

太阳光度计定标方法和西安地区气溶胶光学特征的研究

刘晶晶, 王国英, 徐梓翔, 刘 芸, 王 骏, 闫 庆, 华灯鑫

(西安理工大学机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 利用西安理工大学 2015~2018 年的太阳光度计观测资料, 在传统 Langley 法定标的基础上, 利用期望平均法和拟合平均法获得了更为稳定的仪器定标系数, 分析了西安地区气溶胶光学厚度和 Ångström 波长指数的变化特征。研究结果表明: (1) 仅用 Langley 法对仪器进行定标带来的误差较大, 引入期望平均法与拟合平均法后, 得到的仪器定标值更合理, 有效解决了 Langley 法定标值波动较大的问题; (2) 西安地区气溶胶光学厚度日变化呈现 5 种特征: 平稳型、上升型、下降型、凹型和凸型, 其中平缓型出现频率最低 (3.55%), 凸型出现频率最高 (34.25%); (3) 500 nm 气溶胶光学厚度季节均值为 0.60 ± 0.36 , 0.59 ± 0.33 , 0.62 ± 0.40 , 0.68 ± 0.36 , 呈春夏低、秋冬高的季节变化趋势。Ångström 波长指数季节均值在夏季最大 (1.06 ± 0.33), 春季最小 (0.81 ± 0.32)。

关键词: 太阳光度计定标; 气溶胶光学厚度; Ångström 波长指数

中图分类号: P407 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20190404

Study on calibration method of sky radiometer and aerosol optical properties in Xi'an region

Liu Jingjing, Wang Guoying, Xu Zixiang, Liu Yun, Wang Jun, Yan Qing, Hua Dengxin

(School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: On the base of Langley method, a more reliable instrument calibration coefficient was obtained after the expected average and fitting average method were used, and the spatiotemporal characteristics of aerosol optical depth(AOD) and Ångström wavelength exponent were analyzed using observations of sky radiometer at Xi'an University of Technology from 2015 to 2018. Results revealed that: (1) Only the Langley method is used to calibrate the instrument. The error is large. After the introduction of the expected average method and the fitted average method, the instrument calibration value obtained is more reasonable, effectively solving the problem of large fluctuations in the legal value of the Langley legal calibration value; (2) the diurnal variation of aerosol optical depth has 5 types: flat type, ascending type, descending type, convex type, and concave type, respectively. The frequency of flat type is lowest, 3.55%, and concave type is highest, 34.25%; (3) the seasonal variation of aerosol optical depth at 550 nm wavelength showed spring and summer are lower, and autumn and winter are higher, with the average values: 0.60 ± 0.36 , 0.59 ± 0.33 , 0.62 ± 0.40 , 0.68 ± 0.36 , respectively. Moreover, Ångström wavelength exponent have a highest value in summer (1.06 ± 0.33), and have a lowest value in spring (0.81 ± 0.32).espectively. Moreover, Ångström wavelength exponent have a highest value in summer (1.06 ± 0.33), and have a lowest value in spring (0.81 ± 0.32).al variation of aerosol optical depth at 550 nm wavelength showed spring and summer are lower, and autumn and winter are higher, with the average values: 0.60 ± 0.36 , 0.59 ± 0.33 ,

收稿日期: 2020-03-10; 修订日期: 2020-04-25

基金项目: 国家自然科学基金 (61705180, 61675166); 陕西省自然科学基金 (2018JQ4046); 陕西省教育厅科学研究计划专项 (16JK1555)

作者简介: 刘晶晶 (1987-), 女, 讲师, 博士, 主要从事大气遥感方面的研究。Email: jingjingliu@xaut.edu.cn

0.62±0.40, 0.68±0.36, respectively. Moreover, Ångström wavelength exponent have a highest value in summer (1.06±0.33), and have a lowest value in spring (0.81±0.32).

