

多波段光度计定标及误差分析

高玲¹ 赵春雷² 李成才^{1,†} 任通¹ 李倩¹

1. 北京大学物理学院大气与海洋科学系, 北京 100871; 2. 河北省气象科学研究所, 石家庄 050021;
† 通信作者, E-mail: ccli@pku.edu.cn

摘要 根据 Langley 法定标的原理, 在河北省灵寿县对 4 台多波段太阳光度计 MICROTOPS II 进行定标, 并采用最小二乘法得到了很好的定标结果。分别计算了仪器的视场角、通道的半波宽度、大气状况以及气体吸收等方面对定标结果造成的影响, 并且对水汽吸收通道(936 nm)采用修正的 Langley 法定标, 得到 4 台仪器各自 5 个通道的定标系数。将定标后的仪器在天津武清和河北石家庄进行了观测, 每两台仪器测得的气溶胶光学厚度(AOT)相对误差在 1%左右, 说明此次利用 Langley 法定标的结果很好。

关键词 多波段太阳光度计; 定标; Langley 法; 气溶胶光学厚度

中图分类号 P412

Calibration and Error Analysis for Multi-wavelength Sun-Photometer Observations

GAO Ling¹, ZHAO Chunlei², LI Chengcai^{1,†}, REN Tong¹, LI Qian¹

1. Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, School of Physics, Peking University, Beijing 100871; 2. Institute for Meteorological Research of HeBei Province, Shijiazhuang, 050021; † Corresponding author, E-mail: ccli@pku.edu.cn

Abstract The theory of Langley method was used to calibrate the four multi-wavelength MICROTOPS II sun-photometers at Lingshou in Hebei Province, and good calibration results were obtained by using least square method. Then error analysis was taken from instrument viewing angle, filter bandwidth, weather condition, gas absorption etc. The modified Langley method was adopted to the water vapor channel (936 nm). Finally, calibration results of five channels were calculated for each instrument. In order to verify the effectiveness of the calibration, the calibrated sun-photometers were used to observe the aerosol optical thickness (AOT) at Wuqing in Tianjin and Shijiazhuang in Hebei Province. The result shows that the relative errors are no larger than 1%, which indicates a successful calibration.

Key words multi-wavelength sun-photometer; calibration; Langley plots; aerosol optical thickness

大气气溶胶是由大气与悬浮于其中的固体和液体颗粒组成的分散体系的统称, 通常指其中的固体和液体微粒。大气气溶胶通过直接辐射强迫和间接辐射强迫对气候产生重要影响^[1], 因此对大气气溶胶进行观测有重要意义。近年来利用卫星资料反演^[2-3]以及利用地基仪器观测^[4]是两种研究气溶胶光学特性的主要手段, 其中利用地基多波段太阳光度计遥感气溶胶光学厚度是目前气溶胶遥感手段中

最准确的方法。卫星遥感的结果通常利用多波段太阳光度计的遥感结果来检验^[5-6], NASA 为了获得气溶胶的光学特性并校验卫星遥感气溶胶的结果, 在全球建立了一个气溶胶的观测网络(Aerosol RObotic NETwork, AERONET), 由分布在全世界的一百多个站点组成。这些有限的 AERONET 站点数据远远不能满足了解气溶胶时空分布的需要, 因此操作简单的便携式多波段太阳光度计得到了广泛应用。

国家自然科学基金(40575001, 40775002)、863 计划(2006AA06A303, 2008AA121806)和国家公益性行业(气象)科研专项(GYHY200806027)资助

收稿日期: 2010-11-30; 修回日期: 2011-03-04; 网络出版日期: 2011-09-05

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2442.N.20110905.0806.004.html>

多波段太阳光度计遥感气溶胶的原理, 是利用可见光到近红外波段范围内一系列的窄波段滤光片, 测量大气对直接太阳辐射的消光, 然后反演大气气溶胶的光学厚度和粒子谱^[7]。我国最早开始利用多波段光度计遥感气溶胶工作是1983年由赵柏林等^[8]开展的。到目前为止, 我国已进行了许多利用光度计遥感气溶胶的研究工作, 并且取得了许多成果^[9-11]。大量研究表明, 光度计定标不准确会对气溶胶的反演带来很大的误差^[12]。因此, 为了确保太阳光度计测量数据的准确性和可靠性, 就必须定期对太阳光度计进行准确定标。Morys 等^[13]和 Schmid 等^[14]曾利用标准光源法和 Langley 法对 MICROTOPS II 的定标进行了研究, 得到了很好的定标结果。杨志峰等^[15]、李霞^[16]和毕雪岩等^[17]也曾分别开展过 CE318 及 MICROTOSPS II 这两种类型的光度计定标工作。

