

李金辉,周毓荃,岳治国,等,2022. 基于微波辐射计数据的秦岭南北水汽和云底高度等参量的差异[J]. 气象,48(4):452-458.  
Li J H,Zhou Y Q,Yue Z G,et al,2022. Water vapor and cloud base heigh difference between the north and south of Qinling Mountains based on microwave radiometer measurements[J]. Meteor Mon,48(4):452-458(in Chinese).

## 基于微波辐射计数据的秦岭南北水汽和 云底高度等参量的差异\*

李金辉<sup>1,2</sup> 周毓荃<sup>3</sup> 岳治国<sup>1,2</sup> 王 瑾<sup>1,2</sup> 宋嘉尧<sup>1,2</sup> 雷连发<sup>4</sup>

1 陕西省人工影响天气中心,西安 710016

2 秦岭和黄土高原生态环境气象重点实验室,西安 710016

3 中国气象科学研究院,北京 100081

4 北方天穹信息技术(西安)有限公司,西安 710014

**提 要:** 利用微波辐射计分析了秦岭南北的水汽、液态水含量、湿度、云底高度等特征,结果表明:秦岭北垂直积分水汽量年平均为  $18.52 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ,秦岭南为  $20.94 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ,90%以上水汽秦岭北平均高度为 4.26 km,秦岭南为 3.87 km;垂直积分液水含量,秦岭南年平均为  $0.13 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ,秦岭北年平均为  $0.12 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ,两者相差不多;秦岭腹地的空气湿度大,秦岭南年平均相对湿度 75.3%,秦岭北年平均相对湿度为 59.8%,秦岭南比秦岭北平均相对湿度大 15.6%;云底高度,秦岭南年平均为 3817.5 m,秦岭北年平均为 4396 m,中云云底高度年平均差异不大;降雨时秦岭南云底年平均高度为 323.3 m,较秦岭北低,二者相差 42.2 m。

**关键词:** 微波辐射计,垂直积分水汽总量,垂直积分液水总量,人工影响天气

**中图分类号:** P412,P421

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.111701

## Water Vapor and Cloud Base Heigh Difference Between the North and South of Qinling Mountains Based on Microwave Radiometer Measurements

LI Jinhui<sup>1,2</sup> ZHOU Yuquan<sup>3</sup> YUE Zhiguo<sup>1,2</sup> WANG Jin<sup>1,2</sup> SONG Jiayao<sup>1,2</sup> LEI Lianfa<sup>4</sup>

1 Shaanxi Weather Modification Center, Xi'an 710016

2 Key Laboratory of Eco-Environment and Meteorology for the Qinling Mountains and Loess Plateau, Xi'an 710016

3 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

4 Northern Sky Information Technology (Xi'an) Co. LTD, Xi'an 710014

**Abstract:** The characteristics of water vapor, liquid water content, humidity and cloud base height in the north and south of Qinling Mountains are analyzed by using microwave radiometer. The results show that the annual average of vertically integrated water vapor in the north of Qinling Mountains is  $18.52 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ , and that in the south of Qinling Mountains is  $20.94 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ . The average height of more than 90% water vapor in the north of Qinling Mountains is 4.26 km, and that in the south of Qinling Mountains is 3.87 km. The average annual water content of vertical integrated liquid water content is  $0.13 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  in the south of Qinling Mountains and  $0.12 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  in the north of Qinling Mountains. The air humidity in

\* 国家重点研发计划(2016YFA0601704)资助

2021年2月19日收稿; 2021年7月17日收修定稿

第一作者:李金辉,主要从事人工防雹、人工增雨技术研究. E-mail:2888ljh@163.com

通讯作者:周毓荃,主要从事人工影响天气云水资源研究. E-mail:zhouyq05@163.com

the hinterland of Qinling Mountains is high. The annual average relative humidity in the south of Qinling Mountains is 75.3%, and that in the north of Qinling Mountains is 59.8%. The average relative humidity in the south of Qinling Mountains is 15.6% higher than that in the north of Qinling Mountains. The average height of cloud base is 3817.5 m in the south of Qinling Mountains and 4396 m in the north of Qinling Mountains. The annual average height of cloud base in the south of Qinling Mountains is 323.3 m, which is 42.2 m lower than that in the north of Qinling Mountains.

