

宋嘉尧, 张文煜, 张宇, 等. 基于微脉冲激光雷达观测资料的半干旱区沙尘天气消光效应分析[J]. 干旱气象, 2013, 31(4): 672-676, doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2013)-04-0672

基于微脉冲激光雷达观测资料的半干旱区 沙尘天气消光效应分析

宋嘉尧^{1,2}, 张文煜², 张宇², 田梦²

(1. 陕西省人工影响天气办公室, 陕西 西安 710014;

2. 半干旱气候变化教育部重点实验室, 兰州大学大气科学学院, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 利用兰州大学半干旱区气候与环境观测站(SOCAL)的微脉冲激光雷达(MPL)2008年4月30日至5月2日观测资料, 对晴朗天气、浮沉天气及扬沙天气过程中气溶胶垂直分布的连续变化、物理机制进行了对比分析与探讨。结果表明 MPL 很好地反映出不同天气过程中大气气溶胶廓线的日变化特征: 受人类活动影响, 天气晴朗时, 早晨9时开始在0~2 km范围出现气溶胶聚集区, 持续至15时, 气溶胶平均消光系数 $<0.20 \text{ km}^{-1}$; 受沙尘输送影响, 浮尘天气时, 气溶胶聚集区高度范围为1~2 km, 高层气溶胶富集区高度范围为5~7 km, 气溶胶平均消光系数 0.38 km^{-1} ; 扬沙天气时, 气溶胶聚集区高度范围为0~1 km, 浓度远大于浮尘天气, 但高层气溶胶浓度较小且分布较均匀, 气溶胶平均消光系数 $>0.50 \text{ km}^{-1}$ 。

关键词: MPL; 气溶胶; 沙尘天气; 垂直分布

文章编号: 1006-7639(2013)-04-0672-05 doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2013)-04-0672

中图分类号: P412.25

文献标识码: A

引 言

浮尘、扬沙天气是近年来半干旱区春季常见的天气现象, 其带来的沙尘气溶胶有较强的直接辐射效应, 不仅会改变局地大气热力状况和稳定度^[1], 它的远距离输送也会对更多地区的大气光学特征、地—气辐射平衡、环境及气候产生影响^[2]。中亚半干旱区是地球上重要的沙尘源之一^[3-4], 分析半干旱区沙尘天气下气溶胶的垂直分布特征以及时间变化, 对局地气候变化、大气环流和长期气候预测都具有重要意义。兰州大学半干旱气候与环境观测站(SACOL)位于兰州大学榆中校区翠英山顶(35.946°N, 104.137°E), 海拔1960 m, 属温带半干旱气候, 年平均降雨量381.8 mm。有研究表明, 该站所处地区一直是沙尘天气的高发区, 沙尘日数峰值出现在4月, 春季(3~5月)沙尘日数最多, 占全年的46.8%。观测站内架设有MPL(微脉冲激光雷达), 可以接收大气气溶胶、云等对激光的后向散射, 是当前监测气溶胶光学特性、空间垂直分布及相

关信息的有效遥感探测手段^[5]。此前有文献^[6-9]利用激光雷达对中亚、大连及北京的沙尘粒子的垂直贡献、时间变化和光学特性进行了分析, 也有学者^[9-12]对塔克拉玛干沙漠、内蒙及甘肃的沙尘气溶胶的辐射效应作了相关讨论。但对于半干旱区不同沙尘天气下气溶胶垂直分布的连续变化、同晴朗日的区别及其物理机制研究甚少。本文利用SOCAL站内的MPL在2008年4月30日至5月2日的有效观测数据, 对晴朗、浮尘及扬沙天气过程中沙尘气溶胶垂直分布的连续变化、物理机制进行了分析与讨论。

1 仪器和研究方法

MPL由激光发射系统、探测器和数据采集系统3部分组成, 主要技术参数如表1所示。回波信号时间步长1 min。

激光雷达方程可以简单表示为:

$$P(r) = P_0 C \beta(r) r^{-2} \exp \left[-2 \int_0^r \sigma(r') dr' \right]$$

收稿日期: 2013-05-08; 改回日期: 2013-10-11

基金项目: 国家重大科学研究计划“973”项目(2012CB956200)资助

作者简介: 宋嘉尧(1984-), 女, 汉族, 硕士, 工程师, 主要从事气溶胶及人工影响天气研究。E-mail: song_song_1123@hotmail.com