太阳光度计在实际应用中, 波长的选取、半波宽度、仪器定标和吸收气体的影响等等都会带来观测误差。本文使用的仪器是 MICROTOPS II, 仪器的波长选取、半波宽度已经确定, 因此为了提高气溶胶观测的准确程度, 首先要进行仪器的定标。基于 2009 年 11 月 3 日在河北省灵寿县的一座山上 (38.669°N, 113.848°E, 海拔 1438 m) 的观测, 对 4 台仪器进行了定标, 然后对定标结果进行误差分析, 并对定标后的仪器进行了观测验证。

1 观测仪器

本次观测中采用的仪器是近年来被广泛应用的美国 Solar Light 公司生产的 MICROTOPS II 多波段太阳光度计, 它是一款 5 通道手持式太阳光度计, 用户可以根据不同的观测目的, 购买时可选择通道的中心波长, 通过选择不同的通道来获得臭氧总量 (305.5, 312.5 和 320 nm 通道)^[13]、水汽柱总量 (936 nm 通道) 以及气溶胶光学厚度。每一个通道均备有窄波段滤光片, 都具有 2.5° 的视场角, 圆形视场^[18]。该仪器以其精度高、操作简单、易携带和价格低等优点得到广泛应用。

本次观测使用了 4 台仪器, 每台仪器都有 5 个波段。其中由北京大学物理学院大气与海洋科学系提供的两台仪器 (仪器号 7334 和 7335) 5 个波段的中心波长分别是 340, 500, 675, 870 和 1020 nm, 另外由河北省气象局气象科学研究所提供的两台仪器 (仪器号 10606 和 10610) 5 个波段的中心波长分别为

340, 500, 675, 936 和 1020 nm。除 340 nm 的半波宽度为 2 nm 以外, 其他波段的半波宽度都为 10 nm。此 4 台仪器的中心波长、半波宽度和响应函数均由厂家准确测定。

2 仪器定标

2.1 定标原理

光度计的定标常用的有两种方法: 标准光源法和 Langley 法^[19]。

2.1.1 标准光源定标的基本原理

在实验室使用标准光源, 测定不同通道光电转换元件上的电压值作为定标标准。设 $F_i(\lambda)$ 表示标准光源的辐射通量密度, $V_i(\lambda)$ 为对应的光度计测值, 则 $V_0(\lambda)$ 可计算如下:

$$V_0(\lambda) = V_i(\lambda) \frac{F_0(\lambda)}{F_i(\lambda)}, \quad (1)$$

其中 $F_0(\lambda)$ 代表大气上界波长为 λ 处的太阳辐射通量密度。

2.1.2 Langley 法的基本原理

根据比尔-朗伯定律, 地面接收到的辐射通量密度^[20]用下式计算:

$$\begin{aligned} S_m(\lambda) &= S_0(\lambda) \exp\left(-\int_0^{\infty} k(\lambda) \sec(\theta) dz\right) \\ &= S_0(\lambda) \exp\left(-m \int_0^{\infty} k(\lambda) dz\right) \\ &= S_0(\lambda) \exp(-\tau(\lambda)m), \end{aligned} \quad (2)$$

$S_0(\lambda)$ 代表波长为 λ 处大气上界的辐射通量密度, $S_m(\lambda)$ 代表波长为 λ 处到达地面的辐射通量密度, $k(\lambda)$ 代表波长为 λ 处的大气消光系数, $\tau(\lambda)$ 代表波长为 λ 处整层大气的光学厚度, θ 为太阳天顶角, 大气质量数 $m = \sec(\theta)$ 。但在有折射、密度随高度变化的球面分层大气中, 相对大气质量 m 的计算就复杂多了, Kasten^[21]推导出了比较简便的经验公式:

$$m = \frac{1}{\cos \theta + 0.15(93.885 - \theta)^{-1.253}}。 \quad (3)$$

假定太阳是一个稳定不变的辐射源, 并且在一段时间大气的光学特性不变, 也即 $S_0(\lambda)$ 和 $\tau(\lambda)$ 为定值, 对式(2)取对数有

$$\ln S_m(\lambda) = \ln S_0(\lambda) - \tau(\lambda)m。 \quad (4)$$

由于太阳光度计的电压值 $V(\lambda)$ 与接收到的辐射量 $S(\lambda)$ 成正比关系, 因此有

$$\ln V_m(\lambda) = \ln V_0(\lambda) - \tau(\lambda)m。 \quad (5)$$

此时直线的截距 $\ln V_0(\lambda)$ 即为各个通道的定标系数。

在实际定标过程中, 由于测量时间较长, 因此定标成功与否的关键在于定标期间大气的稳定性, 即大气光学厚度 $\tau(\lambda)$ 在定标过程中是否为常数, 定标的精度直接与大气的稳定度有关。

