

基于 GNSS 网的湖南省水汽时空变化分析

Analysis of Temporal and Spatial Variation of Water Vapor in Hunan Province Based on GNSS Network

赵凯 刘盼

Kai Zhao Pan Liu

西北综合勘察设计研究院 中国·陕西 西安 710082

Northwest Comprehensive Survey, Design and Research Institute, Xi'an, Shaanxi, 710082, China

摘要: 水汽是大气中的重要组成部分, 虽然在整个大气中所占比例只有 0.1%~3%, 却是大气中最为活跃的部分。获取高精度、高时空分辨率的水汽信息能够准确地分辨中小尺度恶劣天气的变化, 对防灾减灾有重要作用。论文利用 2015 年中国湖南省 58 个 CORS 站的观测数据, 应用 Bernese 5.2 反演得到大气总延迟 ZTD 数据, 采用 Saastamoinen 模型精确计算得到静力学延迟 ZHD 并利用相关关系解算出湿延迟 ZWD, 通过湿延迟 ZWD 与转换参数 Π 计算出大气可降水量 PWV 的综合值。

Abstract: Water vapor is an important part of the atmosphere, although it accounts for only 0.1%~3% of the whole atmosphere, it is the most active part of the atmosphere. Obtaining high-precision and high spatial-temporal resolution water vapor information can accurately distinguish the changes of small and medium-scale bad weather, which plays an important role in disaster prevention and reduction. In this paper, based on the observation data of 58 CORS stations in Hunan Province, China in 2015, the total atmospheric delay ZTD data is obtained by Bernese 5.2 inversion, the static delay ZHD is accurately calculated by saastamoinen model, and the wet delay ZWD is calculated by using the correlation solution, through the wet delay ZWD and the conversion parameters Π Calculate the comprehensive value of atmospheric precipitable water PWV.

关键词: CORS; PWV; GNSS 技术

Keywords: CORS; PWV; GNSS technology

DOI: 10.12346/se.v3i4.6357

1 引言

水汽及其变化是天气与气候变化的主要原因, 水汽时空变化对水平尺度 100km 左右、持续时长只有几小时的中小尺度灾害性天气(大暴雨、龙卷风等)的监测与预报有着重要的意义。近些年来, 随着科学技术的进步与发展, GNSS 技术逐渐成为一种新型的观测手段, 相比无线电气象探空仪、水汽辐射计和气象卫星等常规的观测手段, 相对于传统方法, 基于 GNSS 的水汽探测精度高、时空分辨率高, 是一种全天候、近实时的大气水汽测量方法^[1]。

本项目通过采集湖南省 58 个 CORS 站的观测数据, 运用 Bernese 5.2 软件反演出天顶对流层总延迟 ZTD (Zenith tropospheric delay), 总延迟 ZTD 由静力学延迟 ZHD (Zenith

hydrostatic delay) 和湿延迟 ZWD (Zenith wet delay) 组成; 通过插值得到测站温度、气压和相对湿度后, 利用 Saastamoinen 模型精确计算得静力学延迟 ZHD; 再利用 $ZWD=ZTD-ZHD$ 解算出湿延迟; 通过湿延迟 ZWD 与转换参数 Π 计算出大气可降水量 PWV 值。每 10 分钟测定一次 PWV 值, 在天气变化剧烈的情况下这些数据对监测严重的大暴雨、龙卷风等短时段恶劣的天气有着重要的作用。分析研究同一地区一天、一年中的 PWV 数据的变化, 可以分析得到该地区一天不同的时间段中天气的变化情况及不同季节对该地区天气情况的影响; 分析研究不同地区同一时间段的 PWV 数据, 可以分析得到纬度、高程等因素对天气情况的影响。所得结论对预测湖南省暴风雨、冰雹、龙卷风等恶

【作者简介】赵凯 (1982-), 男, 中国陕西西安人, 本科, 高级工程师, 从事测绘地理信息研究。

劣天气及防灾减灾有着重要的作用。

湖南省的地理概况对本项目的研究有着重要的指导作用，对所得到的实验结果有验证的作用。

2 研究区概况

湖南属于内陆省份，位于中国中南部长江中游以南，地图坐标为东经 109° ~114°，北纬 20° ~30°。

全省以中、低山与丘陵为主，面积约为 14.9 万平方公里，占 70.2%；岗地与平原约为 5.2 万平方公里，占 24.5%；河流湖泊水域面积约为 1.1 万平方公里，占 5.3%。西北有武陵山脉，西南有雪峰山脉，南部为五岭山脉（即南岭山脉），东面为湘赣交界诸山，湘中地区大多为丘陵、盆地和河谷冲击平原，除衡山高达千米以外其他均为海拔 500m 以下，湘北为洞庭湖、与湘、资、沅、澧四水尾间的河湖冲积平原，地势很低，一般海拔 50m 以下。东、南、西三面山地环绕，中部和北部地势低平，呈马蹄形的丘陵型盆地。湖南属亚热带季风气候，四季分明，气候温暖湿润，年降水量 1300~1800mm，自东南向西北递减；年平均气温 16℃ ~18℃。

3 数据处理流程

图 1 为本项目总技术路线。

①利用精密单点定位（Precise point positioning），应用 Bernese 5.2 反演得到了湖南省 58 个 CORS 站的大气总延迟 ZTD 数据，图 2 以 CDZX 测站 2015 年 1 月 5 日的部分数据为例，其中 TOTAL_U 一列为大气总延迟数据。

②总延迟 ZTD 分为静力学延迟 ZHD 和湿延迟 ZWD 两部分，静力学延迟 ZHD 主要受测站纬度、气压和测站海拔高度影响，占 ZTD 的 90% 左右，可 Saastamoinen 模型精确计算得到^[2]。由于得到的数据中没有气压参数，所以先利用 MATLAB 程序反演得到了不同时间各测站的气压、温度和相对湿度。图 3 为计算各测站的气压、温度和相对湿度的程序，图 4 为各参数计算结果（以 CDZX 测站 2015 年 1 月 1 日为例）。

