

刘红燕, 王迎春, 王京丽, 等. 2009. 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, 33 (2): 388-396. Liu Hongyan, Wang Yingchun, Wang Jingli, et al. 2009. Preliminary analysis of the characteristics of precipitable water vapor measured by the ground-based 12-channel microwave radiometer in Beijing [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (2): 388-396.

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

刘红燕 王迎春 王京丽 李炬 曹晓彦 熊斌

中国气象局北京城市气象研究所, 北京 100089

摘要 首先对比分析了三种测量水汽技术(地基微波辐射计、探空、GPS)之间的差异, 得到地基微波辐射计与探空的差值为 0.281 cm, GPS 与探空的差值为 0.728 cm, 地基微波辐射计与 GPS 的差值为 0.322 cm。接着就地基 12 通道微波辐射计测量得到的水汽总量(简称 PWV), 分析了北京地区水汽在四个季节中的日变化特征。秋季日变化差为 0.162 cm, 冬季日变化差为 0.130 cm, 春季日变化差为 0.229 cm, 夏季日变化差为 0.276 cm。另外, 北京地区四个季节中水汽最大值/最小值出现频率最高的时间段呈现一定的特征。即四个季节中在北京时间 00:00 到 00:59 和 23:00 到 23:59 这两个时间段中, 水汽出现最大值/最小值的概率较其他时间段都高, 其中冬季在北京时间 10:00 到 10:59 之间出现最小值的概率最高。水汽总量 PWV 每小时变化率在四个季节中都存在这样的现象: 出现正的水汽总量 PWV 每小时变化率的百分比与出现负的水汽总量 PWV 每小时变化率的百分比相当, 几乎都为 50%。最后就水汽与温度相关性做了分析, 分别得到四个季节中各个小时水汽与温度的相关系数, 结果显示各个小时水汽与温度的相关性在四个季节中, 除了夏季从北京时间 09:00 到 22:00 为负相关外, 其他时间段内都为正相关。而且各个小时水汽与温度的相关系数都按照秋、春、冬、夏的顺序递减。

关键词 地基微波辐射计 水汽 日变化特征 温度 相关系数

文章编号 1006-9895(2009)02-0388-09

中图分类号 P426

文献标识码 A

Preliminary Analysis of the Characteristics of Precipitable Water Vapor Measured by the Ground-Based 12-Channel Microwave Radiometer in Beijing

LIU Hongyan, WANG Yingchun, WANG Jingli, LI Ju, CAO Xiaoyan, and XIONG Bin

Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100089

Abstract Precipitable water vapor (PWV) is one of important green-house gases in the atmosphere. It affects the energy balance of the land-atmosphere system. The evolution of cloud and precipitation has a close relationship with the PWV. In the climate change, the PWV has a positive effect on temperature. Ground-based microwave radiometer can make all day unattended measurement of the PWV. Three different PWV measurements are compared. The PWV mean bias between the radiometer and the radiosonde is 0.281 cm. The PWV mean bias between the radiometer and the GPS is 0.322 cm. The PWV mean bias between the GPS and the radiosonde is 0.728 cm.

In Beijing, there exist different diurnal variations in different seasons. The mean diurnal variation is about 0.162 cm in autumn, 0.130 cm in winter, 0.229 cm in spring, and 0.276 cm in summer. Moreover, the maximum

收稿日期 2007-09-21, 2007-12-05 收修定稿

资助项目 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项基金项目“地基 GPS 斜路径水汽反演方法改进研究”

作者简介 刘红燕, 女, 1975 年出生, 博士, 研究方向: 云雾物理, E-mail: hlyl@ium.cn

PWV appears mostly at 0000 LST or 2300 LST in the four seasons. The minimum PWV is the same as the maximum PWV, except that the minimum PWV appears at 1000 LST in winter.

The variation of PWV per hour decreases in the order of summer, autumn, spring and winter. Moreover, in every season, both percentages of the positive and negative PWV variations per hour are nearly 50%.

The hourly correlations between the PWV and temperature are analyzed for the four seasons. The hourly correlation coefficients decreases in the order of autumn, spring, winter and summer. In autumn, spring and winter, all the hourly correlation coefficients are positive. However, in summer, the hourly coefficients are negative from 0900 LST to 2200 LST.

Key words 12-channel ground-based microwave radiometer, precipitable water vapor (PWV), diurnal variation, temperature, coefficient

1 引言

水汽 (precipitable water vapor, 简称 PWV) 在云的演变、降水的发生以及变化中都起着重要的作用。水汽总量的增加和水汽通量的辐合与对流发展密切相关。在大气各种化学反应过程中,水汽也有着重要的贡献。同时水汽又是大气中变化最活跃的一种温室气体,它对于太阳短波是透明的,但吸收地球的长波辐射,从而使得大气温度升高。高温时所含水汽量较低温时多,而多的水汽量,又由于水汽的温室效应导致大气温度升得更高 (Ramanathan et al., 1989)。故在大气气候变化中,水汽对温度起着正反馈的作用。另,在陆地、海洋之间的水循环过程中,大气水汽由蒸发到凝结,吸收热量或者释放热量,从而起到调整地球能量的作用,并影响到了地球大气系统温度以及环流的分布模式 (Starr et al., 1991)。“水汽在大气中相当于一种噪声信号,而大气的诸多应用都必须建立在

