

基于地基 GPS 的暴雨水汽输送分析研究

梁宏, 刘晶淼, 曹玉静, 李世奎, 李文静

中国气象科学研究院, 北京 100081

摘要 利用地基 GPS 大气可降水量资料、常规气象资料和美国国家环境预报中心 (National Cholesterol Education Program, NCEP) 资料分析了 2005 年 8 月 22–24 日云南一次暴雨期间的水汽输送过程, 分析了云南地基 GPS 立体布局的重要性。结果表明, GPS 遥感的大气可降水量与探空观测结果有高度的一致性; 地基 GPS 探测可以获得大气可降水量高频变化的信息; 暴雨期间水汽输送主要集中在 850~600 hPa 之间的各层; 立体布局的地基 GPS 网是监测西南水汽通道的有力手段。

关键词 地基 GPS 网; 暴雨; 水汽输送

中图分类号 TV122

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2009)18-0055-05

Transfer Analysis on of Atmospheric Water Vapor Based on Ground-based GPS During a Rainstorm

LIANG Hong, LIU Jingmiao, CAO Yujing, LI Shikui, LI Wenjing

Chinese Academy of Meteorological Science, Beijing 100081, China

Abstract Based on the ground-based GPS Precipitable Water vapor (PW) data, weather stations' ground data and NCEP grid reanalysis dataset during the year 2005, the transfer process of water vapor during a summer rainstorm in Yunnan Province from August 22 to 24 in the year 2005 is studied, and the important role of the 3D distribution of the ground-based GPS net is analyzed. It is shown that the correlation between the PW from GPS and the PW from radiosondes is very good. The rapidly changing information of precipitable water vapor can be obtained by ground-based GPS high temporal resolution observations. The rapid change of PW reflects the rapid change of water vapor transfer, which could be used for the monitoring of rainstorm's generation and development. Moreover, the meeting between the cold air mass from northern China and the warm and wet air mass from the Bengal Bay is

responsible for this rainstorm. During the rainstorm, the main water vapor is carried to Yunnan Province by Southwestern summer monsoon and northeastern wind. These two water vapor sources both play a very important role for this rainstorm. Transfer of water vapor is mainly centralized on the layers between 850 hPa and 600 hPa. This may be the low-level air flow blocked by the mountains. Additionally, the gaps between the terrains are very large in southwestern China. The 3D distribution ground-based GPS net is a good instrument for monitoring the water vapor channel in this region, which makes up for the fact that an individual ground-based site can not detect the atmospheric water vapor at different altitudes.

Keywords ground-based GPS net; rainstorm; transfer of water vapor

0 引言

云南西北部是青藏高原东缘, 其南北走向的巨大山系和深切河谷成为全球独特的纵向山系河谷景观。研究表明^[1-2], 每年随南亚季风经西南水汽通道向长江流域输送大量的水汽。东亚季风区夏季降水的水汽主要来自三个方面: 西南季风从孟加拉湾带来、东南季风从热带西太平洋带来以及跨赤道气流从南海带来, 其中西南水汽通道尤为重要。水汽是降雨形成和维持对流性天气系统所需能量源的主要成分。由于大气可降水量 (Precipitable Water vapor, PW) 时空分布变化迅速, 常规地面大气湿度观测结果难以准确反映水汽输送和分布状况。尽管利用台站探空资料可获得准确的大气可降水量资料, 但费用高, 探测次数少, 不能满足对爆发降水灾害性天

收稿日期: 2009-07-15

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (40775020); 中国气象局新技术推广项目 (CMATG2007Z05)

作者简介: 梁宏, 博士研究生, 研究方向为 GPS/MET 等, 电子信箱: liangh@cma.gov.cn; 刘晶淼 (通信作者), 研究员, 研究方向为水文气象学等, 电子信箱: jingmiaol@cma.gov.cn

气过程监测的要求。微波辐射计可提供高时间分辨率(1~10 min)的大气可降水量资料,但受环境影响较大,且仪器贵,未能广泛应用。地基 GPS 网大气水汽监测既费用低廉、又能提供高时空分辨率可降水量资料,近十几年来其在大气科学探测领域,特别是在暴雨灾害性天气监测方面^[3-10]得到广泛应用。但是目前中国的地基 GPS 网基本处于试验阶段,空间分辨率仍然较低,与其他相关观测综合应用才能充分发挥其作用。

