

中国地区太阳分光辐射观测网的建立与仪器标定

辛金元^{1,3}, 王跃思^{1*}, 李占清², 王普才¹, 王式功³, 温天雪¹, 孙扬^{1,3}

(1. 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029; 2. 马里兰大学气象学系, MD 20782, 美国; 3. 兰州大学大气科学学院, 兰州 730000)

摘要: 大规模的太阳分光地基联网观测不但能够直接为该项研究提供基础数据, 同时也可为卫星遥感提供地表订正。利用性能优越的 LED 型太阳光度计, 依托中国生态研究网络(CERN) 分布在中国各地的观测站, 建立了标准的太阳分光辐射观测网。利用 Langley 定标法结合量值传递定标法对观测网所有光度计的标定方法及误差分析表明, 不同光度计间的同步观测结果(相对标准偏差小于 3%) 以及与 CIMEL 光度计的观测结果间(相对偏差小于 5%) 有很好的一致性, 证实了观测结果的准确性以及该类型光度计及其观测网的稳定性和可靠性。

关键词: 太阳分光辐射观测网; Langley 定标法; 传递定标法; 气溶胶光学厚度

中图分类号: X830.2 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2006)09-1697-06

Introduction and Calibration of the Chinese Sun Hazemeter Network

XIN Jin-yuan^{1,3}, WANG Yue-si¹, LI Zhan-qing², WANG Pu-cai¹, WANG Shi-gong³, WEN Tian-xue¹, SUN Yang^{1,3}

(1. Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 2. Department of Meteorology, The University of Maryland, College Park, MD 20782, USA; 3. College of Atmospheric Science, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Much of the current uncertainty in the quantitative assessment of the climate and environment change is due to our lack of knowledge of the aerosol, for which the large-scale sun hazemeter ground-based network directly provides basic data. The data also can revise the results of the satellite remote sensing. Depending on the stations of CERN, the standard network was first built in China. The accurate and reliable hazemeter (LEDs) was uniformly used in the network. The hazemeters were calibrated by Langley plot method and transfer calibration and were uniformly checked. The AODs, which were synchronously retrieved from hazemeters (RSD < 3%) and CIMEL (RSD < 5%), were coherent and comparable. The stability and reliability of the hazemeters and the network was approved.

Key words: sun hazemeter network; Langley plot method; transfer calibration; aerosol optical depth (AOD)

大气气溶胶的直接和间接辐射效应对地气系统辐射收支的影响是天气与气候变化最重要的因子之一^[1~4]。随着温室气体对气候变化影响的逐步明确, 我国大气气溶胶对气候变化影响的不确定性已成为当前大气科学研究最受关注的热点与难点之一^[5,6]。大气气溶胶光学特性的地基联网观测已成为当前解决这一重大科学难题的观测平台与研究基础^[7~9], 它的建立和应用将为中国大气气溶胶的光学特性及其对气候变化影响的定量研究提供重要的科学依据。

在过去几十年里, 为了评估我国大气气溶胶光学特征及其对天气和气候变化的影响, 国内科学家以及相关科研机构利用地面遥感和空间遥感等手段在不同区域对气溶胶进行了大量观测研究。罗云峰^[10]、毛节泰^[11]、邱金桓^[6]等分别在他们的综合性论述中详细地给出了近 40 多年我国科学家在该领域中的主要工作和重要的贡献。但是由于不同研究

者、科研团体采用观测仪器设备往往不同, 而且观测区域相对单一, 所以多数观测研究的时序性较强, 但不同观测点间数据可比性差。因此, 数据使用多受限制。

近几年来, 我国科研人员逐渐开始利用地面观测结合卫星遥感来反演我国部分地区、区域的气溶胶光学特征, 已取得了初步的结果^[12~15]。但在卫星反演气溶胶光学特征过程中源于地表反照率和气溶胶模型带来的实际误差难以估计, 对于中国大陆, 各地区地表植被分布以及气溶胶类型具有很大差异, 卫星遥感需要同时有地面太阳光度计同步观测进行对比订正^[12,13,16,17]。

