

利用台站资料定标太阳光度计效果评估

李霞

(中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所, 乌鲁木齐 830002)

摘要 运用 Langley 方法、采用法国 CE318 太阳光度计在台站的观测记录为光度计定标, 提出一种较客观的数据处理方法, 主要分为 4 步: ①利用 Langley 法对全年资料进行预处理, 得到各通道定标常数、Langley 法线性拟合相关系数、550 nm 的气溶胶光学厚度等; ②以线性拟合相关系数的阈值大小(如 440 nm 相关系数大于等于 0.99)、定标期间 550 nm 的平均气溶胶光学厚度小于等于 0.15、半天(上午或下午)参与拟合的数据个数大于等于 8 组为条件, 对预处理数据进行筛选; ③根据光度计电压信号图像、最大值再次选取定标常数; ④对最终选出的多组定标常数取平均值。对 2002、2005 年, 乌鲁木齐、塔中、哈密、和田 4 个站点光度计资料进行试验, 定标系数与出厂定标值(2002 年)、北京定标值(2005 年)比较后, 4 个站点的定标误差基本控制在 8.5% 以内(和田除外), 说明这种定标步骤有一定的参考价值。

关键词 太阳光度计 定标 Langley 法 相关系数 气溶胶光学厚度

引言

近 10 年气溶胶的气候效应是国际上气候变化研究的热点之一, 同时气溶胶的增多也是造成大气污染的重要因素之一。地基、天基遥感气溶胶是获取气溶胶特性的重要观测手段, 而且地基遥测资料还能够对天基遥测数据的可靠性进行对比较验。因此, 1992 年起, 美国 NASA 在全球陆续安装了 100 多个法国 CIMEL 公司生产的 CE318A 型自动跟踪扫描太阳光度计, 形成了 AERONET 网(Aerosol Robotic Network)^[1], 至今已经发展有 400 余个站点。中国气象局 2002 年在全国陆续建立了 20 个沙尘暴观测站, 目的就是大气气溶胶进行系统的、长期的监测, CE318 太阳光度计是其中的一个重要监测设备。

一个不容忽视的问题是: 一些误差会影响太阳光度计的准确性, 如果不考虑这些因素, 由光度计数据得出的气溶胶参数将包含相当大的误差^[2]。若以这些含带误差的数据来检验卫星等遥感数据, 衍生的错误将难以设想。因此, 为了确保太阳光度计测量数据的准确性、可靠性, 就必须定期对太阳光度计

进行准确定标(本文指对太阳直射辐射测量进行定标)。定标方法主要有 2 种: 标准光源法和 Langley 法。标准光源法简单且易操作, 但是由于不同的标准光源存在 5%~10% 的相对误差, 因此存在一些不确定性^[2]。若将太阳作为标准光源, 运用 Langley 法来定标则更加准确。只是这种方法对定标地点以及天气条件要求较高^[3]。此外, 还可以运用一个或 2 个以上已经定过标的光度计作为参照仪器, 运用它们和被定标的光度计在同一个地点同时进行观测, 由参照光度计得出的光学厚度来反推被定标光度计的定标常数^[4]。

AERONET 每 6 或 12 个月就对全球布设的光度计进行一次定标。首先, 每 3~4 个月在 Mauna Loa 观象台(位于夏威夷, 海拔高, 且远离污染源, 上午大气稳定)运用 Langley 法对参照光度计进行定标, 定标误差控制在 0.2%~0.5% 以内。而后在 GSFC(Goddard Space Flight Center)选择晴朗、稳定的大气条件, 440 nm 的光溶胶光学厚度小于 0.15, 通过与参照光度计交叉比较的方法对全球的光度计进行定标。国内科研人员运用 Langley 法在黄山、西藏等高山或海洋等大气洁净的地方定标, 取