对这种噪声的认识上” (Rogers et al., 1991)。而对水汽的各种认识中,都需要有对水汽的连续、大量的观测数据。表 1 列出了各种观测设备及其优、缺点。

地基微波辐射计不需人工看守,可在任意天气条件下,长期高时间分辨率 (每分钟) 地探测水汽总量。这种探测技术和理论已经相当成熟 (周秀骥, 1982; 廖国男, 2004; Westwater et al., 2005)。国际 COST720 温度、湿度和云廓线实验 (Dominique et al., 2006), 通过使用多种微波辐射计与云雷达、风廓线雷达联合观测来提高反演大气廓线的算法,同时研究了雾形成、发展以及消散时的物理过程。Revercomb et al. (2003) 综述了美国 ARM (Atmospheric Radiation Measurement) 实验中使用微波辐射计探测有关水汽的研究背景以及前景。国内科学家在微波辐射计探测水汽方面也进行了大量研究工作,陈洪滨 (1999) 提出利用 110 GHz 以上高频微波对大气参量进行被动遥感的算

表 1 各种观测水汽统计表

Table 1 The technique to measure the precipitable water vapor (PWV)

观测平台	测量系统	优点	缺点	参考出处
地基	常规地面观测仪器,干湿球,露点仪	观测时间长	空间分布不均匀,且仅是地面观测数据	Middleton et al. (1953)
气球	常规探空观测	观测时间长,垂直分辨率高	高空漂移,上对流层、平流层观测变化大	Elliott et al. (1991)
卫星	红外(TOVS)、微波(SMMR, SSM/D)、GPS	覆盖范围广	由于受到各种大气物质(云、冰等)以及地球表面特征的影响,其反演能力有所限制	Susskind et al. (1984), Prabhakara et al. (1985), Rind et al. (1993), Roosen et al. (1993)
飞机	机载各种露点仪、激光雷达等	可在任何时间任何地点观测,商用飞机可覆盖全球	昂贵,数据有限	Starr et al. (1991), Kelly et al. (1991)
地基遥感	Raman lidar、地基微波辐射计、地基 GPS	高质量数据,高空间分辨率,高时间分辨率	昂贵	England et al. (1992)

法;林龙福等(1994)研究在非对称边界条件下水平有限降水云的微波辐射率的计算公式;魏重(1995)提出一种使用三波段(0.86、1.35、3.2 cm)地基微波辐射计联合反演雨天大气的水汽总量等的物理迭代方法;朱元竞等(1994)和李万彪等(2001)对于地基微波辐射计在人工影响天气以及天气分析中的应用做了分析研究。

本文主要使用由地基微波辐射计所观测的北京地区的水汽资料来进行分析研究。文章第2节介绍观测仪器以及数据资料,并将微波辐射计与探空、GPS做了比较;第3节分析了北京地区水汽日变化以及水汽每小时变化率等的特征,并讨论分析了四个季节中各个小时水汽与温度之间的相关性;第4节总结讨论。

2 测量方法介绍以及对比结果分析

2.1 地基微波辐射计测量 PWV 方法介绍

大气中在微波波段起主要吸收作用的气体有氧气和水汽。臭氧也有一定的吸收,其他一些微量气体以及污染成分(如 H_2S 、 SO_2 、 NO 、 CO 等)也都具有各自的吸收区,而且其吸收线的强度可与氧气和水汽相比拟。但由于这些气体在大气中的含量十分稀少,因而对大气的微波吸收和发射过程的作用非常微薄,可以忽略。地基微波辐射计通过接受大气微波辐射信号来测量大气水汽总量。使用双通道算法[式(1)]可以得到与仪器方向垂直的水汽总量 PWV:

$$P_{wv} = c_0 + c_1 \ln[(T_{mz} - T_{b0}) / (T_{mz} - T_{b23.8})] + c_2 \ln[(T_{mz} - T_{b0}) / (T_{mz} - T_{b30.0})], \quad (1)$$

其中, c_0 、 c_1 、 c_2 为常数; T_{b0} 是宇宙背景的亮温,为 2.7 K; T_{mz} 是与当地季节的大气平均亮温有关的值,这里取为平均地面温度的 95%; $T_{b23.8}$ ($T_{b30.0}$) 是地基微波辐射计在 23.8 GHz (30.0 GHz) 通道测量得到的亮温值。

由美国 Radiometrics 公司生产的地基 12 通道微波辐射计即是用来测量大气水汽总量的设备。其 12 个通道分别是 5 个水汽通道 (22.035、22.235、23.835、26.235、30.0 GHz) 和 7 个氧气通道 (51.25、52.28、53.85、54.94、56.66、57.29、58.8 GHz)。辐射计在 22.035、22.235、23.835、26.235 GHz 的波束宽为 5.5° ; 在 30.0 GHz 的波束宽为 4.5° ; 在 51.25、52.28、53.85、54.94、56.66、57.29

GHz 的波束宽为 2.7° ; 在 58.80 GHz 的波束宽为 2.3° 。地基 12 通道微波辐射计于 2005 年 8 月 18 日放置北京南郊观象台 ($39.93^\circ N$, $116.28^\circ E$) 进行观测。仪器每隔三个月进行一次液氮标定,同时选择在天空晴朗无云的条件下,做了 tipping curve 标定 (Han, 2000)。