收稿日期: 2005-07-19; 修订日期: 2005-09-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(40520120071, 40375015); 中国科学院野外台站网络建设基金项目

作者简介: 辛金元(1975~), 男, 博士研究生, 讲师, 主要研究方向为气溶胶观测与模拟, E-mail: xjy@dq.cern.ac.cn

* 通讯联系人, E-mail: wys@mail.iap.ac.cn

为了进一步认识中国大气气溶胶光学特性及其时空变化特征,更有效、准确地利用卫星遥感数据,更加准确地定量分析中国气溶胶对亚洲及全球气候变化的影响,CERN 大气科学分中心依托其 19 个生

态观测站和 4 个城市观测点建成了一个覆盖了中国典型区域的太阳分光辐射观测网(图 1).该网络将作为一个非常重要的地基观测平台,为相关研究提供必要的地基观测数据.

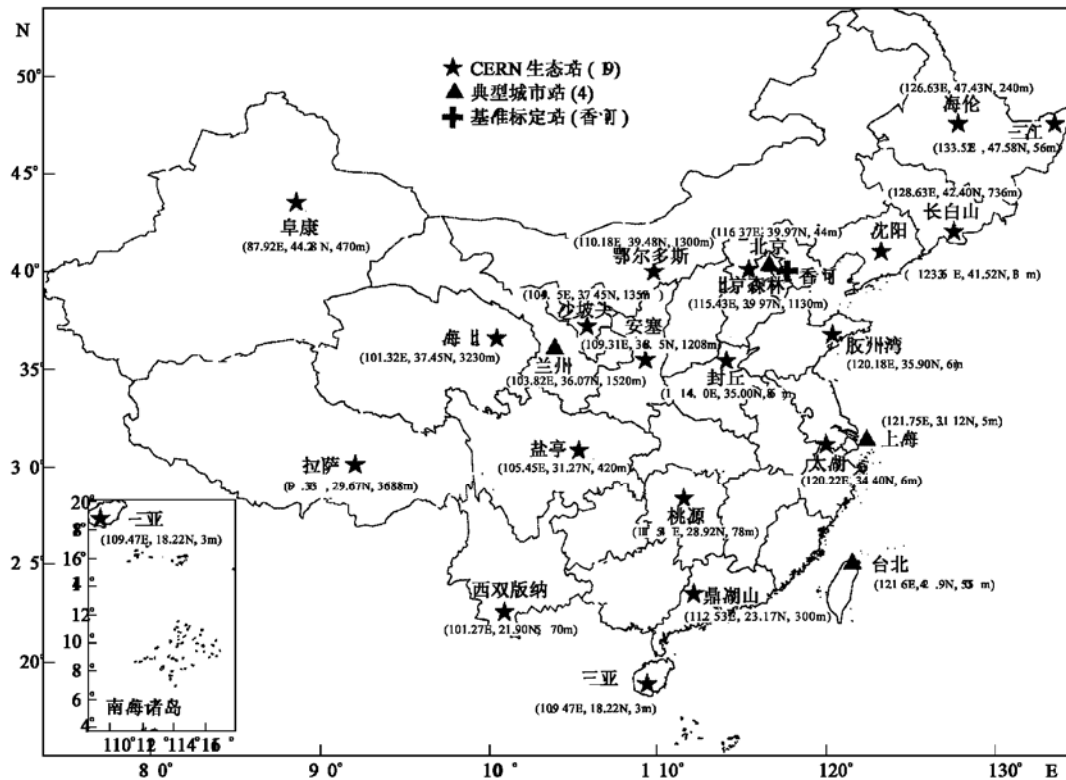


图 1 中国分光观测网地理分布图

Fig. 1 Geographical locations of observation sides in the CERN sun hazemeter network