得了很好的结果^[3,5]。而国内气象台站的光度计运用参照光度计来定标比较妥当,但是建网前期寻找合适的参照光度计比较困难。将光度计带离台站到高山或海上等处进行定标,既费时又耽误台站的观测。可能包含上述因素,这批光度计目前只于2005年春季在北京进行过一次比对,而光度计的观测数据也较少应用到科研业务中。直接运用光度计在台站的观测数据、采用 Langley 法对光度计进行定标,定标结果能够达到何种精度呢? 本文采用2002~2005年新疆的4部太阳光度计(乌鲁木齐、塔中、和田和哈密)观测数据进行了尝试,通过对各种气候环境状况下定标结果的比较,说明这种方法在一定程度上是可行的。

1 仪器、定标方法、资料和站点气候背景

1.1 仪器、定标方法

观测站配备的太阳光度计为法国 CIMEL 公司的 CE318 型自动跟踪扫描太阳光度计,该仪器在可见光至近红外波段设有8个观测通道,分别是1020 nm、870p1、670 nm、440 nm、870p2、870 nm、936 nm、870p3,其中 p1、p2、p3 为3个极化通道。法国 CIMEL 公司为太阳光度计专门开发研制了一套应用软件(ASTPWin),主要功能为光度计安装地点参数的设置、数据的获取、传输和数据图像的处理、显示等。

根据 Beer-Lambert-Bouguer 定律,在地面直接测得的在给定波长 λ 的太阳辐照度 E_λ (W/m^2) 在 λ 上:

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

其中 $E_{0\lambda}$ 为大气外界太阳辐照度(太阳常数), R 为测量时刻日地距离订正因子, m 为大气光学质量, τ_λ 为波长 λ 处的大气总光学厚度。若仪器响应的电压与进入仪器的太阳辐照度成正比,即仪器是线性响应的,则式(1)中的辐照度可换算成仪器测得的电压 V_λ 代表 E_λ , 公式(1)为:

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

式中 $V_{0\lambda}$ 是特定波长 λ 的定标常数。大气光学质量 m 的计算公式^[7]为:

$$m = [\cos Z + 0.50572 \times (96.07995 - Z)^{-1.6364}]^{-1} \quad (3)$$

其中 Z 为太阳天顶角,单位是度。

对于无水汽吸收的波段,大气总光学厚度 τ_λ 可

表示为:

$$\tau_\lambda = \tau_{r\lambda} + \tau_{a\lambda} + \tau_{O_3\lambda} + \tau_{NO_2\lambda} \quad (4)$$

其中 $\tau_{r\lambda}$ 为分子散射(Rayleigh)光学厚度, $\tau_{a\lambda}$ 为气溶胶光学厚度, $\tau_{O_3\lambda}$ 、 $\tau_{NO_2\lambda}$ 分别为吸收气体 O_3 、 NO_2 的光学厚度。和前2项相比,后2项非常小,忽略不计。Rayleigh 散射光学厚度可以通过地面气压值^[8]计算:

$$\tau_{r\lambda} = \frac{p}{p_0} 0.0088\lambda^{-4.05} \quad (5)$$

式中 p_0 为标准大气压(1013.25 hPa), p 为实际大气压, λ 为波长,单位是 μm 。将式(2)、(3)和式(4)结合,同时公式两边取对数,则为:

$$\ln V_\lambda - \ln R^2 = \ln V_{0\lambda} - m(\tau_{r\lambda} + \tau_{a\lambda}) \quad (6)$$

以 $\ln V_\lambda - \ln R^2$ 为 y 坐标, m 为 x 坐标,式(6)具有类似 $y = ax + b$ 的线性形式,直线斜率就是大气总光学厚度,截距是太阳光度计在大气外界测得的电压信号的对数 $\ln V_{0\lambda}$, 这就是 Langley 定标法。一旦获得了比较精确的仪器定标常数 $V_{0\lambda}$, 结合式(4), 就可以计算出气溶胶光学厚度(AOD: Aerosol Optical Depth)。本文通过 Langley 法分别计算出440 nm、870 nm的总光学厚度,除去各自的分子散射光学厚度,最终求得这2个通道的AOD。继而运用 Angstrom 公式外推得到550 nm的AOD。