**Key words:** microwave radiometer, vertical integrated water vapor, vertical integrated liquid water, weather modification

## 引言

秦岭是中国南北气候分界线,主体部分在陕西,秦岭在陕西包括渭南南部、西安南部、宝鸡的南部和汉中北部、安康北部、商洛全部(简称陕南)。丹江口水库水量的70%来自于陕南汉江和丹江。汉江是长江最大支流,源于秦岭南麓的汉中市宁强县,丹江发源于商洛地区西北部的秦岭南麓,流经陕西、河南、湖北三省,在湖北省丹江口市与汉江交汇于丹江口水库。

水汽、液态水含量的观测方法有:卫星反演,机载探测、气象探空,微波辐射计反演等。其中微波辐射计具有数据连续观测、分辨率高、操作性强的特点,通过反演可得到垂直方向连续的温度、相对湿度、水汽密度、云底高度、垂直积分水汽量、垂直积分液水含量等信息。微波辐射计有一定的缺陷,在有云的情况下,特别是低云和厚云存在时,湿度廓线反演误差增大,降水时天线罩上附着的水将严重影响辐射计的反演精度,但利用纳米材料制作天线罩,并配备鼓风机向天线罩表面吹气等方法可有效减小水膜效应。

微波辐射计作为一种新型的大气探测设备,其探测原理和方法已日趋成熟,观测数据已开始应用到雷暴、暴雨、雾的预警预报和模式检验等方面,显示出良好的应用前景。许皓琳等(2020)利用微波辐射计分析乌鲁木齐和成都两地机场雷暴降水水汽条件,能够展现不同地区大气水汽的分布特征,以及降水过程中各层水汽的演变情况。李德俊等(2012)对武汉一次短时暴雪天气分析,结果表明:微波辐射计探测的温度、相对湿度、整层水汽密度和液态含水量等参量随降水相态改变均有明显的变化,同时还发现降水强度和比湿有较好的对应关系,降水开始后

比湿迅速增加,降水减弱时比湿快速减少。杨文霞等(2019)使用Ka波段(毫米波)云雷达、微波辐射计、微雨雷达和地面雨量计对河北省邢台站出现的一次西南涡弱层状云降水过程进行综合遥感分析,表明联合观测能获取更为精细的云结构演变和降水粒子增长过程,是精细化识别降水出现和人工增雨潜力区的有效手段。黄建平(2010)利用地基微波辐射计反演兰州地区液态云水路径和可降水量,结果表明:95%的云水路径值都在 $150 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 以下,95%的可降水量值都在3 cm以下。其他的研究如基于地基微波辐射计反演四川盆地水汽及云液态水的初步分析(郑飒飒,2020),利用地基遥感方法检测大气中气态、液态水含量分布特征(段英和吴志会,1999),一次降水过程云液态水和降水演变特征的综合观测分析(张志红和周毓荃,2010)等等。综上所述,微波辐射计探测水汽总量的精度与探空相比一致性较好,云、液水总量也有较高的精度。

目前陕西布设了5部微波辐射计,其中4部是中国兵器工业北方天穹信息技术(西安)有限公司研制并生产的MWP967KV型地基多通道微波辐射计,1部为德国生产的XGM-1型微波辐射计;分别布设在秦岭南安康宁陕县气象局、秦岭北麓西安长安区气象局院内(2部,其中1部为进口)、西安中心的西安市气象局、西安城北的泾河气象站。微波辐射计是分析空中云水资源的有效工具(Cai et al, 2020; Zhou et al, 2020),以往利用微波辐射计分析水汽、液水含量等均为个例的分析,对长序列的分析较少见,本文利用秦岭南北两部同型号微波辐射计(宁陕县海拔高度为802.4 m、长安区气象局海拔高度为445.0 m),研究秦岭地区大气中的水汽、液态水含量,湿度、云底高度等,对了解空中云水资源,开展人工增雨作业具有重要的意义。

