

多波段光度计遥感气溶胶误差分析及订正^{*}

张军华 王美华 毛节泰

(北京大学地球物理系暴雨监测和预测国家重点实验室, 北京 100871)

摘 要 结合 1998 年实际遥感气溶胶所用多波段光度计, 详细分析了由于仪器定标、仪器视场角、滤光片宽度、气体吸收等方面带来的误差, 并提出了相应的订正方法, 特别是针对水汽的吸收, 提出了三波段差分吸收订正法。结果表明, 通过误差订正, 遥感精度有很大提高, 气溶胶光学厚度在 0.1 左右, 相对误差不超过 10%, 中等大气浑浊度情况下相对误差 2% 左右。

关键词: 光度计; 大气光学厚度; 气溶胶

1 引言

多波段光度计遥感气溶胶是气溶胶光度学观测的一种常用方法。实际应用中, 光度计的波段选取、半波宽度、仪器定标、吸收气体的影响以及观测等方面都可能带来误差, 许多作者对此作过分析, 如 Shaw^[1]分析了天气条件、天空散射光、气体吸收等对仪器定标的影响, Box 和 Deepak^[2,3]从理论上定量分析了由仪器视场角引入的误差, Pinker 等^[4]也详细论述了减小定标误差的必要性和方法。根据我们 1998 年在广东新丰江、青海瓦里关、北京密云、西藏当雄^[5]所做的气溶胶光度计观测, 结合所用的多波段光度计, 详细地讨论了定标误差、仪器误差和吸收气体引起的误差, 并给出了可行的订正方法。这些分析和方法, 也适用于利用其他多波段光度计遥感气溶胶的误差分析和订正。

2 观测仪器

实验所用仪器为北京师范大学光电仪器厂生产的 BB 型 10 波段太阳光度计, 视场为 3° 圆形视场, 10 个波段的中心波长分别位于 450 nm、500 nm、550 nm、600 nm、650 nm、700 nm、750 nm、800 nm、850 nm、900 nm 附近, 半波宽度 10~20 nm, 四台仪器的中心波长、半波宽度、响应函数均由生产厂家准确测定。

3 误差分析及订正

根据误差的来源, 分为定标误差、仪器固有误差和吸收气体误差分别论述。

1999-06-14 收到, 1999-09-02 收到修改稿

^{*} 国家自然科学基金资助项目 49635200

3.1 仪器定标误差

根据 Lambert-Beer 定律, 整层大气的光学厚度由下式计算得出^[6]:

$$\tau(\lambda) = -\frac{1}{m(\mu)} \ln \frac{V(\lambda)}{\alpha V_0(\lambda)}, \quad (1)$$

其中 $\tau(\lambda)$ 为整层大气光学厚度, $V(\lambda)$ 为太阳光度计测值, $V_0(\lambda)$ 为光度计定标常数, $m(\mu)$ 为大气质量数, μ 为太阳天顶角。

由仪器定标误差引起的气溶胶光学厚度的绝对误差可表示为

$$\Delta\tau(\lambda) = -\frac{1}{m(\mu)} \frac{\Delta V_0(\lambda)}{V_0(\lambda)}. \quad (2)$$

光度计的定标有两种方法: 标准光源法和 Langley 法^[1]。由于不同的标准光源存在 5%~10% 的相对误差^[1], 利用标准光源法作仪器的绝对定标还存在一定的不确定性, 因此我们对仪器采用标准光源法和 Langley 法相结合的定标方法。利用标准光源监测观测过程中仪器的稳定性, 以消除由于温度效应、探测器变性等带来的误差, $V_0(\lambda)$ 由 Langley 法定出。

Langley 法定标的关键是大气稳定性, 对天气条件要求严格, 在比较洁净的大气条件下, 定标结果较好。对每一次的定标数据的处理, 首先选取大气质量数小于 6.0 的数据点, 利用最小二乘法拟合 $\ln[V(\lambda)/\alpha]$ 与 $m(\mu)$ 的关系。求出线性相关大于 0.99 的直线在 y 轴的截距, 得到第一次 $V_0(\lambda)$ 的近似值。然后根据 (1) 式计算这段时间的 $\tau(\lambda)$, 剔除与平均光学厚度的相对误差大于 2% 的数据点, 再次拟合, 得到要求的 $V_0(\lambda)$ 。经过这样的处理, 定标相对误差小于 2%。