1.2 资料

本文利用新疆乌鲁木齐、塔中2002~2005年及和田、哈密2002~2004年的太阳光度计观测数据进行定标试验(观测资料具体时间见表1)。这4部太阳光度计于2005年3月运往北京,与参照光度计进行比对。但是乌鲁木齐的光度计在京期间出现了故障,没有给出定标结果。而哈密的光度计定标后从当年4月开始在乌鲁木齐安装使用。所以,为了检验本文定标步骤的严谨性,原哈密太阳光度计2005年3月在京的定标结果分别和乌鲁木齐2005年及哈密2004年本站的定标常数进行比较。和田光度计在京的定标结果与2004年本站的结果来比

表1 光度计观测数据的时间

台站	时间
乌鲁木齐	2002-04~2003-03, 2004-01~2005-12
哈密	2002-04~2004-12, 缺2003-06
塔中	2002-06~2005-12
和田	2002-06~2004-12

较,塔中站运用 2005 年的观测资料来比较。2002 年 4 部光度计的定标结果与各自的出厂定标值比较。

2 定标数据处理步骤和试验结果比较

2.1 定标数据处理步骤

(1) 运用 Langley 法对全年资料预处理。

首先运用 ASTPWin 软件,将每站全年光度计资料(K7 文件)生成 8 个子文件。对每日观测数据(*.SSK 文件)分上午、下午时段分别运用 Langley 法(式(6))进行线性拟合。由于太阳高度角低时(即大气质量较大时),天边的云在垂直高度上间隙很小,对辐射产生影响的机会增大;而正午大气质量较小时,湍流发展旺盛,地面气溶胶被输送到空中,同样影响定标,所以只有大气质量 $m \geq 2$ 且 $m \leq 5$ 期间的数据参与 Langley 法计算。输出结果包括 1020、670、440、870 nm 这 4 个通道的定标常数、线性拟合的相关系数及参与线性拟合的数据个数。

(2) 依据 3 个条件初步选出定标数据。

初选定标系数要满足 3 个条件:

① 依据 Langley 线性拟合相关系数的大小选取数据,一般在天气晴朗、大气稳定的状况下拟合的相关系数相对高。本文以 440 nm 的相关系数大于等于 0.95 或 0.99 作为标准。

② 依据空气的洁净程度选取数据,即根据气溶胶光学厚度大小判断:550 nm 的气溶胶光学厚度(AOD)小于等于 0.15 或 0.10。图 1a 是塔中光度

计 2005 年 6 月 22 日的观测值,440 nm 拟合相关系数为 0.9903。但从曲线波动上就可以判断当天的大气不太稳定,这天不宜作为定标日。一般 6 月塔中站光度计测得的电压信号最大值可以达到 22000,而图上只有 16000,表示太阳辐射到达地面时存在较大的衰减。对应天气实况是:上午浮尘天气,能见度仅有 2~5 km,午后虽然无云,但能见度也仅为 15 km,这天上午、下午的 AOD 分别是 0.5957、0.6935。所以,在相关系数较大的情形下,对大气洁净程度还应该有所限制,运用气溶胶光学厚度值 0.15 来界定就可以将塔中这天的记录剔除在定标数据之外。

③ 半天(上午或下午,以 12:00 为界,下同)与 Langley 法定标数据的个数至少达到 8 组。在相关系数高的情形下,数据少不具有代表性。全天大气质量 m 从 2~5 的变化过程出现 2 次,如果只利用 12 h 数据定标,能够参与 Langley 计算的数据多为 12 组,所以本文规定至少 8 组数据具有一定代表性。

(3) 依据电压信号图像、最大值再次筛选取定标数据。

在一天中太阳直接辐射从早晨的最小到中午达到最大,到日落又至最小,整个曲线为对称的半圆弧形。运用 ASTPWin 软件进行处理,由电压信号就可以产生如图 1 所示图像。图 1b 为哈密 2004 年 5 月 3 日的观测记录。哈密当天晴朗,只在早 08:00 出现过 1 成云量,全天风速仅为 1~3 m/s,能见度

