

李育,徐安伦,董保举.大理地基GPS观测大气可降水量变化特征[J].气象研究与应用,2020,41(3):32-37.

LI Yu, Xu Anlun, Dong Baoju. Variation characteristics of precipitable water volume observed by GPS in Dali [J]. Journal of Meteorological Research and Application, 2020, 41(3): 32-37.

大理地基GPS观测大气可降水量变化特征

李育^{1,2}, 徐安伦^{1,2}, 董保举^{1,2}

(1.大理国家气候观象台, 云南 大理 671003; 2.大理市气象局, 云南 大理 671003)

摘要:利用中日JICA项目2010—2013年大理地基GPS探测的逐时大气可降水量PWV资料,分析PWV的日变化、月变化及季节变化特征,选取不同季节典型晴天、雨天进行分析对比,探讨有、无降水日PWV的差异特征,与大理国家基准气候站同期降水、气温、水汽压、相对湿度分析对比。结果表明,PWV晴天日变化特征与气温相似,呈单峰型分布,雨天时,PWV会在降雨前或降雨时出现峰值,通常呈现准双峰型日变化特征,其日变化特征湿季比干季更为显著,PWV季节变化特征与水汽压、气温、降水趋势接近,与大理地区干湿季分明的低纬高原季风气候吻合。

关键词:大气可降水量;日变化;季节变化;大理

中图分类号: P412.13 **文献标识码:** A **doi:** 10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2020.3.06

OSID:



引言

水汽及其变化是天气和气候的主要驱动力,是大气运动中最不均匀、最富于变化的成分,水汽也是较难描述的气象参数之一^[1-3],地基GPS水汽观测可以获得很高时间分辨率和达到毫米精度的水汽资料,以补充探空资料在时间分辨率上的不足,提供水汽快速变化的信息。目前,GPS气象学迅速发展成为一个前沿性、多学科交叉的研究领域,利用GPS技术遥测大气可降水量的研究取得很大进展^[4-6],在天气分析^[7]、预报^[8]、数值模式^[9]等方面获得了广泛深入的应用。大理地处孟加拉湾西南季风的迎风区,东亚水汽通道上游,是南支槽东移和孟湾风暴北进东移入境的主要通道,但由于大理无探空站,高空水汽探测资料缺乏,对大理PWV进行研究,旨在能初步了解本地高空水汽变化特征,为后期深入研究打下基础,对大理及水汽通道下游地区的降水天气预报预测提供一定参考。本文利用中日JICA项目^[10]2010—2013年大理大气可降水量(以下简称PWV)数据,分析其日变化、月变化及季节变化特征,并与

同期降水、气温、水汽压和相对湿度对比,找出大理上空PWV变化特征。

1 试验场地、观测仪器和资料处理

大理国家气候观象台依托JICA项目,于2007年2月建立地基GPS/MET观测系统。布设在大理国家气候观象台观测场内,位于大理古城以东约2km。设备采用美国天宝Trimble NetRS GPS接收机,Zephyr Geodetic测地GPS天线,通过Trimble GPSBase软件实现管理。主要观测要素有:大气可降水量(PWV)、中性大气的总延迟量、大气的湿延迟量、电离层电子浓度(TEC)。本文选取的大理2010—2013年PWV资料是经过云南省气象科学研究所对GPS探测的原始资料,使用GAMIT解算方案进行实时解算得到的^[11],气温、降水等其它要素选取同期大理国家基准气候站观测资料。

2 地基GPS遥测大气可降水量基本原理及算法

2.1 基本原理

收稿日期:2020-03-15

基金项目:云南省大理州气象局科研项目“云南地基GPS水汽反演系统评估及应用”

作者简介:李育(1979—),男,云南大理人,学士,工程师,主要从事中短期天气预报及GPS水汽探测研究。E-mail:870297873@qq.com

GPS 卫星发射的无线电波信号穿过大气层时, 受到电离层电子和平流层、对流层大气的折射, 由于速度的减弱和路径的弯曲造成信号的延迟。大气延迟量可分为电离层延迟、静力延迟和湿延迟, 电离层延迟、静力延迟分别通过双频技术、地面气象要素订正得出, 最终得到的湿延迟可以解算出精确的大气可降水量^[12]。