2.2 微波辐射计与探空、GPS 测量的 PWV 的对比分析

北京南郊观象台每天施放 2 次探空 (0000 UTC 和 1200 UTC), 且安装有每 30 分钟采样大气水汽总量 (PWV) 的 GPS 站。利用探空观测的各个高度的比湿 q 对大气压力 p 进行垂直积分 [见公式 (2)], 可以得到大气垂直方向的水汽总量:

$$P_{wv} = \int (q/g) dp, \quad (2)$$

其中, g 为地球重力加速度,积分从地面到大气顶。GPS 的微波信号被地球的电离层和中性大气所延迟,通过公式 (3) 可计算得到大气水汽总量 PWV:

$$P_{wv} = \pi \times Z_{wD}, \quad (3)$$

其中, π 为转换因子, Z_{wD} 为湿延迟。

统计分析微波辐射计和探空在 0000 UTC 或者 1200 UTC 所测量得到的水汽总量的差异 (见图 1a, 对比样本数目为 455 个,时间从 2005 年 8 月到 2006 年 8 月)。结果得到两种测量方法的平均差值为 0.281 cm; 拟合回归直线的斜率为 0.9094, 截距为 -0.1450 cm。

南郊观象台的 GPS 每 30 分钟采样一次,取 GPS 每小时的平均水汽值,与同时间由微波辐射计测量的每小时水汽值做对比分析 (见图 1b)。共有样本数目 785 个,所用数据的时间为 2006 年 9、10、11 月。分析得到两种测量方法的平均差值为 0.322 cm, 拟合回归直线的斜率为 0.714、截距为 0.422 cm。

图 1c 为 GPS 与探空测量水汽的对比图。共用 254 个样本,得到 GPS 测量的水汽与探空的平均差值为 0.728 cm。图像中线性拟合直线的斜率为 0.708, 截距为 0.822 cm。对比图 1a 与图 1c, 可见微波辐射计相比于 GPS, 与探空测量的水汽更加接近。这与微波辐射计的测量原理中使用了历史探空资料有关。同时,这一对比结果也为下文使用微波辐射计而非 GPS 测量得到的水汽值来分析水汽的特征奠定了一个基础。

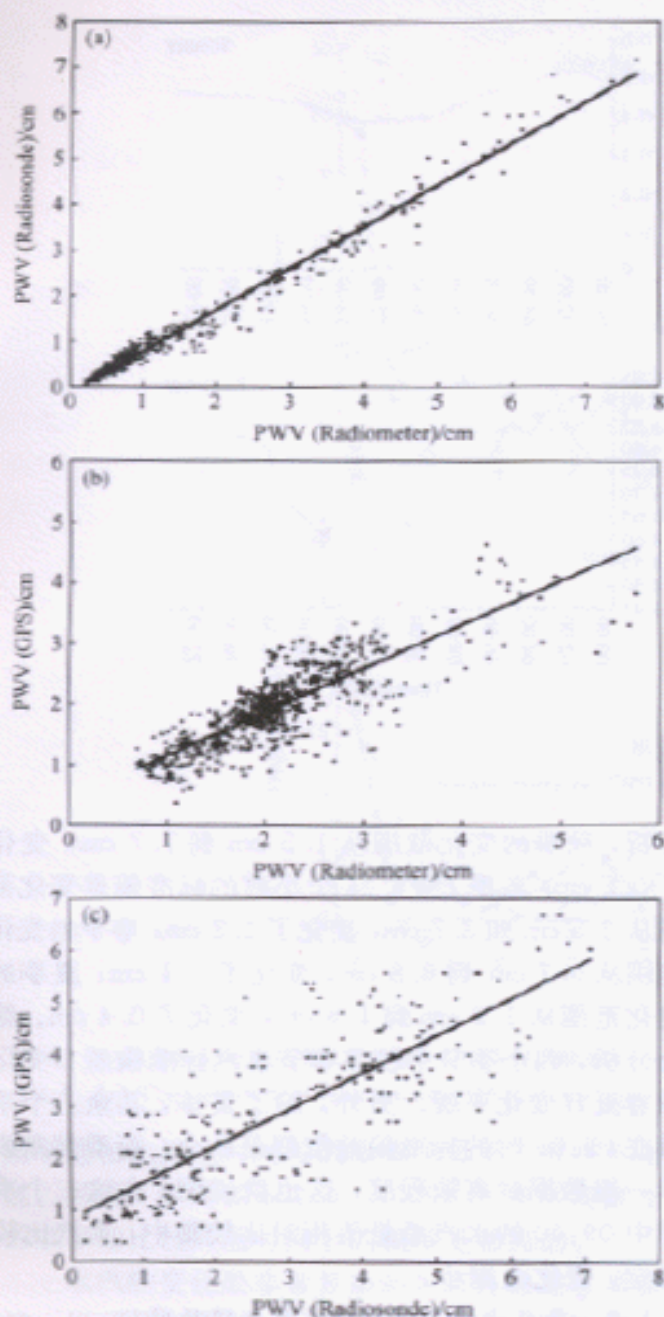


图1 (a)微波辐射计测量的PWV与探空测量的PWV的对比图, (b)微波辐射计测量的PWV与GPS测量的PWV的对比图, (c)探空测量的PWV与GPS测量的PWV的对比图