2.2 观测以及定标数据处理

2.2.1 仪器操作

1) 一定要在保持顶窗盖关闭的情况下开机, 因为在开机的过程中仪器要先测一个暗电流。否则会使得 AOT 测值偏大。

2) 将仪器与 GPS 相连接。若没有的话, 应手动在子菜单的 CLOCK 里设置仪器的时间(世界时), 在子菜单 LOCATION 里设置测点经纬度、海拔高度及气压信息。

3) 在观测的时候应随时记录当时的天气状况, 在目测没有云的情况下方能进行观测, 首先要打开顶窗盖, 将进光口对准太阳, 待太阳的光点与仪器圆盘上的内圈重合的情况下, 视为对准。

4) 在主菜单的情况下, 按下 SCAN 键开始扫描, 一般设置的扫描时间是 15 s, 在这个过程中为了保

持测值的准确和稳定性, 应尽量保持仪器不动, 可寻找双手的支点。

5) 一次可连续测 3~5 个点, 在观测的过程检测 AOT 的值, 若变化不大, 则说明大气状况比较稳定, 此种数据方能用于定标。

6) 测量间隔可视具体情况而定, 在太阳高度角比较小的时候时间间隔可短一些, 反之则测量间隔可适当延长。若遇到太阳暂时被云块遮蔽的情况, 可适当调整观测时间。

2.2.2 定标数据处理

利用串口将光度计与计算机相连, 应用 Microtops Organizer 软件将光度计存储器内的数据下载到计算机上, 并从中提取大气光学质量(AM)、日地平均距离的修正系数(SDCORR)及各通道的电压值信息(SIG340, SIG500, SIG675, SIG936 或 SIG870, SIG1020), 根据式(5)采用最小二乘法拟合直线, 得到截距 $\ln V_0(\lambda)$ 。将拟合直线偏离较大的点除去, 然后再次拟合, 直至拟合直线的线性相关大于 99%。定标结果见图 1, 得到的定标系数见表 1。

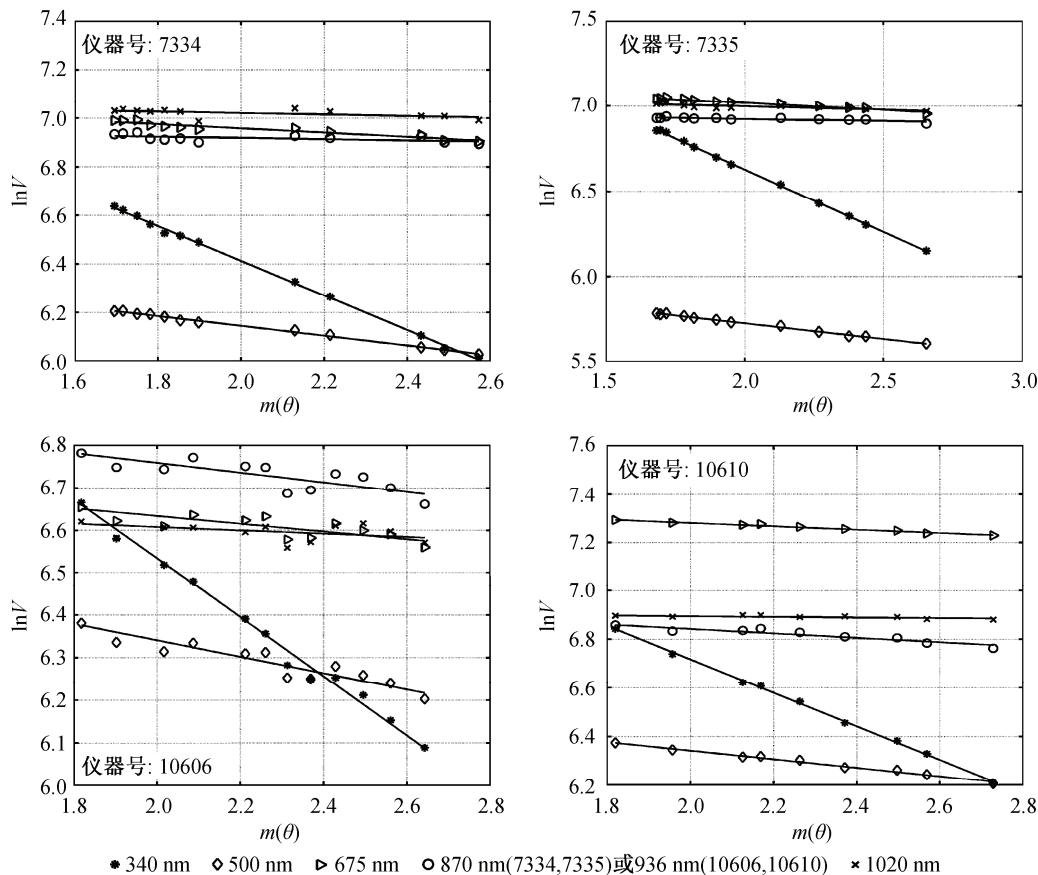


图 1 4 台太阳光度计(7334, 7335, 10606, 10610)各通道定标结果
Fig. 1 Calibration results of every channel for each sun-photometer