2005 年 8 月 22-24 日云南大部分地区出现了强降水天气(图 1),测站最大 24 h 降水量达 120 mm,造成上百人伤亡和巨大的经济损失。水汽输送对暴雨的形成至关重要,本文利用云南 3 个地基 GPS 站每 0.5 h 一次的大气可降水量资料、常规气象资料和 $1^\circ \times 1^\circ$ (纬度 $\times$ 经度)的 NCEP 格点再分析资料,详细分析了这次暴雨期间的水汽输送过程,分析云南地基 GPS 网立体布局的重要性。

1 资料和方法

1.1 GPS 大气可降水量估算

收集 2005 年 8 月云南地基 GPS 网(图 1(a))的观测数

据。下载位于拉萨等 6 个 GPS 卫星跟踪站的同步观测数据,以及国际 GPS 服务(International GPS Service, IGS)提供的精密星历,利用 GAMIT 软件对观测数据进行处理,得到时间间隔 30 min 的对流层总延迟量 Z_t 。然后,采用 Elgered 等^[11]天顶流体静力学延迟公式计算天顶流体静力学延迟量 Z_h :

$$Z_h = \frac{(2.2779 \pm 0.0024)P_0}{f(\lambda, H)} \quad (1)$$

其中, P_0 为地面气压(hPa), $f(\lambda, H) = 1 - 0.00266 \cos 2\lambda - 0.00028H$, λ 为测站地理纬度($^\circ$), H 为测站海拔高度(km), Z_h 单位为 mm。

从对流层总延迟量减去天顶静力学延迟量得到天顶湿项延迟量 Z_w ,再用下式计算大气可降水量 PW_{GPS} ^[12]:

$$PW_{\text{GPS}} = \Pi \cdot Z_w \quad (2)$$

其中, $\Pi = 10^6 \cdot [\rho_w R_v (k_3/T_m + k'_2)]^{-1}$, ρ_w 为液态水密度 (g/cm^3); $R_v = 461.495 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, 为水汽的比气体常数; k_3 和 k'_2 为物理常数, $k_3 = 3.793 \times 10^5 \text{ K}^2 \cdot \text{hPa}^{-1}$, $k'_2 = 22 \text{ K} \cdot \text{hPa}^{-1}$; $T_m = a + bT_s$, 为大气加权平均温度,取 $a = 44.05$, $b = 0.81$ ^[13], T_s 为地面温度(K), PW_{GPS} 单位为 mm。GPS 探测的 PW 与同时时间探空所得的 $PW(PW_{\text{RS}})$ 比较,其误差可达 mm 量级^[14]。8 月昆明站 GPS 探测的 PW 与探

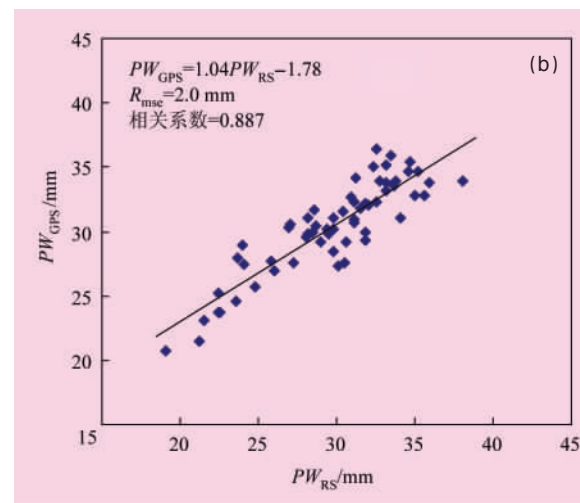
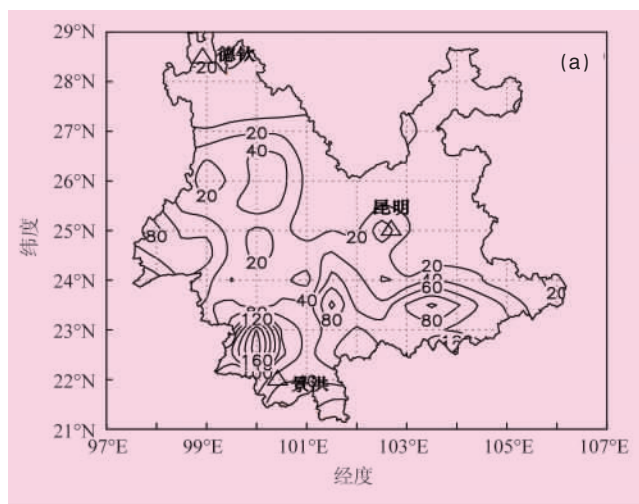


