

可见光波段气溶胶标高的实验研究

韩 永^{1,2}, 范 伟³, 饶瑞中¹, 王英俭¹

(1 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 大气光学中心, 安徽 合肥 230031;

2 中国科学院研究生院, 北京 100039;

3 安徽气象科学研究所, 安徽 合肥 230031)

摘 要: 大气气溶胶对大气辐射和光传播具有重要影响, 而标高是反映气溶胶高度分布特征的关键参量。利用连续光谱的太阳辐射计和前向散射能见度仪, 测量了大气柱光学特性以及近地面层的大气水平消光系数, 获得了可见光波段的大气气溶胶标高的变化特征: 随着波长值的增加, 气溶胶标高减小; 对于实验当地的情况, 一般冬季气溶胶标高要大于夏季的气溶胶标高。

关键词: 气溶胶标高; 光学厚度; 消光系数; 能见度仪; 太阳辐射计

中图分类号: P427.1

文献标识码: A

文献编号: 1673-6141(2006)01-0033-08

Aerosol Scale Height of Visible Light-wave in Experimentation Study

HAN Yong^{1,2}, FAN Wei³, RAO Rui-zhong¹, WANG Ying-jian¹

(1 Laboratory for Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

2 Graduate School of Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China;

3 Anhui Institute of Meteorological and Science, Hefei 230031, China)

Abstract: The atmospheric aerosol has important influence to atmospheric radiation and light propagation, but scale height is the key parameter which reflects aerosol height distribution. So using continuous spectrum sun-photometer and forward scatter visibility sensor, we measured the atmosphere column optical characteristic and plan extinction coefficient on earth on the base of two experiments, respectively. The characteristic of aerosol scale height of visibility light-wave is obtained: with wavelength increasing, aerosol scale height declines; generally, aerosol scale height in winter is higher than it is in summer for the place of experiment condition; the more wavelength is high, the more aerosol scale height is little.

Key words: aerosol scale height; optical depth; extinction coefficient; visibility sensor; sun-photometer

1 引 言

对流层气溶胶以直接强迫和间接强迫两种主要方式影响着地球大气短波和长波辐射平衡。气溶胶的存在减小了由于温室气体导致的全球温度的上

升幅度。对流层气溶胶引起的空气污染质量问题, 包括城市能见度的下降、可吸入颗粒物对人们健康的影响等, 已经在全球范围内引起广泛关注^[1]。此外, 气溶胶对大气中的光传播产生散射和消光作用, 影响激光大气传输等技术的工程应用^[2]。

收稿日期: 2006-02-06; 修改日期: 2006-04-14

基金项目: 国家 863 计划专题资助

E-mail: yhan7506@126.com

20 世纪 70 年代以来, 我国的快速工业化过程也伴随着区域性空气污染问题的出现。大气气溶胶的组成是一个重要的影响因子, 有时它不仅对总的气溶胶消光的组成是必须的, 而且对估计不同空间间隔范围内的有效高度 (气溶胶标高) 也是可能的^[3]。

对于辐射计算来说, 研究大气气溶胶的时空变化是一个十分紧迫的课题, 因为它对于改善光学传输模式、气溶胶的微物理特征以及估计通过大气的光波范围的操作系统效率都是必需的, 而气溶胶标高就是大气气溶胶时空变化特征的一个重要物理量^[4~7]。接下来我们利用连续光谱的太阳辐射计、前向散射能见度仪、温湿传感器和探空仪等, 以沿海某地 2004 年 8 月和 2005 年 3 月的两次实验为基础, 对可见光波长 (0.40、0.44、0.532、0.55 和 0.69 μm) 的气溶胶标高变化特征进行分析。

2 气溶胶标高测量原理

大气气溶胶标高的物理含义^[8]是假设气溶胶浓度随高度分布保持不变时的气溶胶层的等效厚度。随着高度增加, 气溶胶浓度一般按指数关系下降, 反映气溶胶浓度随高度变化的关键参数就是标高。因此对标高的计算分析, 能够对气溶胶浓度含量随时间及地域空间变化的情况有较为清楚的了解。气溶胶浓度随高度增加而减少的速率可以由下式表示为

$$N_a(h) \approx N_a(0)e^{-\frac{h}{H_a}} \quad (1)$$

其中, $N_a(0)$ 是地面气溶胶浓度, 而 $N_a(h)$ 是在高度为 h 处的气溶胶浓度, H_a 即为标高。

根据 (1) 式可以得到

$$\beta_{\text{ext}}(h, \lambda) \approx \beta_{\text{ext}}(0, \lambda)e^{-\frac{h}{H_a(\lambda)}} \quad (2)$$