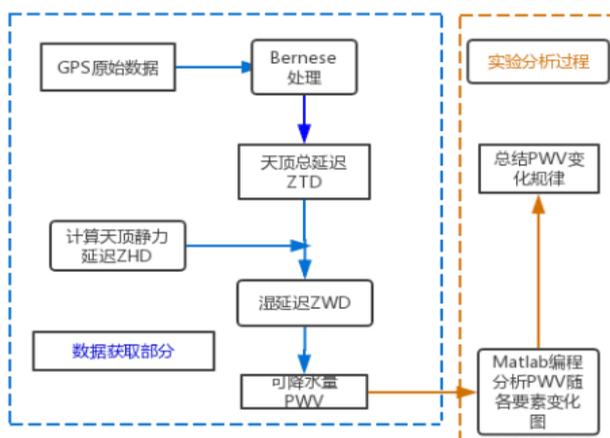


图 1 本项目总技术路线

PPP_150050: Collecting results 21-DEC-17 00:30

A PRIORI MODEL: -16 MAPPING FUNCTION: 6 GRADIENT MODEL: 4 MIN. ELEVATION: 3 TABULAR INTERVAL: 600 / 86400

STATION NAME	FLG	YYYY MM DD HH MM SS	YYYY MM DD HH MM SS	MOD_U	CORR_U	SIGMA_U	TOTAL_U	CORR_N	SIGMA_N	CORR_E	SIGMA_E
CDAX	A	2015 01 05 00 00 00	2.3143	0.14881	0.00196	2.46308	-0.00164	0.00004	0.00047	0.00005	
CDAX	A	2015 01 05 00 10 00	2.3143	0.14947	0.00157	2.46374	-0.00163	0.00004	0.00047	0.00005	
CDAX	A	2015 01 05 00 20 00	2.3143	0.15478	0.00138	2.46905	-0.00162	0.00004	0.00047	0.00005	
CDAX	A	2015 01 05 00 30 00	2.3143	0.15252	0.00148	2.46679	-0.00161	0.00004	0.00047	0.00005	
CDAX	A	2015 01 05 00 40 00	2.3143	0.15175	0.00114	2.46603	-0.00160	0.00004	0.00047	0.00005	
CDAX	A	2015 01 05 00 50 00	2.3143	0.15159	0.00104	2.46586	-0.00159	0.00004	0.00047	0.00005	
CDAX	A	2015 01 05 01 00 00	2.3143	0.14971	0.00099	2.46398	-0.00158	0.00004	0.00047	0.00005	
CDAX	A	2015 01 05 01 10 00	2.3143	0.14935	0.00103	2.46362	-0.00158	0.00004	0.00047	0.00005	
CDAX	A	2015 01 05 01 20 00	2.3143	0.15213	0.00107	2.46641	-0.00157	0.00004	0.00047	0.00005	
CDAX	A	2015 01 05 01 30 00	2.3143	0.14875	0.00107	2.46302	-0.00156	0.00004	0.00047	0.00005	
CDAX	A	2015 01 05 01 40 00	2.3143	0.15522	0.00100	2.46949	-0.00155	0.00004	0.00047	0.00005	
CDAX	A	2015 01 05 01 50 00	2.3143	0.15340	0.00092	2.46768	-0.00154	0.00004	0.00047	0.00005	
CDAX	A	2015 01 05 02 00 00	2.3143	0.15402	0.00105	2.46829	-0.00153	0.00004	0.00047	0.00005	
CDAX	A	2015 01 05 02 10 00	2.3143	0.15514	0.00107	2.46942	-0.00152	0.00004	0.00047	0.00005	
CDAX	A	2015 01 05 02 20 00	2.3143	0.15401	0.00113	2.46828	-0.00151	0.00004	0.00047	0.00005	
CDAX	A	2015 01 05 02 30 00	2.3143	0.15170	0.00104	2.46598	-0.00150	0.00004	0.00047	0.00005	
CDAX	A	2015 01 05 02 40 00	2.3143	0.15312	0.00087	2.46740	-0.00149	0.00004	0.00048	0.00005	
CDAX	A	2015 01 05 02 50 00	2.3143	0.15335	0.00082	2.46763	-0.00148	0.00004	0.00048	0.00005	
CDAX	A	2015 01 05 03 00 00	2.3143	0.15503	0.00081	2.46931	-0.00147	0.00004	0.00048	0.00004	
CDAX	A	2015 01 05 03 10 00	2.3143	0.15487	0.00095	2.46915	-0.00146	0.00004	0.00048	0.00004	
CDAX	A	2015 01 05 03 20 00	2.3143	0.15717	0.00100	2.47145	-0.00145	0.00003	0.00048	0.00004	
CDAX	A	2015 01 05 03 30 00	2.3143	0.15701	0.00118	2.47129	-0.00145	0.00003	0.00048	0.00004	
CDAX	A	2015 01 05 03 40 00	2.3143	0.16016	0.00146	2.47444	-0.00144	0.00003	0.00048	0.00004	
CDAX	A	2015 01 05 03 50 00	2.3143	0.16427	0.00163	2.47855	-0.00143	0.00003	0.00048	0.00004	
CDAX	A	2015 01 05 04 00 00	2.3143	0.15687	0.00116	2.47116	-0.00142	0.00003	0.00048	0.00004	
CDAX	A	2015 01 05 04 10 00	2.3143	0.16130	0.00099	2.47558	-0.00141	0.00003	0.00048	0.00004	
CDAX	A	2015 01 05 04 20 00	2.3143	0.16049	0.00101	2.47477	-0.00140	0.00003	0.00048	0.00004	