Key words: sky radiometer calibration; aerosol optical depth; Ångström wavelength exponent

0 引言

大气气溶胶是指由大气介质与悬浮于其中的各种固体、液体粒子共同组成的一个多相体系。气溶胶能够直接和间接影响地气系统的能量收支平衡,对于气候变化的作用也不容忽视^[1-2]。气溶胶是城市污染的主要成分,也是气候评估中最大的不确定因子之一^[3-4]。我国西北地区气溶胶含量丰富、类型多样,因此加强西北地区气溶胶光学特性的观测和研究具有十分重要的科学意义^[5-6]。

气溶胶光学厚度作为气溶胶光学特性中最基本的物理量,目前探测手段主要包括地基遥感和卫星遥感^[7-8]。其中,太阳光度计作为目前公认的最基本最准确的地基遥感手段,具有丰富的信息含量和相对成熟的反演理论^[9-11],常用来验证卫星遥感的准确性^[12-15]。因此,太阳光度计的探测和反演精度在气溶胶遥感测量中起着至关重要的作用。但是,随着太阳光度计工作时间的推移和天气状况的影响,其标定系数会发生不同程度的变化,从而影响观测数据的精确反演。因此,对天空辐射计进行定期定标,获得准确、稳定的定标值是各种光学特性精确反演的前提^[16-20]。

文中利用西安理工大学天空辐射计 2015~2018 年的有效观测数据,在 Langley 定标的基础上采用期望平均法和拟合平均法^[21] 获得更加精确和稳定的仪器定标常数,进而反演出气溶胶的光学厚度和波长指数,最终得到西安地区气溶胶光学厚度和波长指数的变化特征,从而有助于更好地了解气溶胶对西安地区大气环境、气候变化的影响。

1 仪器定标

利用 Langley 法并结合直接辐射观测数据,选取符合条件的晴空天气对太阳光度计进行定标^[22-23]。图 1 所示为 2015 年各个波段 18 天定标值分布情况(其他年份做相同处理),图中横坐标表示定标日期,纵坐标表示定标值,不同的符号表示不同波段。由图可知,2015 年全年晴好天气的仪器定标值具有很大差异。定标值在 400~1 020 nm 的可见光到近红外光波

段变化波动较大,340、380 nm 波段变化波动较小,数据比较集中,说明仪器的定标值对可见和近红外波段的影响较大。同样的结论从不同波段定标值的平均值和标准差(图 2)也可以看出,在观测的 7 个波段中,400~1 020 nm 波段的标准差明显大于 340 nm 和 380 nm。

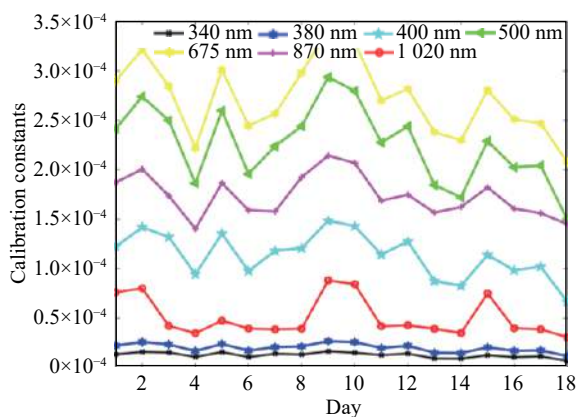


图 1 每日各波段定标值分布情况

Fig.1 Distributional characteristics of calibration values of each wavelength and every day

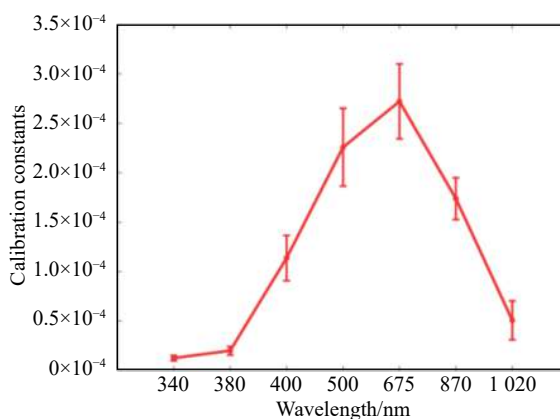


图 2 各波段定标值的变化区间分布

Fig.2 Range distribution of calibration values of each wavelength

综上所述,若只选用符合条件的某一天作定标,会给反演结果带来较大误差。而目前常用的方法是选用几天晴好天气的平均值作定标,但该方法不能排除粗大误差的影响。

文中在选取晴好天气进行定标的基础上,利用期

望平均法与拟合平均法对定标值进行筛选,从而获得较为精确和稳定的仪器定标值。图 3 为期望平均法与拟合平均法对每个波段(以 500、675 nm 波段为例,其他波段图略)定标值的筛选、检验,其中虚线所在的范围为拟合平均法得到的最佳定标范围,实线所在的区域为期望平均法的最佳定标范围,红色方形为初始所有定标值的平均值。图 4 为期望平均法与拟合平均法筛选后得到的定标值平均值与标准差,由图可