其中, $\beta_{\text{ext}}(0, \lambda)$ 是波长为 λ 时近地面层的气溶胶消光系数, $\beta_{\text{ext}}(h, \lambda)$ 是在高度为 h 处的气溶胶消光系数。

由 (2) 式可得: 大气气溶胶光学厚度与近地面气溶胶消光系数的关系为

$$\begin{aligned} \tau_a(\lambda) &\approx \int_0^\infty \beta_{\text{ext}}(0, \lambda)e^{-\frac{z}{H_a(\lambda)}} dz \\ &\approx \beta_{\text{ext}}(0, \lambda)H_a(\lambda) \end{aligned}$$

因而有

$$H_a(\lambda) \approx \frac{\tau_a(\lambda)}{\beta_{\text{ext}}(0, \lambda)} \quad (3)$$

上式中 $\tau_a(\lambda)$ 是波长为 λ 时气溶胶的光学厚度。由于消光系数的实际高度分布并不一定严格服从指数下降规律, 由 (3) 式, 可假设

$$\tau_a(\lambda) = \beta_{\text{ext}}(0, \lambda)H_a(\lambda) + C \quad (4)$$

由公式 (4), 设自变量是大气地面消光系数, 因变量是气溶胶光学厚度, 可以得到两者之间的分布关系, 对分布结果进行线性拟合, 直线的斜率就是气溶胶标高。截距则在另一方面描述了来自对流层上部 (2~12 km) 和平流层的气溶胶对整层气溶胶光学厚度的贡献。

首先, 利用前向散射能见度仪获得大气水平消光系数, 在减去分子的消光系数之后即可得到近地面层的气溶胶消光系数; 然后, 利用 OPAC 计算机软件^[9] 计算出不同湿度 (0%、50%、70%、80%、90%、95%、98% 和 99%) 和不同波长 (0.40、0.45、0.50、0.55、0.60、0.65、0.70、0.75 μm) 时的气溶胶消光系数, 根据能见度仪所探测到的近地面层气溶胶消光系数, 利用插值法分别求出与实际状况 (相对湿度和对应波长 0.40、0.44、0.532、0.55 和 0.69 μm) 相对应的气溶胶消光系数; 最后, 使用太阳辐射计探测到的大气柱光学厚度, 减去由 Modtran3.7 计算出的对应波长大气分子的光学厚度, 利用公式 (3), 即可求出大气气溶胶标高。

3 实验设备

为了获得地面水平消光系数, 使用美国 Belfort Instrument 公司生产的 Model 6230A 能见度仪, 在可靠定标的前提下它能够连续不断地探测地面大气水平消光系数, 并实时计算相对应的地面水平能见度^[10]。

用于实验的光谱太阳辐射计是日本 PREDE 公司制造的自动跟踪太阳辐射计 PGS-100, 视场角是 1° , 波长范围 350~1050 nm。光谱分辨率是 3.6 nm, 探测器使用的是 Si-CCD, 它具有线性范围宽、响应速度快和噪声小等特点。从 350~1050 nm 的所有波长均用 Langley 方法进行定标, 相关系数高于 0.99。仪器由 IBM-PC 计算机控制, 并存储数据。

此外, 还有温、湿传感器等。上述仪器采样同时进行。

因温度、湿度等气象参数是气溶胶标高的影响因素之一, 所以表 1 至表 4 给出了实验期间 (2004 年 8 月和 2005 年 3 月) 大气的温湿情况。

4 大气气溶胶标高探测结果

4.1 实验期间的气象参数

表 1 2004 年 8 月 10、15、16、18、22 日大气温度状况

Table 1 Atmospheric temperature on Aug 10、15、16、18 and 22, 2004

Year Month Day	Mean(\bar{t} / °C)	Standard deviation	Min(°C)	Max(°C)
04 08 10	28.140 42	0.309 63	26.869	28.843
04 08 15	27.340 23	0.907 97	25.818	28.78
04 08 16	27.982 18	1.153 77	25.993	30.322
04 08 18	28.403 47	0.589	27.579	30.432
04 08 22	27.699 82	0.877 68	26.349	30.161