图 1 云南地基 GPS 网及 2005 年 8 月 22-24 日累积降水量分布(a)和 8 月昆明 GPS 探测 PW 与探空结果散点图(b)

Fig. 1 Ground-based GPS net and distribution of accumulated precipitation from August 22 to 24 in Yunnan Province (a), and scatter plot of time series of PW_{GPS} vs PW_{RS} at Kunming in August 2005 (b)

空所得的 PW 比较均方根误差 $R_{\text{msc}} = 2.0 \text{ mm}$ (图 1(b)),符合本文所引文献有关 PW 精度的要求。

1.2 水汽收支计算

为了更好地分析这次暴雨的水汽输送过程,利用 $1^\circ \times 1^\circ$ (纬度 $\times$ 经度)的 NCEP 格点再分析资料计算云南省各边界的水汽输送情况。以 105°E 为东边界, 99°E 为西边界, 21°N 为南边界, 28°N 为北边界,分析该区域上空各层及整层的水汽收支情况,水汽收支的具体计算方法参考文献[15]。其中,纬向水汽通量 Q_λ 和经向水汽通量 Q_φ 的计算方法为

$$Q_\lambda = \frac{1}{g} u q \Delta l \cdot \Delta p \quad (3)$$

$$Q_\varphi = \frac{1}{g} v q \Delta l \cdot \Delta p \quad (4)$$

其中, u, v 分别为纬向风和经向风分量, m/s ; q 为比湿, g/kg ; g 为重力加速度, m/s^2 ; $\Delta l = 1 \text{ cm}$, $\Delta p = 1 \text{ hPa}$ 。水平方向的水汽通量散度 A 的计算方法为^[15]

$$A = \nabla \cdot \left(\frac{1}{g} v q \right) \quad (5)$$

式中, v 为风速, m/s , A 的单位为 $\text{g}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2 \text{ hPa})$ 。若 $A > 0$, 水汽通

量是辐散的;若 $A < 0$, 则水汽通量是辐合的。

2 结果分析

2.1 GPS 大气可降水量变化

图 2 给出了 3 个 GPS 站(昆明、德钦和景洪)2005 年 8 月 18–31 日 PW 和 1 h 降水量的变化。图 2(a)给出了昆明站利用探空资料计算的大气可降水量,每天 2 次。可以看出,无线电探空获得的大气可降水量与 GPS 探测的结果具有很好的相似性。从图 2 可见,3 站在 2005 年 8 月 22–24 日云南暴雨期间,除德钦站的 PW 无明显增加,并无较大降水发生外,其他 2 站在此期间 PW 都有明显增加,并伴随大暴雨发生。此期间昆明站的 PW 均达到 30 mm 以上,23 日极大值达到 35 mm,同时昆明站 22 日降水量是 20 mm,23 日的降水是 50 mm;景洪站的 PW 都在 60 mm 以上,最大值达 65 mm,23 日降雨量达 60 mm。由此可见,大雨或暴雨的发生,除了与大气环流、大气不稳定条件等密切相关之外,大气中 PW 量亦是决定较大降水发生发展的重要条件之一。