1 实验仪器与观测网

光谱消光法是最经典也是最广泛应用的一种探测气溶胶光学特性的有效方法,它应用窄带太阳光度计测量太阳的直射光强以确定气溶胶光学厚度.整个观测网络统一采用美国林业局生产的新一代便携式 LED 太阳分光光度计,也可称为太阳灰度计,同类产品在全球 GLOBE (the global learning and observations to benefit the environment) 计划中曾得到广泛地应用^[7].该类光度计的核心部分是发光二极管 LED(light emitting diode)探测器,当太阳光照射到这个探测器时,它将产生微弱电流,电流通过放大器被转化成电压信号,检测这个电压信号,获得观测值^[18].光度计由 4 个通道组成,中心波段分别为 405 500 650 880nm,每个通道的视场角约为 2.5°.除 880nm 波段的半波宽度为 30nm 外,其它 3 个波段的半波宽度为 5nm.光度计内部安装有一个精确

的时钟,显示屏可以自动显示最大辐射探测信号和观测时间.内置的 PIC16F877 微控制器控制光度计数据的获取和存储,微控制器只保持光度计测得的最大值,永久性存储器可以自动记录和保存观测值以及光度计的观测状态.

虽然该类光度计比干涉滤波类型的光度计(如 CIMEL)有较大的视场角和带宽,但其具有造价低廉、操作简单、稳定性高、维护方便等众多适宜用于网络观测的优点,现在已成为国际科学家普遍认可的光学仪器^[7,19].

图 1 分别给出了 23 个观测站点的地理位置和海拔高度.19 个 CERN 站点的地表特征适用于卫星资料反演,它们一般处在地表均一的(暗)背景地区;分别包括了 7 个农业生态站:三江、海陵、沈阳、安塞、封丘、盐亭和桃源站;3 个水体生态站:胶州湾、太湖和三亚站;4 个森林生态站:长白山、北京森林、西双版纳、鼎湖山站;3 个荒漠生态站:鄂尔多斯、沙

坡头和阜康; 2 个高原生态站: 拉萨高原农业站和海拔高寒草甸站. 北京、上海、台北和兰州 4 个城市观测点分别可代表我国典型城市的状况. 观测网基本覆盖中国范围的大部分地区, 而且对中国地区的典型地理特征有着很好的代表性.

为了使观测网的结果与 MODIS 卫星资料相匹配, 各站点所取观测时段设在 Terra 和 Aqua 2 颗 MODIS 卫星每日的过境时段范围内, 每天在当地时间 10:00~14:00 共观测 15~20 组数据, 整个观测网要求在北京时间的整点和半点时观测.

2 工作方法

随着光度计使用和时间推移, 仪器的标定值均可能会产生不同程度的漂移, 所以对光度计进行定标是利用分光光度计进行科学观测与研究的一项重要前提工作. 特别对于应用于联网观测的分光光度计, 统一标定与检测是保证观测网准确性和网络数据有效性的一项基础工作^[7~9]. 一般光度计用以下 3 种方法标定:

(1) Langley 定标法 目前在相关研究中最为普遍采用的光度计定标方法, 但不便于对大量的光度计进行统一标定, 因为必须寻找到理想的定标天气条件^[20].

(2) 传递定标法 利用以标定好的光度计作为基准光度计, 与预标光度计进行同点、同步观测, 从而达到定标目的. 这是一种非常适用于大量光度计统一标定的方法, 其对天气状况的要求不是非常的苛刻^[7].

(3) 标准灯定标法 利用光度计测定一定光谱范围的标准灯的能量, 从而达到定标的目的. 这是最快的定标方法, 但其精确度最低^[21].

根据 Lambert-Beer 定律, 整层大气的光学厚度可由方程 (1) 获得.

$$\tau(\lambda) = -\frac{1}{m(\theta)} \ln \left[\frac{V(\lambda)}{\alpha V_0(\lambda)} \right] \quad (1)$$

其中 $\tau(\lambda)$ 为大气光学厚度, $V(\lambda)$ 是在波段 λ 处光度计测得地面辐射能量值, $V_0(\lambda)$ 为光度计在大气层顶测得的辐射能量电压值, 及光度计标定常数, θ 为太阳高度角, $m(\theta)$ 为相对大气质量数, α 是日地距离因子. 大气光学厚度 $\tau(\lambda)$ 包括气溶胶光学厚度 $\tau_{\text{aer}}(\lambda)$ 、大气分子瑞利散射 $\tau_{\text{R}}(\lambda)$ 和大气中气体吸收 $\tau_{\text{gas}}(\lambda)$. 则气溶胶光学厚度可表示为方程 (2).