## 1 资料说明与处理

### 1.1 资料与方法

使用国产 MWP967KV 型地基多通道微波辐射计,具有较高的精度(刘晓璐,2019),每 2 min 完成一次扫描,每小时使用 30 个扫描资料,所有统计以小时为单位,为整点前后 30 min 的平均值,月、年的平均是小时平均。采用机器学习方法,长安微波辐射计垂直资料是利用泾河气象站的探空资料训练进行反演,宁陕微波辐射计垂直资料变化是利用汉中气象站的探空资料训练进行反演,日常使用中每半年进行一次液氮标定,日常实时进行 Tipping 标定等。资料时间为 2018 年 8 月至 2020 年 2 月(长安区气象局 2018 年 12 月有 6 d、2019 年 1 月有 7 d、2019 年 2 月有 17 d 无微波辐射计资料,利用西安市气象局微波辐射计资料替代,宁陕县气象局微波辐射计资料完整)。

降雨会对微波辐射计数据反演带来较大不确定性,为了减小误差,在计算垂直积分水汽含量、液水含量、水汽廓线时利用自带的降雨传感器数据剔除降雨样本,同步统计两地没有降雨的资料。由于水汽积分与高度有关,而两地海拔高度不一样,为了使得积分数据具有可比性,两站点数据统一从宁陕的海拔高度作为积分水汽和液态水的起算点。降雨时云底高度较低,微波辐射计测的云底高度误差较小,没有剔除降雨时的资料。

### 1.2 垂直积分水汽与气象探空资料相关分析

秦岭北麓的长安区气象局微波辐射计垂直积分水汽与泾河气象站探空(两者距离 37 km)比较,相关系数为 0.97,因长安微波辐射计放置位置距离泾河探空站较近,因此利用泾河气象站探空反演的垂直积分水汽与长安区气象局实际的垂直积分水汽相关性较好(图 1a)。秦岭南宁陕微波辐射计垂直积分水汽与汉中探空比较(两者距离 153 km),相关系数为 0.88,主要由于两地相距较远,受到水汽水平分布不均匀的影响,相关性变小(图 1b)。

## 2 秦岭南北垂直积分水汽、垂直积分液水含量变化特征

### 2.1 秦岭南北垂直积分水汽变化

水汽主要在低层,由于两地海拔高度有差异,宁陕县气象站比长安气象站海拔高度高约 357.4 m,为了使得两地数据具有可比性,长安积分水汽总量起算高度与宁陕一致,选取两个站点没有降雨同一时段进行分析,逐月统计积分水汽平均值,秦岭北长安区气象站与秦岭南宁陕县气象站的垂直积分水汽量,年度变化趋势一致(图 2)。11 月至次年 3 月垂直积分水汽量偏小,4、5、6 月逐渐增加,7 月和 8 月达到大值,9 月又逐渐减小。秦岭南宁陕县气象站微波辐射计垂直积分水汽量年平均为  $20.94 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ,月平均变动范围为  $10.87 \sim 46.73 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ,月平均最