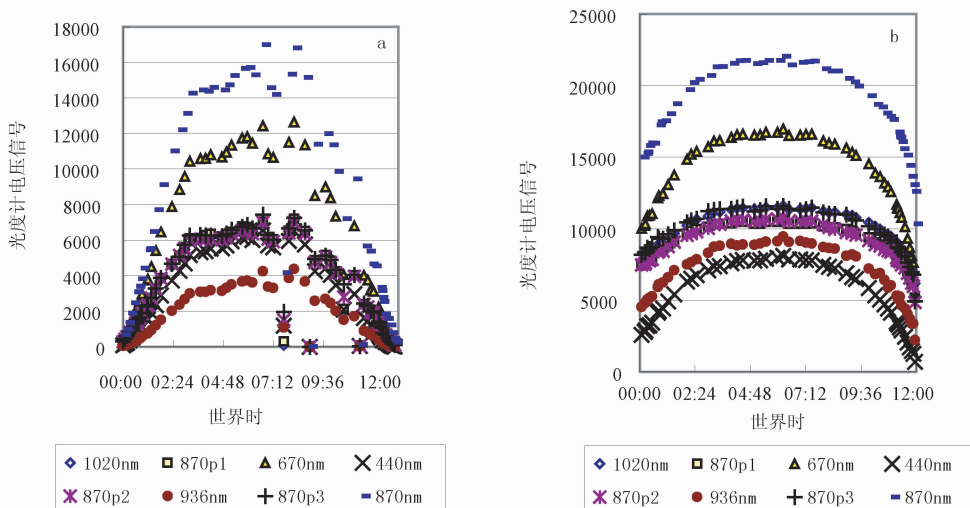


图 1 太阳光度计各通道所测的电压信号随时间变化图像:

(a) 塔中 2005 年 6 月 22 日, (b) 哈密 2004 年 5 月 3 日

一直保持30 km,电压信号图像呈现半圆弧形、对称且圆滑,440 nm 通道的 Langley 法拟合相关系数达0.9924,正午电压信号最大值(870 nm)达到22000,参照哈密数月的光度计观测记录,正午最大信号值在晴好天气条件下一般在22000左右,所以这天上午、下午2个时段的数据都可以采纳。在4个台站的初选数据中,有较多日数电压信号图像与图1b类似,可是正午电压信号的最大值偏离正常最大值很多(≥ 500)、曲线不连续、连续但存在阶梯状等,这些数据都是天气不稳定或云遮挡日面所致,这类数据都不予采纳。

2.2 定标试验结果比较

完成2.1节所述步骤后可以得出预处理定标结

果,每个台站一年中可以得到多组定标常数(半天可得到1组定标常数),数学平均之后可以得到4个站每年各个通道对应的定标常数。通过比较440 nm拟合相关系数(0.95、0.99)以及550 nm的AOD(0.10、0.15)各自的定标结果,发现440 nm的Langley法拟合相关系数大于等于0.99,550 nm的AOD小于等于0.15的定标结果更为稳妥。衡量最终定标结果的优劣是以误差大小表示:误差= $[(\text{出厂或北京定标值}-\text{台站定标值})/\text{出厂或北京定标值} \times 100]$,结果如表2。

表 2 2002年、2005年新疆4部太阳光度计定标结果的比较

		1020 nm	670 nm	440 nm	870 nm	
乌鲁木齐	2002年	出厂定标值	10983.82	20849.73	12786.01	24683.93
		台站定标值	10240.90	20050.75	12298.20	23308.79
		误差/%	6.76	3.83	3.82	5.57
	2005年	北京定标值	12505.54	19580.75	12839.39	24077.20
		台站定标值	13454.96	20841.51	13096.26	26083.29
		误差/%	-7.59	-6.44	-2.00	-8.33
塔中	2002年	出厂定标值	10447.69	19903.49	12990.19	26083.11
		台站定标值	10010.42	19550.61	12543.90	25528.18
		误差/%	4.19	1.77	3.44	2.13
	2005年	北京定标值	9691.78	18559.83	12630.98	24563.94
		台站定标值	10256.42	20112.42	12774.95	26507.33
		误差/%	-5.83	-8.37	-1.14	-7.91
哈密	2002年	出厂定标值	13282.18	20763.76	12738.87	25007.57
		台站定标值	13433.01	20728.65	12591.24	24947.46
		误差/%	-1.14	0.17	1.16	0.24
	2005年	北京定标值	12505.54	19580.75	12839.39	24077.20
		台站定标值	12850.81	19858.57	12296.33	24480.98
		误差/%	-2.76	-1.42	4.23	-1.68
和田	2002年	出厂定标值	12609.48	22157.28	13339.32	25501.48
		台站定标值	12080.10	21036.06	12260.75	23859.09
		误差/%	4.20	5.06	8.09	6.44
	2005年	北京定标值	2032.70	3530.59	2125.07	4163.52
		台站定标值	10184.92	19664.00	11933.12	22284.30
		误差/%	-435.49	-456.96	-461.54	-435.23

