

文章编号: 1007 4619(2006)05 0749 07

利用太阳光度计测值估算北京上空水汽含量

张玉香¹, 李晓静¹, 顾行发^{2 3 4}

(1 国家卫星气象中心, 北京 100081; 2 遥感科学国家重点实验室, 中国科学院 遥感应用研究所, 北京 100101;

3 国家航天局 航天遥感论证中心, 北京 100101; 4 电子科技大学 自动化工程学院, 四川 成都 610054)

摘要: 基于 CE318 自动跟踪太阳光度计水汽通道 (936nm) 和一个窗区通道 (870nm) 的北京上空太阳直射辐射观测数据, 利用修改的兰勒方法对大气柱水汽含量的估算方法, 开展了太阳光度计的标定和北京上空水汽含量的计算等。利用探空观测结果对太阳光度计测量水汽量的标定显示, 二者的线性相关性为 0.986 定标不确定度为 0.024g/cm²。利用该方法对从 2002 至 2004 年观测的北京地区水汽含量进行了估算, 结果表明在 1 2 3 11 12 月份, 北京地区大气柱的水汽含量基本上小于 0.5g/cm², 三年中同月份水汽含量的平均值有较好的一致性。

关键词: 水汽含量; 太阳光度计; 定标

中图分类号: TP79/P407 文献标识码: A

Estimation of Water Vapor Amount over Beijing from Sun Photometer Measurements

ZHANG Yu-xiang¹, LI Xiao-jing¹, GU Xing-fa^{2 3 4}

(1 National Satellite Meteorological Center Beijing 100081 China;

2 State Key Laboratory of Remote Sensing Science Jointly Sponsored by the Institute of Remote Sensing Applications of Chinese Academy of Sciences and Beijing Normal University Beijing 100101, China

3 The Center for National Spaceborne Demonstration Beijing 100101 China;

4 School of Automation Engineering the University of Electronic Science and Technology of China Sichuan Chengdu 610054 China)

Abstract Based on measurements on 936nm water vapor band and 870nm atmospheric window band for CE318 sun photometer. A method of water vapor amount estimation by an improved Langley plot is presented. Calibration of CE318 sun photometer and calculation of water vapor amount are also described. The results of calibration of the water vapor exhibited that its linear relativity is 0.986 and the uncertainty is 0.024g/cm². The results of the water vapor amounts in 2002–2004 indicated that they are all less than 0.5g/cm² from Jan (Nov) to Mar (Dec) over Beijing atmosphere. An agreement is occurred to monthly average values of water vapor amounts year by year.

Key words water vapor; sun photometer; calibration

1 引 言

大气中的水汽含量是重要的气象和大气参数,

在许多科学研究领域, 诸如天气预报、地球环境监测、空间遥感和大气辐射传输计算等都需要这个参数。通常情况下, 对于水汽含量的测算一般是通过探空手段实现的。近些年来, 随着科学探测技术的

收稿日期: 2006-04-10 修订日期: 2006-05-25

基金项目: 中国科学院百人计划项目 (编号: KZCX0415), 国家教育部留学回国人员科研启动基金重点项目 (编号: HX040013), 国防科学技术工业委员会项目 (编号: KJSX0401)。

作者简介: 张玉香 (1949—), 女, 副研, 1977年毕业于山东大学光学系, 在国家卫星气象中心工作。多年来主要从事于卫星传感器的辐射定标和大气校正研究工作, 在国内外刊物上发表论文多篇。