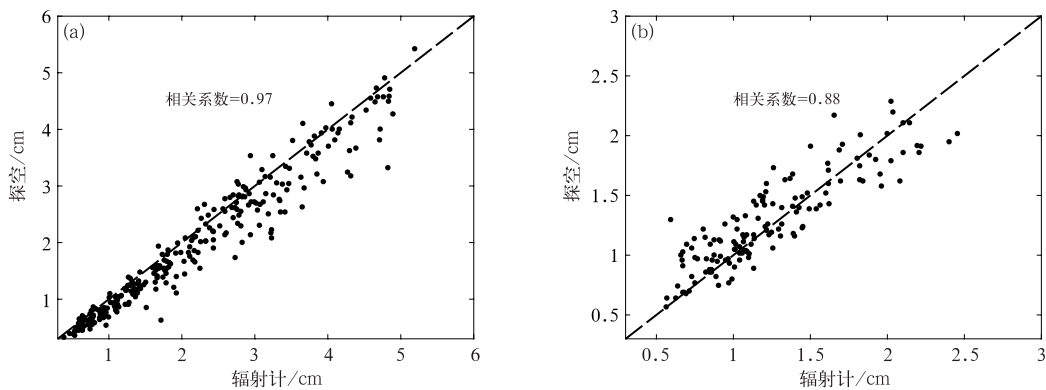


图 1 (a)长安区站和(b)宁陕站微波辐射计垂直积分水汽与探空对比

Fig. 1 The integrated water vapor compared with sounding

(a) Chang'an Station, (b) Ningshan Station

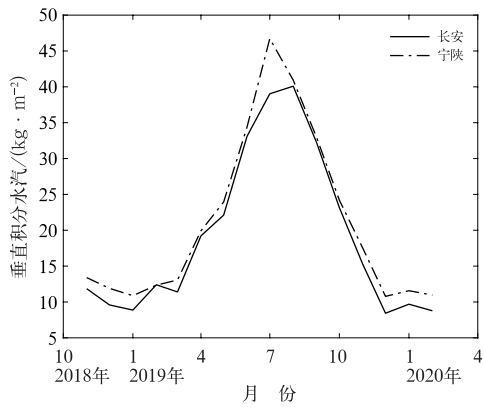


图 2 2018 年 11 月至 2020 年 2 月宁陕县气象站与长安区气象站垂直积分水汽对比  
Fig. 2 Comparison of the integrated water vapor between Ningshan Weather Station and Chang'an District Weather Station from November 2018 to February 2020

大与最小相差 4.3 倍,秦岭北垂直积分水汽量年平均为  $18.52 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ,月平均变动范围为  $8.43 \sim 40.1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ,月平均最大与最小相差 4.76 倍,秦岭北垂直积分水汽变率更大。

### 2.2 水汽廓线对比

对 4 km 以下的水汽廓线进行了月平均统计,可以看出在高空水汽含量趋近一致,秦岭南宁陕站水汽密度廓线月平均基本都大于秦岭北部,越往低空水汽相差越大,另外从季节上看夏季水汽密度相差较大,冬季差异小(图 3)。

### 2.3 秦岭南北垂直积分液水含量变化

秦岭南宁陕县气象站垂直积分液水含量月平均在  $0.04 \sim 0.42 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ,平均为  $0.13 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ,月平均垂直积分液水含量最高与最低相差 10.5 倍,