图 2 反演得到的大气总延迟 ZTD 数据

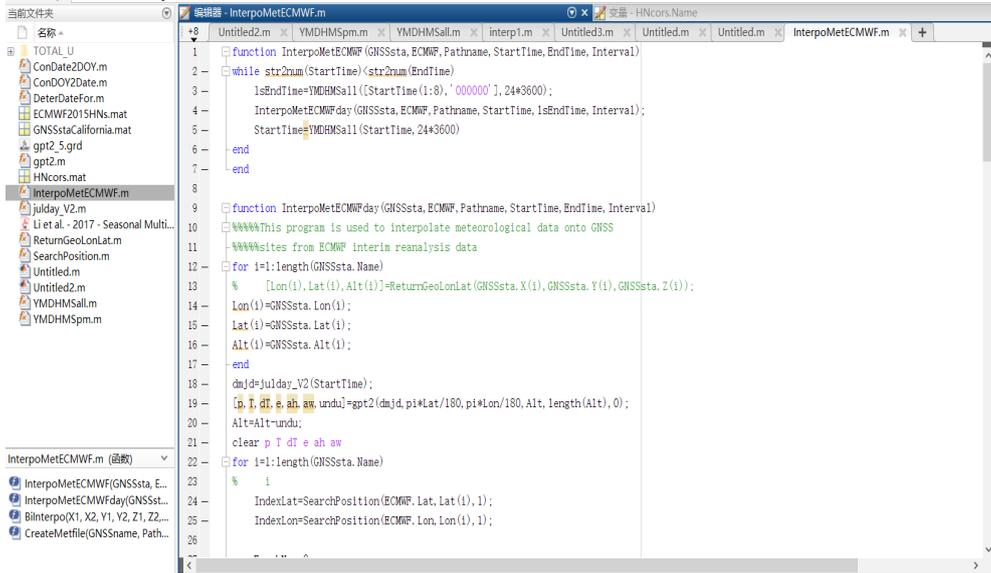


图 3 计算各测站的气压、温度和相对湿度的程序

2.11		METEOROLOGICAL DATA		RINEX VERSION / TYPE	
SPIDER V4.4,1,5228		2019 05 12 08:05		PGM / RUN BY / DATE	
CDAX		MARKER NAME		MARKER NUMBER	
3 PR TD HR		# / TYPES OF OBSERV		END OF HEADER	
15	01	01	00	00.00	1036.1 -0.8 63.8
15	01	01	00	10.00	1036.0 -0.6 64.1
15	01	01	00	20.00	1035.9 -0.5 64.4
15	01	01	00	30.00	1035.8 -0.3 64.7
15	01	01	00	40.00	1035.6 -0.1 65.1
15	01	01	00	50.00	1035.5 0.1 65.4
15	01	01	01	00.00	1035.4 0.2 65.7
15	01	01	01	10.00	1035.3 0.4 66.0
15	01	01	01	20.00	1035.2 0.6 66.3
15	01	01	01	30.00	1035.1 0.7 66.6
15	01	01	01	40.00	1035.0 0.9 66.9
15	01	01	01	50.00	1034.9 1.1 67.2
15	01	01	02	00.00	1034.8 1.3 67.5
15	01	01	02	10.00	1034.6 1.4 67.8
15	01	01	02	20.00	1034.5 1.6 68.1
15	01	01	02	30.00	1034.4 1.8 68.4
15	01	01	02	40.00	1034.3 1.9 68.7
15	01	01	02	50.00	1034.2 2.1 69.1
15	01	01	03	00.00	1034.1 2.3 69.4
15	01	01	03	10.00	1034.0 2.5 69.7
15	01	01	03	20.00	1033.9 2.6 70.0
15	01	01	03	30.00	1033.8 2.8 70.3
15	01	01	03	40.00	1033.7 3.0 70.6
15	01	01	03	50.00	1033.5 3.1 70.9
15	01	01	04	00.00	1033.4 3.3 71.2
15	01	01	04	10.00	1033.3 3.5 71.5
15	01	01	04	20.00	1033.2 3.7 71.8
15	01	01	04	30.00	1033.1 3.8 72.1

图 4 参数计算结果

③上一步中计算得到了测站纬度、气压和测站海拔高度，现利用 Saastamoinen 模型编程得到所有站点的大气干延迟 ZHD 数据。

$$ZHD_s = 0.2277 \cdot \frac{P_s}{F(\phi, H)} \quad (1)$$

$$F(\phi, H) = 1 - 0.0026 \cdot \cos(2\phi) - 0.00028H \quad (2)$$

式中， P_s 为测站处气压（hPa）， ϕ 为测站地理纬度， H 为测站海拔高度（km）。

④ ZWD 主要受信号传播路径上水汽的密度的影响，变化十分复杂，很难进行建模，所以利用大气总延迟 ZTD、大气干延迟 ZHD 和湿延迟 ZWD 三者之间的关系由公式（3）计算得到。

$$ZWD = ZTD - ZHD \quad (3)$$

⑤通过湿延迟 ZWD 与转换参数 Π 计算出大气可降水量 PWV 的综合值，可将湿延迟转换成可降水量，其中 Π 为转换系数。

$$PWV = \Pi \cdot ZWD \quad (4)$$

$$\Pi = \frac{10^6}{\rho_w R_v \left(\frac{k_3}{T_m} + k_2' \right)} \quad (5)$$

$$k_2' = k_2 - k_1 \frac{M_w}{M_d} \quad (6)$$

其中 k_1 k_2 k_3 均代表大气折射系数， $k_1 = 77.6890K \cdot hPa^{-1}$ 、 $k_2 = 71.2952K \cdot hPa^{-1}$ 、 $k_3 = 375463K^2 \cdot hPa^{-1}$ ， R_v 是水汽气体常数， M_w 是水汽摩尔质量， M_d 是干空气摩尔质量。

图 5 为计算得到的 PWV 值（以 CDAX 测站 2015 年 7 月 26 日为例）。

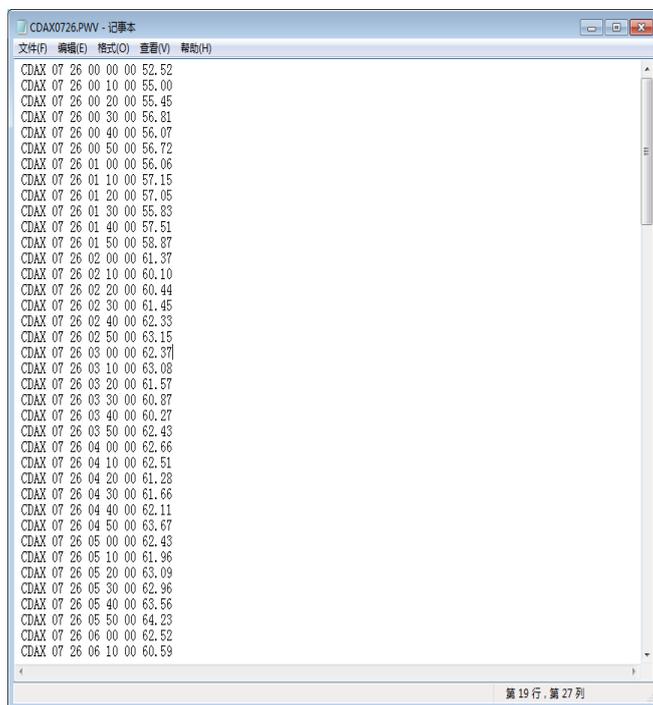


图 5 计算得到的 PWV 值

⑥通过利用 MATLAB 绘图功能得到的可降水量日变化、年变化图像，以及不同因素对可降水量的影响情况。

其中，日可降水量变化图见图 6~ 图 9。

通过对娄底双峰、郴州宜章、邵阳武冈、常德安乡四个站可降水量的日变化曲线可知，一日当中不同时段，可降水量表现为小幅度的波动，极大值通常出现在午后到傍晚，极小值出

现在早晨前后；从变化幅度分析，白天相对于晚上的可降水量变化幅度大。对比温度变化和相關研究得知：这主要是因为早晨随着气温升高、地表蒸发量增多，可降水量也随之变多；傍晚前后气温降低，蒸发量减少，可降水量也随之减少。