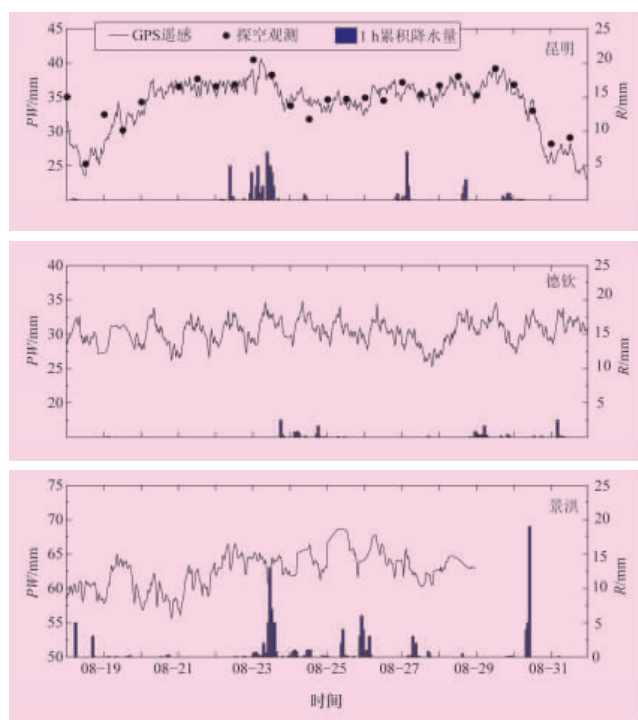
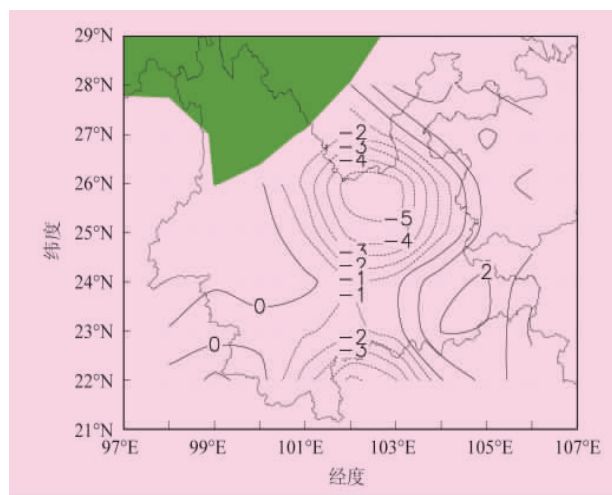


图 2 2005 年 8 月 18–31 日大气可降水量和 1 h 累积降水量 R 序列图(UTC)

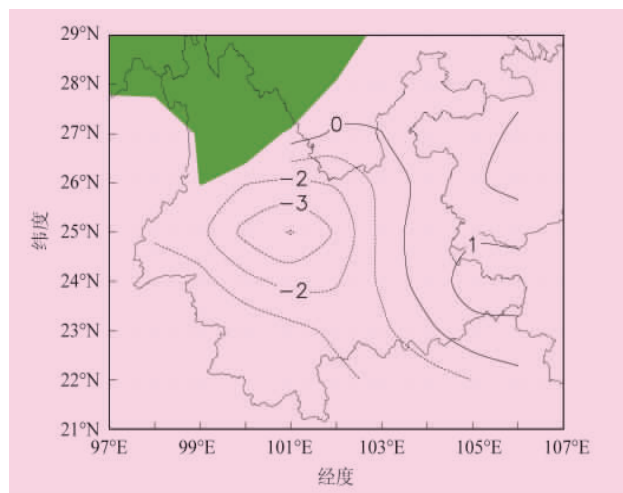
Fig. 2 Time series of PW and hourly precipitation R from August 18 to 31, 2005

图 3 给出了云南水汽通量散度场空间分布状况。可以看出,23 日 08 时昆明和景洪都有明显的水汽辐合;24 日昆明地区仍然有较明显的水汽辐合,但与 23 日相比明显偏小了。同时,景洪 24 日 08 时的水汽辐合明显偏小,日降水量也随之偏小。从对 PW 、水汽通量散度场和降水量的分析可见,较大的 PW 与水汽通量散度场的同时存在,有利于降水的发生;二者

之一存在,则只是降水发生的必要条件。从图 2 和图 3 可以看出,23 日云南东北部上空 750 hPa 为水汽辐合区,辐合中心强度为 $-5 \times 10^{-5} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$,昆明站可降水量表现为快速上升;景洪站的可降水量也有小幅度上升;而德钦站因为上空没有水汽辐合而未有类似的结果。24 日 750 hPa 水汽辐合中心转移到了云南的中部,昆明、景洪和德钦站上空几乎没有水汽辐合,昆明和景洪站的可降水量下降,德钦站则维持原有的可降水量波动。可见 GPS 可降水量的变化能反映区域水汽辐合或辐散的变化。昆明站从 19 日开始大气可降水量逐步上升,降水从 21 日开始,且降水强度逐日加大,23 日达到了最强,而后可降水量快速下降,降水结束。23 日 00:00–12:00 (UTC)GPS 可降水量发生了较大的波动,00:00–04:00 (UTC)可降水量快速下降了 4 mm,04:00–12:00 (UTC)可降水量又快速上升了 6 mm,此时降雨强度也达到了最大,可降水量的这种短期快速变化特征从探空结果是看不到的。可见可



