

我国西北地区气溶胶垂直分布特征分析

秦武斌^{1,2}, 李学彬¹, 鲁先洋¹, 陈小威^{1,2}, 崔生成¹, 翁宁泉¹, 朱文越¹

¹中国科学院安徽光学精密机械研究所中国科学院大气成分与光学重点实验室, 安徽 合肥 230031;

²中国科学技术大学研究生院科学岛分院, 安徽 合肥 230031

摘要 气溶胶标高是反映气溶胶浓度和消光系数廓线垂直分布特性的一个重要物理量。使用微脉冲激光雷达测量了我国西北典型地区的气溶胶消光系数廓线;使用太阳光度计测量了大气的垂直光学厚度;对测量数据进行拟合,得到了气溶胶标高。结果表明,两种方法得到的气溶胶标高具有很好的线性相关性,相关系数大于 0.87。对该地区的气溶胶标高进行了统计分析,得到气溶胶标高随时间、地域及气候条件的变化关系。该研究对了解西北地区的气溶胶变化特征和建立气溶胶模式具有一定的参考意义。

关键词 大气光学; 气溶胶标高; 消光系数; 光学厚度; 激光雷达; 太阳光度计

中图分类号 P427.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0301001

Aerosol Vertical Distribution Characteristics in Northwest China

Qin Wubin^{1,2}, Li Xuebin¹, Lu Xianyang¹, Chen Xiaowei^{1,2}, Cui Shengcheng¹,
Weng Ningquan¹, Zhu Wenyue¹

¹Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

²Science Island Branch of Graduate School, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230031, China

Abstract Aerosol scale height is one of the important quantities, and it indicates the aerosol concentration and the vertical distribution characteristics of extinction coefficient profile. The aerosol extinction coefficient profile is obtained with micro pulse lidar in northwest China, and the atmosphere vertical optical thickness is measured by sun-photometer. We can obtain aerosol scale height by fitting the measured data. Results show that the aerosol scale heights obtained by the two different methods have a good linear correlation, and the correlation coefficient is larger than 0.87. A statistical analysis for aerosol scale height in northwest China is carried out. The variation in aerosol scale height with time, region and climate condition is presented. The research has significance in studying the characteristics of aerosol variation in northwest China and establishing aerosol patterns.

Key words atmospheric optics; aerosol scale height; extinction coefficient; optical thickness; lidar; sun-photometer

OCIS codes 010.1290; 010.1110; 010.1310

1 引 言

随着我国工业化和城市化进程的发展,气体和颗粒物的排放明显增加,使气溶胶的垂直分布发生明显的变化。为准确估算气溶胶的大气辐射,需考虑气溶胶的垂直分布特征^[1]。气溶胶浓度与气溶胶源、天气条件(湿度、风向、风速等)、季节等因素密切相关,变化范围一般很大,空间分布不均匀。一般地,气溶胶的高度越低,均匀性越差,这主要是由地面污染源的不均匀分布导致的。气溶胶浓度随高度的增加呈指数下降,其中衡量气溶胶浓度变化的关键参数为气溶胶标高。

收稿日期: 2016-06-30; **收到修改稿日期:** 2016-10-27

基金项目: 国家自然科学基金(41105021,41305019)、空间目标测量重点实验室开放基金

作者简介: 秦武斌(1992—),男,硕士研究生,主要从事大气参数测量与分析方面的研究。E-mail: 1316256@163.com

导师简介: 李学彬(1980—),男,博士,副研究员,主要从事气溶胶光学特性方面的研究。E-mail: xbli@aiofm.ac.cn(通信联系人)

气溶胶标高随气候和地理条件的变化而变化。1924年, Koschmieder^[2]提出了气溶胶标高、水平气象视距与大气光学厚度的经验转换公式。1981年, Peterson等^[3]在Koschmieder所提模型的基础上进行了改进,通过消除大气分子的影响,建立了气溶胶标高、气溶胶光学厚度(AOD)与水平气象视距的关系。一般认为, Peterson所提模型是真正意义上的描述AOD与气溶胶标高、地面能见度关系的模型。许潇锋等^[4]根据我国12个一级站的对流层气溶胶光学厚度、地面能见度和地面气压资料,给出了气溶胶标高的计算公式。余娟等^[5]建立了随观测时间变化的气溶胶标高经验公式,并将该公式引入Peterson模型中,提出了基于高斯曲线的地面能见度和气溶胶光学厚度的转换模型。Calvello等^[6]指出假如气溶胶浓度随高度增大不遵循指数分布,那么根据指数分布计算得到的气溶胶标高就称为等效气溶胶标高。