其中，日平均可降水量变化图（一年），见图 10~ 图 11。

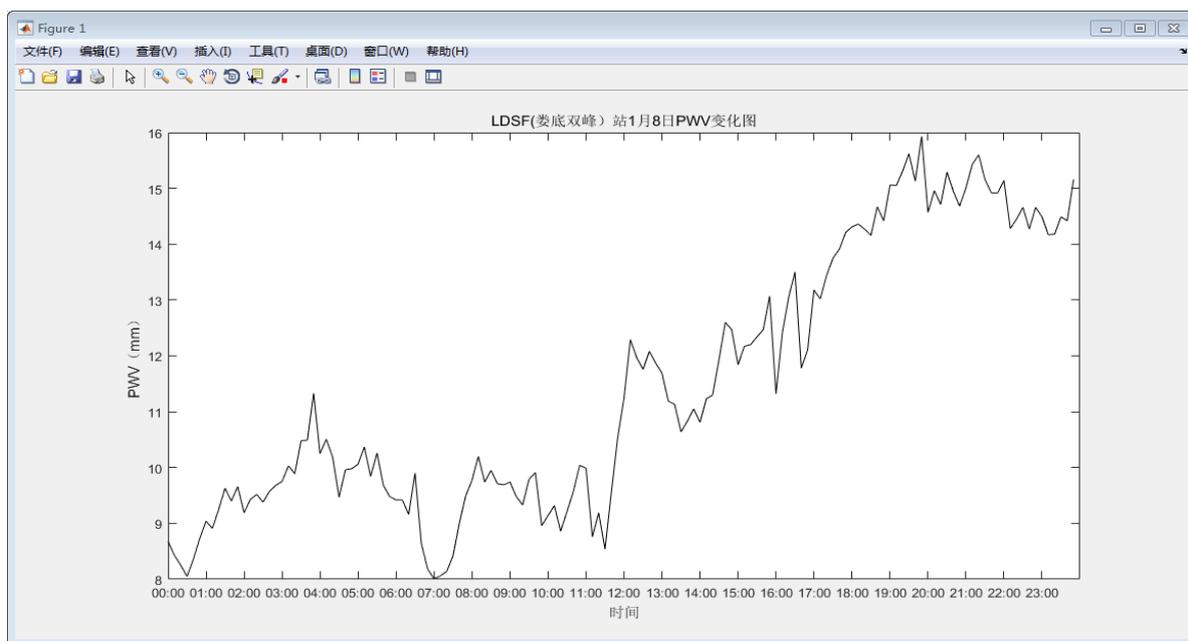


图 6 娄底双峰站 1 月 8 日可降水量变化图

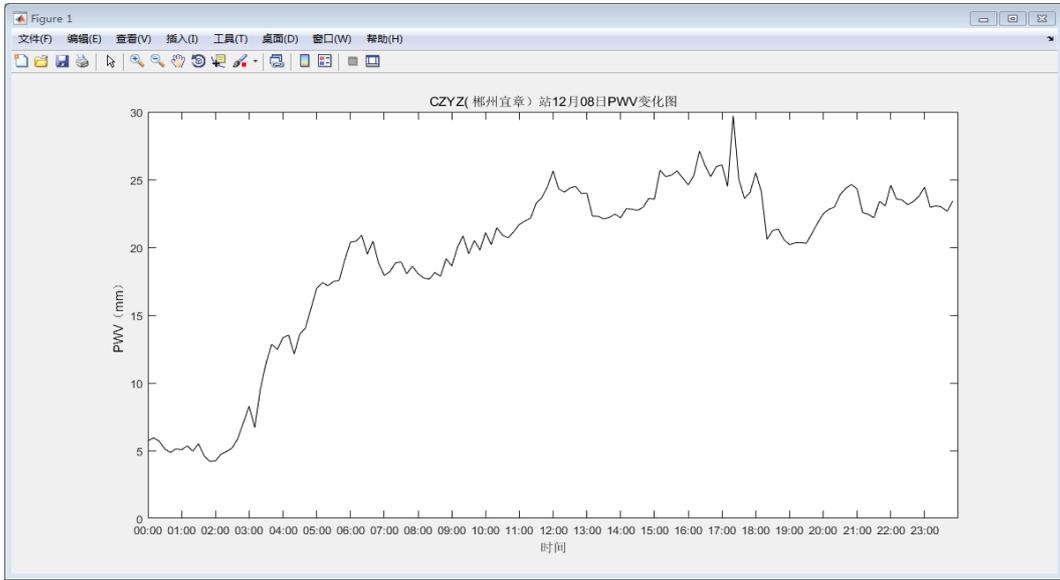


图 7 郴州宜章站 12 月 8 日可降水量变化图

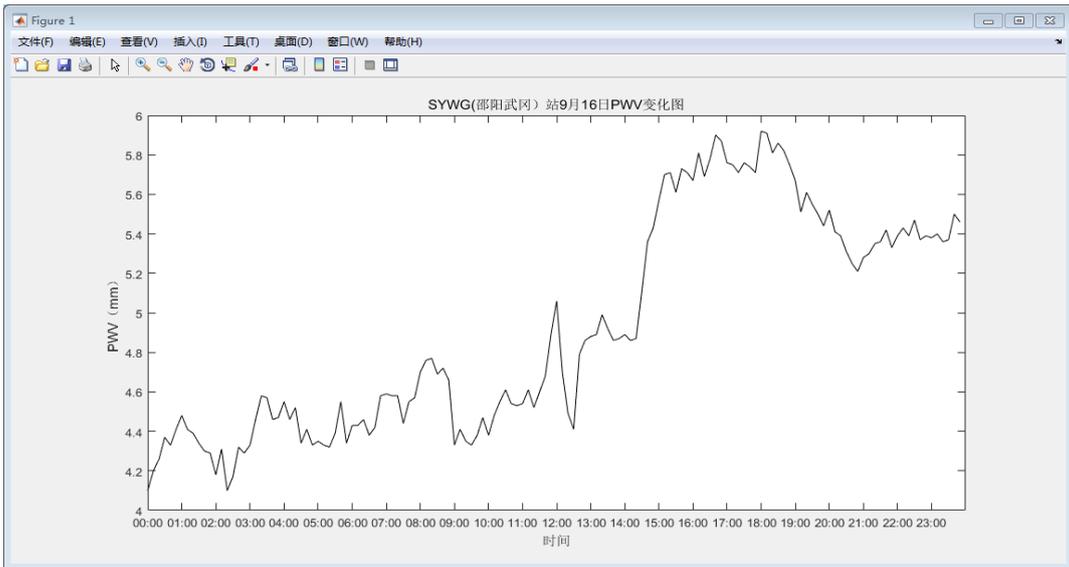


图 8 邵阳武冈站 1 月 8 日可降水量变化图