表 2 2004 年 8 月 10、15、16、18、22 日大气湿度状况

Table 2 Atmospheric humidity on Aug 10、15、16、18 and 22, 2004

Year Month Day	Mean($\bar{R}h$)	Standard deviation	Min	Max
04 08 10	77.89	4.545 36	72.3	82.1
04 08 15	85.600 18	3.984 36	78.358	92.136
04 08 16	78.362 45	6.955 88	63.264	89.887
04 08 18	81.138 51	3.998 12	68.856	86.45
04 08 22	85.278 43	4.504 28	73.126	91.869

表 3 2005 年 3 月 5、6、9 和 20 日大气温度状况

Table 3 Atmospheric temperature on Mar 5、6、9 and 20, 2005

Year Month Day	Mean(\bar{t} / °C)	Standard deviation	Min(°C)	Max(°C)
05 03 05	11.414 29	1.778 36	8.586	14.399
05 03 06	10.155 59	1.739 99	7.347	13.086
05 03 09	13.959 3	2.338 12	9.838	18.03
05 03 20	15.482 38	1.324 36	13.302	17.41

表 4 2005 年 3 月 5、6、9 和 20 日大气湿度状况

Table 4 Atmospheric humidity on Mar 5、6、9 and 20, 2005

Year Month Day	Mean($\bar{R}h$)	Standard deviation	Min	Max
05 03 05	45.766 32	7.545 36	26.984	62.3
05 03 06	49.550 41	8.780 68	32.863	73.053
05 03 09	73.822 22	9.847 18	46.37	87.049
05 03 20	72.973 66	8.899 06	57.99	85.997

4.2 气溶胶标高单日变化

根据前面所述, 图 1 (a)、(b)、(c)、(d) 和 (e) 分别给出了波长为 0.40、0.44、0.532、0.55 和 0.69 μm , 2004 年 8 月 10、15、16、18、22 日以及 2005 年 3 月 5、6、9、20 日的大气气溶胶标高变化曲线。从图上可以看出: 对于单日情况, 随着波长的增加, 气溶胶标高呈下降趋势, 这一点与文献 [2] 中关于可见光波段气溶胶标高的变

化趋势相同, 说明该计算结果是可靠的; 每天的早晨气溶胶标高值相对较低, 随着时间的增加, 它的数值有所增加, 这也与实际的天气情况相符合, 因为一般的情况下, 早晨风速较小, 况且经过一夜的沉降之后, 气溶胶层的高度也就较低; 随着太阳的升起, 太阳辐射加速了地球大气的运动, 也就加速了气溶胶进入高空的局地热力条件, 其结果将是气溶胶的标高值有所上升。当然, 在以后我们获得晚