知,各方法所得的平均值差别不大,但经过数据筛选后每个波段的标准差明显变小,说明定标值的离散程度明显减小,尤其在 400~1 020 nm 波段。如表 1 所示,期望平均法使各波段定标值标准差减小了 39.5%~86.8%,而期望平均法使标准差减小了 68.1%~86.8%,说明再筛选处理对这些波段的定标值具有很大影响。但总体看来,在每个波段期望平均法比拟合平均法的标准差更小,说明期望平均法的筛选效果比拟合

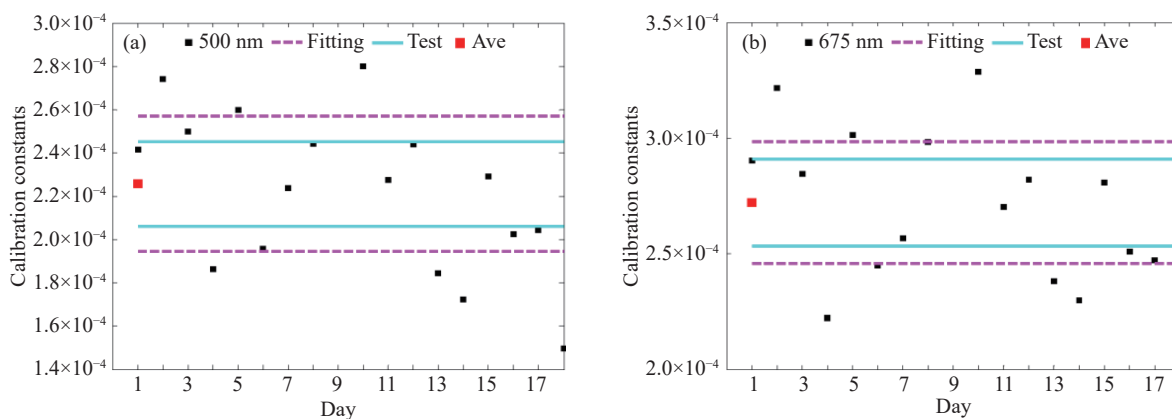


图 3 晴天天气定标值及其定标值检验筛选结果(虚线为拟合平均法上下限,实线为期望平均法上下限;(a) 500 nm, (b) 675 nm)

Fig.3 Initial and screened result of calibration values in clear day under: (a) 500 nm and (b) 675 nm (The dotted purple and solid cyan lines denote upper-lower limit of the fitting and expectation method, respectively)