$$\tau_{\text{aer}}(\lambda) = \tau(\lambda) - \tau_{\text{R}}(\lambda) - \tau_{\text{gas}}(\lambda) \quad (2)$$

对公式 (1) 变形可得公式 (3):

$$\ln[V(\lambda)] = \ln[\alpha V_0(\lambda)] - m(\theta) \tau_{\lambda} \quad (3)$$

假设大气状况稳定, 即在 τ_{λ} 不变的情况下, $m(\theta)$ 和 $\ln[V(\lambda)]$ 成线性关系, 根据测得的 $V(\lambda)$ 和大气质量数 $m(\theta)$, 利用最小二乘法拟合直线在 y 轴截距即为 $\ln[\alpha V_0(\lambda)]$, 从而得到 $V_0(\lambda)$, 这即为 Langley 定标法.

由于该类光度计在 880nm 波段有 30nm 的半波宽, 这个波段除计算气溶胶光学厚度要受到气体吸收较强的干扰外, 还有其它的功能尚待开发(不在本文讨论范围之内), 所以文中给出的在该波段的光学厚度为大气光学厚度, 图形中一般以 OD(optical depth) 表示, 气溶胶光学厚度在图形中以 AOD(aerosol optical depth) 表示. 同时, 为保证 $m(\theta)$ 与 $\ln[V(\lambda)]$ 线性关系的可信度, 在选定的定标日应该保证有最长的观测时段, 从而使得大气质量数 $m(\theta)$ 有一个较宽的取值范围.

3 结果与讨论

采用 Langley 定标法和传递定标法对分光观测网的所有光度计进行标定. 利用 Langley 定标法分别对北京、拉萨、阜康、三江的 4 台光度计进行标定.

图 2 分别给出了 4 台光度计在定标日 $m(\theta)$ 和 $\ln[V(\lambda)]$ 间的线性关系, 从图 2 可以看到, 它们之间呈非常显著的线性关系, 除 880nm 通道外 ($R^2=0.91$), 其它光度计每个通道定标拟合直线的线性相关系数 R^2 大于 0.96. 这说明, 只要选定合适的天气条件, Langley 定标法存在普遍的适应性, 可以在不同地点利用该方法对光度计定标. 当然, 海拔高、区域环境干燥地区更容易地找到满足定标条件的理想天气, 从而使定标误差降到最低.

图 3 分别给出了这 4 台光度计于 2004-07-08~2004-07-09 在北京进行同步的观测试验结果的对比, 每台仪器的定标值采用它们在各自地区获取的 Langley 定标值. 从图 3 可以看出, 4 台光度计的同步观测结果具有高度一致性. 图 3(a) 中, 4 台光度计在 880nm 波段观测结果间的平均相对标准偏差为 3.1%; 在 650nm 波段观测结果间的平均相对标准偏差为 2.6% [图 3(b)]; 在 500nm 波段观测结果间的平均相对标准偏差为 1.8% [图 3(c)]; 在 405nm 波段观测结果间的平均相对标准偏差为 2.5% [图 3(d)]. 图 3 表明, 不同光度计观测结果保持了很好的一致性, 说明 ①对这 4 台光度计采用 Langley 定标法获得的标定值基本正确; ②该类型光度计有较高的稳定性, 观测结果有很好的可比性.