2.2 算法

Bevis^[13]等人给出了湿延迟 ZW 与 PWV 的关系式:

$$W_{\text{pwv}} = \Pi \cdot Z_w \quad (1)$$

其中, W_{pwv} 为水汽的积分总量, Z_w 为湿项天顶延迟, Π 为常数 (大约为 0.15), 可通过地面气温的观测和历史资料的统计而得到:

$$\Pi = \frac{10^6}{R_v [(k_3/T_m) + k'_2]} \quad (2)$$

其中, $R_v = 461.495 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, $k'_2 = k_2 - mk_1$, k_1 , k_2 和 k_3 为大气的折射指数, m 为水汽和干空气的分子量比。取 $k_3 = 3.739 \times 10^5 \text{ K}^2 \cdot \text{hPa}^{-1}$, $k'_2 = 22 \text{ K} \cdot \text{hPa}^{-1}$, T_m 为加

权平均温度, 通过地面温度 (T_s) 的观测来估算: $T_m = a + b \cdot T_s$, 取 $a = 70.2$, $b = 0.72$ ^[14]。

3 结果分析

3.1 日变化特征的对比分析

3.1.1 干季典型晴天

大理由于受季风影响, 冬半年和夏半年控制大理地区的气团性质截然不同, 形成雨热同季, 干凉同季, 夏秋多雨, 冬春多旱, 干湿季分明的季风气候^[15]。通过干季典型晴天 PWV 与气温、水汽压、相对湿度对比 (图 1), 可看出干季的 PWV、水汽压总体处于低位运行, 日较差小, 日变化特征不显著, PWV 与气温日变化特征相关, 呈单峰型特征, 峰值通常出现在气温峰值后的 17:00—19:00 (北京时, 下同), 最低值通常出现 3:00—4:00 或 6:00—7:00。水汽压与相对湿度日变化特征相关, 峰值通常出现在 8:00—9:00, 最低值出现在 17:00—18:00。相对湿度与气温的日较差大, 日变化特征显著, 且两者变化呈反相关。

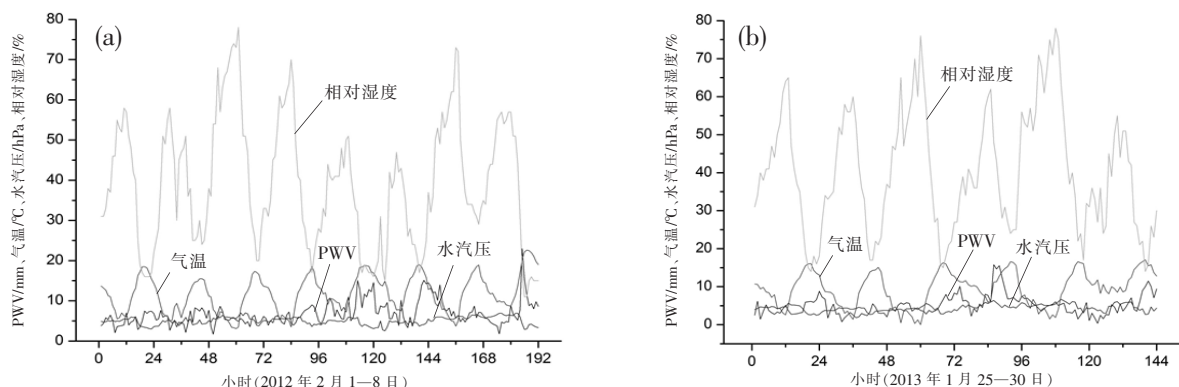


图 1 2012 年 2 月 1—8 日 (a) 和 2013 年 1 月 25—30 日 (b) PWV、气温、水汽压、相对湿度逐小时对比

3.1.2 湿季典型晴天

通过湿季晴天 PWV 与气温、水汽压、相对湿度对比 (图 2), 可看出湿季的 PWV、水汽压较干季有明显上升, 日较差增大, 日变化特征更为显著, PWV 与气温日变化特征相似, 呈单峰型特征, 白天 PWV 的变化较大, 夜间相对稳定, 日变幅小于 4mm, 峰值出现在 16:00—18:00, 最低值出现在 6:00—8:00, 大理地区的 PWV 日循环特征与地面气温基本一致, 皆受太阳辐射日变化的控制^[16-17]。水汽压与相对湿度日变化特征相似, 峰值出现在 6:00—8:00, 最低值出现在 16:00—18:00, PWV、气温和水汽压、相对湿度两组要素的日变化特征呈现反相关。