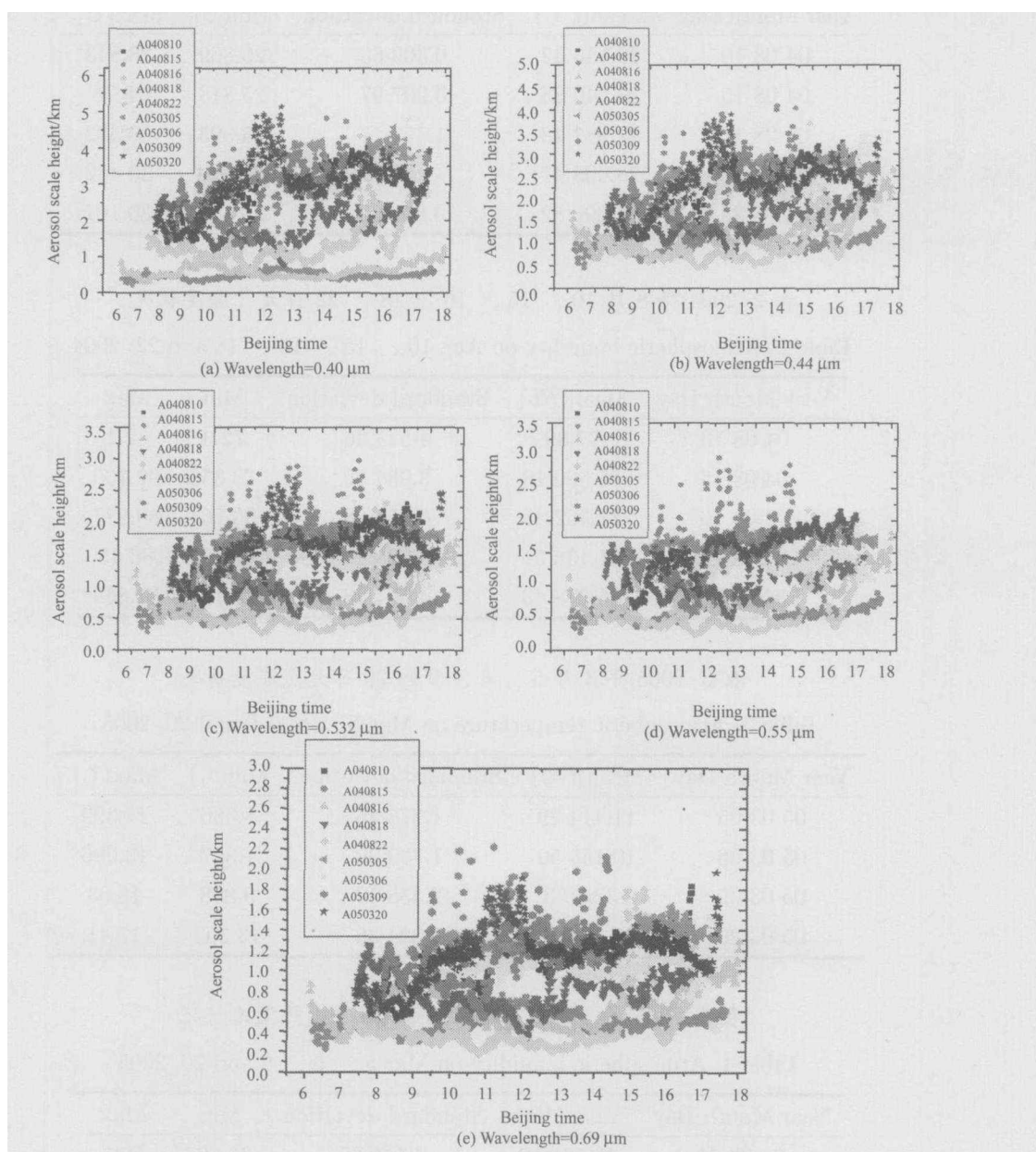


图 1 (a)、(b)、(c)、(d)、(e) 分别给出了波长为 0.40、0.44、0.532、0.55 和 0.69 μm 时 2004 年 8 月 10、15、16、18、22 日, 2005 年 3 月 5、6、9、20 日沿海某地大气气溶胶标高的变化曲线

Fig.1 (a)、(b)、(c)、(d)、(e) is the change of atmospheric aerosol scale height at wavelength 0.40、0.44、0.532、0.55、0.69 μm on Aug 10、15、16、18、22, 2004 and Mar 5、6、9 and 20, 2005 in one zone of the edge ocean, respectively

表 5 波长 0.40 μm 的气溶胶标高统计Table 5 Statistics of aerosol scale height at 0.40 μm

Year Month Day	Mean(km)	Standard deviation	Min(km)	Max(km)
A04 08 10	3.124 13	0.667 71	1.283 57	4.136 87
A04 08 15	0.519 32	0.267 51	0.222 2	3.978 42
A04 08 16	0.623 89	0.181 08	0.299 78	1.292 67
A04 08 18	1.884 4	0.437 16	0.785 27	2.689 23
A04 08 22	1.309 05	0.502 8	0.631 1	4.341 69
A05 03 05	3.549 69	0.391 13	2.697 37	4.609 27
A05 03 06	3.349 03	0.292 3	2.316 48	4.809 4
A05 03 09	2.717 32	0.785 78	1.354 73	4.850 31
A05 03 20	2.992 12	0.767 2	1.386 3	5.353 35