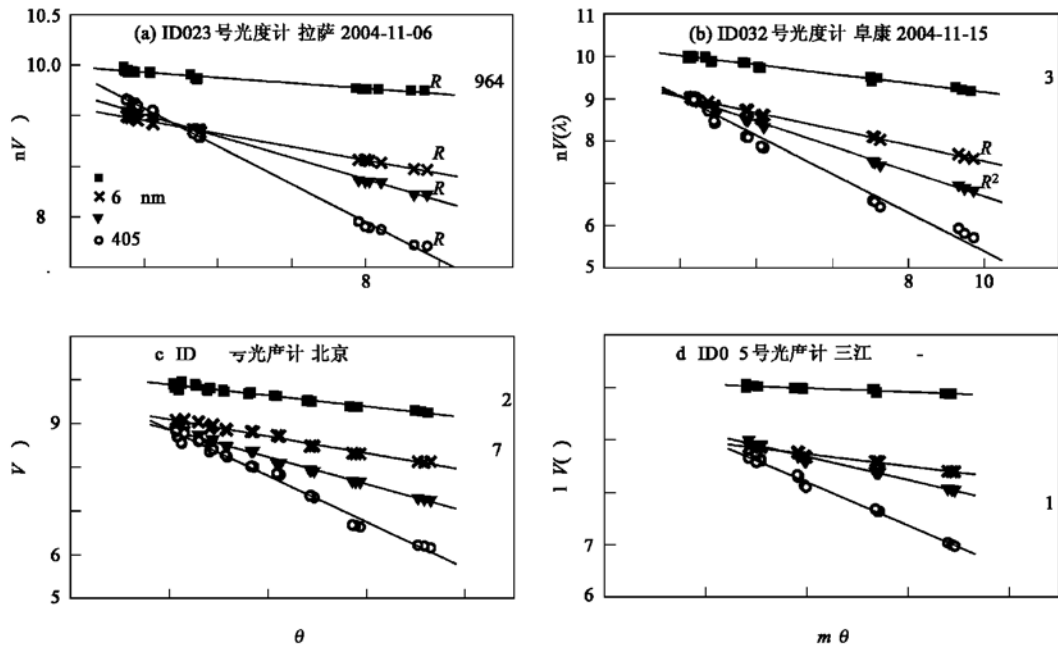


图 2 利用 Langley 定标法分别在不同地点对 4 台光度计进行标定

Fig. 2 Langley plot calibration for four LED sun hazemeters from four sites

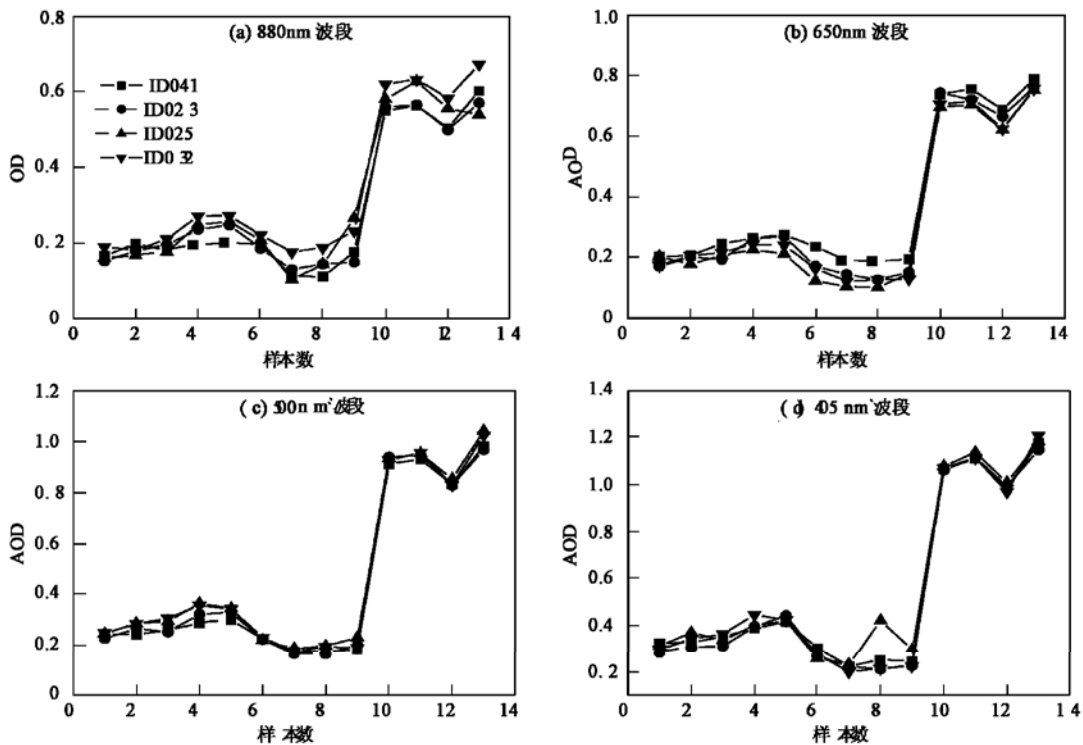


图 3 4 台光度计在北京同步观测结果比对

Fig. 3 Comparison of synchronous results of four hazemeters from Beijing

图 4 分别为利用 ID041 光度计作为基准光度计对 ID030、ID044 光度计进行传递定标状况。从图 4 可以看出,虽然在同步观测期间气溶胶光学厚度有

较大的变化,但标定值保持了很好的稳定性。这是 Langley 定标法所不能实现的。表 1 给出了这 2 台光度计 4 个波段标定值和相对标准偏差(RSD)。对于

这 2 台光度计, 在 880nm 波段处, 定标值的相对标准偏差达到 5% 左右; 在其它 3 个波段, 定标值的相对标准偏差小于等于 1.2%。