0.3 cm以下。IWV的月变化特征和张掖地区的月降水变化特征基本一致,IWV高值期6~8月也是张掖地区降水最多的时期,全年78%的降水集中在6~8月。大气水汽的月分布特征与水汽输送密切相关,祁连山山区主要受西风带、偏南季风(南亚季风和高原季风)和东亚季风影响,其中大气水汽贡献主要来源于偏南季风和东亚季风^[23]。冬季张掖地区受西北干冷气流控制,天气以晴天为主,大气中水汽含量一直较低;进入夏季以后,受来自印度洋的南亚季风和来自青藏高原的高原季风的共同引导,大量水汽翻越青藏高原向该区域输送,大气水汽含量逐渐增大并达到最大值。

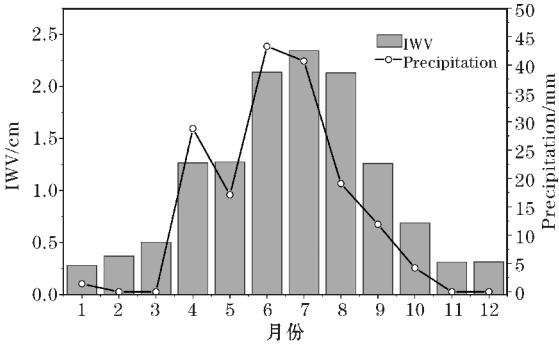


图5 张掖地区大气水汽总量和降水量月变化特征

3.2 液态水含量的变化特征

大气中的水基本上是以水汽为主,水汽本身无法形成降水,只有云中的液态水才有可能通过自然过程或人工影响产生降水,液态水含量的高低将直接决定降水强度。因为冬季云内不存在液态水,所以对冬季的LWP不做分析。为了方便讨论,只统计有云情况,即剔除LWP为0 mm的值,得到各月和春、夏和秋季三季张掖地区LWP的总的日变化特征和各季节LWP的变化特征。由图6可以看出LWP月变化特征与IWV有一定差异,LWP的月变化存在两个峰值,其中LWP在4月达到最大值为0.848 mm,在6月存在一个峰值为0.443 mm,6月后总体为下降趋势。张掖站年平均降水量为132.6 mm,降水量主要集中在6-8月,7月最多,4月降水量为5.3 mm;2017年张掖站降水量达到了166.5 mm,为近10年最多,2017年4月降水更是达到了28.8 mm,为建站以来最高值,4月降水较为异常。究其原因,2017年4月上旬该区域出现了罕见的春季连阴雨天气,因此,2017年降水出现了两个峰值,分别为4月(28.8 mm)和6月(43.3 mm)。降水这种异常的变化,体现在LWP的月变化特征上,与LWP的峰值出现具有较好的一致性。

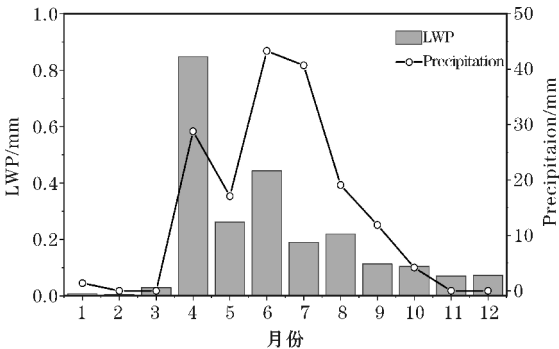
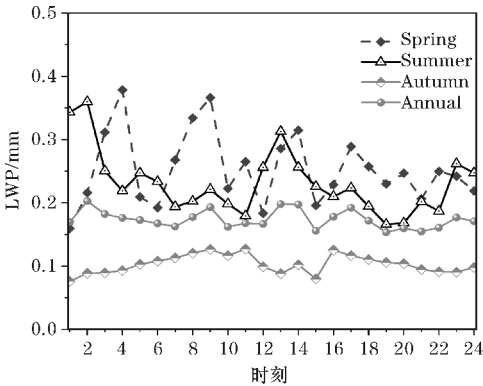