我国西北地区的大气条件千差万别,因此对西北典型地区的气溶胶标高进行测量研究更具有实际意义。2015年8~10月,本课题组分别在甘肃嘉峪关、张掖和武威地区进行了实验测量,3个观测场均位于河西走廊上,海拔在1500 m左右,属温带大陆性气候。2015年11、12月,本课题组又在新疆库尔勒进行了观测,测量点海拔为1300 m,地处欧亚大陆和新疆腹心地带,温带大陆性干旱气候特征显著。通过分析实验结果,了解了气溶胶标高随时空变化的基本规律,即气溶胶浓度和大气边界层的时空变化情况。

2 理论分析

一般地,气溶胶浓度随高度的增加呈指数下降,当其浓度衰减到近地面浓度的 $1/e$ 时,气溶胶层的高度即定义为标高,则高度 h 处的气溶胶浓度 $N_a(h)$ 可表示为

$$N_a(h) \approx N_a(0)\exp(-h/H_a), \quad (1)$$

式中 $N_a(0)$ 为近地面的气溶胶浓度; H_a 为标高,反映了气溶胶浓度随高度的增加而减小的速率,是衡量气溶胶浓度随高度变化的关键参量^[7]。对气溶胶标高进行统计分析,能够更好地了解气溶胶浓度随时空变化的特征。

根据(1)式,得到高度 h 处的气溶胶消光系数 $\beta_{\text{ext}}(h)$ 为^[8-9]

$$\beta_{\text{ext}}(h) \approx \beta_{\text{ext}}(0)\exp(-h/H_a), \quad (2)$$

式中 $\beta_{\text{ext}}(0)$ 为近地面的气溶胶消光系数。

获取气溶胶标高的常用方法有两种:1)利用激光雷达测量消光系数廓线,然后拟合得到气溶胶标高。利用激光雷达测量某一区域内随高度变化的气溶胶消光系数 $\beta_{\text{ext}}(h)$,以(2)式为模型并用最小二乘法对数据进行指数函数拟合,可得到气溶胶标高 H_a ;2)利用太阳光度计测量整层气溶胶的光学厚度,反演得到气溶胶标高 H_a ^[10]。整层气溶胶的光学厚度 τ_a 可表示为对气溶胶消光系数在垂直高度上的积分,即

$$\tau_a = \int_0^{\infty} \beta_{\text{ext}}(h) dh \approx \int_0^{\infty} \beta_{\text{ext}} \exp(-h/H_a) dh \approx \beta_{\text{ext}}(0) H_a. \quad (3)$$

由(3)式可得, $H_a \approx \tau_a / \beta_{\text{ext}}(0)$ 。由于实验测量存在误差,且消光系数的实际高度分布并不一定完全呈指数下降,因此得出的气溶胶标高 H_a 误差较大^[11-12]。根据(3)式,可假设 $\tau_a \approx \beta_{\text{ext}}(0) H_a + C$,其中 C 可用来校正(3)式中的一个变量^[13],使气溶胶光学厚度与近地面消光系数满足一定的比例关系,从而减小测量误差。设自变量是大气近地面消光系数 $\beta_{\text{ext}}(0)$,因变量是气溶胶光学厚度 τ_a ,可得到两者之间的分布关系。对分布曲线进行线性拟合,则拟合直线的斜率就是气溶胶标高 H_a 。

3 数据处理与对比分析

3.1 利用消光系数廓线拟合标高

实验所采用的激光雷达是中国科学院安徽光学精密机械研究所自主研发的532 nm波长微脉冲激光雷达(MPL),每5 min采集一组数据,基于Fernald反演方法,采用常数雷达率^[14],得到气溶胶在532 nm波长处消光系数的垂直分布廓线。在进行数据反演前,先进行相关校正处理,主要包括背景噪声校正、几何重叠因子校正和残余脉冲校正等^[15]。图1为2015年8月8日在嘉峪关测量得到的气溶胶消光系数廓线与拟合曲线的比较,图1(a)为17:30时线性坐标下气溶胶消光系数廓线与拟合曲线的对比结果,图1(b)为17:00—18:00时间段内取平均后的气溶胶消光系数廓线与拟合曲线在对数坐标中的对比结果。采用最小二