研究和发展的,科学家们及相关研究人员开发了利用地基观测方法^[1-3]或空基遥感手段对大气中的水汽含量进行估算和反演。在空基遥感中,有些对地观测卫星上的仪器,如 TERRA AQUA-MODIS 神舟 3-CMODIS 和 FY-1C/1D 扫描辐射计等,都设置了位于近红外的 940nm 通道用来反演大气柱水汽总量^[4-7]; NOAA-16/17/18 卫星上的 HIRS 传感器上有多个中波红外吸收通道用于反演大气水汽廓线; FY-2B/C 卫星扫描辐射计的 6.3—7.6 μm 通道也用于大气水汽总量的反演。在地基观测中,通常采用太阳光度计或微波辐射计相关通道进行大气水汽总量的估算。1999 年以来,我国一些相关部门和遥感研究单位先后从国外引进了几十台(套)法国 CMEL 公司生产的 CE318 自动跟踪太阳光度计,用以进行大气气溶胶消光光学厚度、气溶胶谱分布和水汽含量的探测^[8]。CE318 自动跟踪太阳光度计有 8 个通道,带宽为 10nm,光谱覆盖从可见光到近红外,视场角为 1.2 $^\circ$ 。CE318 太阳光度计的通道参数见表 1。

表 1 CE318 太阳光度计通道参数

Table 1 Sun Photometers wavelength band

通道号	中心波长 /nm	带宽 /nm
1	1020	10
2	870 p_1	10
3	670	10
4	440	10
5	870 p_2	10
6	870	10
7	936	10
8	870 p_3	10

注: p_1 p_2 p_3 为极化通道

架设在国家卫星气象中心楼顶(39 $^\circ$ 57'N, 116 $^\circ$ 19'E)的一台 CE318 太阳光度计,自 2002 年 5 月开始对北京上空大气进行观测,本文利用其中的太阳直射辐射度观测数据,并采用一种称作“修改的兰勒方法”对大气柱的水汽含量进行了估算方法试验和研究。通过北京气象观测站(54511 站,

39 $^\circ$ 48'N, 116 $^\circ$ 28'E)探空观测的水汽量对 CE318 太阳光度计观测水汽含量进行了标定,并获得了太阳光度计测量的绝对水汽总量。

2 修改的兰勒(Langley)方法

大气中光谱的光学厚度与地面上观测到的光谱的直射太阳辐射强度 E_λ , 有如下关系^[8,9],

$$E_\lambda = E_{0\lambda} R^{-2} \cdot \exp(-m \tau_\lambda) T_{g\lambda} \quad (1)$$

式中, $E_{0\lambda}$ 是波长为 λ 的大气外界太阳辐照度(太阳常数), R 为测量时刻的日地距离校正量(平均与实际日地距离的比值), m 为大气质量数(m 为太阳天顶角 θ 的函数), τ_λ 为大气垂直总光学厚度, $T_{g\lambda}$ 为吸收气体透过率。

若用测量仪器的输出电压 V_λ 代表 E_λ , 上面公式可以写成:

$$V_\lambda = V_{0\lambda} R^{-2} \cdot \exp(-m \tau_\lambda) \cdot T_{g\lambda} \quad (2)$$

式中, $V_{0\lambda}$ 是定标常数。对于吸收气体透过率 $T_{g\lambda}$, 在可见、近红外波长范围由于臭氧吸收使该值小于 1。根据比尔定律^[2], 臭氧吸收透过率 $T_{O_3\lambda}$ 为

$$T_{O_3\lambda} = \exp(-m \tau_{O_3\lambda}) \quad (3)$$

大气中的二氧化氮(NO_2) 同样也遵从比尔定律。但是, 大气中的水汽吸收透过率并不遵从比尔定律。对于无水汽吸收的波段, 将式(2)和式(3)结合, 大气总光学厚度 τ_λ 可以写成为

$$\tau_\lambda = \tau_\lambda + \tau_{a\lambda} + \tau_{g\lambda} \quad (4)$$

式中, τ_λ 为分子散射(Rayleigh)光学厚度, $\tau_{a\lambda}$ 为气溶胶散射光学厚度, $\tau_{g\lambda}$ 为吸收气体(如 O_3 , NO_2) 光学厚度。