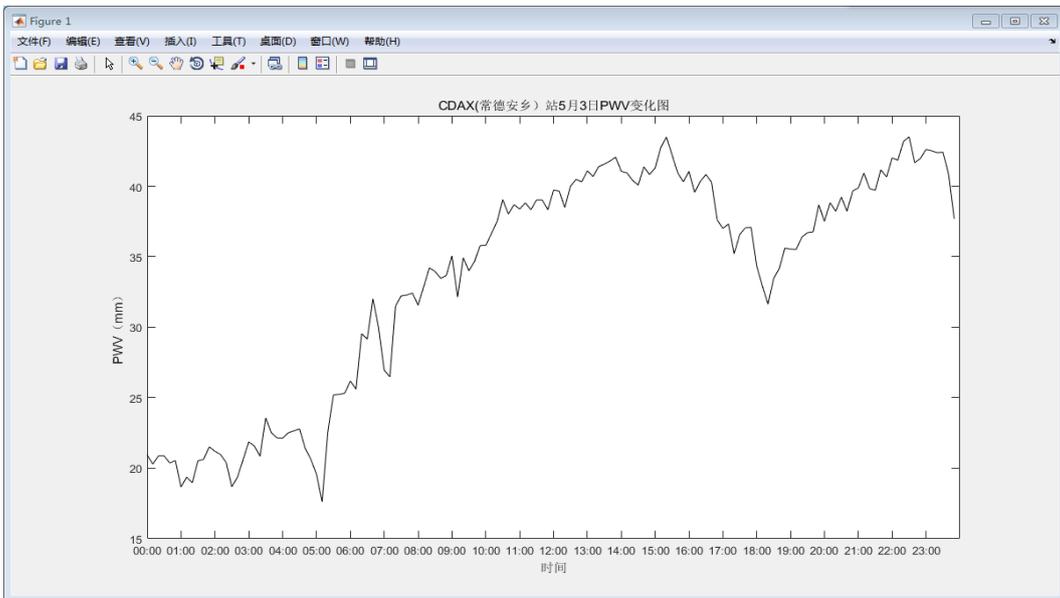


图 9 常德安乡站 1 月 8 日可降水量变化图

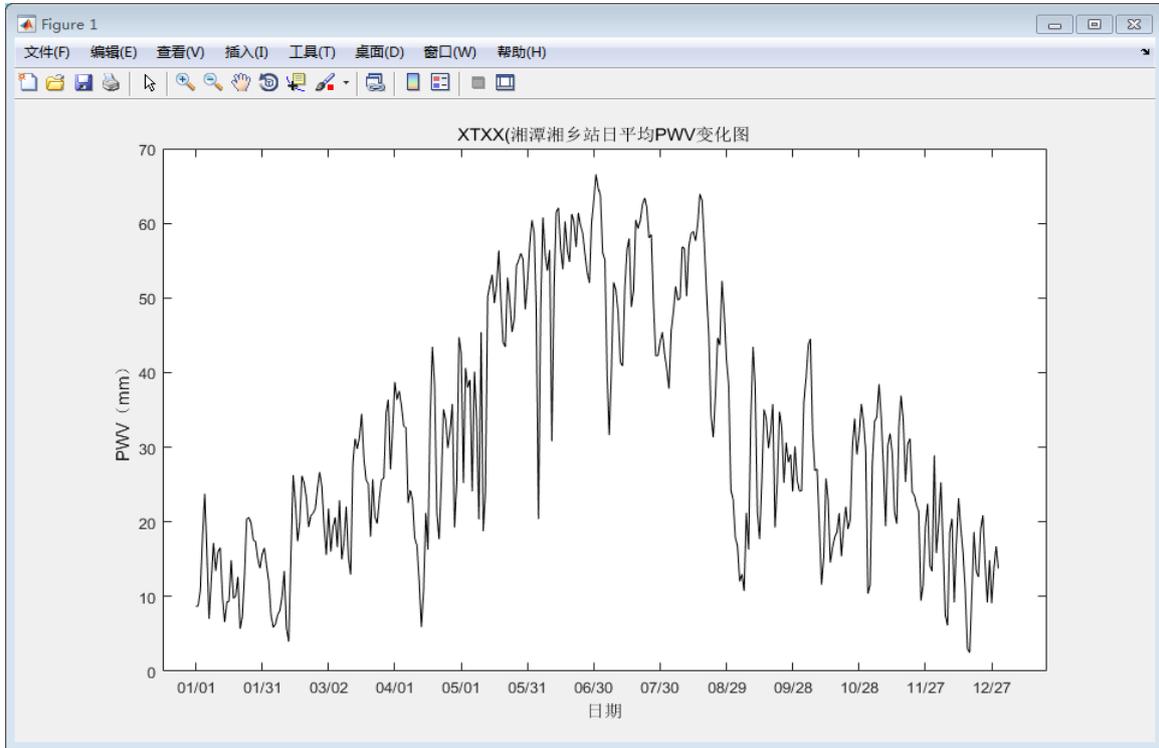


图 10 湘潭湘乡站日平均可降水量变化图

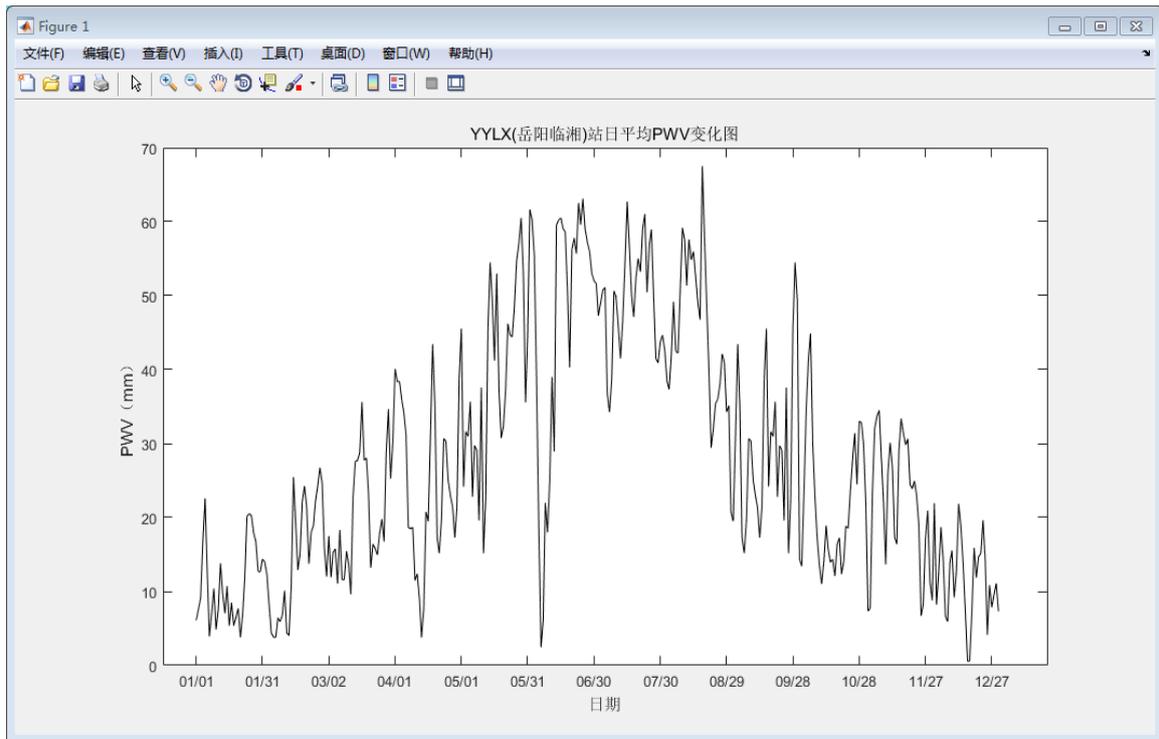


图 11 岳阳临湘站日平均可降水量变化图

分析湘潭湘乡站和岳阳临湘站的一年的日平均可降水量变化图得出，两站点一年中的日平均可降水量的时序变化特征基本相似，具体表现为以下方面：可降水量总体变化趋势表现为波动性的