图6 张掖地区大气液态水含量和降水量月变化特征

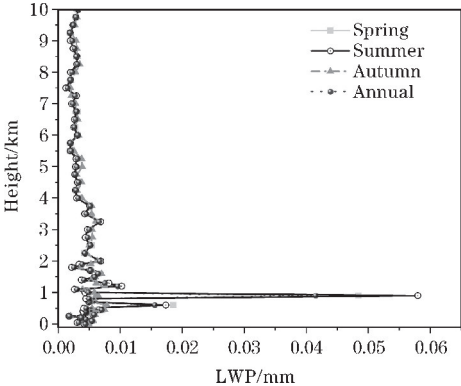
全年日平均LWP变化呈现出波动变化特征(图7a),日间LWP高于夜间,虽然在02时、09时、14时和17时存在4个峰值,但峰值数值接近,分别为0.21 mm、0.193 mm、0.198 mm和0.192 mm。对应IWV和日降水的日变化可以看出,在白天,当日降水出现峰值时,LWP也处于相应的峰值;在IWV最小值和日降水

低值区(10:00),LWP也处于相应的谷值;而在夜间,LWP的较IWV的峰值提前1 h出现。IWV和LWP的迅速增大,预示着测站上空水汽迅速聚集,出现降水的可能性非常大,可作为预报和人工增雨作业的参考指标。

LWP的季节日变化特征差异较大(图7a),春、夏两季LWP的日变化较为剧烈,秋季LWP变化相对平缓。这是因为云存在一个生成、发展、成熟和消亡的生命过程,期间LWP也在发生变化,而且不同种类的云,其LWP也有较大的差异;春夏两季,天气系统的发展和变化相对秋季更复杂,对云的生成发展影响也更明显。春、夏、秋三季日间LWP要大于夜间,在白天09:00、14:00和17:00前后有三个明显的高值区,谷值位于15:00前后。春季LWP变化较为剧烈,01:00-04:00 LWP具有明显的上升趋势,04:00-17:00呈明显的波动变化,在04:00、09:00、11:00、14:00和17:00存在5个明显的峰值,17:00后LWP逐渐下降,但是仍存在一定的波动。夏季LWP的变化也存在一定的波动,但是明显弱于春季,呈单峰型分布特征,01:00至11:00总体趋势为波动下降,在11:00达到最小值为0.179 mm,11:00-13:00 LWP明显上升,在13:00达到最大值0.31 mm,后逐渐下降在20:00后波动上升。秋季LWP变化较为平缓,呈现双峰分布,在01:00-11:00总体为上升趋势,在11:00达到第一个峰值为0.127 mm,在12:00-15:00存在一个低值区,在16:00达到第二个峰值0.125 mm后开始逐渐下降。



(a) 日变化



(b) 垂直变化

图7 张掖地区液态水含量平均日变化和垂直变化特征

由 LWP 垂直变化特征可以看出(图 7b),各季节和全年的 LWP 垂直分布特征基本一致,LWP 主要集中在0.6~1.2 km,最大值出现在距地面0.9 km高度。在1.2 km以上,各季节和全年的 LWP 值相差不大,仅在低层1.2 km以下,夏季 LWP 明显高于全年和春、秋两季节。LWP 年平均值在0.6 km、0.9 km和1.2 km存在 3 个峰值分别为 0.016 mm 和 0.042 mm 和 0.010 mm,最大值均出现在0.9 km,春、夏、秋三季在这 3 个高度均存在峰值。

总体而言,日间 LWP 的变化要明显强于夜间,春季 LWP 的波动变化趋势较其他季节变化更明显,这可能与春季冷暖气流交互较多,天气背景不稳定有关;就 LWP 垂直变化特征而言,张掖地区 LWP 主要集中于 0.6~1.2 km,夏季液态水资源最为丰富。

3.3 晴空下大气水汽总量特征

张掖国家气候观象台东南方向临近张掖国家湿地公园,为了分析周边湿地蒸发的水汽对观象台微波辐射计测量结果的影响,根据张掖市观象台 2017 年全年的观测记录,选取全年晴空无云日的观测资料进行分析。这样选择资料的原因主要是晴天少云情况反映出天气较稳定,受大区域水汽输送的影响较小,大气水汽