Fig. 1 (a) PWV measured by the ground-based microwave radiometer and the radiosonde, (b) PWV measured by the ground-based microwave radiometer and GPS, (c) PWV measured by the radiosonde and GPS

3 北京地区水汽特征初步分析

3.1 水汽总量的日变化特征

3.1.1 水汽总量平均日变化特征

微波辐射计可以获取每分钟的PWV值。取同

表2 四个季节的数据所对应的月份

Table 2 The respective months in the four seasons

季节	月份
秋季	2005年9、10、11月
冬季	2005年12月和2006年1、2月
春季	2006年3、4、5月
夏季	2006年6、7、8月

一小时内PWV(共60个数值)的平均值,作为该小时的平均PWV。将微波辐射计近一年的观测数据按照春、夏、秋、冬四个季节分为四组数据。表2中列出了各个季度所包含的观测数据的月份。将同一季节中所有相同小时的平均PWV,再次取平均得到该季节在此时刻的平均PWV,进而可得该季节24小时PWV的日变化图(见图2),同时取标准偏差又可得到表示该季节在该时刻PWV值离散程度的日变化图(见图3)。

在这四个季节中PWV呈现弱的日变化特征。其中,秋天从00:00~12:00(北京时,下同)PWV逐渐减小;从12:00~22:00PWV逐渐增加。最大值出现在00:00~00:59之间,为1.982 cm;最小值出现在12:00~12:59之间,为1.820 cm。日变化差为0.162 cm,变化了8.5%。冬天从02:00~12:00水汽逐渐减小,从12:00~23:00水汽逐渐增加。最大值出现在02:00~02:59之间,为0.514 cm;最小值出现在12:00~12:59之间,为0.384 cm;日变化差为0.130 cm,变化了29.5%。春天最大值出现在20:00~20:59之间,为1.534 cm;最小值出现在09:00~09:59之间,为1.399 cm。日变化差为0.229 cm,变化了16.4%。夏天最大值出现在03:00~03:59之间,为4.882 cm;最小值出现在15:00~15:59之间,为4.606 cm。日变化差为0.276 cm,变化了5.8%。PWV在最小值到最大值的时间间隔:秋季为10个小时,冬季为11个小时,春季为10个小时,夏季最短为7个小时。

Guldner(2001)在研究中得到(52°23'N, 13°04'E)地区PWV在不同季节也存在日变化特征,其中夏季的日变化差为0.15 cm,变化了8%;冬季的日变化差为0.05 cm,变化了5%。Guldner(2001)排除了仪器对温度的敏感所引起的PWV误差以及PWV算法对温度的依赖性所导致的误差,认为PWV的日变化特征是PWV固有的。由于我们使用的地基12通道微波辐射计与Guldner