先增加后下降，从4月份开始逐渐增加，到6、7、8月份达到最大值，8月底后转为下降，冬季可降水量最

低。这与湖南省亚热带季风性湿润气候夏季降水多冬季降水少密切吻合。两站变化曲线的不同在于，在小尺度的变化上，每个站点时序变化的情况各不相同，而且湘潭湘乡站相对岳阳临湘站的可降水量更加趋于平稳。

其中，相近纬度不同高程可降水量对比见图 12~ 图 13。

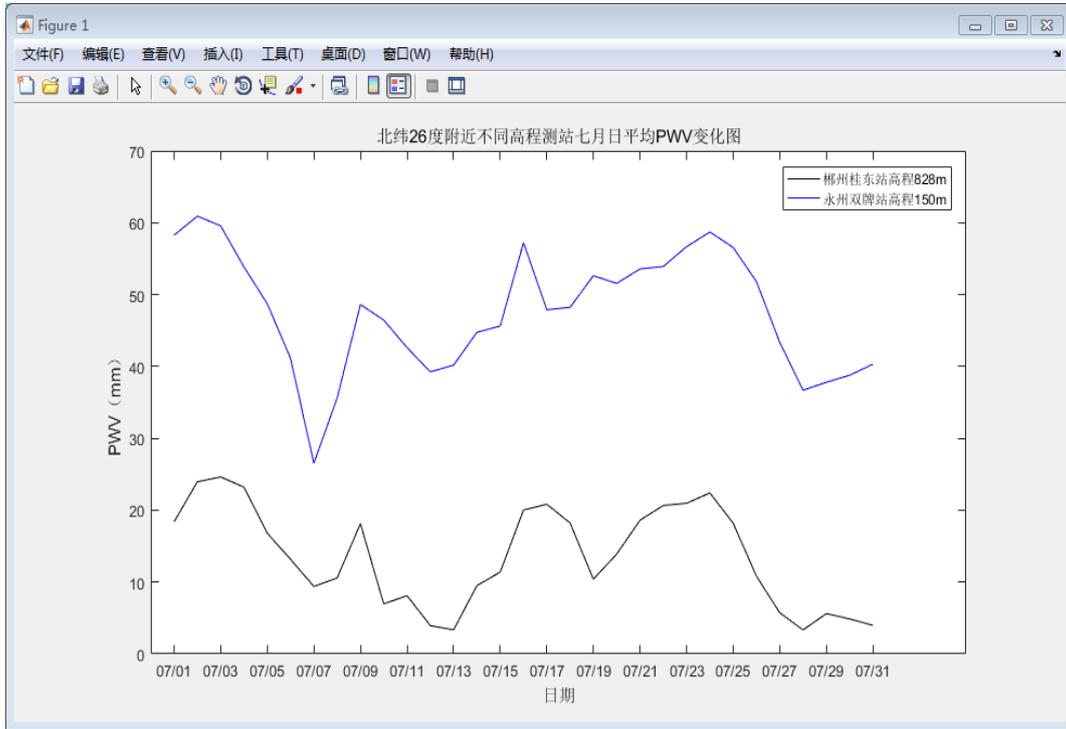


图 12 相近纬度不同高程七月日平均可降水量对比图
(郴州桂东与永州双牌站)