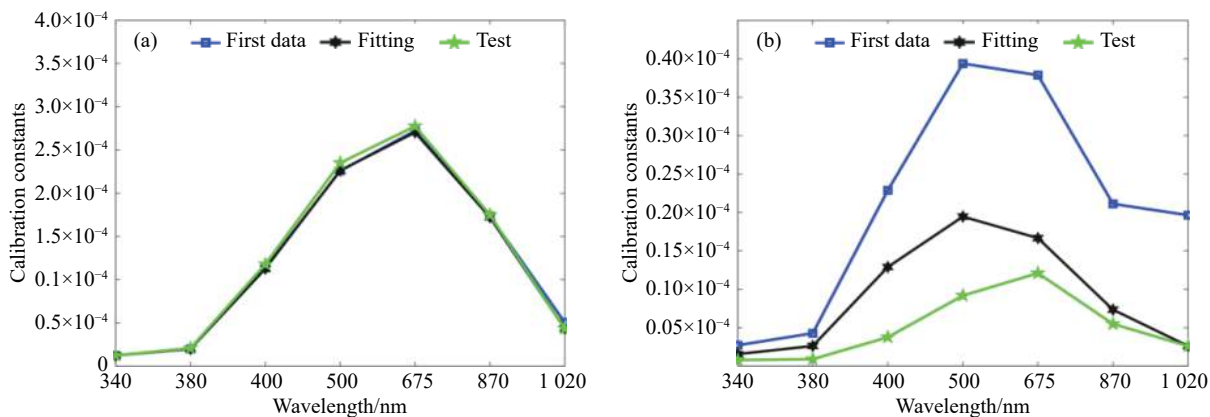


图 4 各波段定标值筛选前后平均值 (a) 与标准差 (b) 的分布情况

Fig.4 Mean value (a) and standard deviation (b) of calibration values of each wavelength before and after data screening

表 1 期望平均法与拟合平均法的各波段定标值标准差(减小比例)情况

Tab.1 Standard deviation and its improved percentage of calibration values derived from the fitting and expectation method at each wavelength

Method	340 nm	380 nm	400 nm	500 nm	675 nm	870 nm	1 020 nm
Fitting method	0.016(40.7)	0.026(39.5)	0.129(43.7)	0.195(50.5)	0.167(55.9)	0.073(65.4)	0.026(86.8)
Expectation method	0.008(70.3)	0.009(79.1)	0.038(83.4)	0.092(76.6)	0.121(68.1)	0.055(73.9)	0.026(86.8)

平均法更好。因此文中最终选取的仪器各波段定标值为期望平均法上下区间内的平均值,在此基础上获得了西安地区 2015~2018 年气溶胶光学厚度和波长指数的分布特征。

2 结果分析

表 2 为太阳光度计 2015~2018 年每月的有效观测天数和有效观测样本数。由表可知,9~11 月太阳光度计的有效观测天数均少于 10 天,且有效样本数均小于 50,说明 9~11 月的结果代表性较差,而其他月份的结果具有较好的代表性。经过统计,西安地区气溶胶光学厚度日变化特征 ($\lambda = 500 \text{ nm}$),大致分为五种类型:平稳型、上升型、下降型、凹型和凸型 (图 5)。

平稳型表示全天 AOD 变化较稳定,此种情况大多发生在天气稳定、气溶胶浓度和分布均较稳定的情况,如图 6 所示,西安市内此种天气出现频率最低 (3.55%);凸型出现的频率最高 (34.25%),其主要特征为 AOD 在午间大,早晚小,可能原因是午间前后太阳辐射和人类活动的增加导致 AOD 增大;凹型出现的频率为 27.95%,表现为 AOD 早晚较大,午间较小,多发生于早晚湿度较高的天气;而上升型和下降型出现的频率相当,分别为 16.93% 和 17.32%。上升型表明 AOD 在清晨较小随后逐渐升高,一般与污染物的逐渐积累有关。下降型,即 AOD 呈下降趋势,清晨较高随后逐渐降低,一般发生在清晨存在逆温层和霾层,随着气温升高逆温层和霾层逐渐消散的天气。

表 2 POM-02 每月有效观测天数和观测样本数 (2015 年 2 月~2018 年 3 月)

Tab.2 Effective days and samples of every month from POM-02 (Feb. 2015 – Mar. 2018)

Month	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Effective days	18	57	21	25	41	49	57	18	3	8	4	13
Effective samples	217	1 322	614	839	949	900	1 403	630	44	86	12	166