表 1 4 台光度计的各通道的定标系数

Table 1 Calibration constants of every sun-photometer

λ/nm	10606	10610	7334	7335
340	8.079	8.256	8.087	7.831
500	6.752	6.776	6.091	6.541
675	6.805	7.480	7.186	7.137
870	-	-	6.971	6.985
936	6.888	7.057	-	-
1020	6.732	7.033	7.080	7.090

由图 1 可以看到, 4 台仪器各自 5 个通道的数据基本呈线性分布, 很好地满足了 Langley 法定标的条件, 根据 Langley 法定标原理, 拟合得到的各通道直线的截距即为定标系数。另外从定标结果还可以看出, 虽然是在同时同地对同型号的光度计进行定标, 但由于不同仪器感应元件存在差异, 每台仪器的定标系数并不相同, 因此需要对每台仪器各自进行定标。将定标结果在光度计中进行设置, 新观测的数据将按照新的定标系数进行处理。

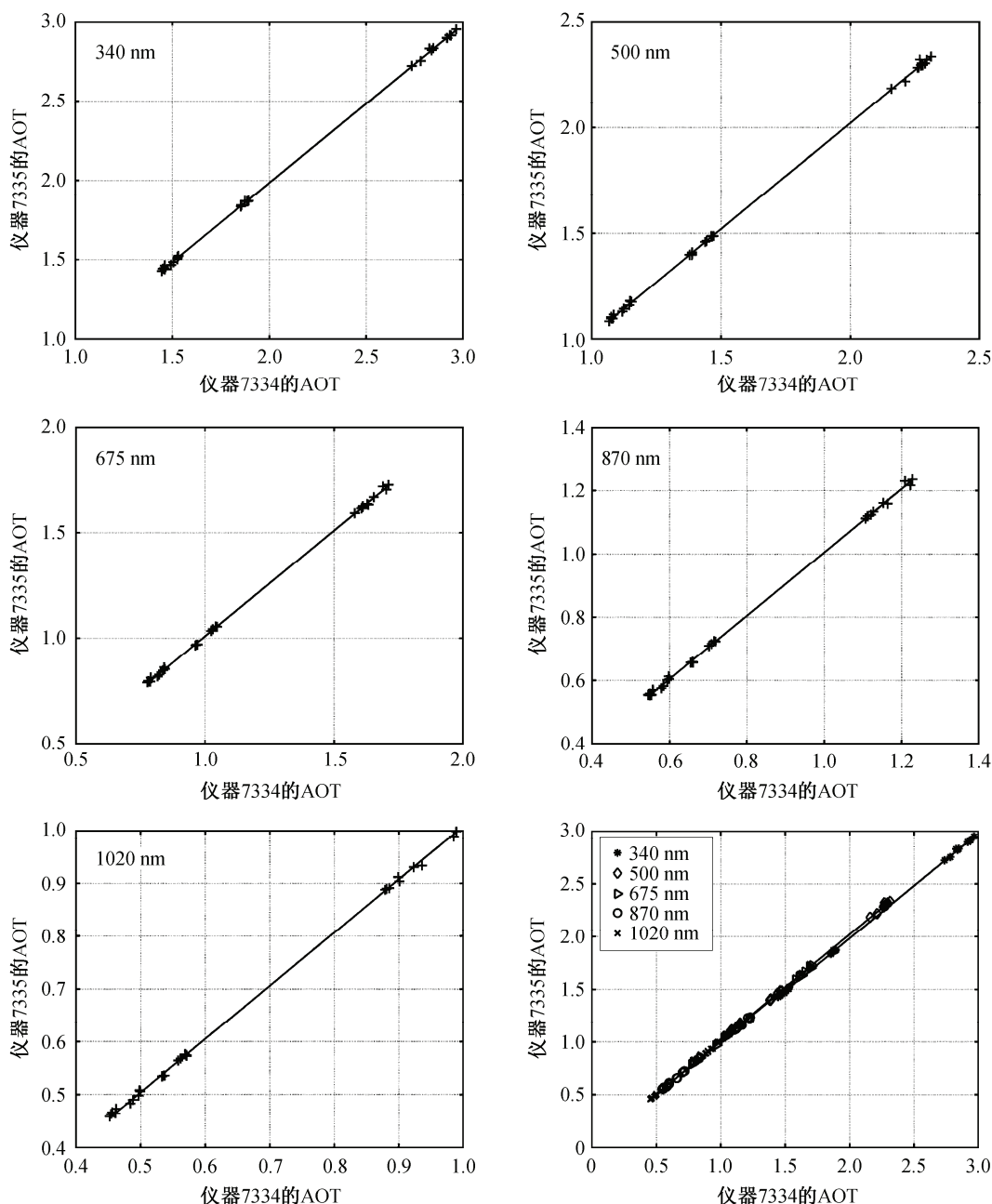


图 2 仪器 7334 和 7335 在天津武清测得的 AOT 对比

Fig. 2 Comparison aerosol optical thickness from same type sun-photometer (7334, 7335) at Wuqing in Tianjin

2.3 定标结果验证

当光度计的各通道进行定标后, 则直接从光度计中获取的AOT值即为订正后的真实的气溶胶光学厚度的值。

使用表 1 中 Langley 法定标的结果订正太阳光度计(7334, 7335), 并于 2009 年 11 月 23 日和 27 日用其在天津武清(39.383°N, 117.017°E, 海拔 150 m)进行观测, 直接提取 AOT 值, 即为已做定标订正后的值, 两者相对比得到的结果如图 2 所示。同理在

河北石家庄(38.03°N, 114.26°E, 海拔 70 m)于 2009 年 12 月 30 日对 10606 和 10610 仪器定标结果进行验证, 两者相对比结果如图 3 所示。同型号两台仪器测量结果的相对误差不超过 1%, 相关系数如表 2 所示, 都超过了 98%。

从图 2 可以看到仪器 7334 和 7335 相同通道的值都基本相等, 而图 3 中仪器 10606 和 10610 相同通道的值存在一定的差别。原因如下: 2009 年 11 月 23 和 27 日武清出现霾, 气溶胶光学厚度非常大, 因