从表 2 可见,新疆 4 部光度计经过 2002 年 3 个季度的运行,年底的台站定标值与出厂定标值比较,误差都在 8.5% 以内,空气质量相对差的站点的光度计定标误差也相应大些,哈密台站定标值与出厂定标值相对比较吻合,误差小于 2.0%。2005 年 3 部光度计的台站的定标结果与北京定标值误差也在 8.5% 以内,只是误差都是负数,这可能与这些光度计在北京定标前经过人工清洁、维护等有关。和田光度计在北京的定标值与当地 2004 年的定标结果区别很大,与和田当地连续 3 年的观测记录也不符,原因待查。

3 仪器稳定性的初步判断

上述定标过程是建立在太阳光度计仪器本身性

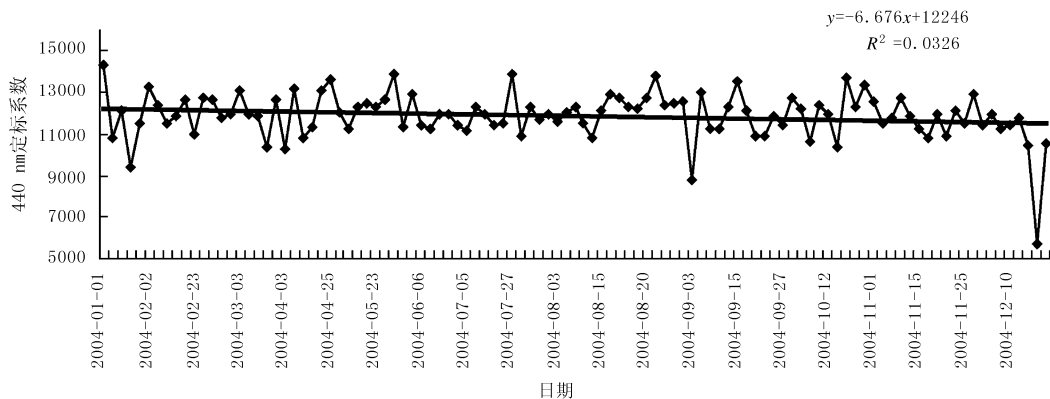


图 2 2004 年哈密太阳光度计 440 nm 初选定标系数序列

4 小结

太阳光度计定标的准确与否由定标方法、仪器精度和定标步骤共同决定的。CE318 是性能比较稳定的光度计,而 Langley 法又是定标的传统方法。本文介绍了运用光度计在台站的观测记录为光度计定标的步骤,主要分为 4 步①利用 Langley 法对全年资料进行预处理,得到每日上午、下午的定标常数、各通道 Langley 法线性拟合的相关系数、当日 550 nm 的 AOD 平均值和参与拟合的数据个数;②采用 3 个条件,即 440 nm 的线性拟合相关系数大于等于 0.99,550 nm 的 AOD 小于等于 0.15,半日参与 Langley 法拟合的数据必须达到 8 组以上对数据进行初选;③根据电压信号的图像、最大值再次筛选