这种差异源于不同波段的带宽, 880nm 波段的带宽为 60nm, 而其它 3 个波段的带宽仅为 10nm, 这就导致了 880nm 波段的观测值要受到更大的干扰, 从而造成了观测值的相对不稳定, 这也是图 4(a) 中 880nm 波段定标值的波动比其它 3 个波段剧烈的原因。但总体上, 标定误差

在可以接受范围之内。

表 1 传递标定值和相对标准偏差 (RSD)				
Table 1 Transfer calibration value and relative standard deviation				
波段/nm	标定值(ID030)	RSD/%	标定值(ID044)	RSD/%
880	21 529	3.9	27 271	4.9
650	16 616	0.9	16 775	0.8
500	20 427	0.9	20 682	0.6
405	29 429	1.2	39 480	1.2

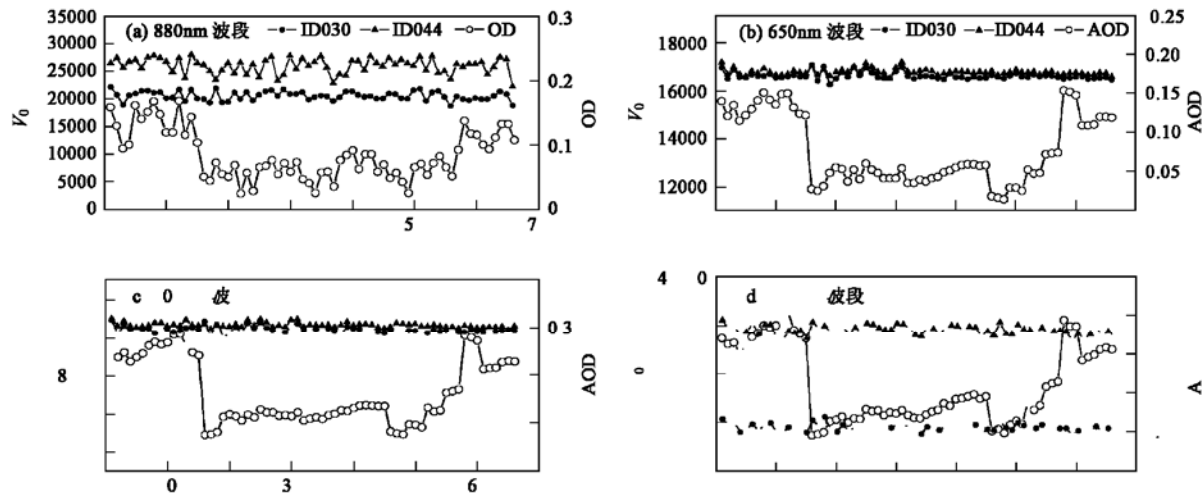


图 4 2 台光度计的传递定标以及光学厚度的变化
Fig. 4 Transfer calibration for two LED sun hazemeters and the change of AOD