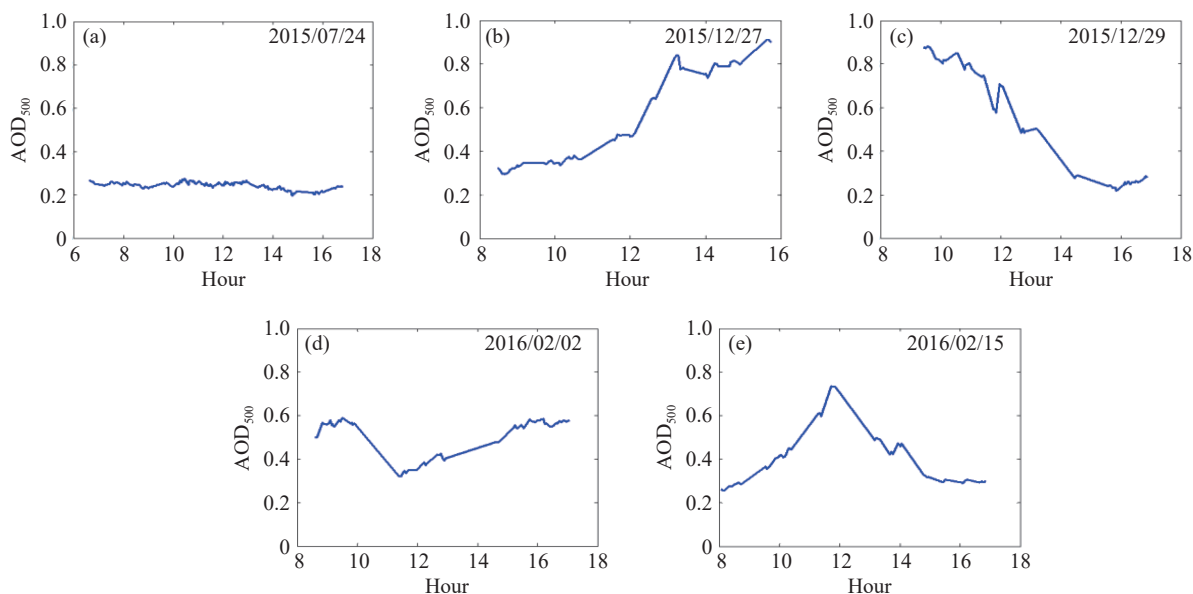


图 5 气溶胶光学厚度 (500 nm) 的日变化类型。(a) 平稳型, (b) 上升型, (c) 下降型, (d) 凹型, (e) 凸型

Fig.5 Diurnal variation types of AOD(500 nm). (a) Flat type, (b) ascending type, (c) descending type, (d) concave type, (e) convex type

图 7 表示 2015~2018 年气溶胶光学厚度和波长指数的月、季节均值和频率分布图。由图可知,气溶胶光学厚度随波长的增加而减小。气溶胶光学厚度峰值主要集中在 10 月到次年 3 月 (11 月除外)。500 nm

波段 AOD 高值区主要出现在 3、10 月和 12 月,其值分别为 0.76 ± 0.29 、 0.86 ± 0.4 和 0.75 ± 0.47 ,低值区出现在 4 月和 9 月,其值分别为 0.49 ± 0.25 和 0.35 ± 0.13 。图 7(b) 表示 500 nm 波段气溶胶光学厚度的季节变

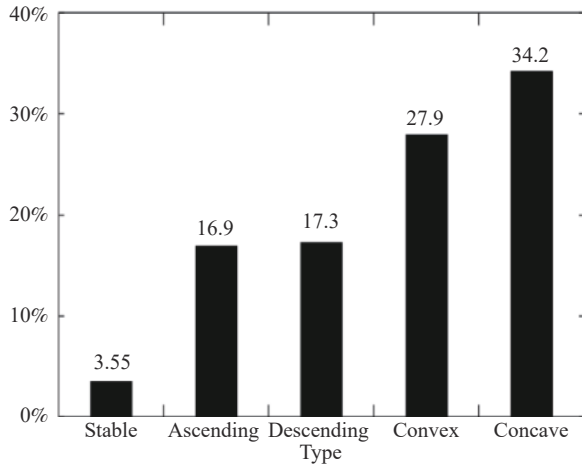


图 6 气溶胶光学厚度日类型出现的频率

Fig.6 Frequency distribution of diurnal types of AOD

化, 分别为: 0.60 ± 0.36 , 0.59 ± 0.33 , 0.62 ± 0.40 , 0.68 ± 0.36 , 表明气溶胶光学厚度冬秋季较高, 春夏季较低, 符合