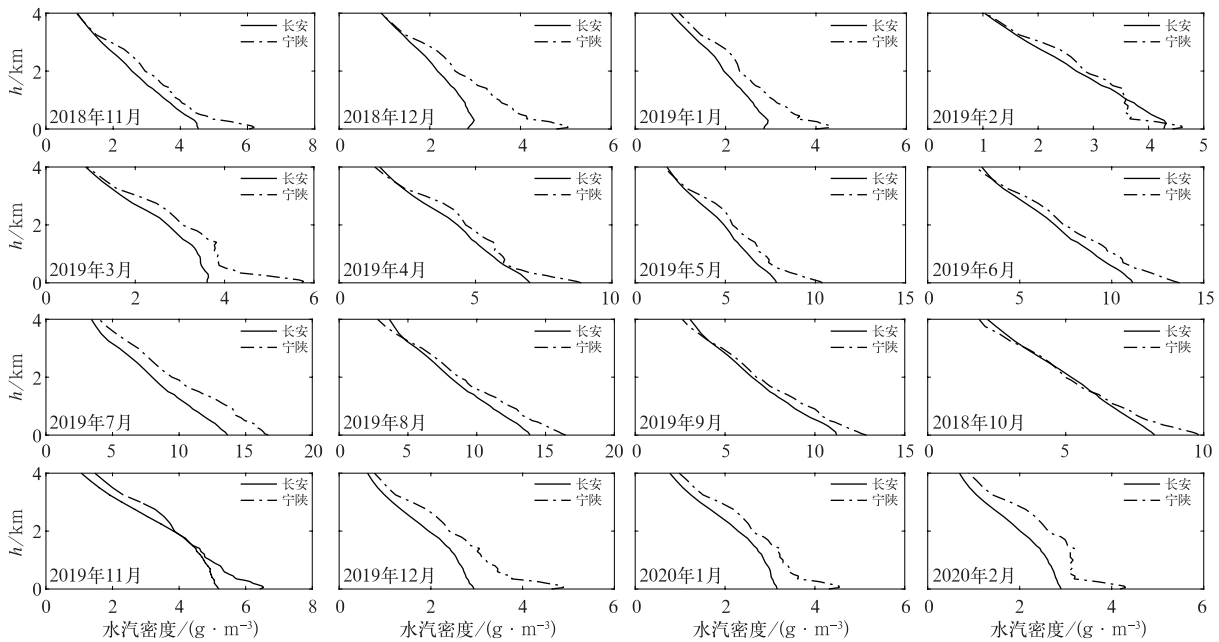


图 3 2018 年 11 月至 2020 年 2 月宁陕县气象站与长安区气象站水汽密度廓线月平均统计对比  
Fig. 3 Monthly statistics of water vapor density profile between Ningshan Weather Station and Chang'an District Weather Station from November 2018 to February 2020

秦岭北长安区气象局垂直积分液水含量月平均变动范围为  $0.04 \sim 0.25 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ,平均为  $0.12 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ,月平均垂直积分液水含量最高与最低差 6.25 倍(图 4),秦岭南与秦岭北年平均垂直积分液水含量相差不大,秦岭南的垂直积分液水含量变率更大。

### 2.4 秦岭南北湿度、90%以上水汽、降雨量分布特征

平均而言,秦岭南宁陕县气象站地面年平均相

对湿度为 75.3%,秦岭北长安区气象站地面年平均湿度为 59.8%,秦岭南比秦岭北年平均相对湿度大,相差 15.6%。秦岭南 2、3、4 月平均相对湿度小( $<70\%$ ),而秦岭北 12、1、2、3 月平均相对湿度小( $<60\%$ )(表 1)。90%以上水汽平均高度,秦岭南宁陕县气象站年平均为 3.87 km,月最高与最低相差 820 m,秦岭北麓的长安区气象局年平均为 4.26 km,月最高与最低相差 870 m,秦岭北麓水汽

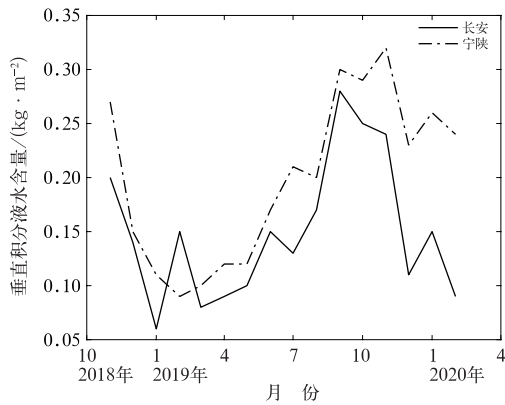


图 4 同图 2, 但为垂直积分液水含量

Fig. 4 Same as Fig. 2, but for integrated liquid water content

表 1 秦岭南宁陕县气象局、秦岭北麓长安区气象局平均湿度及 90% 以上水汽平均高度

Table 1 Average humidity and moisture height above 90% of weather stations of Ningshan County in south of Qinling Mountains, and Chang'an District at northern foot of Qinling Mountains in Shaanxi Province

月份	宁陕月平均相对湿度/%	长安月平均相对湿度/%	宁陕 90% 以上水汽月平均高度/km	长安 90% 以上水汽月平均高度/km	宁陕月降雨量/mm	长安月降雨量/mm
2018 年 11 月	78.9	71.3	3.65	4.13	17.6	25.0
2018 年 12 月	78.7	52.7	3.63	4.38	40.6	9.3
2019 年 1 月	76.9	56.2	3.56	4.37	7.7	8.1
2019 年 2 月	69.4	58.8	3.73	4.34	5.8	13.6
2019 年 3 月	65.1	50.3	3.51	4.22	15.8	3.1
2019 年 4 月	67.6	67.0	3.55	4.33	62.0	72.0
2019 年 5 月	72.9	63.7	3.70	4.48	82.2	37.9
2019 年 6 月	79.4	63.6	3.96	4.82	57.8	118.8
2019 年 7 月	80.0	63.9	4.33	4.81	245.9	102.2
2019 年 8 月	77.0	67.0	3.83	4.87	201.6	166.5
2019 年 9 月	84.1	74.4	4.17	5.00	355.1	195.0
2019 年 10 月	85.5	82.1	4.08	4.59	119.0	55.6
平均	75.3	59.8	3.87	4.26	100.9	67.3