(a) 08-23 00:00 UTC



(b) 08-24 00:00 UTC

图 3 水汽通量散度场(单位: $10^{-5} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$)

Fig. 3 Water vapor flux divergence field
(unit: $10^{-5} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$)

降水量累积到一定程度降水才发生,最强降水发生在可降水量上升最快的时候。德钦站从18~26日可降水量基本维持在30 mm左右,日变化明显。降水集中在23和24日,整个过程的降雨量为10 mm左右,可见德钦站基本不受这次暴雨过程的影响,但仍然有可降水量增加伴随着降水发生。景洪站8月的大气可降水量为55~70 mm,大约是德钦站的两倍。从21日开始可降水量逐渐增加,22日下午达到了峰值67 mm。22日有微量降水,23日出现大雨,可降水量下降。从图1还可以看出,8月昆明站降水时的大气可降水量约为30 mm,景洪站约60 mm,可降水量超过该值就可能出现降水。可见,高分辨率的GPS探测可以获得大气可降水量高频变化的信息,大气可降水量的快速增加是造成云南这次暴雨过程的重要因子,因为可降水量的快速增加表明水汽输送的快速增加,有利于满足降水形成的水汽条件。

2.2 区域水汽辐合(散)特征分析

从700 hPa的高度场、温度场和风场(图略)看来,22日08:00中国西北地区东部和河套地区有冷空气东移,华南和江南主要受副高压控制。23日08:00原先处于西北地区东部的冷空气沿青藏高原东侧南下入侵中国西南地区东部,温度场表现为云南东北部有一明显的冷舌南伸;此时,由于受西南季风的影响,来自孟加拉湾的暖湿气流正源源不断地向西南地区输送,从而与高原东侧南下的冷空气交汇在云南西部

和南部地区,导致该地区的强降雨过程。可见这场暴雨是北方的冷空气与来自孟加拉湾暖湿气流在云南相互交汇共同作用的结果。

图4给出了8月下旬云南的水汽收支情况,图中正值为水汽辐散,负值为水汽辐合。可以看出,整个地区和东西方向都以水汽辐合为主,而南北方向则以水汽辐散为主,说明该地区的水汽输送以东西方向的水汽输送为主导。但暴雨期间南北方向上有较大的水汽辐合,且23日的水汽辐合量大于24日,与暴雨的发生和发展程度相对应,整个地区与南北方向水汽收支时间序列的相关系数为0.62,而整个地区与东西方向水汽收支时间序列的相关系数仅0.47,可见南北方向的水汽输送对这次暴雨的发生和发展也是很重要的。从整个云南地区的水汽收支情况还可以看出,从22日中午到25日云南都以水汽辐合为主,在此期间昆明和景洪站的可降水量波动大,以增加为主;26日以水汽辐散为主,昆明、景洪和德钦站的可降水量都出现了下降的趋势。再看各层的水汽收支情况(图5),21日和22日600 hPa以下为水汽辐散,600 hPa以上有少量水汽辐合;23日和24日600 hPa以下转为水汽辐合,600 hPa以上为水汽辐散层,850 hPa以下几乎没有水汽辐合,最大辐合量在750 hPa约400 t/s,可见这次暴雨的水汽主要来自850~600 hPa之间的各层。这在GPS网的可降水量变化中也得到了体现,处于大气中低层的昆明(1 890 m)和景