3.1.3 典型雨天

通过典型雨天 PWV 与气温、水汽压、相对湿度对比 (图 3), 可看出各要素日较差比晴天有所减小, 降雨前或降雨时段的日变化特征有所改变。由于降雨通常伴有降温, 气温持续低位运行, 峰值不明显, PWV 与气温相关性降低。PWV 在降雨前或降雨时出现峰值, 呈现准双峰型特征^[16], 降水大多出现在高于大气可降水量基值的时段, 当 PWV 下降到一个稳定状态后, 主降水过程随之结束, PWV 的持续性递增和持续性递减预示着降水的开始和结束^[17-18]。如 2013 年 7 月 18 日 1:00 出现在降雨过程开始前的峰值, 2012 年 7 月 28 日 1:00、2013 年 7 月 21 日 5:00、

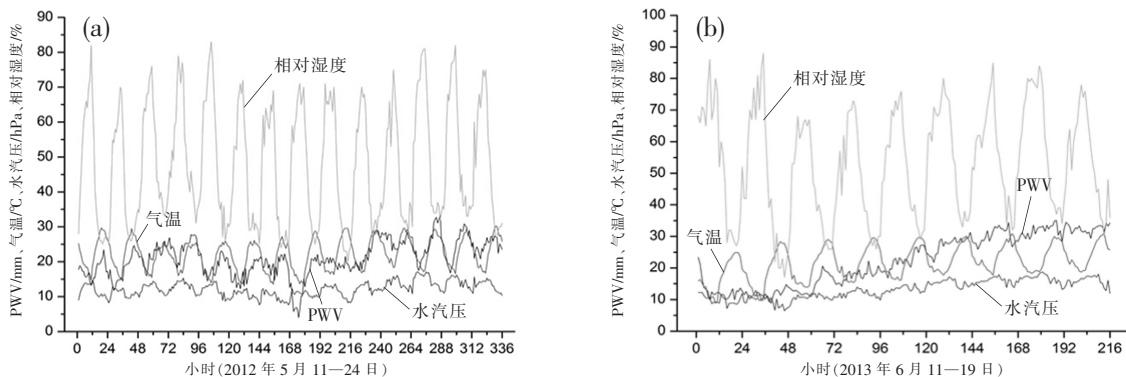


图2 2012年5月11—24日(a)和2013年6月11—19日(b)PWV、气温、水汽压、相对湿度逐时对比

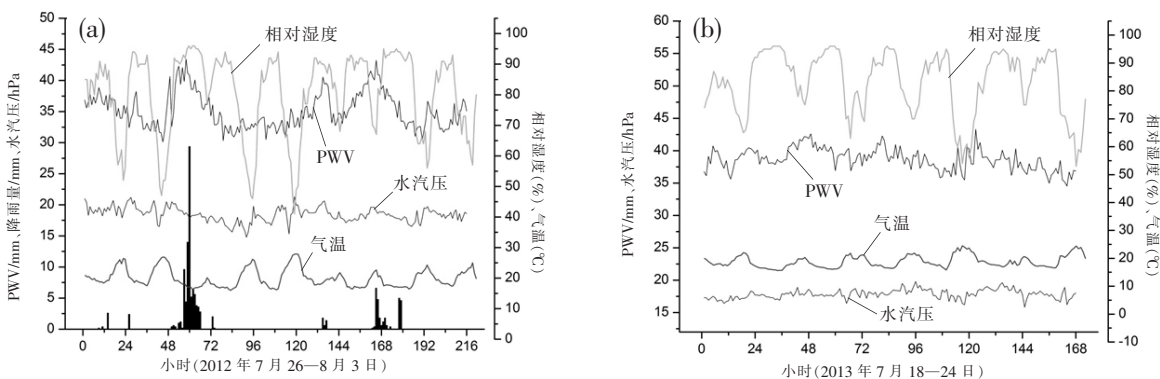


图3 2012年7月26日—8月3日(a)和2013年7月18—24日(b)PWV、气温、水汽压、相对湿度、降雨量逐时对比

7月23日1:00出现在降雨过程初期的峰值,这是PWV独特的变化特征,PWV湿季日变化特征在无降水日比有降水日更显著^[19]。水汽压峰值不明显,PWV和相对湿度在降雨时段总体处于高位运行。