根据在北京天文台兴隆观测站 (海拔 1 000 m)、西藏当雄 (海拔 4 200 m)、安徽黄山 (海拔 1 860 m) 三个定标点定标结果的比较, 对于定标地点的选择, 不但要考虑大气洁净程度, 而且要考虑大气边界层的影响, 相对海拔 1 000 m 以上的定标点是一个合适的选择。

3.2 仪器固有误差

仪器固有误差是由于诸如温度效应、电子线路的非线性、探测器灵敏度变化、滤光片特性、视场角大小等等引入的误差。有关温度效应等引起的仪器稳定性, 通过标准光源对仪器的不断标定解决, 下面只分析由于视场角和滤光片半波宽度引起的误差和订正方法。

3.2.1 视场角的影响

由于仪器固有的视场角, 进入仪器的辐射量除太阳直接辐射以外, 还有部分天空的散射光。可以用公式表示如下^[1]:

$$F(\lambda) = F_0(\lambda)e^{-m(\mu)\tau(\lambda)} + \int L_d d\omega, \quad (3)$$

$F_0(\lambda)$ 为大气上界太阳光谱, L_d 为天空散射光亮度, ω 为立体角。

天空散射光的影响使进入仪器的辐射 $F(\lambda)$ 增大, 根据公式 (1), 计算得到的气溶胶光学厚度将比实际值小。

Shaw^[1]、Box 和 Deepak^[1,3] 分别利用不同的方法计算了天空散射光的影响。根据他

们的结果, 视场角 5° 、中等大气混浊度的情况下, 如果太阳天顶角不大于 80° (大气质量数约为 6), 由于天空散射光带来的误差可以忽略。我们所用仪器视场角为 3° , 对于仪器的定标, 我们取大气质量数小于 6.0 的数据, 天空散射光的影响可以忽略, 而平时观测一般在中午前后进行, 因此可以不考虑天空散射光的影响。

3.2.2 滤光片半波宽度的影响

由于滤光片总是有一定的带宽, 气体分子瑞利散射光学厚度应为波段内积分分子散射光学厚度, 可以用下式计算得出:

$$\tau_m = -\ln(T) = -\ln \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F_0(\lambda) e^{-\tau_m(\lambda)} \Phi(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F_0(\lambda) \Phi(\lambda) d\lambda}, \tag{4}$$

其中 T 为该波段积分分子散射透过率, $\tau_m(\lambda)$ 为单色光瑞利散射光学厚度, $F_0(\lambda)$ 为大气上界太阳光谱, $\Phi(\lambda)$ 为滤光片响应函数。

3.3 吸收气体的影响

在 400 nm~1 000 nm 的可见和近红外波段存在着臭氧、氧气、水汽的弱吸收带。下面分别论述这几种吸收气体的订正方法。

3.3.1 臭氧

臭氧的吸收可以根据臭氧在不同波长的吸收系数和整层大气臭氧总量计算得出。由于缺少实测的臭氧数据, 我们采用 Heuklon^[7] 的臭氧模式计算得到各观测点的臭氧量 (DU):

$$O_3 = 235 + \{150 + 40\sin[0.9865(d_j - 30)] + 20\sin[3(\theta + 20)]\} \sin^2(1.28\varphi), \tag{5}$$

其中第一项 235 为赤道地区臭氧年平均值 (单位: DU), d_j 为儒略历天数, θ 和 φ 分别为观测点的经度和纬度。

考虑到 20 年来臭氧的变化以及青藏高原的低值问题, 参考周秀骥等人的研究成果^[8], 我们在西藏地区取 (5) 式第一项数值为 185, 在其他地区取 205, 由此计算的结果比较符合实际。