在大气相对稳定的条件下(τ_λ 为一定值), 利用太阳光度计进行不同太阳天顶角(θ)时的太阳直射辐射测值(V_λ), 由 $\ln V_\lambda$ 与 m 的线性关系外推到 m 为 0 时 $\ln V_{0\lambda}$ 的结果。由 $\ln V_\lambda + \ln R^2$ 与 m 画直线, 直线的斜率就是大气总光学厚度 τ_λ , 截距就是太阳光度计获得的大气外界辐射强度($V_{0\lambda}$) 的对数即 $\ln V_{0\lambda}$, 这种方法称之为兰勒(Langley)方法^[2,8,9]。

由于大气中水汽吸收透过率不符合兰勒方法, 针对前面提及的 CE318 太阳光度计来说, 即采用 936nm 水汽通道和 870nm 窗区通道测量辐射的比值, 将两个通道上的瑞利散射和气溶胶散射贡献基本消除掉, 以此来提取大气水汽含量的信息。但是, 由于这两个通道上波谱带位置的差异, 仍有残余的气溶胶和瑞利散射的贡献存在。

图 1 为利用 MODTRAN 3.7 软件包, 并选择

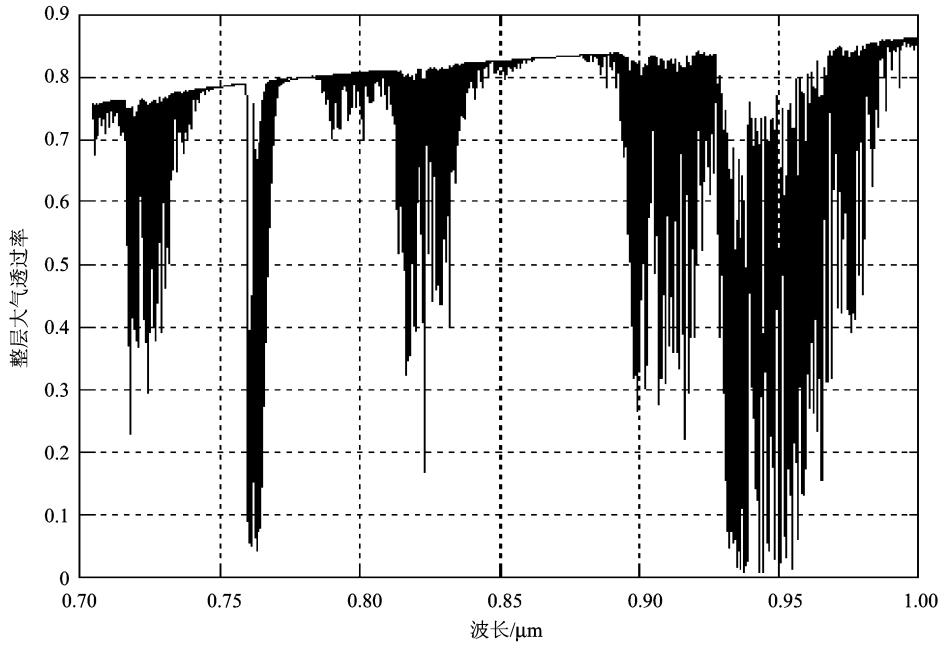


图 1 近红外光谱大气透过率

Fig 1 Atmospheric transmittance at near infrared spectrum

1976年美国标准大气模拟计算的近红外波段大气透过率曲线。该曲线显示了 870nm 和 936nm 通道整层大气透过率的特征。

将 936nm 和 870nm 通道测量电压的比值与大气质量数、水汽含量之间建立一种非线性关系, 式 (5), 此方法称之为修改的兰勒 (Langley) 方法^[1]。

$V_{\lambda_1} N_{\lambda_2} = (V_{0\lambda_1} N_{0\lambda_2}) \exp(- (m \tau_{(a+r)} + (mu)^b))$ (5)
 式中, V_{λ_1} 、 V_{λ_2} 分别为 936nm、870nm 通道上的测值; $V_{0\lambda_1}$ 、 $N_{0\lambda_2}$ 为待定常数; $\tau_{(a+r)}$ 为两个通道上气溶胶和瑞利光学厚度差的贡献 (模拟结果约为 0.01); u 为待求的水汽含量; b 为待定指数。