乘法并以(2)式为模型对气溶胶消光系数的分布曲线进行指数拟合,以消光系数 $\beta_{\text{ext}}(h)$ 和高度 h 为已知参量,根据拟合出的指数函数参数可得到近地面消光系数 $\beta_{\text{ext}}(0)$ 和气溶胶标高 H_a 。

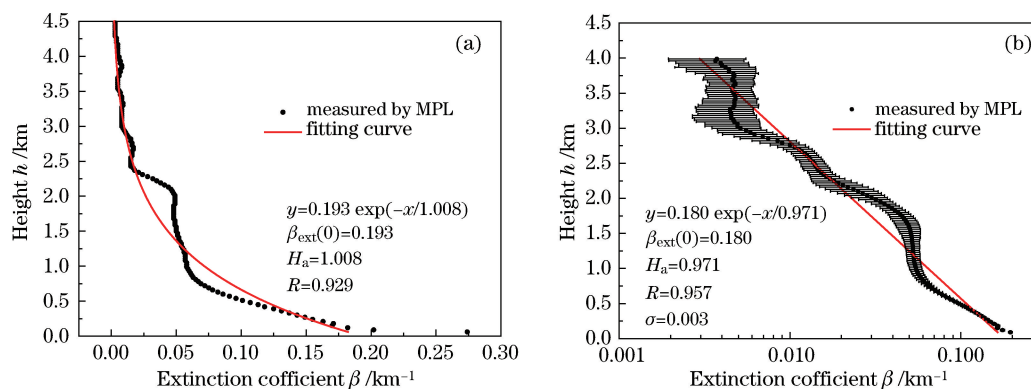


图 1 在 2015 年 8 月 8 日(a) 17:30 和(b) 17:00—18:00 使用 MPL 实测的嘉峪关地区的气溶胶消光系数廓线与拟合曲线
Fig. 1 Aerosol extinction coefficient profiles measured by MPL and fitting curves at (a) 17:30 and (b) during 17:00—18:00 in Jiayuguan (2015-08-08)

由图 1 可以看出,拟合曲线与 MPL 实测值的变化趋势一致,两者吻合较好,只是在局部略有差异,取平均后的气溶胶消光系数廓线抖动更小,符合度更高。从图 1(a)中可以看出,高度为 2 km 处有一拐点,说明在气溶胶输送中有一定的气溶胶聚集现象^[16]。实验结果表明,在晴朗天气下 MPL 测量的气溶胶消光系数廓线很好地服从指数分布,但由于薄云和低云的影响,极少部分气溶胶消光系数廓线无法完全服从指数分布^[17]。若将气溶胶消光系数进行日平均或者月平均,或者将低层薄云部分剔除后,气溶胶消光系数廓线也将服从指数分布,此时可用于拟合气溶胶标高或等效气溶胶标高。

计算近地面水平消光系数时,选择美国 Belfort Instrument 公司的 Model 6000 能见度仪。在可靠定标的前提下,该仪器能够连续探测地面能见度,并实时计算相对应的地面大气水平消光系数。图 2 为使用 MPL 反演得到的气溶胶消光系数与使用能见度仪得到的结果,可以看出两者相差不大且具有较高的相关性,表明获取的近地面气溶胶消光系数是可靠的。用于实验的太阳辐射计是日本 PREDE 公司制造的自动跟踪太阳辐射计 POM-2,利用差值法可以求出与实际需求对应波长的光学厚度,再利用(3)式中光学厚度和近地面消光系数的关系得到气溶胶标高 H_a ^[18]。