3.1.4 全年日变化特征

通过大理干、湿季PWV日变化特征分析,得出全年平均日变化特征(图略),可看出,6:00—7:00为日最低值,9:00后水汽迅速上升,至16:00—17:00达到峰值,18:00后开始下降,夜间持续处于低位运行。水汽的变化取决于平流输送、局地辐合辐散和地表蒸发,但平流输送和辐合辐散与短期内的天气系统、局地环流、风速等相关,在平均状态下,地表的蒸发为水汽供应的贡献更为显著^[16]。

3.2 月变化特征的对比分析

3.2.1 2010—2013年PWV、气温和水汽压逐月平均对比

PWV、气温和水汽压月平均变化趋势相似,PWV与水汽压存在着良好的线性对应关系(图4),相关系数达到0.984,通过经验公式 $W=1.74e$,其中

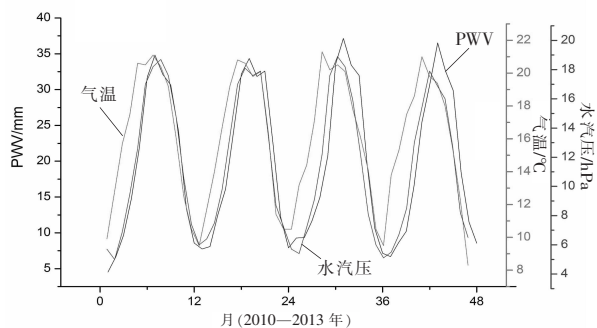


图4 2010—2013年PWV、气温、水汽压逐月平均对比

W 为可降水量, e 为水汽压,且经验系数具有地域和年度稳定性,使没有地基GPS资料或探空资料的地区,利用地面水汽压也可轻易地计算得到整层大气可降水量^[20-23]。最低值通常出现在1月或12月,PWV和水汽压峰值大多出现在7月(PWV峰值均出现在7月,2010年水汽压峰值出现在8月),气温峰值出现时间往往较PWV和水汽压提前,2012年出现在5月,2011、2013年出现在6月,2010年出现在7月。2012—2013年PWV峰值高于2010—2011年,

最大值为 2012 年 7 月的 37.2mm。

3.2.2 2010—2013 年 PWV、气温和水汽压月平均对比

从 2010—2013 年平均看 (图 5), PWV 与水汽压变化趋势更为接近, 峰值均出现在 7 月, 气温峰值出现在 6 月, 1—6 月气温峰值出现时间均比 PWV 和水汽压提前, 表明水汽的蒸发循环与气温的驱动密不可分, 7—12 月随着气温逐步降低, PWV 和水汽压也同步下降。

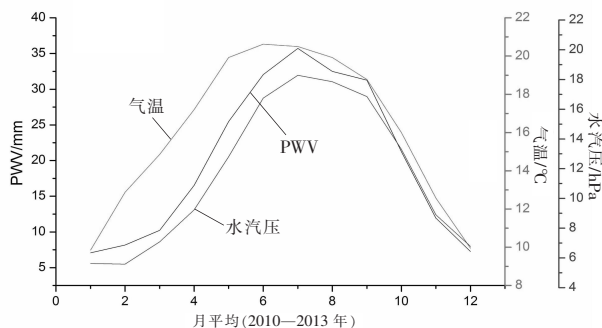


图 5 2010—2013 年 PWV、气温、水汽压月平均变化对比

3.2.3 2010—2013 年 PWV 月平均和月降雨量对比

PWV 月平均值与干湿季对应较好 (图 6), PWV 峰值均出现在 7 月, 最低值大都出现在 1 月 (2011 年出现在 12 月), 月降雨量峰值 2010、2011 年出现在 7 月, 2012 年出现在 9 月, 2013 年出现在 8 月, PWV 峰值出现时间与雨量峰值相同或提前于雨量峰值出现时间。

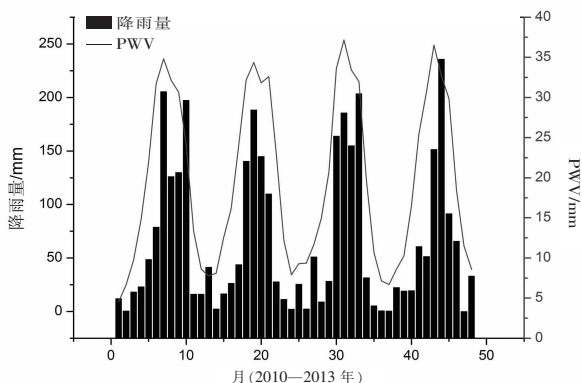


图 6 2010—2013 年逐月 PWV、降雨量对比

3.3 季节变化特征的对比分析

3.3.1 春、秋季变化特征

2010—2013 年季节变化看出 (图略), 春、秋两季 PWV 变化趋势单一, 春季呈现稳定增强趋势, 秋季相反, 呈现持续减弱趋势, 各月之间 PWV 的变化