参考。利用微波辐射计反演云高方面,丁虹鑫等(2018)利用云雷达和微波辐射计联合反演大气湿度廓线,相关系数平均为 0.862,均方差误差为 14.9%,胡树贞等(2020)进行了云雷达与云宏观特征对比分析,发现云雷达探测云高准确性高,与基于探空识别的云底高度平均偏差为 100 m 左右。

将 1 小时中有一半时间有降雨的云层统计为降雨时段,统计云底高度,统计结果如表 2。秦岭南宁陕县气象站年平均云底高度为 3817.5 m,3、4、5、6、7、8 月平均云底高度较高,达到 4091.5 m 以上。全年中云年平均云底高度为 3337.0 m,月平均云底高度在 3115.0~3466.6 m,月平均相差 351.6 m。低

月平均变化更大一些,可以看出秦岭南部相比北部低空更富含水汽。表 1 还可以看到月平均相对湿度较小时,月平均降水量少。

## 2.5 秦岭南北云底高度分布特征

利用微波辐射计反演云底最大高度可达到 9999 m,云底高度越高误差越大,为了准确确定云层云底高度,按照气象学分类将云底高度小于 2000 m 的统计为低云,将云底高度在 2000~5000 m 统计为中云,云底高度 5000 m 以上,因人工增雨作业难于影响不统计。孙丽(2019)利用 CloudSat 卫星观测资料对云垂直结构进行分析,研究了典型系统影响下的作业云系垂直结构特征,为人工增雨作业提供

云年平均云底高度为 1021.7 m,月平均云底高度在 788.8~1208.4 m,相差 419.6 m。降雨时年云底平均高度是 323.3 m。相对来说平均雨量较大的月份平均低云云底高度较低。

表 3 表明,秦岭北麓长安区气象局年平均云底高度为 4396.0 m,冬季平均云底高度较低。全年中云年平均云底高度为 3329.8 m,月平均云底高度在 3126.7~3673.2 m,相差 546.5 m。低云年平均云底高度为 896.6 m,月平均云底高度在 515.5~1153.7 m,相差 638.2 m。降雨时年云底平均高度是 356.5 m。相对来说,平均雨量较大的月份平均低云云底高度较低。

表2 2018年11月至2019年10月秦岭南宁陕县气象局平均云底、中云、低云、降雨时云底高度  
Table 2 Average height of cloud base at the Ningshan Weather Station in  
south of Qinling Mountains of Shaanxi Province from November 2018 to October 2019

月份	宁陕月平均 云底高度/m	宁陕中云月平均 云底高度/m	宁陕低云月平均 云底高度/m	宁陕降雨时月平均 云底高度/m	宁陕 月降雨量/mm
2018年11月	3 023.3	3 394.1	1 103.2	579.8	17.6
2018年12月	2 323.7	3 176.0	1 086.5	448.0	40.6
2019年1月	2 583.1	3 347.4	1 037.2	86.4	7.7
2019年2月	2 891.4	3 466.6	1 096.3	263.3	5.8
2019年3月	5 228.5	3 350.0	1 191.6	589.5	15.8
2019年4月	5 200.2	3 296.6	1 133.2	331.7	62.0
2019年5月	4 384.9	3 318.1	1 208.4	414.2	82.2
2019年6月	4 091.5	3 448.5	875.3	224.5	57.8
2019年7月	5 464.4	3 284.9	935.4	385.4	245.9
2019年8月	5 121.5	3 461.2	849.2	212.2	201.6
2019年9月	3 367.4	3 386.0	788.8	146.3	355.1
2019年10月	2 130.2	3 115.0	956.0	198.1	119.0
平均	3 817.5	3 337.0	1 021.7	323.3	100.9