表1 MPL 技术参数表

Tab. 1 Technical parameters of MPL

仪器单元	主要技术参数	
发生器	激光波长	527 nm Nd:YLF
	脉冲重复频率	2 500 Hz
	脉冲能量	~8 uJ
接收器	望远镜类型	马克苏托夫-卡塞格林
	焦距	2 400 mm
	直径	178 mm
	视野	100 mrad
数据系统	探测器	雪崩型 APD, 光子计数模式
	测距分辨率	15 m, 30 m, 75 m(可编程)
	最大距离	60 km
	多通道衡器	多通道光子计数

其中: $P(r)$ 为高度 r 处的大气后向散射回波功率(单位:W); P_0 为发射激光束的功率(单位:W); C 为与雷达系统有关的常数(单位: $W \cdot km^3 \cdot sr$); $\beta(r)$ 和 $\sigma(r)$ 分别为高度 r 处大气的后向散射系数和消光系数(单位: $km^{-1} \cdot sr^{-1}$ 和 km^{-1})。

通过对激光雷达回波信号进行距离校正, $S(r) = \ln[r^2 P(r)]$,并根据Klett假定的大气消光系数和后向散射系数之间存在的关系 $\beta(r) = B\sigma^k(r)$,得到一个反演消光系数的稳定解^[13-15]。

$$\sigma(r) = \frac{\exp[(S - S_c)/k]}{\left\{ \sigma_c^{-1} + \frac{2}{k} \int_r^{r_c} \exp[(S - S_c)/k] dr \right\}}$$

式中的 r_c 为参考高度, $\sigma(r_c)$ 可以通过对信号的距离校正曲线 $S = S(r)$ 进行拟合,由曲线的斜率算得, B 与后向消光对数比 k 为常数, k 与激光雷达波长和探测的气溶胶性质有关,范围为 $0.67 \leq k \leq 1.0$ 。本文采用张文煜等^[16]在半干旱区利用激光雷达反演大气气溶胶参数研究中的结论:令 $k = 0.78$ 。大气消光系数减去空气分子的消光系数即为气溶胶分子的消光系数。空气分子的消光系数可由美国1976年的标准大气模式中的大气密度廓线及瑞利散射得出。

2 结果分析

2.1 天气背景实况

常规观测资料显示:2008年4月30日是浮尘扬沙天气出现的前一日,天气状况为晴间多云;5月1日06:27~12:42为浮尘天气,12:42~19:36为扬沙天气;5月2日00:32~09:10为扬沙天气,9:10

~15:30为浮尘天气。

2.2 观测结果分析

在此次观测中,为了更为直观地展示出3d中MPL在观测点监测到的气溶胶垂直分布的变化过程,我们在大量的反演结果中,选取时间间隔为3h的气溶胶垂直分布数据进行分析 and 讨论,顺序分别为每日的03:00、06:00、09:00、12:00、15:00、18:00、21:00、24:00。此外,在整理分析资料时发现:晴朗天气下,MPL有效探测高度可达11 km;而在浮尘天气下,能量衰减较为迅速,MPL有效探测高度仅为7~8 km;扬沙天气下更低,只有6~7 km。为了分析方便,将晴朗日(4月30日)的廓线高度统一为12 km,沙尘天气(5月1~2日)的廓线高度统一为8 km。