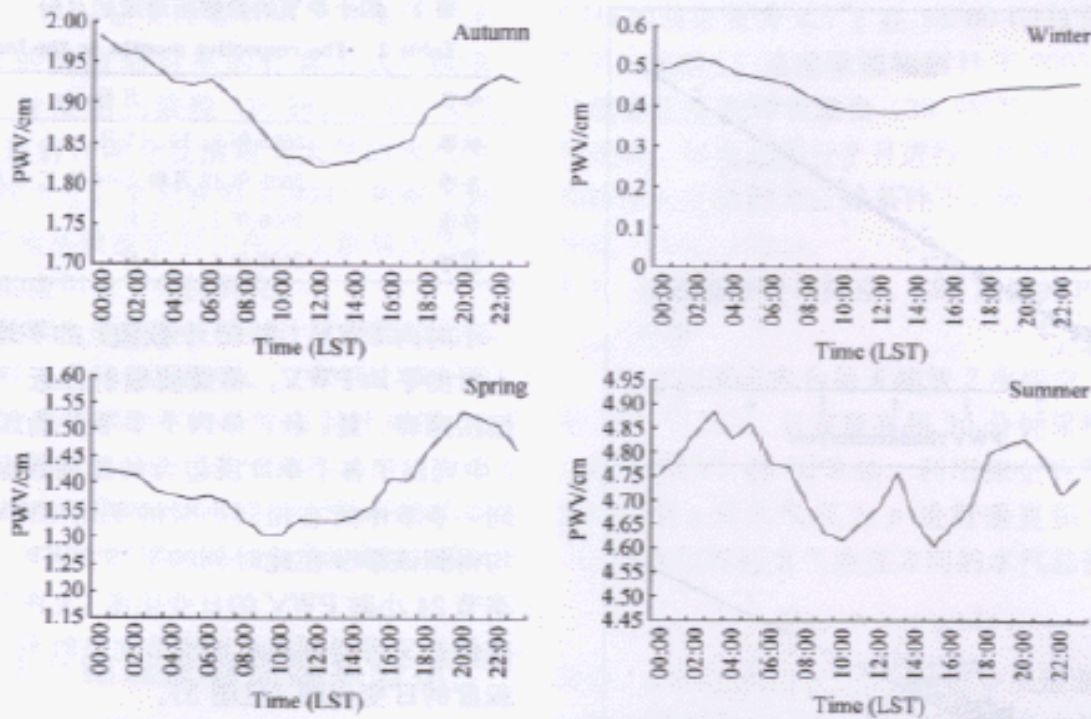


图2 四个季节平均 PWV 日变化图

Fig. 2 The daily variation of the PWV in every season

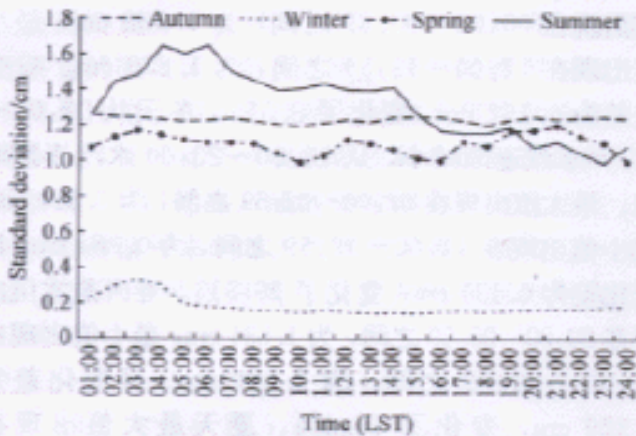


图3 四个季节 PWV 标准偏差日变化图

Fig. 3 The daily variation of the PWV standard deviation in four seasons

(2001) 提到的仪器是同一家公司生产的,且 PWV 的算法是一致的,这些都保证了本文分析得到的北京地区 PWV 的日变化特征是真实的。

图3为四个季节(秋、冬、春、夏)各个季节中同一小时中 PWV 的标准偏差值。各个小时的 PWV 标准偏差值在 00:00~13:00 时间段内按夏、秋、春、冬的顺序递减;在 14:00~18:00,按秋、夏、春、冬的顺序递减;在 19:00~22:00 按秋、春、夏、冬的顺序递减;在 23:00~23:59 之间按秋、夏、春、冬的顺序递减。另外,从变化范围来

分析,秋季的变化范围从 1.5 cm 到 1.7 cm,变化了 0.2 cm;冬季 PWV 24 个小时的标准偏差变化范围从 2.5 cm 到 3.7 cm,变化了 1.2 cm;春季的变化范围从 0.7 cm 到 0.8 cm,变化了 0.1 cm;夏季的变化范围从 1.2 cm 到 1.6 cm,变化了 0.4 cm。综合分析,四个季节中秋冬季水汽标准偏差日变化较春夏日变化平缓。另外,除了夏季,其余三个季节在 09:00 时的标准偏差值都是最小。标准偏差表示一组数据的离散程度,这也就说明,在这三个季节中 09:00 的水汽总量值相对比较集中,水汽比较稳定,变化范围小。

3.1.2 每日水汽总量最大/最小值的特征

上面在研究 PWV 的日变化特征时,分别将各个季节中所有天在同一小时的 PWV 求平均,最后得到 PWV 的平均日变化特征。实际上, PWV 在每一天都有不同的特征,为了反映出单独每一天的变化特征,本文分析了各个季节中每一天 PWV 的最大值、最小值的特征。具体分析内容是统计每个季节,每天的最大值/最小值分别出现在 24 个小时中的概率(图4)。得到的结果显示,在四个季节中,在 00:00~00:59 和 23:00~23:59 这两个时间段中出现最大值的概率明显较其他时间段的高。水汽最小值出现在 00:00~00:59 和 23:00~23:59 的