总量变化主要以自然变化和受局地水汽蒸发的影响为主。通过筛选,共选出 43 天全日无云资料,包括微波辐射计大气水汽总量、地面测站温度、风速和风向数据,平均风向计算采用某一时段风向的平均值。

由图 8 可以看出,在晴空下张掖地区 IWV 有明显的日变化特征,在01:00–10:00逐渐减小,10:00 达到一天的最小值;之后逐渐升高,18:00达到一天最大值,并在 18:00–24:00 维持在一个高值区。晴空条件下主要风向为北风,存在一定的昼夜变化,日间主要为北偏西风,夜间主要为北偏东风,无法将位于观象台东南部的湿地蒸发水汽向观象台方向输送。在01:00–20:00风速变化有一定波动,但是总体上为逐渐变大的趋势。晴空条件下温度在01:00–12:00逐渐上升,12:00达到气温最大值之后逐渐下降。较明显的特征是在气温上升的阶段,IWV 处于下降阶段,而在气温达到一天最高时段并开始下降时,IWV 开始上升。因此,晴空条件下 IWV 的日变化可能因为太阳加热地表,引起地表蒸发加剧,空气中水汽增多;同时地面温度升高,辐射加热近地面空气,对流发展,湍流旺盛而导致温度和风速升高。由此可见,晴空条件下水汽变化主要受局地水汽蒸发影响,东南方向湿地蒸发与水汽输送对该地区影响不大。

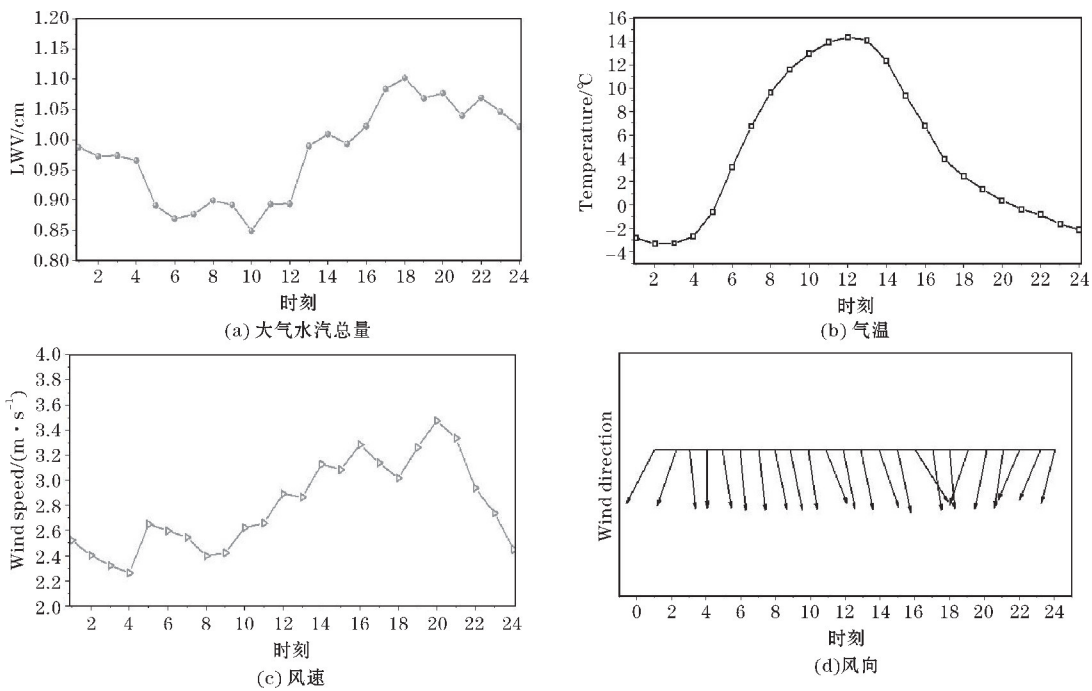


图 8 张掖地区晴空下大气水汽总量、气温、风速和风向的日变化特征

4 结论与讨论

通过以上分析,得到以下结论:

(1)微波辐射计反演的 IWV、VD 与探空所得的数据相关性较好,通过了0.05的信度检验,从不同时段的数据来看,夜间反演效果好于白天,VD 的反演效果好于 IWV。

(2)IMV 的“双峰型”日变化特征明显,主峰在 17:00(1.13 cm),次峰在 03:00(1.08 cm),谷值出现在 10:00(1.02 cm);IWV 的月平均值高值出现在 6-8 月,7 月最大(2.34 cm),与降水的月变化特征基本一致。IWV 季节日平均值夏季(2.242 cm) > 春季(0.975 cm) > 秋季(0.893 cm) > 冬季(0.320 cm),高值区出现在正午到傍晚时段,夜间均存在 IWV 逐渐下降的趋势,春、夏、秋三季日出前后 IWV 下降趋势尤为明显,日间 IWV 变化较夜间更为剧烈。

(3)LWP 日变化呈波动变化特征,存在 4 个峰值,峰值数值接近;LWP 月最高值出现在 4 月(0.848 mm),其次是 6 月(0.443 mm);春、夏、秋三季的 LWP 日变化特征差异较大,春季波动变化明显,夏季呈现出单峰变化,秋季为双峰变化。LWP 春、夏、秋三季和全年的垂直分布特征变化趋势基本一致,LWP 主要集中于 0.6 ~ 1.2 km 的高度,最大值出现在 0.9 km,夏季明显高于其他季节。VD 随高度逐渐降低,水汽主要分布在 3 km 以下,最大值出现在地面(4.45 g/m³);各季节和年变化趋势基本一致,夏季各高度层 VD 明显高于其他季节。

(4)晴空条件下,张掖地区大气水汽来源以局地蒸发为主。

从人工增雨(雪)作业的条件来看,张掖地区各季节中夏季是开展人工增雨作业最为有利的季节,作业的最佳段时间应在 14:00-24:00;而近地层 0.6 ~ 3 km 高度水汽含量充足,是人影作业最适宜的区域。张掖地区降水和 IWV 及 LWP 变化有关,当 IWV 和 LWP 明显增大时,预示着将会出现降水或降水增强;当 IWV 和 LWP 减小时,降水减弱;IWV 较降水提前 1h 出现明显增大,IWV 和 LWP 可作为预报和人工增雨作业的参考因子。

参考文献:

- [1] 陆桂华,何海.全球水循环研究进展[J].水科学进展,2006,17(3):419-424.
- [2] 张强,赵映东,张存杰,等.西北干旱区水循环与水资源问题[J].干旱气象,2008,26(2):1-8.
- [3] 张良,王式功,尚可政,等.中国人工增雨研究进展[J].干旱气象,2006,24(4):73-81.
- [4] 陈超,郭晓军,邱晓斌,等.中国华北地区云垂直结构及云水含量卫星遥感研究[J].气象与环境学报,2015,31(5):159-164.
- [5] 谢松元,杨扬,杨军.辽宁层状云微物理结构的水平变化特征[J].气象与环境学报,2008,24(1):5-8.
- [6] 刘红燕.三年地基微波辐射计观测温度廓线的精度分析[J].气象学报,2011,69(4):719-728.
- [7] 杨大生,王普才.中国地区夏季 6-8 月云水含量的垂直分布特征[J].大气科学,2012,36(1):89-101.
- [8] 刘亚亚,毛节泰,刘钧,等.地基微波辐射计遥感大气廓线的 BP 神经网络反演方法研究[J].高原气象,2010,29(6):1514-1523.
- [9] 樊旭,毛文茜,吴肖燕,等.基于伪逆学习算法的地基微波辐射计反演算法研究[J].西南大学学报(自然科学版),2019,41(1):114-122.
- [10] 赵伯林,尹宏,李慧心,等.微波遥感大气层结的原理和实验[J].中国科学,1981,39(2):217-225.
- [11] 张秋晨,龚佃利,王俊,等.基于地基微波辐射计反演的济南地区水汽及云液态水特征[J].气象与环境学报,2017,33(5):35-43.
- [12] 姚俊强,杨青,韩雪云,等.乌鲁木齐夏季水汽日变化及其与降水的关系[C].全国云降水与人工影响天气科学会议,2014.
- [13] 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):61-69.
- [14] 孙旭映,李耀辉,邓祖琴.一次层状云降水过程中云液态水含量的演变特征[J].干旱区资源与环境,2013,27(10):81-86.
- [15] Wang Z Z, Liu D, Xie C B, et al. Long-term ground-based microwave radiometric measurements of atmospheric brightness temperature in SKYNET Hefei (31.90 N, 117.17E) site [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2017, 188: 181-187.
- [16] 刘红燕,王迎春,王京丽,等.由地基微波辐射计测量得到的北京地区水汽特性的初步分析[J].大气科学,2009,33(2):388-396.
- [17] 教雪,王振会,徐桂荣,等.地基微波辐射计资料在降水分析中的应用[J].暴雨灾害,2011,30(4):358-365.
- [18] 田磊,孙艳桥,胡文东,等.银川地区大气水汽、云液态水含量特性的初步分析[J].高原气象,2013,32(6):1774-1779.
- [19] Xu W J, Liu H Y. Ground-Based Microwave Radiometer Profiler Observations before a Heavy Rainfall [J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 1513: 312-315.
- [20] 王黎俊,孙安平,刘彩虹,等.地基微波辐射计