将式 (5) 两边取对数, 有,

$$\ln(V_{\lambda_1} N_{\lambda_2}) = \ln(V_{0\lambda_1} N_{0\lambda_2}) - m \tau_{(a+r)} - (mu)^b \quad (6)$$

选择大气稳定条件下的 936nm、870nm 通道测值和式 (6), 将 $\ln(V_{\lambda_1} N_{\lambda_2}) + m \tau_{(a+r)}$ 相对于大气质量数 m 的平方根进行线性拟合, 结果发现二者有很好的相关性。那么式 (6) 可以改写为:

$$\ln(V_{\lambda_1} N_{\lambda_2}) + (0.01 * m) = \ln(V_{0\lambda_1} N_{0\lambda_2}) - (mu)^{1/2} \quad (7)$$

那么, $\ln(V_{0\lambda_1} N_{0\lambda_2})$ 为修改的兰勒方法的定标截距常数。

图 2(a)、(b) 为 2002 年 5 月 19 日太阳光度计 936nm 通道测量获得的兰勒曲线和修改的兰勒曲线的比较。

3 截距常数的确定和水汽含量计算

3.1 截距常数的确定

利用大气稳定、晴空条件下 CE318 太阳光度计测值和式 (7) 分别画出修改的兰勒曲线, 获得截距 ($\ln(V_{0\lambda_1} N_{0\lambda_2})$)。考虑到仪器长时间处在野外其性能可能发生变化, 因此, 选择 2002—2003 年 5 月期间获取的、相关系数在 0.999 的若干组截距, 并取平均 (0.13226) 作为该时间段内的截距常数; 同样, 2003 年 6 月—2004 年期间获取截距常数为 0.1849。

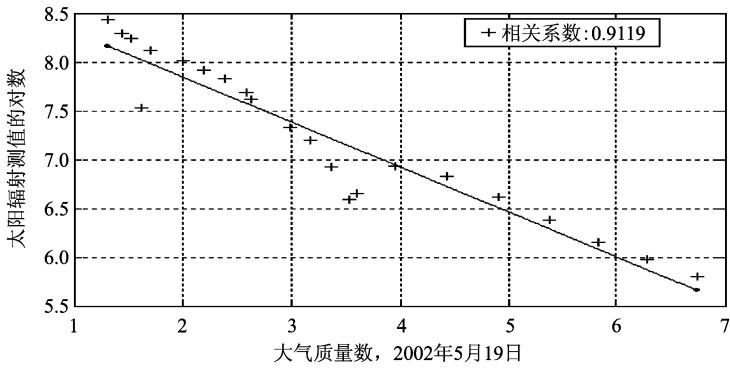
3.2 相对水汽含量的计算

利用确定的截距常数和式 (7) 分别对 2002—2004 年有效观测数据进行处理, 获得所有观测时刻的水汽含量 (u)。图 3 和图 4 分别给出了 2002 年 9 月 16 日和 2003 年 1 月 4 日水汽含量随观测时间的变化。

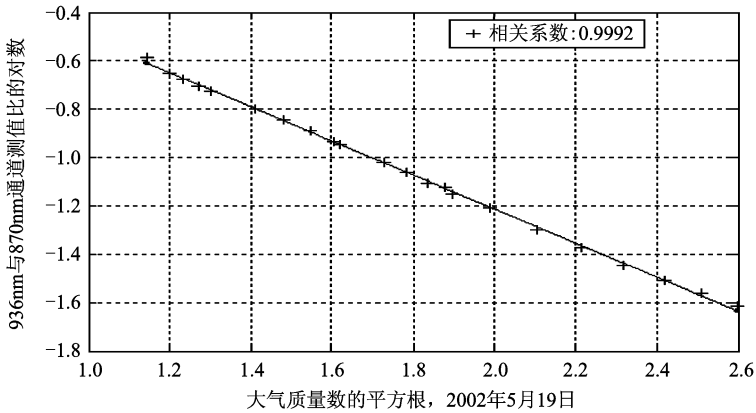
图 3 和图 4 看出, 在一般晴空条件下, 中午前后由于太阳的照射, 水汽含量比早、晚要少的多。