表3 同表2,但为秦岭北麓长安区气象局

Table 3 Same as Table 2, but for Chang'an District Weather Station at the northern foot of Qinling Mountains

月份	长安月平均 云底高度/m	长安中云月平均 云底高度/m	长安低云月平均 云底高度/m	长安降雨时月平均 云底高度/m	长安 月降雨量/mm
2018年11月	4 661.1	3 128.9	515.5	229.4	25.0
2018年12月	3 153.7	3 673.2	1 022.5	290.9	9.3
2019年1月	2 380.1	3 352.4	1 153.7	131.1	8.1
2019年2月	3 521.2	3 340.2	851.8	306.1	13.6
2019年3月	4 715.8	3 523.0	982.2	488.1	3.1
2019年4月	5 436.3	3 267.1	962.5	318.7	72.0
2019年5月	5 103.6	3 214.3	1 033.6	651.6	37.9
2019年6月	4 754.4	3 439.8	737.0	481.4	118.8
2019年7月	5 152.4	3 454.2	940.1	456.3	102.2
2019年8月	4 840.2	3 272.4	856.4	241.8	166.5
2019年9月	4 957.0	3 165.8	725.5	217.1	195.0
2019年10月	4 075.9	3 126.7	978.3	465.3	55.6
平均	4 396.0	3 329.8	896.6	356.5	67.3

总体来说:秦岭南宁陕县气象站年平均云底高度比秦岭北麓长安区气象站低 578.5 m。秦岭南宁陕县气象局中云年平均云底高度与秦岭北麓长安区气象局相差 7.2 m,相差不大。秦岭南宁陕县气象站降雨时云底年平均高度比秦岭北麓长安区气象站低 33.2 m。相对来说,平均雨量较大的月份平均低云云底高度较低。

### 3 结论与讨论

(1)秦岭南北垂直积分水汽量变化趋势一致,11月至次年3月垂直积分水汽量偏小,4、5、6月逐渐增加,7月和8月达到大值,9月又逐渐减小。秦岭北垂直积分水汽量年平均为  $18.52 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ,秦岭

南垂直积分水汽量年平均为  $20.94 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

(2)秦岭南安康宁陕县气象站垂直积分液水含量年平均为  $0.13 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ,月平均垂直积分液水含量在  $0.04 \sim 0.42 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。秦岭北长安区气象站垂直积分液水含量年平均为  $0.12 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。月平均垂直积分液水含量在  $0.04 \sim 0.25 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。秦岭南的垂直积分液水含量变率更大。

(3)秦岭南比秦岭北相对湿度大,年平均相差 15.6%,秦岭南宁陕县气象站 90%以上水汽年平均高度为 3.87 km,秦岭北麓的长安区气象站 90%以上水汽年平均高度为 4.26 km。