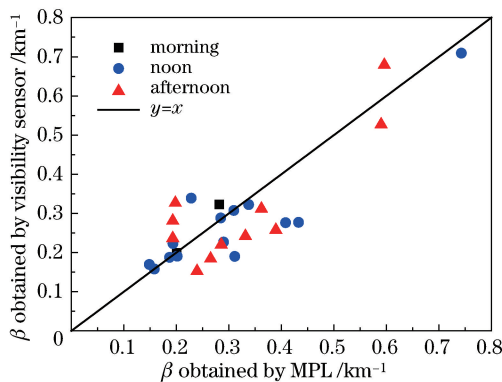


图 2 使用 MPL 和能见度仪得到的气溶胶消光系数对比
Fig. 2 Comparison of aerosol extinction coefficients obtained by MPL and visibility sensor

3.2 两种方法对比

图 3 对比分析了两种方法获得的气溶胶标高,横坐标为对使用 MPL 测得的数据进行拟合后得到的气溶胶标高 H_a ,纵坐标为根据太阳光度计测得的光学厚度计算得到的气溶胶标高 H_a , N 为采样点数,两者均对 5 min 内的数据取平均,图中直线是对两者线性回归统计的结果,图中也给出了拟合的回归直线方程和相关系数 R 。

由统计结果可以看出,在 3 个测量区域通过 MPL 拟合的气溶胶标高和太阳光度计计算的气溶胶标高

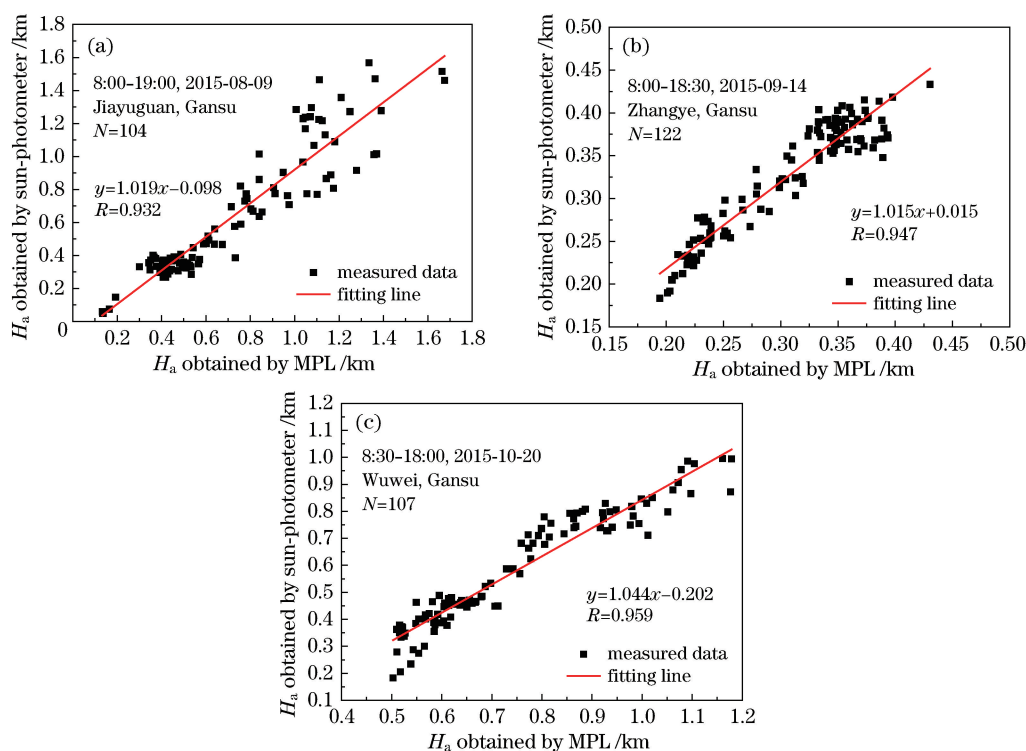


图 3 两种方法获得的三个区域的气溶胶标高的线性回归统计。(a)嘉峪关;(b)张掖;(c)武威

Fig. 3 Linear regression statistics for aerosol scale height in three regions obtained by two different methods.