西安地区的季节变化特性。西安地区冬季为集中供暖期, 采暖燃煤造成空气中的气溶胶粒子增多。此外, 冬季常出现的逆温现象导致污染物不易扩散, 从而形成冬季 AOD 的高值现象。而春季气溶胶光学厚度较大的主要原因是春季为沙尘天气多发期, 受地形和盛行风向的影响, 沙尘气溶胶的输送使得西安地区气溶胶光学厚度增大。图 7(d) 和 (e) 分别表示 Ångström 波长指数的月变化和季节变化, 由图可知, Ångström 波长指数在 7、9 月最高, 分别为 1.16 ± 0.26 和 1.15 ± 0.12 ; 4、5 月最低, 为 0.77 ± 0.34 和 0.79 ± 0.31 。各季节的平均值分别为 0.81 ± 0.32 , 1.06 ± 0.33 , 1.03 ± 0.16 , 0.88 ± 0.33 , 表明 Ångström 波长指数在夏季最高, 春季最低, 说明西安地区春季以粒径较大的沙尘气溶胶为主导, 而夏、秋季以人为源排放和生物质燃烧等共同产生的细粒子为主导。

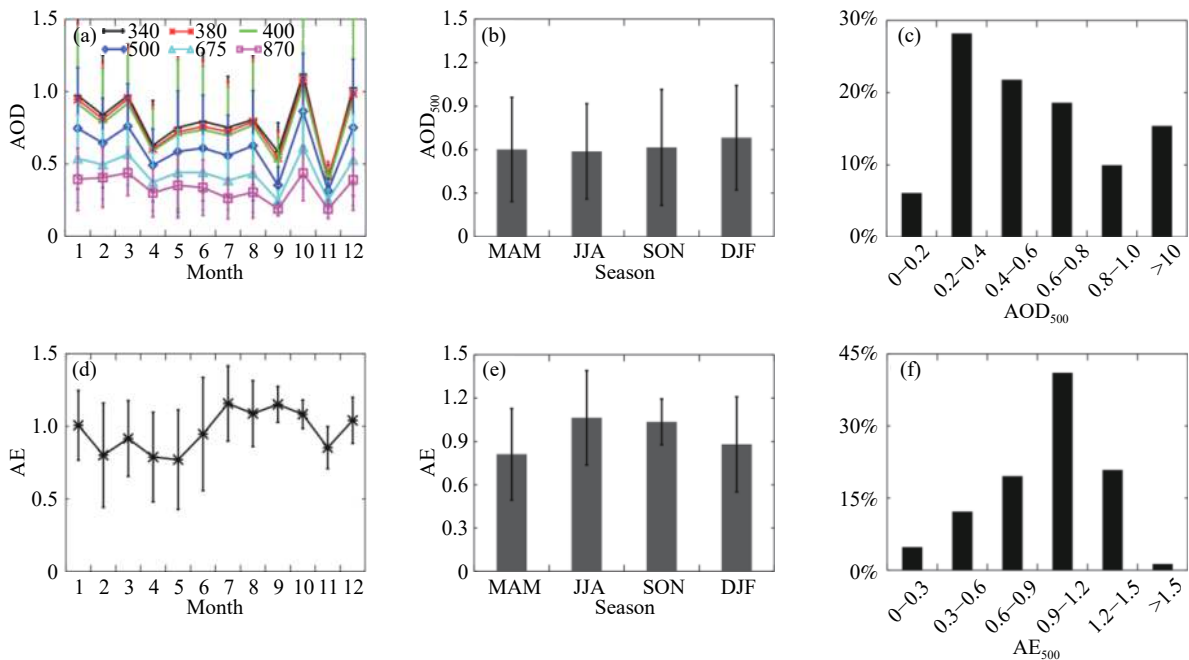


图 7 气溶胶光学厚度月均值 (a)、季节均值 (b)、频率 (c) 和波长指数月均值 (d)、季节均值 (e)、频率 (f) 的分布特征

Fig.7 Monthly (a) and seasonal mean values(b), and frequencies (c) of AOD; Monthly (d) and seasonal mean values(e), and frequencies (f) of AE

观测期间气溶胶光学厚度与 Ångström 波长指数的频率分布如图 7(c) 和 (f) 所示。西安市 AOD 值主要集中在 0.2~0.8, 占样本总体的 68.59%。其中 AOD 出现频率最高区间为 0.2~0.4, 占总样本的 28.21%, 次高区间为 0.4~0.6, 占总样本的 21.79%。而 AOD 在极端清洁值区间 0~0.2 的出现频率仅为 6.09%, 在 >1.0 区间出现的频率为 15.38%, 说明西安市