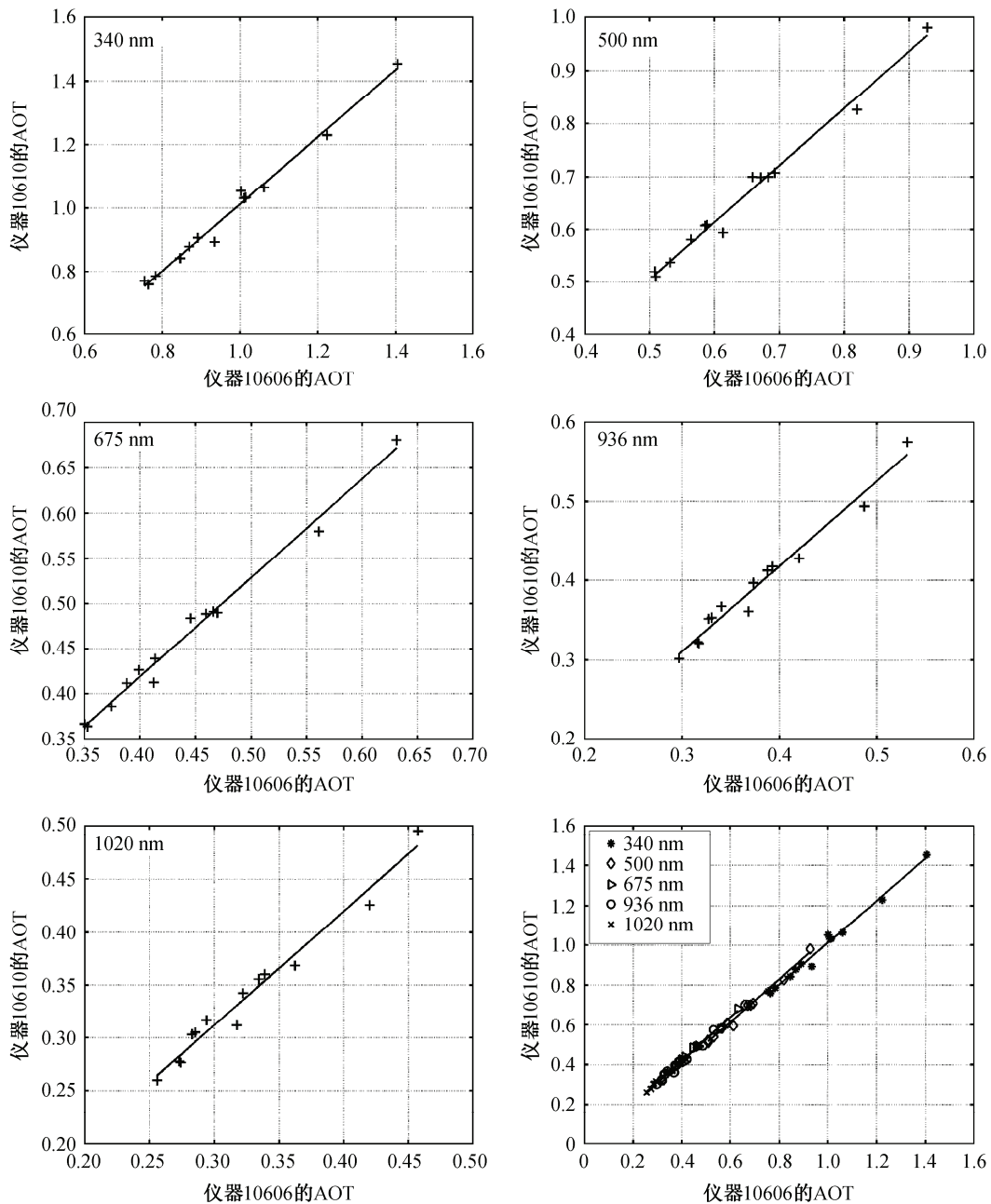


图 3 仪器 10606 和 10610 在河北石家庄测得的 AOT 对比

Fig. 3 Comparison aerosol optical thickness from same type sun-photometers (10610, 10606) at Shijiazhuang in Hebei Province

表 2 型号相同的光度计各通道的相关系数
Table 2 Correlation coefficient of each channel for the same type sun-photometer

λ/nm	10606 和 10610	7334 和 7335
340	0.9945	0.9999
500	0.9934	0.9999
675	0.9940	0.9998
870	-	0.9997
936	0.9860	-
1020	0.9859	0.9999

此此时用于观测的仪器 7334 和 7335 的相对误差就比较小, 相关系数很高, 每个通道都超过了 99.9%; 而 2009 年 12 月 30 日石家庄相对来说比较干净(550 nm 的 AOD 值小于 0.8), 因此此时用于观测的仪器 10606 和 10610 的相对误差要比重污染的时候大, 但数据质量仍然很高, 每个通道的相关系数也都超过了 98%。两者都满足气溶胶光学厚度观测的精度要求。由此可见 Langley 法定标较准确, 本文的定标也是成功的。

通过仪器的定标订正以后, 气溶胶光学厚度的最大不确定性来源于观测误差, 这种随机误差只能通过增加测量次数来减小, 实际观测的时候, 每个波段可以读 3~5 次数据, 然后求平均, 这样可以大大减小随机误差, 使得对气溶胶光学厚度的观测更加准确。

3 Langley 法定标的误差来源分析