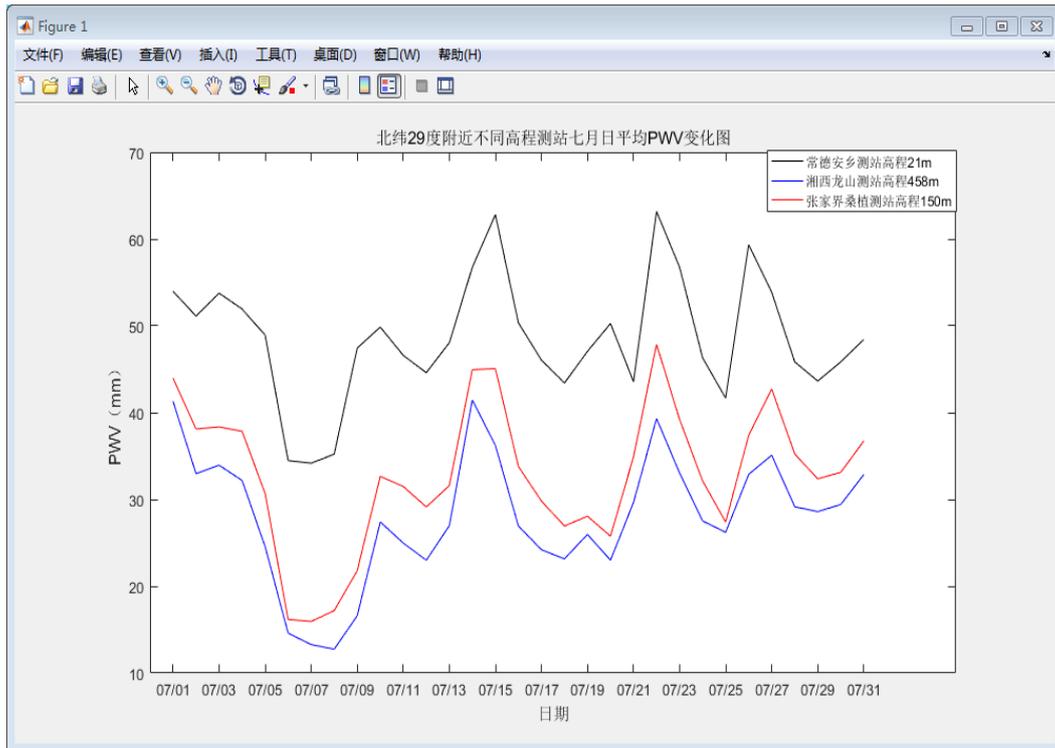


图 13 相近纬度不同高程七月日平均可降水量对比图
(常德安乡站、湘西龙山站、张家界桑植站)

通过在北纬 26° 附近选择了郴州桂东站 (828m) 与永州双牌站 (150m)、北纬 29° 附近选择了常德安乡站 (21m)、湘西龙山站 (458m)、张家界桑植站 (150m)。对比两组图像,可以得到在纬度、季节等其他因素相近时,在同一时段不同

地区的大气可降水量变化趋势相近,但随着高程的增加,可降水量会明显增加。这与地理学中降水在一定高度范围内随高度增加而增加是相吻合的。

其中,相近高程不同纬度可降水量对比见图 14~ 图 15。

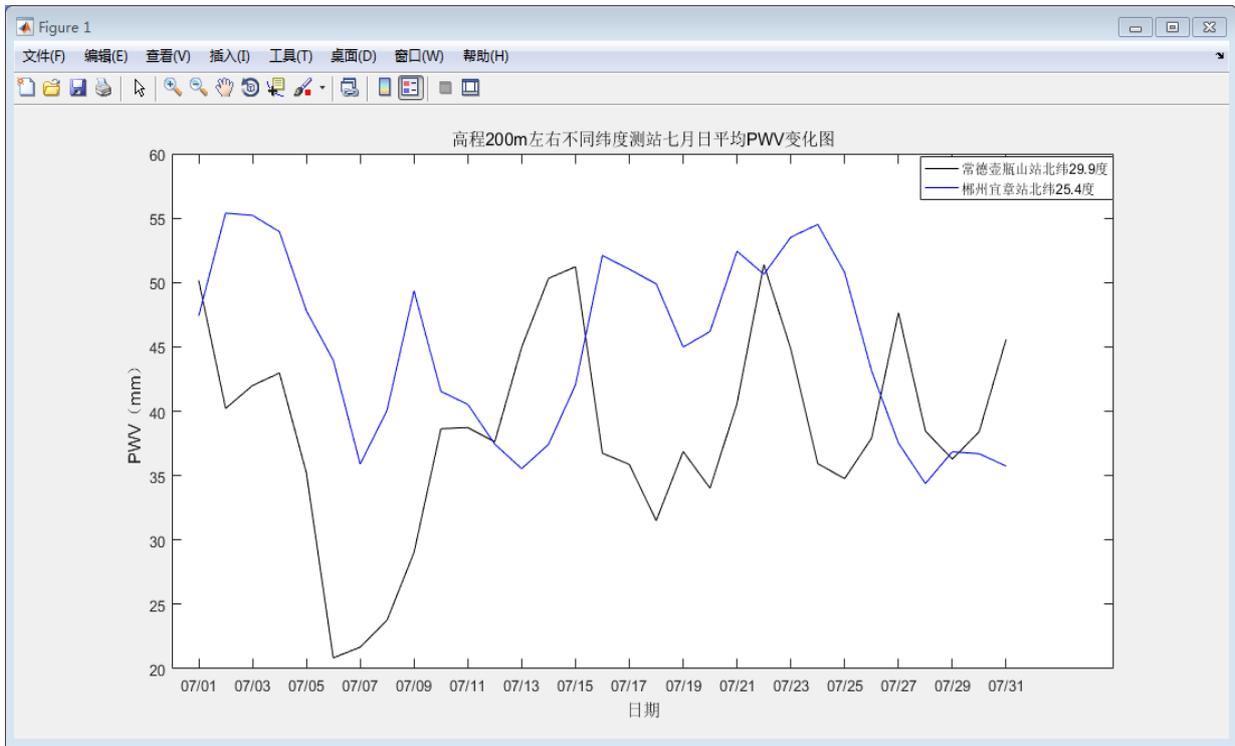


图 14 相近高程不同纬度七月日平均可降水量对比图

(常德壶瓶山站、郴州宜章站)