清洁天气出现概率较低, 污染较严重天气出现概率较高。Ångström 波长指数主要集中在 0.6~1.5 之间, 占比为 81.41%, 表明该地区细颗粒气溶胶占主导。波长指数出现频率最高区间为 0.9~1.2, 占总样本的 41.03%, 次高区间为 1.2~1.5, 频率为 20.83%。在 >1.5 区间出现的频率为 1.28%, 0~0.3 出现的概率为 4.81%。综合观测资料分析可得, 西安地区气溶胶

主控粒子平均半径较小,以人为气溶胶为主导。

3 结 论

利用西安地区 2015~2018 年太阳光度计的观测资料,通过期望平均法与拟合平均法对观测资料进行筛选处理,得到新的定标系数,在此基础上反演分析了西安地区气溶胶光学厚度和 Ångström 波长指数的分布特征,主要结论如下:

(1) 对太阳光度计观测期间 Langley 法的仪器定标结果进行分析,发现不管是选用符合条件的某一天还是选用多个晴好天气的平均值作为定标值,都存在较大误差,结合期望平均法与拟合平均法对测量数据进行筛选处理后得到的仪器定标值更为准确合理;

(2) 西安地区气溶胶光学厚度随波长增加而减小,且在短波段的变化比长波段更明显,气溶胶光学厚度($\lambda=500\text{ nm}$)的日变化大致分为 5 种类型:平缓型、上升型、下降型、凸型和凹型,其中,平缓型出现频率最低,为 3.55%,凸型出现频率最高,为 34.2%;

(3) 500 nm 气溶胶光学厚度呈现秋冬季高、春夏季低的季节变化特征,主要与沙尘气溶胶和人为活动产生的气溶胶有关。Ångström 波长指数在夏季最高,春季最低,表明西安地区春季以粒径较大的沙尘气溶胶为主导,而夏季以人为源排放和生物质燃烧等共同产生的细粒子为主导。西安市 AOD 值主要集中在 0.2~0.8,占样本总体的 68.59%,Ångström 波长指数主要集中在 0.6~1.5 之间,占比为 81.41%。

参考文献:

[1] Mao Jietai, Zhang Junhua, Wang Meihua. Summary comment on research of atmospheric aerosol in China [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2002, 60(5): 625-634. (in Chinese)
毛节泰,张军华,王美华.中国大气气溶胶研究综述[J].*气象学报*, 2002, 60(5): 625-634.

[2] Shi Guangyu, Wang Biao, Zhang Hua, et al. The radiative and climatic effects of atmospheric aerosols [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2008, 32(4): 826-840. (in Chinese)
石广玉,王标,张华,等.大气气溶胶的辐射与气候效应[J].*大气科学*, 2008, 32(4): 826-840.

[3] Zhang Hua, Huang Jianping. Interpretation of the IPCC fifth assessment report on anthropogenic and natural radiative forcing [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2014, 10(1):

40-44. (in Chinese)
张华,黄建平.对IPCC第五次评估报告关于人为和自然辐射强迫的解读[J].*气候变化研究进展*, 2014, 10(1): 40-44.

[4] Zhang Xiaoye, Liao Hong, Wang Fenjuan. The effect of aerosols and clouds on climate change and their responses [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2014, 10(1): 37-39. (in Chinese)
张小曳,廖宏,王芬娟.对第五次评估报告评估气溶胶云对气候变化影响与响应结论的解读[J].*气候变化研究进展*, 2014, 10(1): 37-39.

[5] Bi Jianrong. Observation and simulation study of aerosol features and their direct radiative forcing over Northwestern China[D]. Lanzhou: Atmosphere Science of University College, 2014.
闭建荣.西北地区气溶胶特征及其直接辐射强迫的观测模拟研究[D].兰州:兰州大学大气科学学院, 2014.

[6] Zhao Shiwei, Gao Xiaoqing. Study of aerosol optical depth and Ångström exponent in the northwest of China based on MODIS product [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2017, 12(5): 5-15. (in Chinese)
赵仕伟,高晓清.基于MODIS数据的西北地区气溶胶光学厚度和Ångström波长指数的研究[J].*大气与环境光学学报*, 2017, 12(5): 5-15.