(a) Jiayuguan; (b) Zhangye; (c) Wuwei

具有很好的线性相关性,相关系数大于 0.87,相对误差约为 15%。由线性回归直线的斜率均在 1 附近可知,两种方法获得的气溶胶标高差异较小,说明这两种方法拟合得到的气溶胶标高是合理的。

4 西北地区气溶胶标高统计特征

影响气溶胶垂直分布特征的关键因素是气溶胶源和天气条件,在气溶胶源稳定的情况下,一个地区气溶胶的浓度及其垂直分布特性在很大程度上取决于大气边界层高度和边界层大气稳定度^[7],这 2 个因子随天气条件的变化而变化。气溶胶标高反映了大气边界层气溶胶的特征厚度,边界层气溶胶厚度随时间的变化与气溶胶标高的变化类似^[19],因此对气溶胶标高进行统计分析,可以了解气溶胶浓度随时空的变化情况和气溶胶的垂直分布特性。

4.1 日变化特征

大气中的气溶胶浓度随时间和地点发生变化。选择晴空少云条件下得到的数据进行分析,其中两种方法计算的气溶胶标高均由所有有效测量数据经过 30 min 平均后得到。

由图 4 可以看出,各个地方使用 MPL 拟合得到的气溶胶标高与太阳光度计计算出的气溶胶标高基本一致,最大相对误差为 26.43%,最小相对误差为 2.53%,平均相对误差不超过 16%,平均标准差为 0.21,两者具有相同的趋势:

1) 甘肃地区特征

对甘肃地区(嘉峪关、张掖、武威)的气溶胶标高进行统计,发现早晨气溶胶标高值相对较小,其变化范围为 0.2~0.5 km。随着时间的推移,太阳辐射增加,气溶胶标高值有所增加,这可能与实际大气候条件有关。因为一般情况下清晨温度较低,大气运动缓慢,边界层较低,气溶胶层的高度也较低,大气消光系数衰减明显;随着太阳的升起,温度升高,太阳辐射加速了大气的对流和气溶胶的扩散,使得气溶胶标高值变大,其变化范围为 0.3~2.0 km^[7]。白天特别是下午人类活动频繁,使气溶胶不断产生并不断累积,傍晚时气溶胶标高达到最大值。

2) 新疆库尔勒地区特征

与甘肃地区变化趋势不同,新疆地区早晨气溶胶标高值较大,随着时间的推移,气溶胶标高值下降。结合当地地形和气象条件,新疆库尔勒地区地势开阔,2015年11、12月夜里温度都在0℃以下,相对湿度较大,并且大气边界层稳定,容易形成轻雾天气。当上午温度升高时,近地面相对湿度由大变小,气溶胶输送和扩散加剧,导致气溶胶消光系数由大变小,因此气溶胶标高值由大变小。