Langley 法定标对于天气条件的要求十分严格, 在比较清洁的大气条件下, 定标结果较好。因此定标地点和定标时刻大气的稳定性是两个需要考虑的问题。对于定标地点的选择不仅要考虑大气的清洁程度, 还需要考虑大气边界层的影响, 因为随着太阳的升高, 边界层会不断发展, 湍流的作用使得大气中气溶胶粒子增加, 气溶胶光学厚度变大。研究表明, 要排除边界层的影响, 定标地点相对高度应该在 1000 m 以上^[22]。

本次观测的定标地点及定标时大气状况如下。

1) 天气状况: 本次观测过程中天气晴好, 目测无云。

2) 大气清洁程度: 340 nm AOT 的值小于 0.16, 大气比较清洁, 且 AOT 的变化范围在 5% 以内, 大气状况也较为稳定, 如图 4 所示。

3) 观测地点: 此次的观测地点海拔高度在 1438 m, 受边界层的影响较小。

因此, 本次定标地点的选择和定标时刻的大气状况是符合要求的。

在满足上述定标地点和天气条件要求时, 仪器定标的误差主要来源于测量仪器固有误差、大气质量数的计算、大气光学厚度的日变化以及吸收气体的影响。

3.1 视场角的误差

由于仪器固有的视场角, 进入仪器的辐射除去太阳直接辐射外, 还有天空的部分散射光, 仪器接收到的辐射值可以表达如下:

$$F(\lambda) = F_0(\lambda) e^{-m(\theta)\tau(\lambda)} + \int L_d d\omega, \quad (6)$$

L_d 表示天空的散射光亮度, ω 为立体角。Shaw^[19] 和 Box^[23] 分别利用不同的方法计算了天空的散射光, 并且得到了如下结论: 在视场角为 5°, 大气中等浑浊, 太阳天顶角不大于 80°(大气质量数约为 6) 的情况下, 由于天空的散射光带来的误差可以忽略。在本次观测中, 仪器的视场角为 2.5°, 大气质量数不大于 3, 且大气十分清洁, 如图 4 所示。因此式 (6) 可近似为式 (1), Langley 法适用。