[7] Hsu N C, Jeong M J, Bettenhausen C, et al. Enhanced deep blue aerosol retrieval algorithm: The second generation [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118(16): 9296-9315.

[8] Levy R C, Mattoo S, Munchak L A, et al. The collection 6 MODIS aerosol products over land and ocean [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2013, 6(11): 2989-3034.

[9] Qiu Jinhuan. A new method of determining atmospheric aerosol optical depth from the whole-spectral solar direct radiation: Part I: Theory [J]. *Scientia Atmospherica Sinica*, 1995, 19(4): 385-394. (in Chinese)
邱金桓.从全波段太阳直射辐射确定大气气溶胶光学厚度: I: 理论[J].*大气科学*, 1995, 19(4): 385-394.

[10] Luo Yunfeng, Li Weiliang, Zhou Xiujie. Analysis of the 1980's atmospheric aerosol optical depth over China [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2001, 59(1): 77-87. (in Chinese)
罗云峰,李维亮,周秀骥.20世纪80年代中国地区大气气溶胶光学厚度的平均状况分析[J].*气象学报*, 2001, 59(1): 77-87.

[11] Che H Z, Shi G Y, Uchiyama A, et al. Intercomparison between aerosol optical properties by a PREDE skyradiometer and CIMEL sunphotometer over Beijing, China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2008, 8(12): 3199-3214.

[12] Mao Jietai, Li Chengcai, Zhang Junhua, et al. The comparison of

- remote sensing aerosol optical depth from MODIS data and ground sun-photometer observations [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2002, 13: 127–135. (in Chinese)
- 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与地面光度计遥感的对比[J]. *应用气象学报*, 2002, 13: 127–135.
- [13] Ma Y, Li Z Q, Li Z Z, et al. Validation of MODIS aerosol optical depth retrieval over mountains in central China based on a sun-sky radiometer site of SNET [J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(2): 111.
- [14] Kim S W, Yoon S C, Kim J, et al. Seasonal and monthly variations of columnar aerosol optical properties over east asia determined from multi-year MODIS, LIDAR, and AERONET Sun/sky radiometer measurements [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, 41(8): 1634–1651.
- [15] Liu B M, Ma Y Y, Gong W, et al. Comparison of AOD from CALIPSO, MODIS, and sun photometer under different conditions over central China [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 10066.
- [16] Zhai Wenchao, Li Jianjun, Zheng Xiaobing, et al. Research on method of calibrating sun channels of sun radiometers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(4): 131–136. (in Chinese)
- 翟文超, 李建军, 郑小兵, 等. 太阳辐射计直射通道实验室定标方法研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(4): 131–136.
- [17] Xin Jinyuan, Wang Yuesi, Li Zhanqing, et al. Introduction and calibration of the Chinese sun hazemeter network [J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2006, 27(9): 1697–1702. (in Chinese)
- 辛金元, 王跃思, 李占清, 等. 中国地区太阳分光辐射观测网的建立与仪器标定[J]. *环境科学*, 2006, 27(9): 1697–1702.
- [18] Uchiyama A, Matsunaga T, Yamazaki A. The instrument constant of sky radiometers (POM-02) –Part 1: calibration constant [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2018, 11(9): 5363–5388.
- [19] Che H Z, Zhang X Y, Chen H B, et al. Instrument calibration and aerosol optical depth validation of the China Aerosol Remote Sensing Network [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2009, 114(D3): D03206.
- [20] Zhang M, Gong W, Ma Y Y, et al. Transmission and division of total optical depth method: A universal calibration method for Sun photometric measurements [J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43(6): 2974–2980.
- [21] Tong Jilong, Zhao Yanru, Zhao Zhiyuan, et al. Research on calibration method of sunphotometer in semi-arid areas [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(12): 1201001. (in Chinese)
- 全纪龙, 赵艳茹, 赵志远, 等. 半干旱地区太阳光度计定标方法的研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(12): 1201001.
- [22] Schmid B, Wehrli C. Comparison of sun photometer calibration by use of the Langley technique and the standard lamp [J]. *Applied Optics*, 1995, 34(21): 4500–4512.
- [23] Holben B N, Eck T F, Slutsker R I, et al. AERONET—A federated instrument network and data archive for aerosol characterization [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1998, 66(1): 1–16.