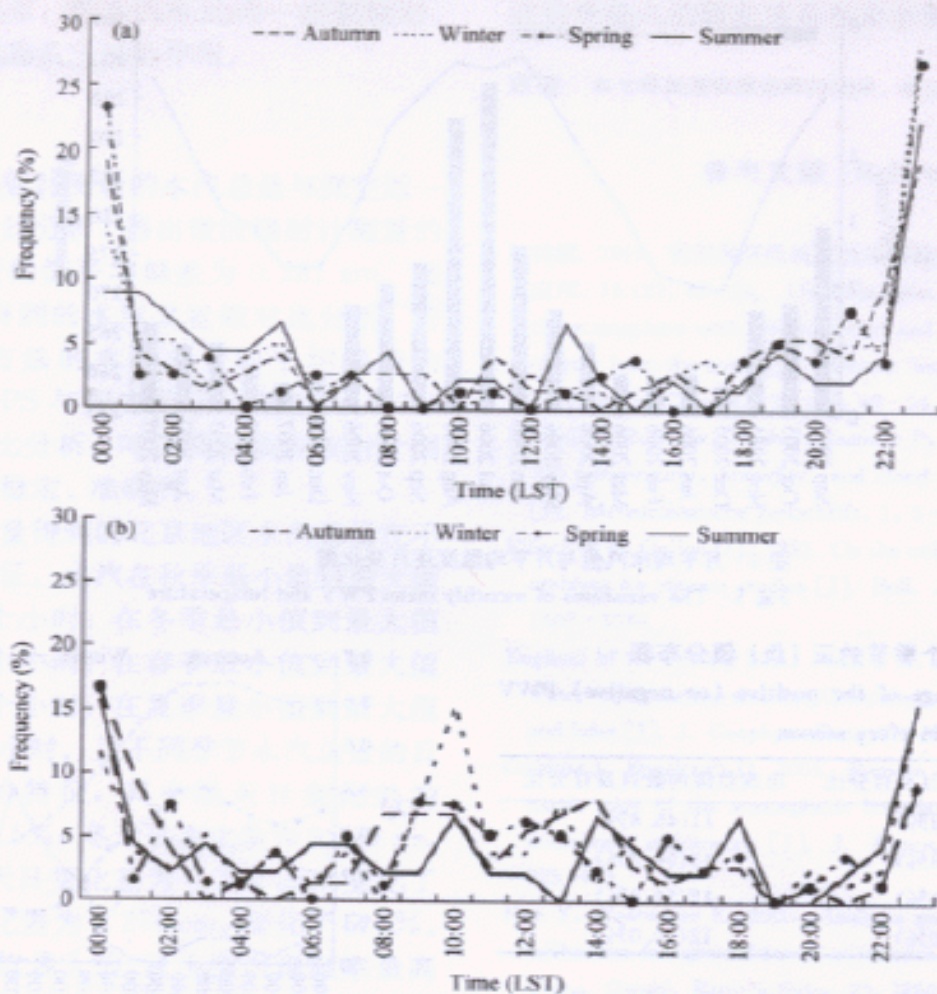


图4 (a) 最大和 (b) 最小 PWV 在各个小时出现的频率

Fig. 4 (a) The frequency of the maximum PWV occurring in every hour; (b) the frequency of the minimum PWV occurring in every hour

概率值相比其他时间段的概率值偏高,但并不很明显。另外,冬天在 10:00~10:59 之间出现最小值的概率相比较其他时间上的概率是最高的。

水汽的变化是非常复杂的,而且也是非常快速的。每日最大值/最小值出现在不同时间的概率的原因,目前还不是很清楚,还有待我们以后进一步深入研究才有可能加以认识和解释。

3.2 水汽总量每小时变化率的特征

将第 N 小时的平均 PWV 减去第 $(N-1)$ 小时的平均 PWV,将得到 PWV 在第 $(N-1)$ 时间的小时变化率(单位为 cm/h)。其中正值表明 PWV 增加,负值表明 PWV 减少。对由地基微波辐射计测量得到的 PWV,分别统计了四个季节中的 PWV 每小时变化率的日变化特征。四个季节中,秋季 PWV 每小时变率最小值出现在 02:00~03:00,为 -0.0486 cm/h ;最大值出现在 16:00~17:00,为

0.0806 cm/h 。冬季 PWV 每小时变化率最小值出现在 05:00~06:00,为 -0.0309 cm/h ;最大值出现在 10:00~11:00,为 0.044 cm/h 。春季 PWV 每小时变化率的最小值出现在 22:00~23:00 之间,为 -0.03102 cm/h ;最大值出现在 16:00~17:00,为 0.027 cm/h 。夏季 PWV 每小时变率最小值出现在 21:00~22:00,为 -0.099 cm/h ,最大值出现在 16:00~17:00,为 0.119 cm/h 。

统计各个季节中出现正值和负值的概率,得到表 3。结果表明春、夏两个季节中出现正的 PWV 小时变化率的比例与出现负的 PWV 小时变化率的比例是相同的,都为 50%。在秋季正的 PWV 小时变化率为 54.2%,负的 PWV 小时变化率为 45.8%。在冬季正的 PWV 小时变化率为 45.8%,负的 PWV 小时变化率为 54.2%。四个季节,正和负的 PWV 小时变化率都接近 50%。即在一年四个

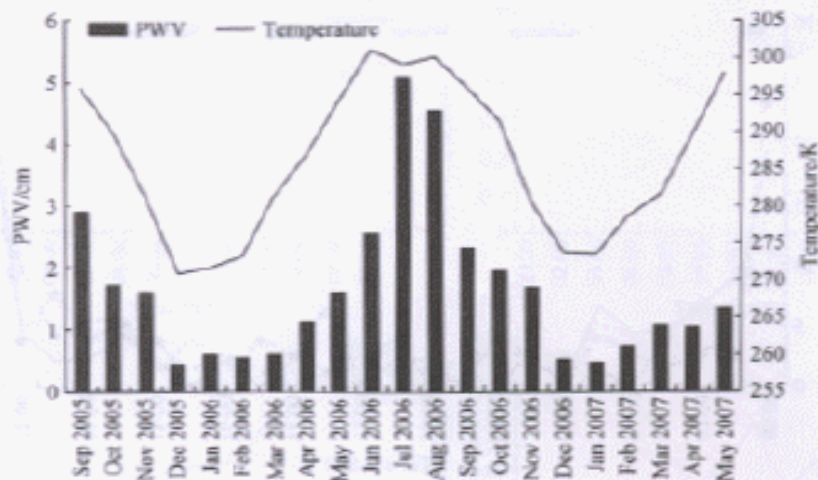


图5 月平均水汽值与月平均温度逐月变化图

Fig. 5 The variations of monthly mean PWV and temperature

表3 PWV变化率四个季节的正(负)值分布表

Table 3 The percentage of the positive (or negative) PWV change value per hour in every season