从图1可看到:在4月30日06:00之前,整层大气均比较清洁,气溶胶含量较小,最大值仅为 $0.29 km^{-1}$,且气溶胶分布均匀,整层消光系数均值 $0.07 km^{-1}$;09:00开始,受人类活动影响,在近地层(2 km)出现相对较大的气溶胶高值区($0.67 km^{-1}$),平均消光系数 $0.42 km^{-1}$;该聚集区一直持续至下午15:00,整层消光系数平均值 $0.18 km^{-1}$,约为2~10 km内的均值($0.099 km^{-1}$)的4倍;在15:00的廓线中,图2中,5月1日凌晨03:00显示的是浮尘天气出现前的大气状况,整层消光系数平均值 $0.06 km^{-1}$,气溶胶分布规律同4月30日24:00较为相似,对流层内气溶胶垂直分布较为均匀,消光系数平均值为 $0.21 km^{-1}$;5月1日06:00、09:00及12:003幅图显示的是浮尘已经到来时的大气状况,整层消光系数平均值 $0.38 km^{-1}$ 。2 km范围处消光系数明显增大,最大值 $0.727 km^{-1}$,近地层(2 km)平均消光系数 $0.47 km^{-1}$ 。与此同时在高层(5~7 km),气溶胶消光系数明显增大,最大值 $1.758 km^{-1}$,高层(5~7 km)平均消光系数 $0.75 km^{-1}$,这可能同浮尘天气下的高空沙尘输送有关。15:00之后,沙尘天气进一步增强,升级为扬沙天气。整层消光系数平均值 $0.58 km^{-1}$,此时大气气溶胶的廓线特征同浮尘天气有很大不同:接近地面底层的气溶胶消光系数明显增大,随着时间的推移,地面沙尘聚集明显,最大值从15:00的 $0.86 km^{-1}$ 迅速增大至18:00的 $2.69 km^{-1}$,已远远超过浮沉天气下同等高度处的气溶胶消光系数。高层气溶胶聚集区消失。张强等^[11]认为:特强沙尘暴发生时,沙尘粒子基本分布在2 700 m以内,其中巨粒子主要分布在大气低层。可以看出,扬沙天气下的气溶胶的垂直分布特征同沙尘暴下沙尘分布特征相似。