表 6 波长 0.44 μm 的气溶胶标高统计Table 6 Statistics of aerosol scale height at 0.44 μm

Year Month Day	Mean(km)	Standard deviation	Min(km)	Max(km)
A04 08 10	2.407 75	0.523 15	0.999 39	3.272 56
A04 08 15	1.048 41	0.303 19	0.436 99	3.616 09
A04 08 16	1.410 89	0.392 31	0.637 84	2.689 3
A04 08 18	1.560 85	0.350 12	0.656 92	2.197 59
A04 08 22	0.929 26	0.424 96	0.437 84	3.709 66
A05 03 05	2.575 42	0.248 7	1.970 43	3.236 8
A05 03 06	2.355 66	0.288 3	1.625 48	3.424 85
A05 03 09	2.176 02	0.659 35	1.038 14	4.090 61
A05 03 20	2.317 96	0.575 37	1.092 07	3.902 5

表 7 波长 0.532 μm 的气溶胶标高统计Table 7 Statistics of aerosol scale height at 0.532 μm

Year Month Day	Mean(km)	Standard deviation	Min(km)	Max(km)
A04 08 10	1.645 67	0.361 32	0.696 14	2.314 03
A04 08 15	0.657 14	0.187 61	0.283 11	2.478 1
A04 08 16	0.956 39	0.276 39	0.432 99	2.008 39
A04 08 18	1.173 22	0.263 26	0.495 68	1.744 5
A04 08 22	0.591 73	0.350 88	0.258 89	2.557 79
A05 03 05	1.747 27	0.150 15	1.360 7	2.127 41
A05 03 06	1.442 94	0.139 3	1.012 16	2.861 29
A05 03 09	1.590 71	0.487 61	0.726 98	2.984 98
A05 03 20	1.642 06	0.399 23	0.783 66	2.709 57

表 8 波长 0.55 μm 的气溶胶标高统计Table 8 Statistics of aerosol scale height at 0.55 μm

Year Month Day	Mean(km)	Standard deviation	Min(km)	Max(km)
A04 08 10	1.540 31	0.337 85	0.656 13	2.156 31
A04 08 15	0.608 76	0.140 55	0.265 5	1.490 15
A04 08 16	0.889 56	0.255 32	0.403 57	1.815 38
A04 08 18	1.103 6	0.246 09	0.467 76	1.641 97
A04 08 22	0.549 76	0.323 08	0.241 61	2.165 41
A05 03 05	1.635 34	0.139 61	1.273 04	1.993 22
A05 03 06	1.335 25	0.135 04	0.952 98	1.980 69
A05 03 09	1.499 03	0.469 21	0.677 71	2.977 12
A05 03 20	1.540 31	0.337 85	0.656 13	2.156 31

表 9 波长 0.69 μm 的气溶胶标高统计Table 9 Statistics of aerosol scale height at 0.69 μm

Year Month Day	Mean(km)	Standard deviation	Min(km)	Max(km)
A04 08 10	1.113 42	0.227 12	0.506 16	1.832 45
A04 08 15	0.502 8	0.146 34	0.222 2	1.819 75
A04 08 16	0.623 89	0.181 08	0.299 78	1.292 67
A04 08 18	0.795 87	0.182 67	0.330 99	1.260 14
A04 08 22	0.458 47	0.317 23	0.186 81	1.807 85
A05 03 05	1.327 79	0.115 64	1.065 53	1.640 57
A05 03 06	1.026 72	0.121 74	0.428 57	1.531 82
A05 03 09	1.136 38	0.341 94	0.528 6	2.228 94
A05 03 20	1.163 43	0.273 37	0.570 09	1.974 6

上的标高数据的情况下,将更能清楚地知道一天中气溶胶标高的变化情况。此外,从图上还可看出,个别时间段气溶胶标高出现极大值,这可能与当时的气象条件,比如风速加大有关。表 5~表 9 分别给出了波长 0.40、0.44、0.532、0.55 和 0.69 μm , 2004 年 8 月 10、15、16、18、22 日以及 2005 年 3 月 5、6、9、20 日统计结果。从中可以较为清楚地看出单日、单波长的均值、标准差、最小值和最大值等。