- 探测在黄河上游人工增雨中的应用[J]. 气象, 2007,33(11):28-33.
- [21] 王毅荣,林纾,李耀辉,等. 甘肃空中水汽含量对全球气候变化响应[J]. 干旱区地理,2006,29(1):47-52.
- [22] 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.
- [23] 张强,张杰,孙国武,等. 祁连山山区空中水汽分布特征研究[J]. 气象学报,2007,65(4):633-643.

Analysis of Water Vapor and Liquid Water Variation Characteristics in Zhangye Area with Microwave Radiometer Data

CHENG Peng^{1,2}, FAN Xu³, HU Xiaohui⁴, ZHANG Wenyu^{2,3}, ZHANG Fenwei¹, PANG Chaoyun¹

(1. Gansu Weather Modification Office, Lanzhou 730020, China; 2. Key Laboratory for Cloud Physics of China Meteorological Administration, Beijing 100081; 3. College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 4. Zhangye Meteorological Bureau, Zhangye 734000, China)

Abstract: In order to study the variation characteristics and distribution law of atmospheric water vapor in Zhangye based on the data observed by microwave radiometer in the national station of Zhangye observatory, the variation characteristics of integrated water vapor and liquid water path of Zhangye region are analyzed, the test is carried out by using the sounding data. The results showed that the inversion data of microwave radiometer is available and it has passed the reliability test of 0.05, the night inversion effect is better than the day. The maximum value of integrated water vapor and liquid water path in Zhangye region appeared in July and April respectively, which is 2.34 cm and 0.84 mm; the diurnal variation of Integrated water vapor appeared typical double peaks pattern, the major and minor peaks occurred at about 17:00 BST and 03:00 BST separately, there were four peaks in the daily variation of liquid water path, but the values between these peaks were close to each other. The seasonal diurnal variation of Integrated water vapor and liquid water path were significantly different, the order of the seasonal daily average of the Integrated water vapor was summer(2.242 cm) > spring(0.975 cm) > autumn(0.893 cm) > winter(0.320 cm). The liquid water path were mainly concentrated in the height range of 0.6 to 1.2 km, the maximum was 0.042 g/m³ at 0.9 km height. The Integrated water vapor in cloudless day in Zhangye region mainly came from local evaporation which caused by the heating of the earth by the sun. When the integrated water vapor and liquid water path increase significantly, the precipitation increases significantly. The occurrence time of the integrated water vapor high value was about one hour ahead of the precipitation high value.

Keywords: atmospheric physics and atmospheric environment; atmospheric detection; integrated water vapor; liquid water path; microwave radiometer