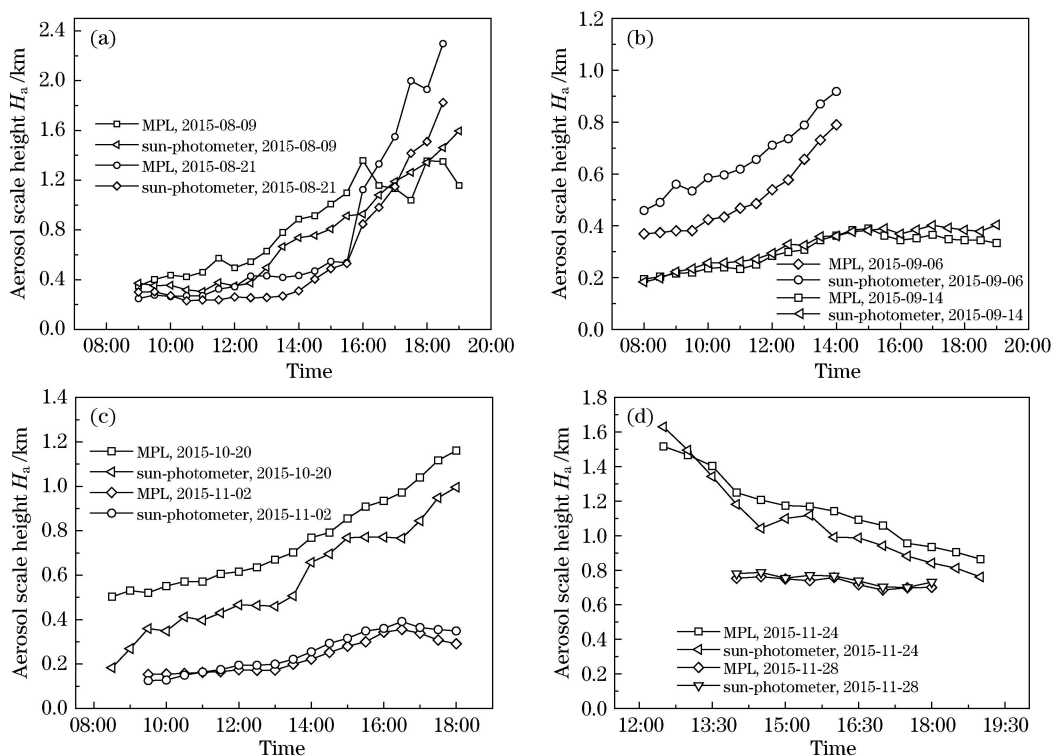


图4 甘肃和新疆地区气溶胶标高的日变化。(a)嘉峪关;(b)张掖;(c)武威;(d)库尔勒

Fig. 4 Diurnal variations of aerosol scale height in Gansu and Xinjiang.

(a) Jiayuguan; (b) Zhangye; (c) Wuwei; (d) Korla

4.2 月统计特征

太阳光度计只能获取白天晴空条件下的气溶胶光学厚度,而MPL因其长期、连续、全天候的测量优势,可实现与使用太阳光度计测量的数据的互补。图5为对2015年8月在嘉峪关地区使用MPL得到的全天测量数据进行拟合得到的气溶胶标高。可以看出,白天拟合数据的气溶胶标高与前述分析一致。随着太阳的升起,气溶胶标高也变大,在当天18:00左右出现极大值。由于白天太阳与地球表面的热交换作用,空气垂直对流剧烈,对流层气溶胶粒子浓度的垂直廓线随时间的变化较快,所以白天气溶胶标高起伏较大。夜晚温度迅速降低,水汽开始沉降,边界层较低,气溶胶消光系数随高度逐渐变小,气溶胶标高变化较为平缓且数值较小。

为了研究西北地区气溶胶标高的变化特征,对西北地区3个时间段的气溶胶标高进行统计。3个时间段分别为上午9:00—11:00、中午12:00—14:00和下午16:00—18:00,如表1所示。从时间上看,甘肃地区3个时间段的气溶胶标高均呈现逐渐增大的趋势。从统计数值上看,每天同一时段的气溶胶标高从大到小依次为嘉峪关、张掖和武威,这与它们在河西走廊的地理位置和测量时间都有着密切的关系。值得注意的是,武威地区的气溶胶标高较小,这与测量时的气温较低有关。在气溶胶源方面,西北地区主要为沙尘型气溶胶粒子。经初步分析,得到甘肃地区与新疆地区的气溶胶标高变化趋势不同的原因可能是新疆地区地广人稀,气溶胶来源主要为土壤沙尘天然源,而甘肃地区除此之外还伴随着少量的煤烟尘、建筑水泥尘等气溶胶源。

表1 甘肃和新疆地区各时段的气溶胶标高统计结果

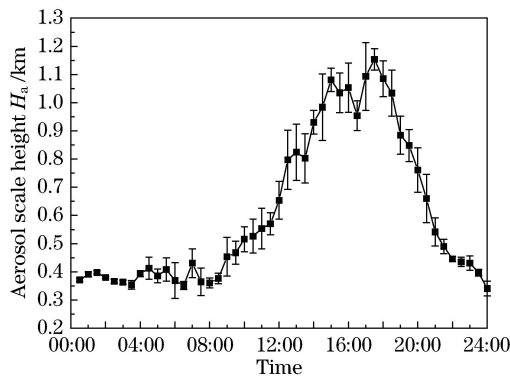


图 5 对 2015 年 8 月在嘉峪关使用 MPL 得到的全天测量数据拟合得到的气溶胶标高

Fig. 5 Aerosol scale height fitted for measurement data in whole day obtained by MPL in Jiayuguan (2015-08)

Table 1 Statistic results of aerosol scale height in each period in Gansu and Xinjiang