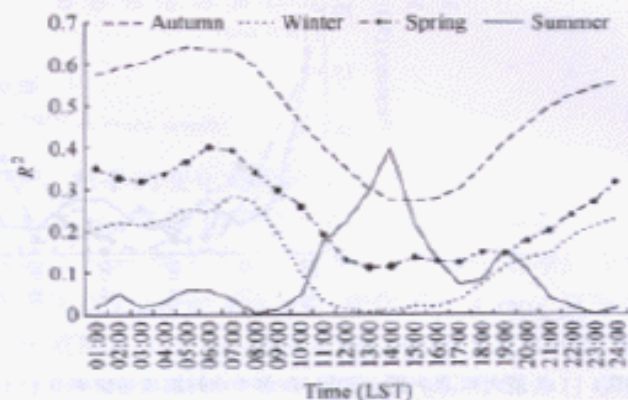
季节	出现正值的数目及百分比	出现负值的数目及百分比
秋季	13(54.2%)	11(45.8%)
冬季	11(45.8%)	13(54.2%)
春季	12(50.0%)	12(50.0%)
夏季	12(50.0%)	12(50.0%)

季节中 PWV 增加率与减少率是对称分布的。

3.3 北京地区水汽与温度关系分析

水汽从赤道到极地逐渐衰减,反应了全球温度分布的特征。大气在暖赤道范围内的水汽量是最大的,约 5 cm,随着纬度增加大气中水汽值逐渐降低,极地处的水汽约为赤道上水汽的十分之一。分析从 2005 年 9 月到 2007 年 5 月由北京南郊观象台微波辐射计测量的水汽与微波辐射计附加的 Vaisala 温湿压探头所测量的温度,得到北京地区水汽与温度随时间变化图(图 5)。图 5 中显示随着温度的升高(降低)大气中的水汽含量逐渐增加(减少),即北京地区水汽与大气温度呈正相关,且其相关系数为 0.6058。

研究表明,水汽随温度的变化特征与季节有关。季节变化中,北半球水汽比南半球的变化剧烈。这是因为北半球陆地比海洋的面积大,陆地的热容量较海洋的低所导致的。使用地基微波辐射计测量的北京南郊观象台的水汽值与温度值,分别分析了四个季节中各个小时内两者的相关性。 R^2 是

图6 水汽与温度相关(R^2)随时间变化图Fig. 6 Time variation of the correlation (R^2) between the PWV and the temperature

表示温度与水汽总量相关性高低的值,其值越高说明温度与水汽总量的相关性越高,反之则表示两者的相关性越低。其中,除了在夏季从 09:00~22:00 水汽与温度呈负相关外,其余时间段中两者都为正相关。图 6 是 R^2 在各个季节中随时间变化图,图中显示四个季节中,同一小时大气水汽与温度的相关性秋季最高,其次是春季、冬季,夏季最小。水汽含量在夏季最高,依次是秋季、春季、冬季。而夏季从 09:00~22:00 大气水汽与温度呈现负相关,这很可能与夏季降水有关,即说明水汽与温度相关性的高低,受到水汽含量的影响。在水汽总量达到一定值以后,水汽与温度之间的相关性可以由正相关转变为负相关。虽然这个结论还需要进一步地论证,但是它对于我们研究水汽对气候变化的作用

时,提供另一种观点,即水汽在达到一定数值时,有可能对气候变化起负反馈的作用。

4 结论

将地基微波辐射计测量的水汽总量与探空近一年的水汽总量做对比分析,得出微波辐射计测量的水汽值与探空测量的值平均偏差为 0.281 cm。而通过与 GPS 测量得到的水汽总量做对比分析,得到的结果是两种方法的水汽总量的平均偏差为 0.159 cm (其中 GPS 与探空的平均偏差为 0.728 cm)。通过这些对比分析,可以确定微波辐射计测量得到的水汽值是稳定、准确的。

微波辐射计测量得到的北京地区水汽总量在不同季节呈现不同特征。水汽在秋季最小值到最大值的时间间隔为 10 个小时;在冬季最小值到最大值的时间间隔为 11 个小时;在春季最小值到最大值的时间间隔为 10 个小时;在夏季最小值到最大值的时间间隔为 7 个小时。且不同季节水汽总量的日变化也呈现不同的特征,其中秋天日变化差为 0.162 cm,变化了 8.5%;冬天日变化差为 0.130 cm,变化了 29.5%;春天日变化差为 0.229 cm,变化了 16.4%;夏天日变化差为 0.276 cm,变化了 5.8%。另外,北京地区水汽最大值/最小值出现频率最高的时间段呈现一定的特征,统计结果显示,在四个季节中,在 00:00 和 23:00 水汽出现最大值的概率相比其他时间明显偏高。同时,在 00:00 和 23:00 水汽出现最小值的概率也较高,但并不明显。其中冬季 10:00 出现最小值的概率最高。各个季节水汽总量的时间变化率也呈现出如下特征:即在一年四个季节中,出现正的、负的水汽总量小时变化率都在 50% 左右,即水汽增加率与减少率是对称分布的。

同时,在研究水汽与温度相关性时,各个季节同一小时的水汽与温度的相关性,秋季最高,其次是春季、冬季,夏季相关性最低。其从秋季到春季、冬季递减的变化趋势与其水汽总量的变化趋势雷同。夏季水汽与温度之间有一定的负相关存在。这可能与夏季降水偏多、水汽值高等因素有关。本文的工作仅是初步性的研究,对于这一现象的解释还有待于今后深入研究。

由于水汽总量自身的多变性和复杂性,以上得到的结果还不足以全面认识水汽总量的特征,对其

进行更深入的研究还是非常必要的。

致谢 本文得到周明煜老师的指导。在此表示感谢。

参考文献 (References)