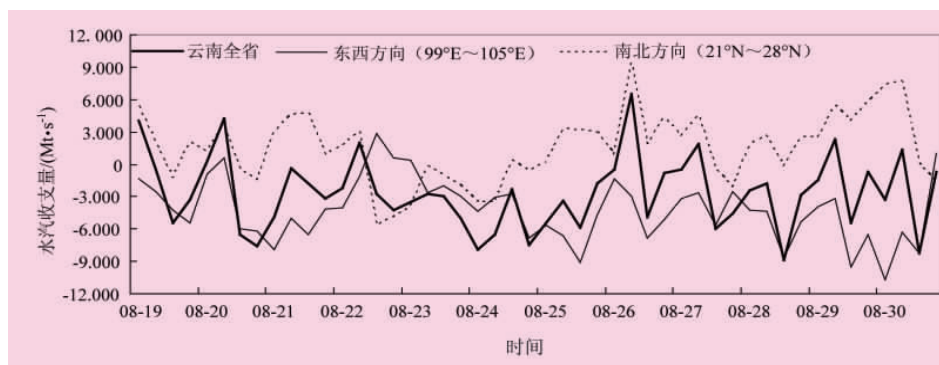


图4 2005年8月下旬云南水汽收支量时间序列

Fig. 4 Time series of water vapor budget in Yunnan Province in late August 2005

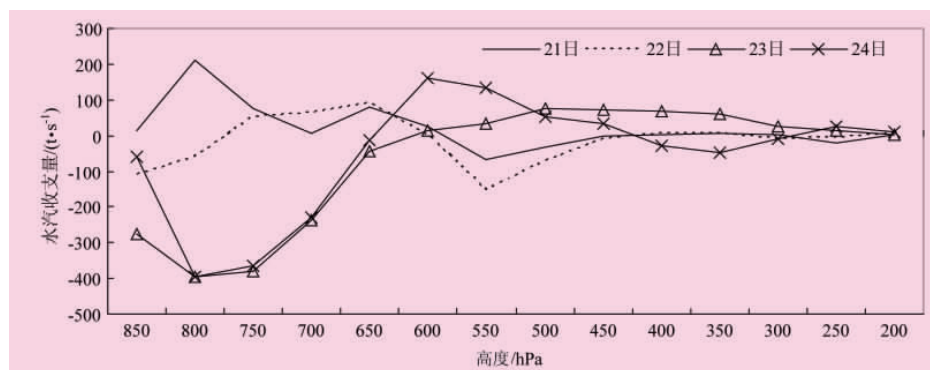


图5 2005年8月21~24日云南上空各层的水汽收支量

Fig. 5 Water vapor budget at different levels in Yunnan Province from August 21 to 24, 2005

洪(580 m)的可降水量均有较大幅度的上升且波动大;处于大气层高层的德钦站(3 320 m)的可降水量基本维持在30 mm左右,波动很小。可见立体布局的地基GPS网可以探测一个地区的大气水汽立体输送情况,从而弥补单个地基GPS站的探测结果不能分层的不足,这也说明立体布局的地基GPS网是监测西南水汽通道的有力手段。

3 结论与讨论

本文利用云南地基GPS网的大气可降水量资料、常规气象资料和NCEP资料研究了发生在2005年8月22-24日云南省暴雨期间的水汽输送过程,主要结论如下。

1) 高时间分辨率的GPS探测可以获得大气可降水量高频变化的信息,而大气可降水量的高频变化反映水汽输送的高频变化,这对暴雨发生和发展的实时监测有重要意义。

2) 这场暴雨来自北方的冷气团与来自孟加拉湾暖湿气团交汇所造成的。水汽来源分两部分,一部分是西南季风带来的水汽,另一部分是东北风带来的水汽,这两部分水汽对暴雨的发生和发展都很重要。暴雨期间水汽输送主要集中在850~600 hPa的各层,这可能是低层的气流受到山体阻挡流速减弱所致。

3) 立体布局的地基GPS网可以用于监测一个地区大气水汽的立体输送,从而弥补单个地基GPS站的探测结果不能分层的不足。云南处于青藏高原东缘,地形落差大,有利于布设立体的地基GPS站网,从而为监测西南水汽通道提供有力的手段,因此加强云南地基GPS网的建设有重要意义。同时,要解决利用站点有限的地基GPS站获取最大的西南水汽输送通道信息的问题,必须了解西南地区的水汽输送情况,因此本研究对于以后在云南进一步布设地基GPS站有一定的参考意义。

参考文献 (References)