(4)秦岭南年平均云底高度比秦岭北年平均云底高度低 578.5 m。中云年平均云底高度相差 7.2 m,相差不大。降雨时秦岭南云底年平均高度比秦岭北

年平均云底高度低 33.2 m。相对来说,平均雨量较大的月份平均低云云底高度较低。

(5)人工增雨作业不能影响水汽,而微波辐射计能够很好地检测大气中汽态、液态水含量、云底高度、湿度、温度等分布特征,对开展人工增雨作业具有重要意义。

## 参考文献

- 丁虹鑫,马舒庆,杨玲,等,2018.云雷达和微波辐射计联合反演大气湿度廓线的初步研究[J].气象,44(12):1604-1611. Ding H X, Ma S Q, Yang L, et al, 2018. Retrieval of humidity profiles by using cloud radar and microwave radiometer[J]. Meteor Mon, 44(12):1604-1611(in Chinese).
- 段英,吴志会,1999.利用地基遥感方法监测大气中汽态、液态水含量分布特征的分析[J].应用气象学报,10(1):34-40. Duan Y, Wu Z H, 1999. Monitoring the distribution characteristics of liquid and vapour water content in the atmosphere using ground-based remote sensing[J]. Quart J Appl Meteor, 10(1):34-40(in Chinese).
- 胡树贞,曹晓钟,陶法,等,2020.船载毫米波云雷达观测西太平洋云宏观特征对比分析[J].气象,46(6):745-752. Hu S Z, Cao X Z, Tao F, et al, 2020. Comparative analysis of cloud macro characteristics from two shipborne millimeter wave cloud radars in the West Pacific[J]. Meteor Mon, 46(6):745-752(in Chinese).
- 黄建平,何敏,阎虹如,等,2010.利用地基微波辐射计反演兰州地区液态云水路径和可降水量的初步研究[J].大气科学,34(3):548-558. Huang J P, He M, Yan H R, et al, 2010. A study of liquid water path and precipitable water vapor in Lanzhou area using ground-based microwave radiometer[J]. Chin J Atmos Sci, 34(3):548-558(in Chinese).
- 李德俊,唐仁茂,向玉春,等,2012.基于多种探测资料对武汉一次短时暴雪天气的监测分析[J].高原气象,31(5):1386-1392. Li D J, Tang R M, Xiang Y C, et al, 2012. Analysis on a short-time snowstorm weather in Wuhan based on variety of monitor data[J]. Plateau Meteor, 31(5):1386-1392(in Chinese).
- 刘晓璐,刘东升,郭丽君,等,2019.国产 MWP967KV 型地基微波辐射计探测精度[J].应用气象学报,30(6):731-744. Liu X L, Liu D S, Guo L J, et al, 2019. The observational precision of domestic MWP967KV ground-based microwave radiometer[J]. J Appl Meteor Sci, 30(6):731-744(in Chinese).
- 孙丽,马嘉理,赵妹慧,等,2019.基于 CloudSat 卫星观测资料的辽宁省不同天气系统影响下云系垂直结构特征[J].气象,45(7):958-967. Sun L, Ma J L, Zhao S H, et al, 2019. Characteristics of cloud vertical structure under different synoptic systems in Liaoning Province based on CloudSat observation[J]. Meteor Mon, 45(7):958-967(in Chinese).
- 许皓琳,郑佳锋,姜涛,等,2020.乌鲁木齐和成都两地机场雷暴降水水汽条件的分析研究[J].气象,46(11):1440-1449. Xu H L, Zheng J F, Jiang T, et al, 2020. Analysis of water vapor variation and transformation during the two airport thunderstorms in Urumqi and Chengdu[J]. Meteor Mon, 46(11):1440-1449(in Chinese).
- 杨文霞,范皓,杨洋,等,2019.一次层状云降雨过程多源遥感特征参量演变分析[J].气象,45(9):1278-1287. Yang W X, Fan H, Yang Y, et al, 2019. Evolution analysis of physical quantities obtained by multi-source remote sensing in a process of stratiform cloud rainfall[J]. Meteor Mon, 45(9):1278-1287(in Chinese).
- 张志红,周毓荃,2010.一次降水过程云液态水和降水演变特征的综合观测分析[J].气象,36(3):83-89. Zhang Z H, Zhou Y Q, 2010. Analyses of composite observations of cloud liquid water and precipitation on the evolution features[J]. Meteor Mon, 36(3):83-89(in Chinese).
- 郑飒飒,2020.基于地基微波辐射计反演四川盆地水汽及云液态水的初步分析[J].高原山地气象研究,40(2):83-88. Zheng S S, 2020. Preliminary analysis of water-vapor content and liquid-water content in Sichuan Basin based on ground-based microwave radiometer[J]. Plateau Mountain Meteor Res, 40(2):83-88(in Chinese).
- Cai M, Zhou Y Q, Liu J Z, et al, 2020. Quantifying the cloud water resource; methods based on observational diagnosis and cloud model simulation[J]. J Meteor Res, 34(6):1256-1270.
- Zhou Y Q, Cai M, Tan C, et al, 2020. Quantifying the cloud water resource; basic concepts and characteristics[J]. J Meteor Res, 34(6):1242-1255.

(本文责编:俞卫平)