5 气溶胶标高特征分析

对于实验当地来说,每年 8 月具有很典型的夏季特征,而每年的 3 月具有典型的冬季特征,因此选择这两个月进行实验具有一定的代表性。图 2 (a)、(b) 分别给出波长为 0.40、0.44、0.532、0.55 和 0.69 μm 时 2004 年 8 月和 2005 年 3 月气溶

胶标高日平均变化特征。从图中可以看出,随着太阳的升起,标高值也跟着上升,其中冬季上升幅度较夏季为大;由于夏天白天较长,所以图 2(a) 在正午时气溶胶标高并没有达到峰值,而是到了 15:00 左右才达到极大值点,然后数值有所下降;图 2(b) 中,出现双峰结构,在 12:00 和 16:00 左右出现极大值,这跟当地的实际气象条件有关。此外,随着波长增加,气溶胶标高有减小的趋势,这一特征与单日气溶胶变化特征相一致。表 10、11 分别给出了这两个月气溶胶标高的统计特征,从中可以清楚地获得气溶胶标高的均值、极值及标准差等信息。比如,2004 年 8 月气溶胶标高的均值普遍小于 2004 年 3 月的数值,其原因可能是冬季由海洋和陆地产生的气溶胶的数量要比夏季的大,并且根据当时的气象条件,通常情况下,当地冬季风速较夏季为大,

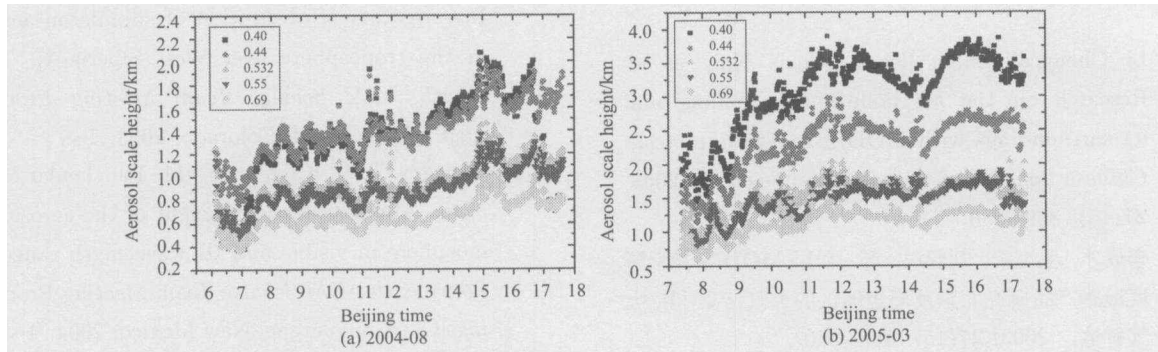


图 2 (a)、(b) 分别给出了波长为 0.40、0.44、0.532、0.55 和 0.69 μm 时 2004 年 8 月, 2005 年 3 月沿海某地大气气溶胶标高的日平均变化曲线

Fig.2 (a)、(b) is the change of atmospheric aerosol scale height in a day at wavelength 0.40、0.44、0.532、0.55、0.69 μm in Aug, 2004 and in Mar, 2005 in one zone of the edge ocean

表 10 2004 年 8 月气溶胶标高统计结果

Table 10 Statistics of aerosol scale height in Aug, 2004

Wavelength(μm)	Mean(km)	Standard deviation	Min(km)	Max(km)
0.40	1.303 96	0.386 97	0.368 16	2.080 42
0.44	1.405 94	0.246 5	0.764 6	2.004 7
0.532	0.957 44	0.181 59	0.503 05	1.465 03
0.55	0.893 6	0.169 47	0.470 63	1.374 25
0.69	0.667 1	0.126 72	0.368 16	1.055 54

表 11 2005 年 3 月气溶胶标高统计结果

Table 11 Statistics of aerosol scale height in Aug, 2004

Wavelength(μm)	Mean(km)	Standard deviation	Min(km)	Max(km)
0.40	3.074 92	0.575 32	1.448 77	3.898 99
0.44	2.301 99	0.406 74	1.134 41	2.988 72
0.532	1.564 56	0.252 38	0.879 44	2.046 31
0.55	1.469 02	0.238 3	0.811 79	1.907 32
0.69	1.133 91	0.184 31	0.600 27	1.544 23