3.3.2 水汽

水汽吸收利用三波段方法订正, 具体原理如下。

对水汽的透过率使用随机指数模式近似^[9]:

$$T(W) = e^{-K(mW)^{\gamma}}, \tag{6}$$

其中 K 、 γ 是与水汽吸收有关的常数, m 为大气质量数, W 为整层大气可降水量。

假设气溶胶光学厚度在 8、9、10 波段 (800 nm、850 nm、900 nm) 符合 Angstrom 分布 $\tau_{aer} = \beta\lambda^{-\alpha}$, 对于 8、9、10 波段可以列出以下方程组:

$$\begin{cases} V_8 = V_{08} \exp[-m\tau_{m8} - m\beta\lambda_8^{-\alpha} - K_8(mW)^{\gamma_8}], \\ V_9 = V_{09} \exp[-m\tau_{m9} - m\beta\lambda_9^{-\alpha} - K_9(mW)^{\gamma_9}], \\ V_{10} = V_{010} \exp[-m\tau_{m10} - m\beta\lambda_{10}^{-\alpha} - K_{10}(mW)^{\gamma_{10}}]. \end{cases} \tag{7}$$

方程组中 V_i 代表 i 波段实测值, V_{0i} 代表 i 波段定标值, τ_{mi} 代表 i 波段分子光学厚度, λ_i 为 i 波段波长, K_i 、 γ_i 分别为 i 波段水汽吸收的系数和指数。

假设波段内太阳光谱基本不变, 波段内水汽透过率可由下式计算得到^[9]:

$$T_w = \frac{\int_{\Delta\lambda} T(W, \lambda) \Phi(\lambda) d\lambda}{\int_{\Delta\lambda} \Phi(\lambda) d\lambda} \quad (8)$$

利用 LOWTRAN 六种不同的大气模型, 根据公式 (8) 计算得到三个波段透过率, 并由 (6) 式回归得到 K_i 、 γ_i , 然后由方程组 (7) 求出水汽吸收光学厚度并扣除。

3.3.3 氧气

大气中氧气的百分比含量基本保持不变, 氧气的吸收可以按与水汽同样的方法求出, 理论上是可行的。但实际计算过程中发现, 对氧气的订正总是过大。具体原因可能是, 在气体吸收的波段, 只有在两种情况下 Lambert-Beer 定律成立: (1) 在滤光片波段内有很多未饱和等间距吸收线, (2) 连续吸收带宽超过滤光片宽度。对其他情况 Lambert-Beer 定律不成立^[10]。可见光波段氧气的吸收峰非常尖锐, Lambert-Beer 定律在该波段不成立。正因为氧气吸收峰很尖锐, 它只对 7 波段 (750 nm) 有影响, 因此我们不用 7 波段数据, 剩余 9 个波段的数据对反演气溶胶光学特性已足够。

4 结果讨论

通过以上讨论, 可以看出, 多波段光度计遥感大气气溶胶存在各种误差, 特别是在气溶胶光学厚度比较小的情况更容易引入很大相对误差。图 1、图 2 分别表示气溶胶光学厚度较大、较小两种情况下订正前后的气溶胶光学厚度。

订正前后差别非常明显, 特别是对水汽的订正, 8、9、10 波段数据比订正以前有明显改观, 说明了三波段差分法订正水汽吸收的正确性。对短波段分子瑞利散射光学厚度的订正, 在气溶胶光学厚度较小时也非常明显, 如图 2 第 1 波段。通过这些误差订