3.3 水汽含量的标定

利用太阳光度计测值估算出的水汽含量是一个无量纲值 (相对单位), 为了获得大气柱绝对水汽含



(a)



(b)

图 2 (a)利用 936nm 通道测值给出的兰勒曲线; (b)利用 936nm 和 870nm 通道测值给出的修改的兰勒曲线

Fig 2 (a) Langley plot at 936nm waveband (b) Improved Langley plot by ratio of measurement at 936nm vs 870nm waveband

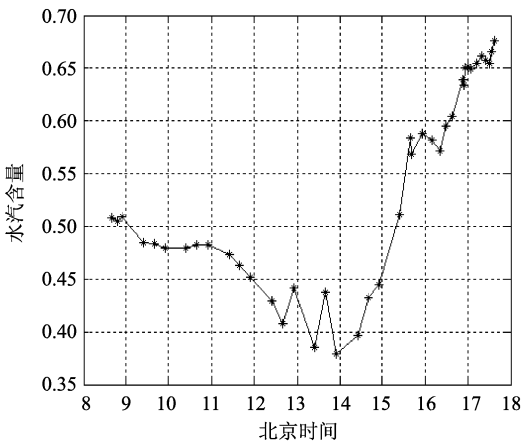


图 3 2002年 9月 16日水汽量(相对单位) 随观测时间的变化

Fig 3 Water vapor amounts on Sep 16 2002

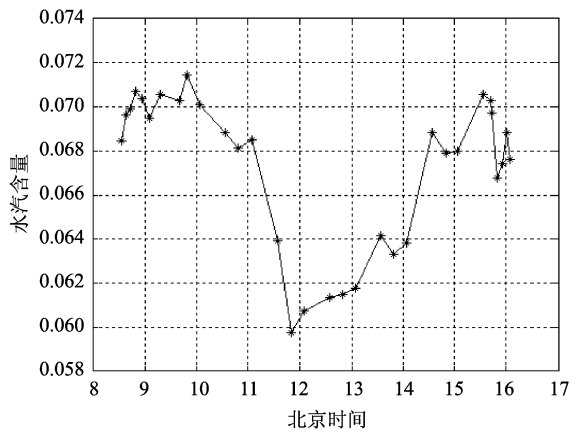


图 4 2003年 1月 4日水汽含量(相对单位) 随观测时间的变化

Fig 4 Water vapor contents on Jan 4 2003

量,需要对太阳光度计获得的相对水汽量进行标定。具体做法是:

(1) 选择 68 个太阳光度计晴空观测日,对这些观测日的北京气象观测站(54511 站)早 8:00 的探

空廓线数据进行提取,并计算出大气柱绝对水汽含量(单位: g/m^2)。

(2) 将太阳光度计上述观测日获得的相对水汽量与探空观测绝对水汽含量进行线性拟合,获得

CE318太阳光度计水汽通道标定结果, 其斜率为 2.08391, 截距为 -0.024 相关系数为 0.986 标准偏差约为 1×10^{-8} , 如图 5 所示。

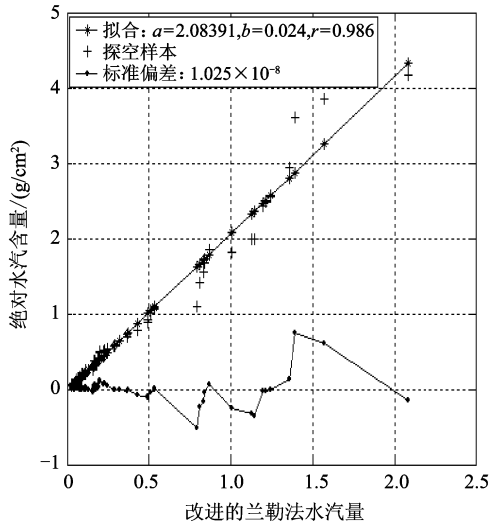


图 5 CE318 936nm 通道水汽含量的标定

Fig 5 Calibration of water vapor amounts

利用水汽量定标斜率和截距, 将 CE318 三年期间获得的 345 个有效观测日的相对水汽含量分别转换为绝对水汽含量 (单位: g/cm^2)。图 6 展示了 CE318 观测绝对水汽含量与探空观测结果的比较。