- [1] 徐祥德, 陈联寿, 王秀荣, 等. 长江流域梅雨带水汽输送源-汇结构[J]. 科学通报, 2003, 48(21): 2288-2294.
Xu Xiangde, Chen Lianshou, Wang Xiurong, et al. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(21): 2288-2294.
- [2] 黄荣辉, 张振洲, 黄刚, 等. 夏季东亚季风区水汽输送特征及其与南亚季风区水汽输送的差别[J]. 大气科学, 1998, 22(4): 460-469.
Huang Ronghui, Zhang Zhenzhou, Huang Gang, et al. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 1998, 22(4): 460-469.
- [3] Liu J, Sun Z, Liang H, et al. Precipitable water vapor on the Tibetan plateau estimated by GPS, radiosonde and NWP analysis and its impact on radiation budget [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110, D17106, doi:10.1029/2004JD005715.
- [4] 梁宏, 刘晶淼, 章建成, 等. 青藏高原大气总水汽量的反演研究 [J]. 高原气象, 2006, 25(6): 1055-1063.
Liang Hong, Liu Jingmiao, Zhang Jiancheng, et al. *Plateau Meteorology*, 2006, 25(6): 1055-1063.
- [5] 曹云昌, 方宗义, 李成才, 等. 利用GPS和云图资料监测北京地区中小尺度降水[J]. 高原气象, 2005, 24(1): 91-96.
Cao Yunchang, Fang Zongyi, Li Chengcai, et al. *Plateau Meteorology*, 2005, 24(1): 91-96.
- [6] 郭虎, 段丽, 杨波, 等. 香山局地大暴雨的中小尺度天气分析 [J]. 应用气象学报, 2008, 19(5): 265-275.
Guo Hu, Duan Li, Yang Bo, et al. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2008, 19(5): 265-275.
- [7] 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.
Li Guocui, Li Guoping, Lian Zhiluan, et al. *Plateau Meteorology*, 2008, 27(5), 1066-1073.
- [8] 叶其欣, 杨露华, 丁金才, 等. GPS/ P_w 资料在强对流天气系统中的特征分析[J]. 暴雨灾害, 2008, 27(2): 141-148.
Ye Qixing, Yang Luhua, Ding Jincai, et al. *Torrential Rain and Disasters*, 2008, 27(2): 141-148.
- [9] 万蓉, 郑国光. 地基GPS在暴雨预报中的应用进展 [J]. 气象科学, 2008, 28(6): 697-702.
Wan Rong, Zheng Guoguang. *Scientia Meteorologica Sinica*, 2008, 28(6): 697-702.
- [10] 陈元昭, 王明洁. 一次夏季冰雹天气过程分析 [J]. 气象研究与应用, 2008, 29(增刊): 39-46.
Chen Yuanzhao, Wang Mingjie. *Journal of Meteorological Research and Application*, 2008, 29(Suppl): 39-46.
- [11] Elgered G. Tropospheric radio-path delay from ground-based microwave radiometry [J]. *Atmospheric Remote Sensing by Microwave Radiometry*, 1993: 213-258.
- [12] Bevis M, Businger S, Chiswell S R, et al. GPS meteorology: Mapping zenith wet delay onto precipitable water [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1994, 33: 379-386.
- [13] 李建国, 毛节泰, 李成才. 使用全球定位系统遥感水汽分布原理和中国东部区加权“平均温度”的回归分析 [J]. 气象学报, 1999, 57(3): 283-292.
Li Jianguo, Mao Jietai, Li Chengcai. *Acta Meteorologica Sinica*, 1999, 57(3): 283-292.
- [14] 丁金才, 黄炎, 叶其欣, 等. 2002年台风Ramasun影响华东沿海期间可降水量的GPS观测和分析[J]. 大气科学, 2004, 28(4): 613-624.
Ding Jingcai, Huang Yan, Ye Qixing, et al. *Chinese Journal of Atmospheric Science*, 2004, 28(4): 613-624.
- [15] 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等. 天气学原理与方法 [M]. 3版. 北京: 气象出版社, 2000: 637-643.
Zhu Qiangen, Lin Jinrui, Shou Shaowen, et al. *Principles and methods of weather*[M]. 3rd ed. Beijing: Chinese Meteorology Press, 2000: 637-643.

(责任编辑 朱宇)

《科技导报》“研究论文”栏目征稿

《科技导报》以发表国内外科学技术各学科专业原创性学术论文为主,同时刊登阶段性最新科研成果报告,以及国内外重大科技新闻,快速、全方位、高密度、大容量提供科技信息。“研究论文”栏目专门发表自然科学、工程技术领域具有创新性的研究论文,要求学术价值显著、实验数据完整、具有原始性和创造性,同时应重点突出、文字精炼、引证及数据准确、图表清晰,并附中、英文摘要以及作者姓名、所在单位、通信地址、关键词等信息。本栏目欢迎广大一线科技工作者投稿。投稿网址:www.kjdb.org;投稿邮箱:kjdbbjb@cast.org.cn。