3.2 仪器通道半波宽度的影响

由于比尔-朗伯定律只能在单色光的情况下成立, 但是仪器的通道有一定的波段宽度, 这会给 Langley 法的应用带来误差, 但是只要在气体的吸收带外, 5 nm 的波段宽度所带来的 V_0 的误差只有 4×10^{-5} ^[23], 可忽略。

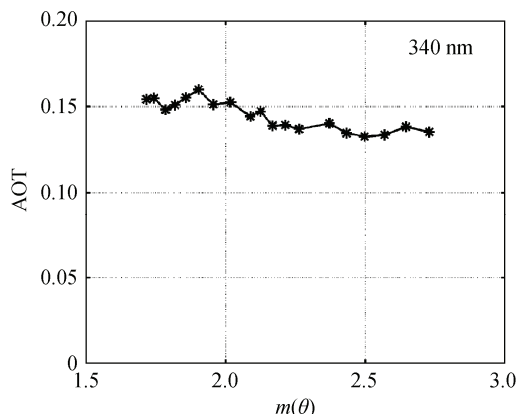


图 4 2009 年 11 月 3 日河北灵寿观测场气溶胶光学厚度随大气质量数的变化
Fig. 4 Aerosol optical thickness changes with optical air mass on 3 November, 2009, at Lingshou in Hebei Province

3.3 大气湍流日变化的影响

Langley法定标是基于假设大气光学厚度不变,以及光度计的灵敏度保持不变基础上成立的。但是一般情况下这种假设很难满足,大气光学厚度一般会随着气溶胶的日变化而有所变化。研究表明,对于一般的气溶胶模型,忽略大气光学厚度的日变化将会引起10%的定标误差^[19]。减小这种误差的方法为:1)选择气溶胶的光学厚度很小的观测地点;2)在观测的时间之内,大气的状况十分稳定。

本次观测在远离城市的高山上进行测量,满足了气溶胶光学厚度很小的条件,另外在高压控制的晴好天气条件下的上午,局地对流强度很小,从图4可见大气的状况也比较稳定。

3.4 吸收性气体的影响

太阳光度计的波长范围主要位于大气窗区,气体的吸收很小,但是在可见和近红外波段还是存在着氧气、臭氧和水汽的弱吸收带,如果不能准确的扣除这些吸收气体的影响,将会给气溶胶的遥感带来误差。Shaw^[19]对位于水汽吸收带上的通道Langley法定出的 $\ln V_0(\lambda)$ 与标准光源法定出的值进行了对比,证实存在较大差异。Schmid等^[14]对水汽通道的Langley法定标进行了修正。

在修正的Langley法定标中,单独考虑水汽的吸收对辐射造成的衰减:

$$m(\theta)\tau(\lambda) \rightarrow m(\theta)\tau_{\text{scat}}(\lambda) + a(m(\theta)u)^b, \quad (7)$$

$\tau_{\text{scat}}(\lambda)$ 表示瑞利散射和气溶胶光学厚度的总和, u 表示水汽的柱总量, a 和 b 是通过辐射传输模式Lowtran确定的常数,在936 nm处定出 $b=0.577$ 。将式(7)代入式(5)可变为

$$\ln V(\lambda) + m(\theta)\tau_{\text{scat}}(\lambda) = \ln V_0(\lambda) - a(m(\theta)u)^b, \quad (8)$$

在水汽含量稳定的情况下, $m(\theta)^b$ 与 $\ln V(\lambda) + m(\theta)\tau_{\text{scat}}(\lambda)$ 呈线性关系,其中等式左边的 $\tau_{\text{scat}}(\lambda)$ 可由该通道相邻的非水汽吸收通道的大气光学厚度值做插值得到。对于美国标准大气,936 nm的AOT等于1020 nm AOT的1.16倍^[19],这样定出来的 $\ln V_0(\lambda)$ 即为修正后的值。

4 分析讨论

利用MICROTOPS II对大气气溶胶观测,为了保证数据的准确性和可靠性,对光度计进行定期的定标是十分必要的,定标的方法有两种:标准光源法和Langley法。标准光源法简单易操作,但是由

于不同的标准光源之间存在5%~10%的相对误差,因此存在一些不确定性。若以太阳为标准光源进行定标,即Langley法定标,又会因为天气状况及定标地点的选择带来一定的定标误差。

对于视场角误差,视场角的大小由出厂设置决定,不可改,但是在大气中等浑浊,太阳天顶角不大于80°(大气质量数约为6)的情况下,由天空的散射光带来的误差可以忽略。此次观测地点选择在海拔为1438 m的高山上,且在天气十分晴好的状况下进行观测,因此大气湍流日变化的影响很大程度上被减小了。另外,对于气体吸收较弱的通道而言,气体吸收对定标的影响可以忽略,而对于936 nm的水汽吸收通道,采用修正的Langley法进行定标,应将水汽的吸收项考虑进去。综合以上的考虑对仪器进行定标,再分别使用仪器7334和7335及仪器10606和10610进行对比观测,相同型号两台仪器AOT的相对误差在1%。