幅度较大, 各月 PWV 保持在各自运行区间, 无交叉出现, 4—5 月, PWV 往往出现较大跃升, 对于干季向雨季的转换有一定指示作用。

3.3.2 冬、夏季变化特征

2010—2013 年季节变化看出 (图略), 冬季 PWV 处于最低值, 月最高值为 2012 年 2 月的 9.3mm, 2 月 PWV 总体略高于 12 月和 1 月, 各月间存在交叉, 且波动较大, 这与冬季受冷空气、南支槽等活动及影响程度相关。夏季 PWV 变化幅度较小, 呈现先增后减的趋势, 7 月出现全年最高值, 4 年平均为 35.7mm, 6 月、8 月 PWV 较为接近。

3.3.3 季节变化特征

大理 PWV 月变化明显, 夏季最大, 6—8 月的 PWV 占全年总量的 42%, 秋、春季次之, 各占可降水总量的 27% 和 22%, 冬季最小, 仅占全年总量的 9%。1—2 月 PWV 值维持在一年中的最低位置, 3 月开始逐渐增加, 7 月达到全年峰值, 10 月迅速减小, 1 月又降至最低值。PWV 在 4—5 月增幅较大, 9—11 月持续下降^[24], 这与云南受南亚季风和东亚季风共同影响, 干季向雨季、雨季向干季转换的特征较为一致, PWV 的季节特征与季风气候下低纬高原干湿季分明, 干季一般为 1 月至次年 4 月, 雨季一般为 5—10 月的气候特征对应较好^[25]。

4 结论

利用 2010—2013 年大理大气可降水量 PWV 和同期大理国家基准气候站常规气象资料, 分析大理地区大气降水量的日变化、月变化及季节变化特征, 得出以下结论:

(1) 大理 PWV 晴天日变化特征与气温相似, 呈单峰型分布, 06—07 时为日最低值, 16—17 时达到峰值, 雨天时, PWV 会在降雨前或降雨时出现峰值, 呈现准双峰型日变化特征。总体上, PWV 干季和湿季的日变化特征与全年平均日变化特征基本一致, 但湿季 PWV 日较差比干季大, 日变化特征也更为显著。

(2) 大理 PWV 月变化特征与水汽压、气温趋势接近, 1—6 月气温峰值出现时间均比 PWV 和水汽压提前, PWV 峰值比雨量峰值时间提前, PWV 与水汽压存在良好线性对应关系。

(3) 大理 PWV 春季、秋季变化趋势单一, 春季呈现稳定增强, 秋季相反, 呈现持续减弱, 4—5 月 PWV 往往出现较大跃升, 对于干季向雨季的转换有一

定指示作用。冬季受冷空气、风力等因素影响,变化波动大。夏季呈现先增后减的趋势。PWV 季节变化特征与大理地区干湿季分明的低纬高原季风气候较为吻合。

参考文献:

- [1] 李国平, 黄丁发. GPS 遥感区域大气水汽总量研究回顾与展望[J]. 气象科技, 2004, 32(4): 201-205.
- [2] 曹云昌, 方宗义, 夏青. 地空基 GPS 探测应用研究进展[J]. 南京气象学院学报, 2004, 27(4): 565-572.
- [3] 谷晓平, 王长耀, 蒋国华. 地基 GPS 遥感大气水汽含量及在气象上的应用[J]. 气象科学, 2005, 25(5): 5543-5550.
- [4] 王小亚, 朱文耀, 严豪建, 等. 地面 GPS 探测大气可降水量的初步结果[J]. 大气科学, 1999, 23(5): 3-5.
- [5] 李国平, 黄丁发. GPS 气象学研究及应用的进展与前景[J]. 气象科学, 2005, 25(6): 651-661.
- [6] 丁金才. GPS 气象学及其应用[M]. 北京: 气象出版社, 2009.
- [7] 杨红梅, 徐宝祥, 周秀骥, 等. GPS 资料在天气分析中应用[J]. 气象科技, 2000, 28(4): 32-34, 37.
- [8] 王源程, 苏鹏程, 陈聪, 等. 地基 GPS 反演泥石流流域局地降水水汽特征—以云南东川蒋家沟为例[J]. 山地学报, 2016, 34(6): 749-756.
- [9] 王曼, 孙绩华, 赵韬, 等. 青藏高原东缘 GPS 水汽资料对暴雨模拟的影响分析[J]. 高原山地气象研究, 2013, 33(4): 25-29, 48.
- [10] 于淑秋, 王继志, 丁国安. 中日 JICA 计划项目—我国高原及周边新一代气象灾害综合监测网系统建设取得进展[J]. 气象学报, 2007, 65(6): 1011-1012.
- [11] 孙绩华, 吴萍, 刘建宇. 云南地基 GPS 水汽解算方案及精度检验 [J]. 南京信息工程大学学报: 自然科学版, 2013, 5(2): 106-112.
- [12] 陈俊勇. 地基 GPS 遥感大气水汽含量的误差分析[J]. 测绘学报, 1998, 27(2): 3-5.
- [13] Bevis M, Businger S, Herring T A, et al. GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system [J]. Journal of Geophysical Research, 1992, 97(D14): 15787-15801.
- [14] 李成才, 毛节泰, 李建国, 等. 全球定位系统遥感水汽总量[J]. 科学通报, 1999, 44(3): 3-5.
- [15] 秦剑, 琚建华, 谢明恩, 等. 低纬高原天气气候[M]. 北京: 气象出版社, 1997.
- [16] 海云莎, 孙绩华, 陈新梅. 2007-2010 年云南 GPS 观测大气可降水量特征分析[J]. 云南地理环境研究, 2011, 23(2): 78-84.
- [17] 李国平, 黄丁发, 刘碧全. 地基 GPS 遥感的成都地区夏季可降水量的日循环合成分析[J]. 水科学进展, 2006, 17(2): 160-163.
- [18] 陈小雷, 景华, 全美然, 等. 地基 GPS 遥测大气可降水量在天气分析诊断中的应用[J]. 气象, 2007, 33(6): 19-24.
- [19] 梁宏, 刘晶森, 陈跃. 地基 GPS 遥感的祁连山区夏季可降水量日变化特征及成因分析[J]. 高原气象, 2010, 29(3): 726-736.
- [20] 杨景梅, 邱金桓. 我国可降水量同地面水汽压关系的经验表达式[J]. 大气科学, 1996, 20(5): 620-626.
- [21] 张学文. 可降水量与地面水汽压的关系[J]. 气象, 2004, 30(2): 9-11.
- [22] 李颖, 张俊东, 罗鹏. 大气可降水量估算模型研究[J]. 气象与环境科学, 2013, 36(12): 21-25.
- [23] 李超, 魏合理, 刘厚通, 等. 整层大气水汽含量与地面水汽压相关性的统计研究[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2008, 3(11): 1170-1173.
- [24] 符睿, 段旭, 刘建宇, 等. 云南地基 GPS 观测大气可降水量变化特征[J]. 气象科技, 2010, 38(4): 456-462.
- [25] 段旭, 尤卫红, 郑建萌. 云南旱涝特征[J]. 高原气象, 2000, 19(1): 84-90.

Variation characteristics of precipitable water volume observed by GPS in Dali

LI Yu^{1,2}, Xu Anlun^{1,2}, Dong Baoju^{1,2}

(1.Dali National Climate Observatory, Dali Yunnan, 671003;

2. Dali Meteorological Bureau, Dali Yunnan, 671003)

Abstract: Based on the hourly PWV data of ground-based GPS in Dali from 2010 to 2013, the characteristics of daily, monthly and seasonal variations of precipitable water volume (PWV) were analyzed. The typical sunny and rainy days in different seasons are selected to explore the difference characteristics of PWV between days with and without precipitation, and compare with the analysis of precipitation, temperature, vapor pressure, and relative humidity in the same period of the Dali national reference climate station. The results show that the daily variation characteristics of PWV on sunny days are similar to the temperature, with a unimodal distribution. On rainy days, PWV will have a peak before or during rainfall, and usually presents a quasi-double-modal daily variation. The diurnal variation characteristics of the wet season are more significant than the dry season, and the seasonal variation characteristics of PWV are similar to water vapor pressure, temperature, and precipitation trends, which are consistent with the low-latitude plateau monsoon climate in Dali with distinct dry and wet seasons.

Key words: precipitable water volume; diurnal variation; seasonal variation; Dali