图 6 中, 横坐标为 CE318 观测相对水汽含量, 直线上的所有点表示 CE318 测量绝对水汽量; “+” 表示探空测量结果。从图中可以看出: 利用两种观

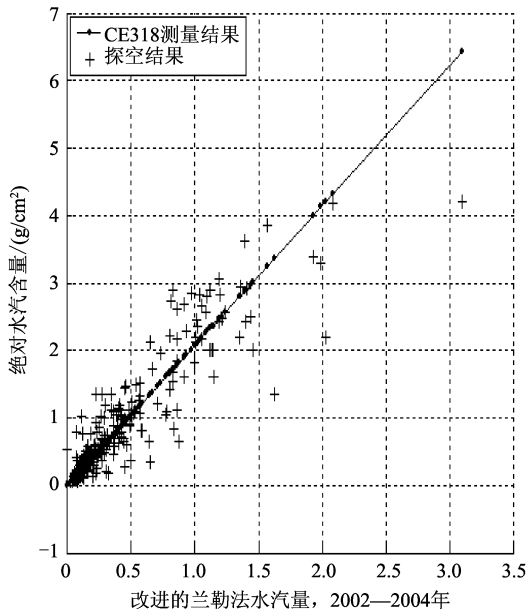


图 6 CE318 观测水汽含量与探空观测结果比较 (北京地区)

Fig 6 The water vapor amounts of measurements by the Sun photometer and radiosonde in Beijing

测手段获得的水汽含量有较好的一致性, 但也发现探空结果与 CE318 观测存在一定的偏差, 这是由于观测时刻大气状况的不稳定和探空仪器的观测误差所致。

为了分析北京地区不同季节大气中水汽的分布情况, 图 7、图 8 和图 9 分别给出了 2002、2003 和 2004 年获得的水汽含量随观测月份的分布情况。

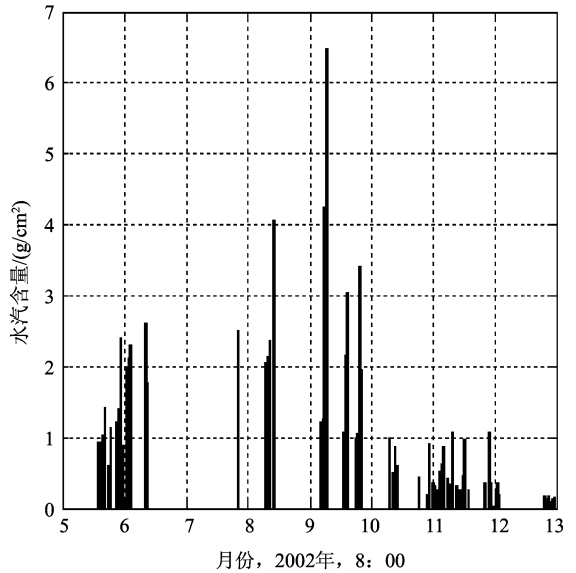


图 7 2002 年 5—12 月期间水汽含量的分布 (北京地区)