- 陈洪滨. 1999. 利用高频微波被动遥感探测大气 [J]. 遥感技术与应用, 14 (2): 49-54. Chen Hongbin. 1999. Remote sensing of the atmosphere with the millimeter and sub-millimeter wave radiometry from the space [J]. Remote Sensing Technology and Application (in Chinese), 14 (2): 49-54.
- Dominique Ruffieux, Nash J, Jeannot P, et al. 2006. The COST 720 temperature, humidity, and cloud profiling campaign; TUC [J]. Meteorologische Zeitschrift, 1, 5-10.
- Elliott W P, Gaffen D J. 1991. On the utility of radiosonde humidity archives for climate studies [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 72: 1507-1520.
- England M N, Ferrare R A, Melfi S H, et al. 1992. Atmospheric water vapor measurements: Comparison of microwave radiometry and lidar [J]. J. Geophys. Res., 97: 899-916.
- Guldner J, Spankuch D. 2001. Remote sensing of the thermodynamic state of the atmospheric boundary layer by ground-based microwave radiometry [J]. J. Atmos. Oceanic Technol., 18: 925-933.
- Han Y, Westwater E. 2000. Analysis and improvement of tipping calibration for ground-based microwave radiometers [J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 38: 1260-1276.
- Kelly K K, Tuck A F, Davies T. 1991. Wintertime asymmetry of upper tropospheric water vapor between the Northern and Southern hemispheres [J]. Nature, 353, 244-247.
- 李万彪, 刘盈辉, 朱元克, 等. 2001. HUBEX 试验期间地基微波辐射计反演资料的应用研究 [J]. 气候与环境研究, 6 (2): 204-208. Li Wanbiao, Liu Yinghui, Zhu Yuanjing, et al. 2001. An application of the measurements by the ground-based microwave radiometers in HUBEX [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 6 (2): 204-208.
- 廖国男. 2004. 大气辐射导论 [M]. 北京: 气象出版社. Liao G N. 2004. An Introduction to Atmospheric Radiation (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press.
- 林龙福, 吕达仁, 刘锦丽, 等. 1994. 不同侧边界条件下水平有限降水云的微波辐射模式研究 [J]. 大气科学, 18 (6): 729-738. Lin Longfu, Lü Daren, Liu Jinli, et al. 1994. Model study of microwave radiances emerging from horizontally finite precipitating clouds with different lateral boundary conditions [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 18 (6), 729-738.
- Middleton W E K, Spilhaus A F. 1953. Meteorological Instruments [M]. University of Toronto Press, Toronto, Ont., Canada.
- Prabhakara C, Short D A, Volmer B E. 1985. El Niño and atmos-

- pheric water vapor, Observations from nimbus 7 SMMR [J]. *J. Climatol. Appl. Meteor.*, 24, 1311-1324.
- Ramanathan V, Berkstrom B R, Harrison E F. 1989. Climate and the earth's radiation budget [J]. *Phys. Today*, 42, 22-32.
- Revercomb H E, Turner D C, Tobin D D, et al. 2003. The ARM program's water vapor intensive observation periods: Overview, initial accomplishments, and future challenges [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 84: 217-236.
- Rind D, Chiou E W, Chu W, et al. 1993. Overview of the stratospheric aerosol and gas experiment II water vapor observations, Method, validation, and data characteristics [J]. *J. Geophys. Res.*, 98: 4835-4856.
- Rocken C, Ware R, Van Hove T, et al. 1993. Sensing atmospheric water vapor with the Global Positioning System [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 20, 2631-2634.
- Rogers R R, Schwartz A P. 1991. Mesoscale fluctuations of columnar water vapor [J]. *J. Appl. Meteor.*, 30: 1305-1322.
- Starr D, Melli S H. 1991. The role of water vapor in climate, a strategic research plan for the proposed GEWEX water vapour project (GVaP) [C]. NASA Conference Publ. 3210: 60.
- Susskind J, Rosenfeld J, Reuter D, et al. 1984. Remote sensing of weather and climate parameters from HIRS2/MSU on TIROS-N [J]. *J. Geophys. Res.*, 89: 4677-4697.
- 魏重. 1995. 三波段地基微波辐射计联合遥感雨云大气参数的方法 [J]. *大气科学*, 19 (1): 21-30. Wei Chong. 1995. Method of retrieving cloud and rain parameters in the atmosphere using the measurements of a triple-wavelength MW radiometer [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese)*, 19 (1): 21-30.
- Westwater E, Crewell S, Mätzler C, et al. 2005. Principles of surface-based microwave and millimeter wave radiometric remote sensing of the troposphere [M]. *Quaderni Dell Società Italiana di Elettromagnetismo*, 1, Settembre.
- 周秀骥. 1982. 大气微波辐射及遥感原理 [M]. 北京: 科学出版社.
- Zhou X J. 1982. The Theory of Atmospheric Microwave Radiance and Remote Sensing (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press.
- 朱元亮, 胡成达, 甄进明, 等. 1994. 微波辐射计在人工影响天气研究中的应用 [J]. *北京大学学报 (自然科学版)*, 30 (5): 597-606.
- Zhu Yuanjing, Hu Chengda, Zhen Jinning, et al. 1994. The role of microwave radiometer in weather modification research [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis (in Chinese)*, 30 (5): 597-606.