Region	Measurement date	Time	Mean /km	Standard deviation	Maximum /km	Minimum /km
Jiayuguan	2015-07-30—2015-08-24	Morning	0.495	0.049	0.659	0.248
		Noontime	0.789	0.105	1.354	0.356
		Afternoon	1.067	0.071	2.417	0.601
		All day	0.609	0.267	1.482	0.186
Zhangye	2015-08-26—2015-09-21	Morning	0.426	0.058	0.495	0.377
		Noontime	0.503	0.039	0.558	0.452
		Afternoon	0.684	0.039	0.741	0.636
Wuwei	2015-10-15—2015-11-03	All day	0.577	0.134	0.781	0.317
		Morning	0.200	0.007	0.207	0.189
		Noontime	0.334	0.034	0.374	0.289
		Afternoon	0.512	0.082	0.628	0.438
Xinjiang	2015-11-02—2015-12-16	All day	0.422	0.205	0.903	0.180
		Morning	1.302	0.148	1.541	1.173
		Noontime	1.222	0.043	1.271	1.178
		Afternoon	1.154	0.051	1.206	1.079
		All day	1.402	0.559	2.411	0.723

5 结 论

针对西北典型地区气溶胶的垂直分布特点,对使用 MPL 和太阳光度计测得的结果进行拟合,得到气溶胶标高,分析了西北典型地区气溶胶标高的变化特性,结论如下:

1) 两种方法获得的气溶胶标高具有很好的线性相关性,相关系数大于 0.87,两者的相对误差较小,说明这两种方法拟合得到的气溶胶标高是可靠的。

2) 甘肃地区在 2015 年 8~11 月份,从早上开始气溶胶标高逐渐上升,傍晚时达到最大值,之后又下降。新疆地区则恰好相反,从早上开始气溶胶标高值逐渐下降,夜晚时达到极小值。

3) 气溶胶标高在白天的变化与气溶胶浓度和边界层高度有关。由于白天大气与地球表面的热交换比夜晚强烈,所以白天气溶胶标高起伏较大,而夜晚气溶胶标高变化较为平缓且数值较小。