因此当观测地点满足大气清洁、海拔在1000 m以上的条件,且观测期间大气状况稳定时,采用Langley法定标是比较准确的。

参考文献

- [1] King M D, Kaufman Y J, Tanre D, et al. Remote sensing of tropospheric aerosols from space: past, present and future. *Bulletin of American Meteorological Society*, 1999, 80(11): 2229-2259
- [2] Chu D A, Kaufman Y J, Zibordi G, et al. Global monitoring of air pollution over land from the earth observing system — TERRA MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS). *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108 (D21): 4661-4678
- [3] Kaufman Y J, Tanre D, Remer L A, et al. Operational remote sensing of tropospheric aerosol over land from EOS moderate resolution imaging spectroradiometer. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(D14): 17051-17067
- [4] Ichoku C, Levy R, Kaufman Y J, et al. Analysis of the performance characteristics of the five-channel MICROTOPS II sun photometer for measuring aerosol optical thickness and precipitable water vapor. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107(D13): 4179-4195
- [5] Holben B N, Eck T F, Slutsker I, et al. AERONET — a federated instrument network and data archive for aerosol characterization. *Remote Sensing of Environment*, 1998, 66(1): 1-16

- [6] Holben B N, Smirnov I A, Tannre D, et al. An emerging ground-based aerosol climatology: aerosol optical depth from AERONET. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106(D11): 12067–12097
- [7] Russell P B, Livingston J M, Dutton E G, et al. Pinatubo and pre-Pinatubo optical-depth spectra: Mauna Loa measurements, comparisons, inferred particle size distributions, radiative effects, and relationship to lidar data. *Journal of Geophysical Research*, 1993, 98(D12): 22969–22985
- [8] 赵柏林, 王强, 毛节泰, 等. 光学遥感大气气溶胶和水汽的研究. *中国科学: B 辑*, 1983, 13(10): 951–962
- [9] 张军华, 刘莉, 毛节泰. 地基多波段遥感西藏当地地区气溶胶光学特性. *大气科学*, 2000, 24(4): 549–558
- [10] 张玉香, 胡秀清, 刘玉洁, 等. 北京地区大气气溶胶光学特性监测研究. *应用气象学报*, 2002, 13(特刊): 136–143
- [11] 毛节泰, 李成才, 张军华, 等. MODIS 卫星遥感北京地区气溶胶光学厚度及与地面光度计遥感的对比. *应用气象学报*, 2002, 13(特刊): 127–134
- [12] Bruegge C J, Halthore R N, Markham B, et al. Aerosol optical depth retrievals over the Konza Prairie. *Journal of Geophysical Research*, 1992, 97(D17): 18743–18758
- [13] Morys M, Mims III F M, Scott Hagerup, et al. Design, calibration, and performance of MICROTOSPS II handheld ozone monitor and sun photometer. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106(D13): 14573–14582
- [14] Schmid B, Christoph W. Comparison of sun photometer calibration by use of the langley technique and the standard lamp. *Applied optics*, 1995, 34(21): 4500–4512
- [15] 杨志峰, 张小曳, 车慧正, 等. CE318 型太阳光度计标定方法初探. *应用气象学报*, 2008, 19(3): 297–306
- [16] 李霞. 利用台站资料定标太阳光度计效果评估. *气象科技*, 2009, 37(1): 79–84
- [17] 毕雪岩, 吴兑, 谭浩波, 等. MICROTOSPS II 型光度计的使用、计算及定标. *气象科技*, 2007, 35(4): 583–588
- [18] MICROTOSPS II user's guide. Philadelphia, USA: Solar Light Company, 2003
- [19] Shaw G E. Error analysis of multi-wavelength sun photometry. *Pure and Applied Geophysics*, 1976, 114(1): 1–14
- [20] 盛裴轩, 毛节泰, 李建国, 等. *大气物理学*. 北京: 北京大学出版社, 2003
- [21] Kasten F. A new table and approximate formula for relative optical air mass. *Theoretical and Applied Climatology*, 1965, 14(2): 206–223
- [22] 张军华, 王美华, 毛节泰, 等. 多波段光度计遥感气溶胶误差分析及订正. *大气科学*, 2000, 24(6): 855–859
- [23] Box M A. Finite bandwidth and scattered light effects on the radiometric determination of atmospheric turbidity and the solar constant. *Applied Optics*, 1981, 20(13): 2215–2219