Fig 7 Water vapor amounts in Beijing during May—Dec. 2002

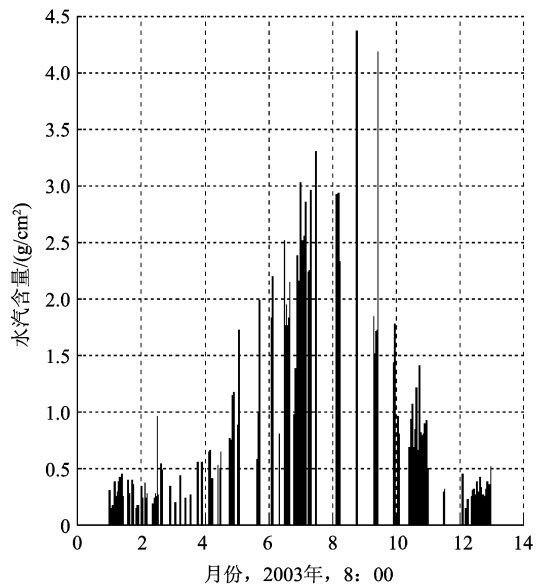


图 8 2003 年水汽含量随月份的分布 (北京地区)

Fig 8 Water vapor amounts in Beijing 2003

表 2 中列出了 2002、2003 和 2004 年中水汽含量月平均值。

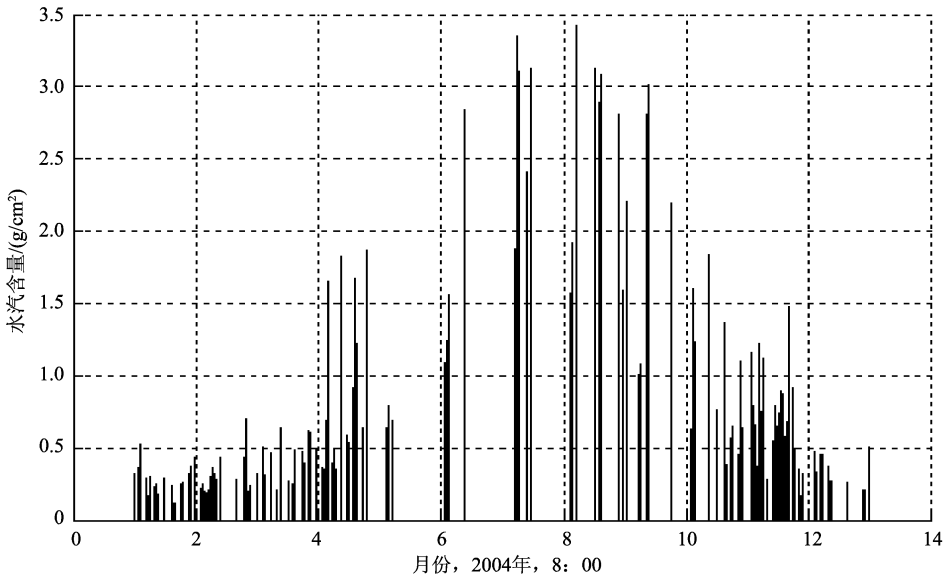


图 9 2004年水汽含量随月份的分布(北京地区)

Fig 9 Water vapor amounts in Beijing 2004

表 2 北京地区水汽含量月平均值(8 00)(单位: g/cm^2)

Table 2 Monthly average of water vapor amounts in Beijing

月份	2002年	2003年	2004年
1	—	0.2704	0.2787
2	—	0.3492	0.3096
3	—	0.3678	0.3920
4	—	0.7035	0.9041
5	1.1955	1.2249	0.7042
6	2.1569	1.9025	1.6814
7	2.4995	2.6296	2.7732
8	2.6556	3.1355	2.5525
9	2.4495	2.0213	2.0525
10	0.6066	0.8053	0.8724
11	0.4752	0.2994	0.7216
12	0.1786	0.3016	0.3395

3.4 结果分析

利用 CE318 太阳光度计 936nm 和 870nm 通道测值及修改的兰勒方法获得的北京上空水汽含量可以看出: 本文中所讨论的修改的兰勒方法从理论上和实际操作上都是可行的; 利用 CE318 太阳光度计 2002—2004 年观测获得的水汽含量精确度较高, 月变化与实际情况比较符合; 由图 7—图 9 中水汽含

量随月份的分布看出, 北京地区在春、冬季节水汽含量较低 (1, 2, 3, 11, 12 月份, 基本上小于 $0.5g/cm^2$); 在夏秋季节水汽含量呈上升趋势。