4) 从月统计数值上看,甘肃地区气溶胶标高差异显著,每天同一时段的气溶胶标高从大到小依次为嘉峪关、张掖和武威。

经研究得到西北地区气溶胶标高的变化特征,对了解我国西北地区气溶胶光学特性和建立相应的气溶胶模式具有十分重要的意义。

参 考 文 献

- [1] Liu Qiong, Geng Fuhai, Chen Yonghang, *et al.* Vertical distribution of aerosols during different intense dry haze periods around Shanghai[J]. *China Environmental Science*, 2012, 32(2): 207-213.
刘 琼, 耿福海, 陈勇航, 等. 上海不同强度干霾期间气溶胶垂直分布特征[J]. *中国环境科学*, 2012, 32(2): 207-213.
- [2] Koschmieder H. Theorie der horizontalen Sichtweite[J]. *Beiträge zur Physik der freien Atmosphäre*, 1924, 12: 33-53, 171-181.
- [3] Peterson J T, Fee C J. Visibility-atmospheric turbidity dependence at Rayleigh, North Carolina[J]. *Atmospheric Environment*, 1981, 15(12): 2561-2563.
- [4] Xu Xiaofeng, Qiu Jinheng, Niu Shengjie, *et al.* Optical depth of the atmospheric aerosol at 12 stations in China over the past 45 years[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, 29(3): 488-495.
许潇锋, 邱金桓, 牛生杰, 等. 近 45 年中国 12 个一级站大气气溶胶光学厚度变化特征[J]. *环境科学学报*, 2009, 29(3): 488-495.
- [5] Yu Juan, Gong Wei, Zhu Zhongmin. Optimized transformation model of aerosol optical depth and visibility based on Gaussian curve[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2011, 15(5): 1008-1023.
余 娟, 龚 威, 朱忠敏. 高斯曲线优化能见度与气溶胶光学厚度转换模型[J]. *遥感学报*, 2011, 15(5): 1008-1023.
- [6] Calvello M, Esposito F, Leone L, *et al.* High resolution measurement of aerosol equivalent scale height over wide range[J]. *Chemical Engineering Transactions*, 2008, 16: 61-66.
- [7] Han Yong, Rao Ruizhong, Wang Yingjian, *et al.* Multi-wavelength spectral aerosol scale height in inshore in contrast with that in inland[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, 29(1): 33-37.
韩 永, 饶瑞中, 王英俭, 等. 沿海和内陆地区多波长光谱气溶胶标高的比较分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2009, 29(1): 33-37.
- [8] Li Xuebin, Xu Qingshan, Wei Heli, *et al.* Study on relationship between extinction coefficient and mass concentration[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(9): 1655-1658.
李学彬, 徐青山, 魏合理, 等. 气溶胶消光系数与质量浓度的相关性研究[J]. *光学学报*, 2008, 28(9): 1655-1658.
- [9] Li Qian, Li Chengcai, Wang Yefang, *et al.* Retrieval on mass concentration of urban surface suspended particulate matter with LIDAR and satellite remote sensing[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2013, 49(4): 673-682.
李 倩, 李成才, 王烨芳, 等. 利用激光雷达和卫星遥感获得城市地面大气悬浮颗粒物浓度分布[J]. *北京大学学报*, 2013, 49(4): 673-682.
- [10] Chen Yunzhu. Data fusion of aerosol optical Depth[D]. Shanghai: East China Normal University, 2013: 5.
陈韵竹. 气溶胶光学厚度的数据融合研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2013: 5.
- [11] Han Yong, Fan Wei, Rao Ruizhong, *et al.* Aerosol scale height of visible light-wave in experimentation study[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2006, 1(1): 33-40.
韩 永, 范 伟, 饶瑞中, 等. 可见光波段气溶胶标高的实验研究[J]. *大气与环境光学学报*, 2006, 1(1): 33-40.
- [12] Han Yong, Rao Ruizhong, Wang Yingjian, *et al.* Multi-wavelength aerosol optical characteristics obtained by atmospheric visibility[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(2): 265-269.
韩 永, 饶瑞中, 王英俭, 等. 利用大气能见度获取多波长气溶胶光学特性[J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(2): 265-269.
- [13] Fan Wei, Han Yong, Wang Yi, *et al.* The measurement of transmittance from visual to infrared bands[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, 35(5): 532-535.
范 伟, 韩 永, 王 毅, 等. 内陆和沿海地区大气气溶胶标高的测量分析[J]. *红外与激光工程*, 2006, 35(5): 532-535.
- [14] Zhang Zhaoyang, Su Lin, Chen Liangfu. Retrieval and analysis of aerosol lidar ratio at several typical regions in China[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(5): 0513002.
张朝阳, 苏 林, 陈良富. 中国典型地区气溶胶激光雷达比反演与分析[J]. *中国激光*, 2013, 40(5): 0513002.
- [15] Deng Tao, Wu dui, Deng Xuejiao, *et al.* The vertical distribution of aerosol optical properties in a severe haze event[J]. *China Environmental Science*, 2013, 33(11): 1921-1928.
邓 涛, 吴 兑, 邓雪娇, 等. 一次严重灰霾过程的气溶胶光学特性垂直分布[J]. *中国环境科学*, 2013, 33(11): 1921-1928.
- [16] Chen Lin, Wang Zhenzhu, Hu Xiuqing, *et al.* Vertical profile of atmospheric aerosol observed by lidar in Dunhuang radiometric calibration site[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2015, 10(4): 324-332.

- 陈 林, 王珍珠, 胡秀清, 等. 敦煌辐射校正场典型气溶胶垂直廓线的激光雷达观测[J]. 大气与环境光学学报, 2015, 10(4): 324-332.
- [17] Zhu Cunxiong, Cao Nianwen, Yang Fengkai, *et al.* Micro pulse lidar observations of aerosols in Nanjing[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(5): 050101.
祝存兄, 曹念文, 杨丰恺, 等. 南京地区微脉冲激光雷达气溶胶观测[J]. 激光与光电子进展, 2015, 52(5): 050101.
- [18] Xu Mengchun, Xu Qingshan, Fan Chuanyu, *et al.* Aerosol scale height measured by sun-photometer based on stratified atmospheric algorithm[J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(6): 0601002.
徐梦春, 徐青山, 范传宇, 等. 基于太阳光度计分层算法获取气溶胶标高[J]. 光子学报, 2015, 44(6): 0601002.
- [19] Gerasopou L E, Andreae M O, Zerefosl C S, *et al.* Climatological aspects of aerosol optical properties in Northern Greece[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2003, 3: 2025-2041.