能比较稳定的情况下才能够采用的。每个台站一年中可以得到多组定标常数,从定标常数的时间序列变化上可以反映仪器性能的稳定性。如哈密 2004 年对预处理的定标数据采用 2.1.2 节所述的 3 个条件筛选后,得到了 105 组定标数据,从 440 nm 的定标常数序列来看(图 2),全年中定标常数时高时低,没有出现明显的单调递增或递减现象,拟合曲线显示定标常数呈微微下降趋势,这符合仪器长时间使用精度衰减的状况。台站定标常数的标准偏差与台站定标常数平均值的百分比小于 10%,说明仪器性能比较稳定。

定标数据;④对上述 3 个步骤处理后的结果取平均值作为光度计一个年度的定标常数。

特别值得关注的是,新疆这 4 个台站中有 3 个站的大气环境极为恶劣,但是 2002 年 4 部光度计的定标结果和出厂定标值、2005 年的定标结果与北京定标值比较之后,发现定标误差均控制在 8.5% 以内(和田 2004 年定标结果除外)。而对于空气质量非常好的哈密地区,定标误差就比较小,哈密 2002 年的定标误差小于 2.0%,2005 年也在 5.6% 以内。由此说明利用台站资料对光度计定标的方法有一定的参考价值。

致谢:北京大学物理学院毛节泰教授对本文进行了指导,特此致谢!

参考文献

- [1] Holben B N, Eck T F, Slutsker I, et al. AERONET—A federated instrument network and data archive for aerosol characterization [J]. *Remote Sens. Environ.*, 1998, 66: 1–16.
- [2] Shaw G E. Error analysis of multi-wavelength sun photometry [J]. *Pure Appl. Geophys.*, 1976, 114: 1–14.
- [3] Zhang J H, Mao J T, Wang M H. Analysis of the aerosol extinction characteristics in different areas of China [J]. *Advance in Atmospheric Sciences*, 2002, 19(1): 136–152.
- [4] O'Neill N T, Royer A, Cote P. Relations between optically derived aerosol parameters, humidity, and air-quality data in an urban atmosphere [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1993, 32: 1484–1498.
- [5] 修鹏, 刘玉光. 太阳光谱仪的定标技术与渤海海域的光学测量 [J]. *高技术通讯*, 2005, 15(7): 85–89.
- [6] 任宜勇, 李霞, 吕鸣, 等. CE318 太阳光度计观测资料应用前景及其解读 [J]. *气象科技*, 2006, 34(3): 349–352.
- [7] Kasten F, Young A T. Revised optical air mass tables and approximation formula [J]. *Appl. Opt.*, 1989, 28: 4735–4738.
- [8] Ramachandran S, Jayaraman A, Acharya Y B, et al. Features of aerosol optical depths over Ahmedabad as observed with a sun-tracking photometer [J]. *Beitr. Phys. Atmos.*, 1994, 67(1): 57–70.

Assessment of Calibration Results of Sun Photometers with Conventional Meteorological Data

Li Xia

(Institute of Desert Meteorology, China Meteorology Administration, Urumqi 830002)

Abstract: An objective data processing method is presented for the calibration of sun photometers CE318 manufactured by the CIMEL Company (France) by using the Langley method and conventional observation data. There are four steps: (1) the observational data from sun photometers are processed with the Langley method in order to acquire calibration coefficients, the linear fitting correlation coefficients for the Langley method, the aerosol optical depth at 550 nm and so on; (2) calibration coefficients are screened through three thresholds: correlation coefficients at 440 nm (≥ 0.99), aerosol optical depth at 550 nm (≤ 0.15) and the number of data sets for linear fitting in 12 hours (≥ 8); (3) calibration coefficients are screened again according to voltage signal images and the maximum at noon; (4) the annual mean calibration coefficients are obtained from the remain data. The data from four sun photometers at Urumqi, Tazhong, Hotan and Hami in Xinjiang from 2002 to 2005 are processed according to the above four procedures. The final mean calibration coefficients are compared with the calibration results acquired through intercomparison with the reference sun photometer in Beijing in 2005 and standard coefficients provided by the CIMEL Company. Biases in these data at three sites are all less than 8.5% (except for the error of Hotan Station), which shows that the procedures for calibration are feasible.

Key words: sun photometer, calibration, Langley method, correlation coefficient, aerosol optical depth