这样冬季就有更适合气溶胶上升到高空的局地气象条件。

6 结 论

以沿海某地的两次实验为基础, 利用能见度仪、太阳辐射计、温湿传感器等探测结果, 给出了沿海某地可见光波段的气溶胶标高的变化趋势、时间特征和波长特征。一般随着波长的增加, 气溶胶

标高将减小; 实验当地, 冬季的气溶胶标高值大于夏季时的情况; 而它的日变化则与当地当时的气象条件有紧密的关系。目前, 由于探测手段匮乏, 因此还不能获得远红外和晚上的气溶胶标高, 在未来获得这两种探测设备的情况下, 有望得到更加精确的大气气溶胶标高变化特征。

参考文献:

- [1] Li Chengcai, Mao Jietai, Alexis Kai, et al. Research on the air pollution in Beijing and its surroundings with MODIS AOD products[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2003, **27**(15): 869~880.
李成才, 毛杰泰, 刘起汉, 等. 利用 MODIS 光学厚度遥感产品研究北京及周边地区的大气污染 [J]. *大气科学*, 2003, **27**(15): 869~880.
- [2] Han Yong, Rao Rui-zhong, Wang Ying-jian. Influence of aerosol concentration field fluctuation to light wave in limit Space[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, **33**(suppl): 268~271.
韩永, 饶瑞中, 王英俭. 有限空间气溶胶浓度场起伏对光波的影响 [J]. *中国激光*, 2006, **33**(增刊): 268~271.
- [3] Uzhegov V N, Pkhalagov Y A, et al. The height of homogenous aerosol atmosphere in visible and IR wavelength range[A]. *Proceedings of SPIE*[C], Bellingham, WA, 2004, **5743**: 288~292.
- [4] Pol'kin V V. Temporal variability of microstructural parameter of near-ground aerosol. Part 1. annual and seasonal variability[A]. *Proceedings of SPIE*[C], Bellingham, WA, 2004, **5743**: 358~363.
- [5] Pol'kin V V. Temporal variability of microstructural parameter of near-ground aerosol. Part 2. diurnal behavior in different seasons[A]. *Proceedings of SPIE*[C], Bellingham, WA, 2004, **5743**: 364~370.
- [6] Panchenko M V, Kozlov V S, Shmargunov V P. Investigation of absorption of submicron aerosol in the troposphere over West Siberia[A]. *Thirteenth ARM Science Team Meeting Proceedings*[C], Broomfield, Colorado, 2003: 1~7.
- [7] Uzhegov V N, Kabanov D M, Panchenko M V, et al. About "effective" height of the aerosol atmosphere in visible and IR wavelength range[A]. *Fourteenth ARM Science Team Meeting Proceedings*[C]. Albuguergue, New Mexico, 2004: 1~8.
- [8] Fan Wei. The wavelength band selection method for target detection based on atmospheric background radiance characteristics[D]. Hefei: Anhui Institute of Optics & Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences. 2005. 54~60.
范伟. 基于大气背景光学性质的目标探测波段选择方法研究 [D]. 合肥: 中国科学院安徽光机所. 2005. 54~60.
- [9] Hess M, Koepke P, Schult I. Optical properties of aerosols and clouds: the software package OPAC[A]. *Bulletin of the American Meteorological Society*[C]. 1998, **79**(5): 831~844.
- [10] Han Yong, Xie Chen-bo, Rao Rui-Zhong, et al. Comparison and analysis of two visibility detecting methods based on optical scatter technology[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, **35**(2): 173~176.
韩永, 谢晨波, 饶瑞中, 等. 基于光散射技术的两种能见度探测方法的比较分析 [J]. *红外与激光工程*, 2006, **35**(2): 173~176.

作者简介: 韩永 (1975-), 男, 中国科学院安徽光学精密机械研究所博士研究生, 主要从事大气光学、辐射传输、卫星遥感及气溶胶物理光学特性研究。