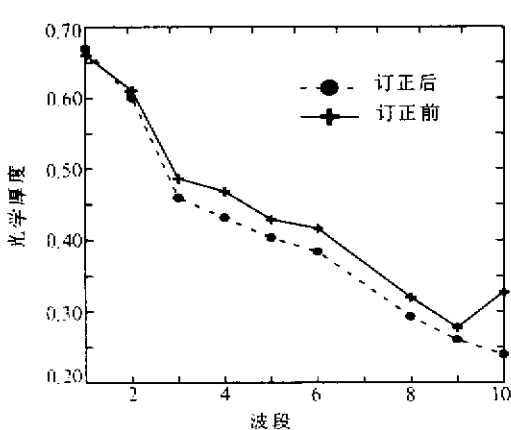


图 1 较大光学厚度订正前后比较

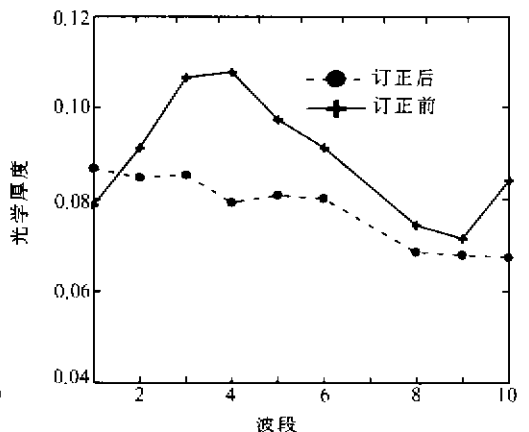


图 2 较小光学厚度订正前后比较

正, 气溶胶光学厚度的最大不确定性来源于观测误差, 这种随机误差只有靠增加测量次数来减小。实际观测时, 每个波段都读三次数据, 然后求平均, 这样由观测引起的偶然误差大大减小。通过订正, 在光学厚度比较小的情况下相对误差小于 10%, 在中等浑浊度情况下, 相对误差在 2% 左右。对氧气的订正明显过大的问题有待继续研究, 如果是由于本文提出的原因引起, 在以后选取滤光片波段时一定要避开该波段。另外, 滤光片中包含 940 nm 和 880 nm 两个波段以反演水汽量是一个比较好的选择。

致谢: 中国科学院大气物理研究所石广玉研究员, 安徽光学精密机械研究所周军研究员对本研究提供了大力帮助, 在此表示感谢。

参 考 文 献

- 1 Shaw, G. E., Error analysis of multi-wavelength sun photometry, *Pure Appl. Geophys.*, 1976, **114**, 1~14.
- 2 Deepak, A. and Box M. A., Forward scattering corrections for optical extinction measurements in aerosol media. 1: monodispersions, *Applied Optics*, 1978, **17**(18), 2900~2908.
- 3 Box, M. A. and Deepak A., Atmospheric scattering corrections to solar radiometry, *Applied Optics*, 1979, **18**(12), 1942~1949.
- 4 Pinker, R. T. et al., Aerosol optical depths in a semiarid region, *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**(D10), 11123~11137.
- 5 张军华, 刘莉, 毛节奏, 地基多波段遥感西藏当雄地区气溶胶光学特性, *大气科学*, 2000, **24**(4), 549~558.
- 6 Lenoble, J., *Atmospheric Radiative Transfer*, Hampton, Virginia, USA: A. Deepak Publ., 1993, 450pp.
- 7 Heuklon, T. K. V., Estimating atmospheric ozone for solar radiation models, *Solar Energy*, 1979, **22**, 63~68.
- 8 周秀骥, 中国地区大气臭氧变化及其对气候环境的影响 (二), 北京: 气象出版社, 1996, 292~296.
- 9 Han Jiecai, Zhou Jun et al., Precipitable water measurements with sun-photometer, *Acta Meteorologica Sinica*, 1997, **11**(1), 96~104.
- 10 Makarova, Ye. A. and Kharitonov A. V., Distribution of Energy in the Solar Spectrum and the Solar Contrast, NASA Technical Translation NASA TTF-803, 1974, 253pp.

Error Analysis and Correction for Multi-Wavelength Sun-Photometer Aerosol Remote Sensing

Zhang Junhua, Wang Meihua and Mao Jietai

(State Key Laboratory for Severe Storm Research, Department of Geophysics, Peking University, Beijing 100871)

Abstract Error analysis and correction is applied to a specific multi-wavelength sun-photometer, which is used for aerosol remote sensing at four locations in China. The results show that instrument calibration, filter bandwidth, gas absorption, etc. can bring serious errors. Several methods are used to correct these kinds of errors, especially a "three band method" is put forward to reduce the errors brought by water vapor. After the correction, it is shown that the relative error is no larger than 10% for very clear condition and is about 2% for medium turbidity.

Key words: photometer; atmospheric optical thickness; aerosol