因为传递定标法观测地点与天气状况的同一性, 所以很大程度地避免了天气条件对光度计定标的限制, 使它成为一种非常适用于光度计统一定标的高效方法, 是对大量光度计联网观测进行统一标定和校对的一个有效方法。利用传递定标法对观测网的其它光度计进行了标定。

图 5 给出了 ID041 光度计与当前最为先进的 CIMEL 光度计观测结果的比较, 图中包括了 2004-

08~ 2004-11 观测数据。这 2 台不同类型的光度计均在北京大气物理所 (116. 37°E, 39. 97°N) 进行观测, 2 台光度计的观测点相距大约 300m。CIMEL 光度计的波段分别为 1 020 870 670 440nm。鉴于 2 台光度计的中心波段不一致, 可对 CIMEL 的观测结果进行对数线性插值, 使得 2 台光度计的波段可以相互对应。从图 5 中可以看出 ID041 光度计与 CIMEL 光度计的观测结果有着很好的对应性和一

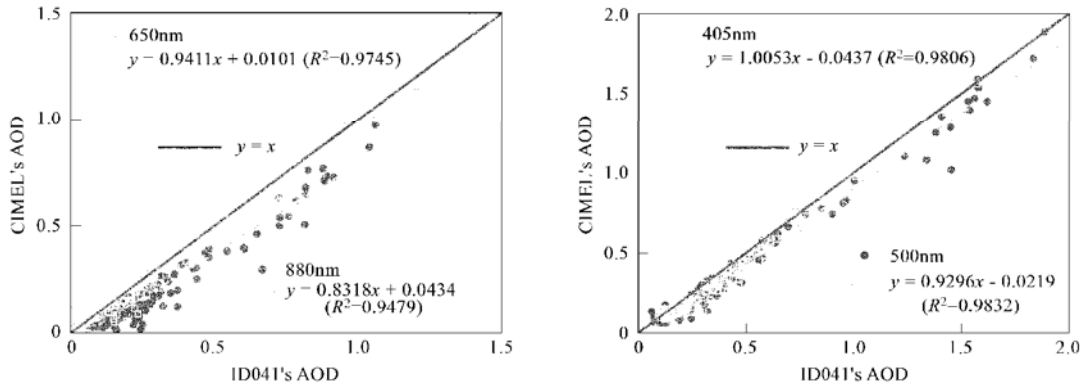


图 5 ID041 光度计与 CIMEL 光度计的 AOD 对比(北京)
Fig. 5 Comparison of AOD between ID041 hazemeter and CIMEL from Beijing

致性。ID041 光度计在 880nm 波段比 CIMEL 光度计的观测结果偏高,这主要是由于 ID041 光度计在 880nm 波段处处理得到的是在该波段的大气光学厚度,而并非气溶胶光学厚度;其它的 3 个波段基本上与 CIMEL 光度计的观测结果相吻合,线性相关系数 R^2 大于 0.97。以上结果说明该类型光度计与当前最为先进的 CIMEL 光度计有着很好的可比性,灵便的操作方式和低廉的价格非常适合开展大规模联网观测研究。

4 结论

(1) 利用 LED 型光度计首次在中国建立了统一、标准的太阳分光辐射观测网。

(2) 利用 Langley 定标法结合量值传递定标法对观测网光度计进行统一标定,结果证明 2 种标定方法是可靠有效的。

(3) LED 型光度计性能优良、操作方便、价格低廉,非常适合于开展气溶胶光学特性联网观测与研究。

致谢:感谢中国科学院中国生态研究网络(CERN)相关台站、美国森林局、中国科学院大气物理研究所刘广仁高级工程师、胡波博士、张宏、夏祥鳌博士、北京大学李成才博士与东华大学亢燕铭教授对本项工作的大力帮助和支持。感谢 AERONET/NASA 北京站点数据负责人陈洪滨研究员提供 CIMEL 观测数据。

参考文献:

- [1] Satheesh S K, Moorthy K K. Radiative effects of natural aerosols: a review [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39** (11): 2089~ 2110.
- [2] Jacobson M Z. Strong radiative heating due to the mixing state of black carbon in atmospheric aerosols [J]. *Nature*, 2001, **409**: 695~ 697.
- [3] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Climate Change 2000, 2001. The Scientific Basis: Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. New York: Cambridge University Press.
- [4] Haywood J M, Boucher O. Estimates of the direct and indirect radiative forcing due to tropospheric aerosols: a review [J]. *Revs. Geophys.*, 2000, **38**: 513~ 543.
- [5] Li Z. Aerosol and climate: A perspective from East Asia[A], In: *Observation, Theory, and Modeling of the Atmospheric Variability* [C]. World Scientific Pub. Co., 2004. 501~ 525.
- [6] 邱金桓, 吕达仁, 陈洪滨, 等. 现代大气物理学研究进展 [J]. *大气科学*, 2003, **27**(4): 628~ 652.
- [7] David R Brooks, Mims F M III. Development of an inexpensive handheld LED-based Sun photometer for the GLOBE program [J]. *J. Geophys. Res.*, 2001, **106**(D5): 4733~ 4740.
- [8] Holben B N, Tanre D, Smirnov A, *et al.* An emerging ground-based aerosol climatology: Aerosol Optical Depth from AERONET [J]. *J. Geophys. Res.*, 2001, **106**: 12067 ~ 12097.
- [9] Holben B N, Eck T F, Slutsker I, *et al.* AERONET — A federated instrument network and data archive for aerosol characterization [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1998, **66**(1): 1~ 16.
- [10] 罗云峰, 周秀骥, 李维亮. 大气气溶胶辐射强迫及气候效应的研究现状 [J]. *地球科学进展*, 1998, **13**(6): 572~ 581.
- [11] 毛节泰, 张军华, 王美华. 中国气溶胶研究综述 [J]. *气象学报*, 2002, **60**(5): 625~ 634.
- [12] 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 [J]. *应用气象学报*, 2002, **13**(特刊): 127~ 135.
- [13] LI Chengcai, MAO Jietai, LAU Kar-Hon Alexis, *et al.* Characteristics of distribution and seasonal variation of aerosol optical depth in eastern China with MODIS products [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, **48**(22): 2488~ 2495.
- [14] 李晓静, 刘玉洁, 邱红, 等. 利用 MODIS 资料反演北京及其周边地区气溶胶光学厚度的方法研究 [J]. *气象学报*, 2003, **61**(5): 581~ 592.
- [15] 徐祥德, 周秀骥, 翁永辉, 等. 星载 MODIS 资料与地面光度计探测气溶胶变分场 [J]. *科学通报*, 2003, **48**(15): 1680 ~ 1685.
- [16] Kaufman Y J, Holben B N. Will aerosol measurements from Terra and Aqua polar orbiting satellites represent the daily aerosol abundance and properties? [J]. *Geophysics Research Letters*, 2000, **27**(23): 3861~ 3864.
- [17] Dubovik O, Smirnov A, Holben B N, *et al.* Accuracy assessments of aerosol optical properties retrieved from Aerosol Robotic Network (AERONET) sun and sky radiance measurements [J]. *J. Geophys. Res.*, 2000, **105**(8), 9791~ 9806.
- [18] Mims F M III. Sun photometer with light-emitting diodes as spectrally selective detectors [J]. *Applied Optics*, 1992, **31**: 6965~ 6967.
- [19] Acharya Y B. Spectral and emission characteristics of LED and its application to LED-based sun-photometry [J]. *Optics & Laser Technology*, 2005, **37**(7): 547~ 550.
- [20] 张军华, 王美华, 毛节泰. 多波段光度计遥感气溶胶误差分析及订正 [J]. *大气科学*, 2000, **24**(6): 855~ 859.
- [21] Shaw G E. Error analysis of multi-wavelength sun photometry [J]. *Pure Appl. Geophys.*, 1976, **114**: 1~ 14.