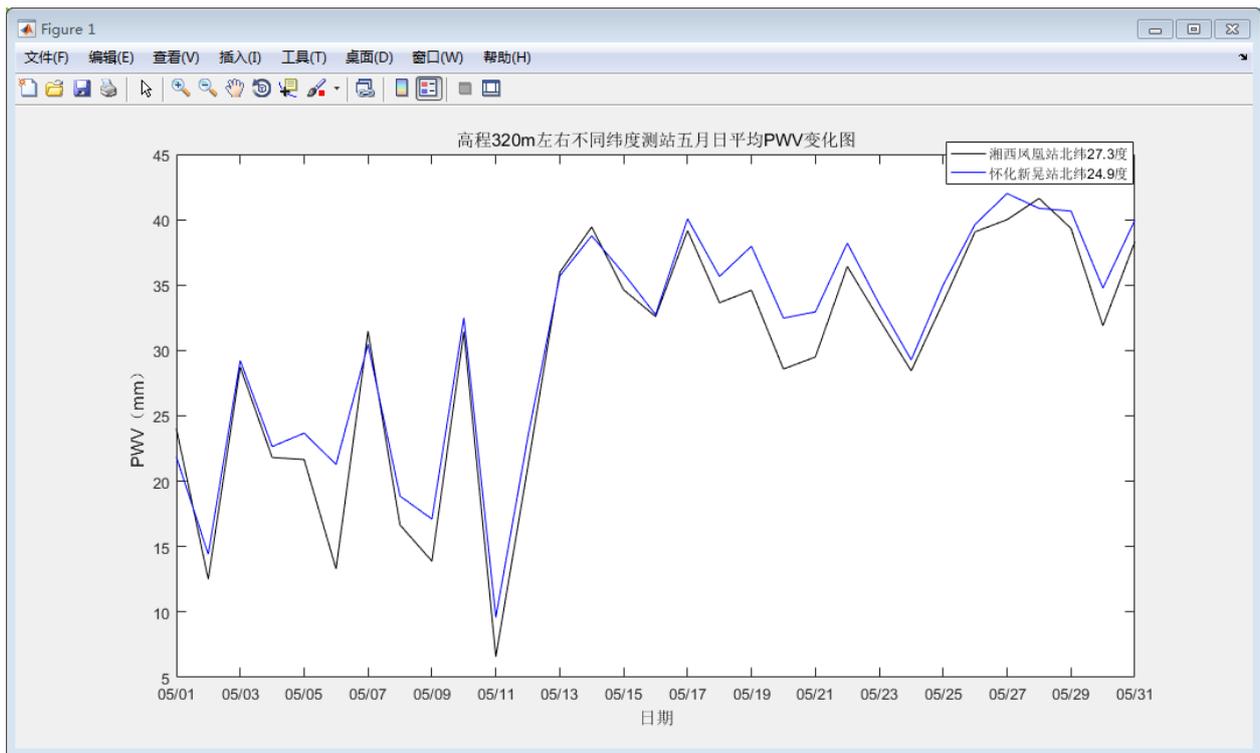


图 15 相近高程不同纬度五月日平均可降水量对比图

(湘西凤凰站、怀化新晃站)

通过在高程 200m 附近选择了常德壶瓶山站(北纬 29.9°)、郴州宜章站(北纬 25.4°)、高程 320m 附近选择了湘西凤凰站(北纬 27.3°)、怀化新晃站(北纬 24.9°)。对比两组图像,可以得到在高程等其他因素相近时,在同一时段不同地区的大气可降水量变化趋势相近(图 14 在部分时段可能由于小尺度的天气异常产生了差别)。随着纬度的增加,可降水量减少,这与地理学中降水量随纬度的增加而减少是相吻合的。但由于湖南省跨纬度范围有限,所以在探究这个问题时所得实验结果并不明显。

4 项目创新点

第一,本项目基于 58 个湖南连续运行参考站(CORS)对湖南省水汽时空变化进行分析,有效获取高精度、高时空分辨率的大气水汽信息。相比无线电气象探空仪、水汽辐射计和气象卫星等常规的观测手段,CORS 系统能够全年每天 24 小时连续不间断地运行,具有实时连续性、覆盖范围广、精度高、价格低廉等优势。它不仅能满足各种测绘工作的需求,还能满足环境、气候等动态信息监测的多种需要。

第二,探究日、月、年多时尺度的 PWV 变化,为进一步分析湖南地区 PWV 的气候分布提供先期基础,对服务于高精度中短期天气状况的预报对地球动力学、变形监测和地震监测等方面的内容有重要作用。

第三,在实际数据不全面的情况下,利用程序反演等到了实时的纬度、气压等参数,对后面的研究工作奠定了基础。

第四,基于 CORS 反演得到大气可降水量 PWV,探究不同纬度、地形对湖南省 PWV 时间序列及其动态分布变换的影响。

第五,静力学延迟 ZHD 主要受纬度、气压和测站高度的影响,约占 ZTD 的 90%,在计算静力学延迟 ZHD 时使用 Saastamoinen 模型计算,确保了计算的精度和准确度。

第六,本项采用 MATLAB 编程分析作为途径之一提高结果精度,但还可在今后的应用中进一步修正优化。

5 项目的意义和社会影响

该项目得到了湖南省站点的日、年大气水汽可降水量 PWV 的变化情况,探究了纬度、高程等因素对 PWV 值的影响。经过研究可得出以下结论:

①一天中可降水量表现为小幅度的波动,极大值通常出现在午到傍晚,极小值出现在早晨前后;从变化幅度分析,白天相对于晚上的可降水量变化幅度大。

②可降水量总体变化趋势表现为波动性的先增加后下

降,从 4 月份开始逐渐增加,到 6、7、8 月份达到最大值,8 月底后转为下降,冬季可降水量最低。

③在纬度、季节等其他因素相近时,随着高程的增加,可降水量会明显增加。

④在高程等其他因素相近时,随着纬度的增加,可降水量减少。

通过季节性影响可以预计恶劣天气出现的时间段,协助有关部门做好提前的预防工作;通过地形、纬度的影响可以预计恶劣天气出现的区域块,提前做好资源的分配和人员的调动工作。

目前,国内外学者基于连续运行参考站数据分析区域内的可降水量和实际降雨之间的规律,验证了 PWV 和降雨之间的关联性^[2-6]。Cao 等^[5]基于地基 GPS 观测值对鄱阳湖局部暴雨事件的分析发现 PWV 和大气中水汽的传输与聚集密切相关,降雨前 1h PWV 有一个急剧升高的过程,GPS-PWV 的应用有助于提高降雨短临预报的精度;Sapucci 等^[7]对 GPS-PWV 时间序列的小波分析进行研究表明,最大降雨前 15~60min, PWV 时间序列到达波峰;利用以上文献资料,可以将实时的 CORS 网数据带入到项目研究过程当中,得到精确的 PWV 值,对恶劣天气进行短临预报,通知相关部门采取灾害预警措施,有效防止恶劣天气对人员和财产带来的严重损失,确保湖南人民的生产生活不受强烈影响。

参考文献

- [1] 李国平,陈娇娜,黄丁发,等.地基GPS水汽实时监测系统及其气象业务应用[J].武汉大学学报:信息科学版,2009,4(11):1328-1331.
- [2] Bevis M, Businger S, Chiswell S, et al. GPS Meteorology: Mapping Zenith Wet Delays onto Precipitable Water[J]. Journal of Applied Meteorology, 1994, 33(3): 379-386.
- [3] 李黎,匡翠林,朱建军,等.基于实时精密单点定位技术的暴雨短临预报[J].地球物理学报,2012,55(4):1129-1136.
- [4] 王勇,何荣,杨彬云,等.GPS反演的可降水量与降水的对比分析研究[J].测绘科学,2010,35(5):80-82.
- [5] 李黎,田莹,谢威,等.基于探空资料的湖南地区加权平均温度本地化模型研究[J].大地测量与地球动力学,2017,37(3):282-286.
- [6] Cao Y, Guo H, Liao R, et al. Analysis of Water Vapor Characteristics of Regional Rainfall around Poyang Lake Using Ground-Based GPS Observations[J]. Acta Geodaetica et Geophysica, 2015, 51(3): 467-479.
- [7] Sapucci L F, Machado LAT, de Souza E M, et al. GPS-PWV Jumps before Intense Rain Events[J]. Atmospheric Measurement Techniques Discussions, 2016(5): 1-27.