4 结 论

本文讨论的基于 CE318 太阳光度计水汽通道 (936nm) 和一个窗区通道 (870nm) 的北京上空太阳直射辐射观测数据, 利用修改的兰勒方法对大气柱水汽含量的估算方法, 是一种有效的获取大气中水汽参数的地基观测手段。太阳光度计 936nm 与 870nm 通道测值比的对数与水汽含量 (u) 的平方根呈现出一个很好的相关性。由于 936nm 与 870nm 通道波带的差异, 该两个通道上气溶胶和瑞利光学厚度差的贡献为 0.01 左右。利用探空数据对太阳光度计观测水汽量标定误差为 $0.024g/cm^2$ 。由于探空观测存在一定的误差, 使探空观测水汽含量与太阳光度计观测结果之间有一定偏差。利用太阳光度计测量给出的 2002—2004 年期间北京上空水汽含量显示, 三年的月平均值有较好的一致性。该结果可为北京地区大气可降水的评估、北京地区环境分析和遥感应用提供了可用的数据。另外, 本研究可为利用 CE318 太阳光度计或同类测量仪器流动式进行水汽含量的测量提供了一种有效方法, 利用该仪器, 是一种在远离探空站的地方获得高精度大气柱水汽含量的补充手段。

参考文献 (References)

- [1] Bird R E, Hulstrom R L. Precipitable Water Measurements with Sun Photometers[J]. *Journal of Applied Meteorology* 1982, 1196— 1201.
- [2] Reagan JA, Thome K J, Herman BM. A Simple Instrument and Technique for Measuring Columnar Water Vapor Via Near IR Differential Solar Transmission Measurements [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 1992, 30, 825— 831.
- [3] Arimio Plana Fattori Michel, Legrand Didier, Tanne *et al*. Estimating the Atmospheric Water Vapor Content From Sun Photometer Measurements[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1997, 37, 790— 804.
- [4] Robert Frouin, Pierre-Yves Deschamps, Pierre Lecomte. Determination From Space of Atmospheric Total Water Vapor Amounts by Differential Absorption Near 940nm; Theory and Airborne Verification[J]. *Journal of Applied Meteorology* 1990, 29, 448— 460.
- [5] Huang Y B, Dong C H. Feasibility Experiments on Sounding Water Vapor Amount with 940nm Spectral Band[J]. *Journal of Applied Meteorological Science* 2002, 13(2): 184— 192 [黄意玢, 董超华. 用 940nm 通道遥感水汽总量的可行性试验[J]. *应用气象学报*, 2002, 13(2): 184— 192]
- [6] Huang Y B, Dong C H, Liu Z Q. Computing Test on the Reflectance in 940nm Water Vapor Channel[J]. *Journal of Applied Meteorological Science* 2002, 13(4): 413— 421 [黄意玢, 董超华, 刘志权. 940nm 水汽通道反射率计算试验[J]. *应用气象学报*, 2002, 13(4): 413— 421]
- [7] Zhang G, Xu JM, Huang Y B. Remote Sensing of Total Columnar Perceptible Water Vapor with two Sun Reflectance Channels of FY-1C Satellite[J]. *Journal of Applied Meteorological Science* 2003, 14(4): 385— 394 [张弓, 许健民, 黄意玢. 用 FY-1C 两个近红外太阳反射光通道的观测数据反演水汽总含量[J]. *应用气象学报*, 2003, 14(4): 385— 394]
- [8] Zhang Y X, Hu X Q, Liu Y J *et al*. Measurement for Atmospheric Aerosol Optical Characteristic in Beijing Urban District[J]. *Journal of Applied Meteorological Science* 2002, 13 (Supplement): 136— 143. [张玉香等. 北京地区大气气溶胶光学特性监测研究[J]. *应用气象学报*, 2002, 13(增刊): 136— 143]
- [9] Biggar S E, Gellman D J, Slater P N. Improved Evaluation of Optical Depth Components From Langley Plot Data[J]. *Remote Sens Environ* 1990, 32, 91— 101.