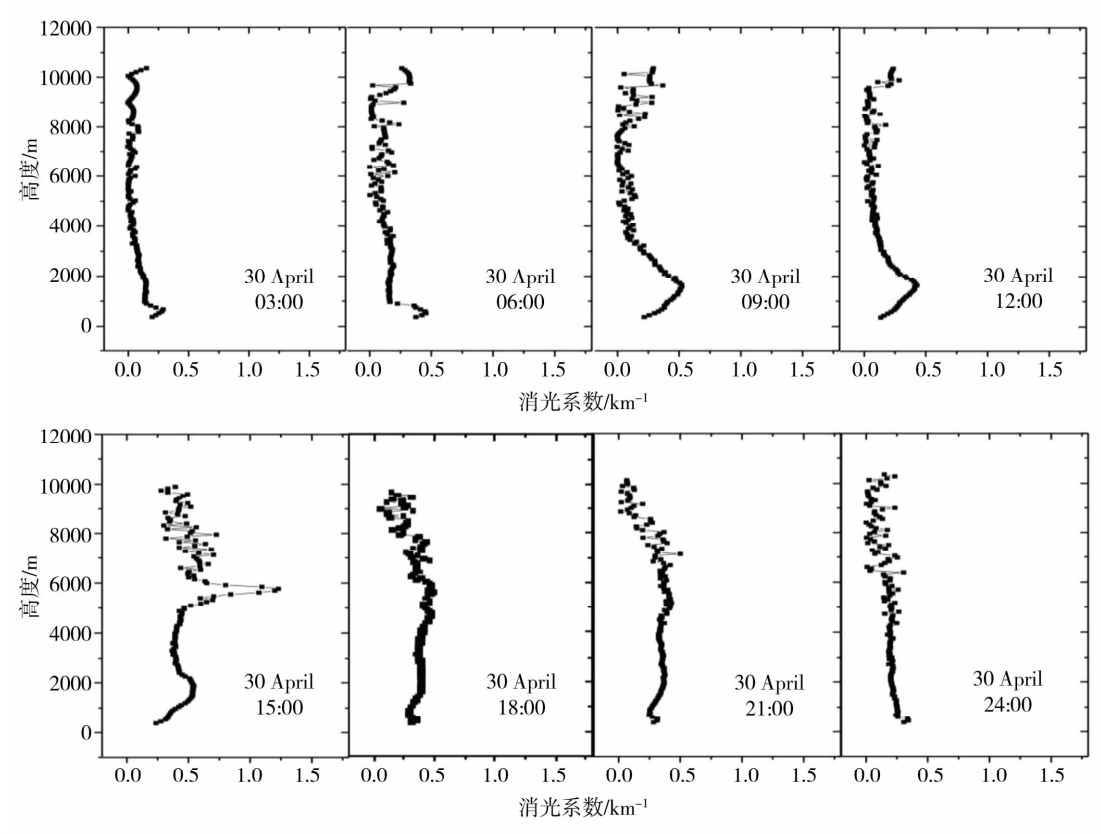


图 1 2008 年 4 月 30 日气溶胶消光系数垂直分布的时间变化
Fig. 1 Vertical distribution of the extinction coefficient of aerosol on April 30, 2008

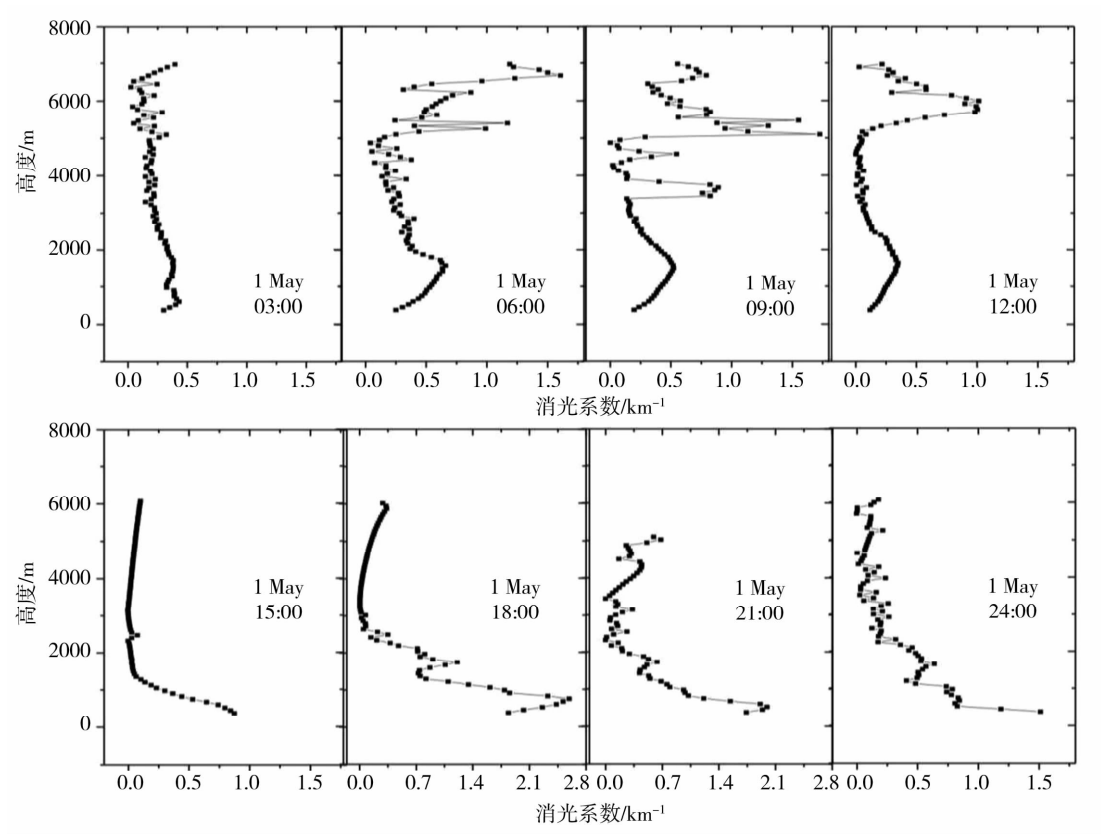


图 2 2008 年 5 月 1 日气溶胶消光系数垂直分布的时间变化
Fig. 2 Vertical distribution of the extinction coefficient of aerosol on May 1, 2008

图3反映的是5月2日气溶胶消光系数垂直分布的时间变化。其中03:00~09:00为扬沙天气下气溶胶垂直分布,同样在凌晨03:00,消光系数平均值 0.50 km^{-1} 。近地层气溶胶消光系数依旧较大,最大值达到 1.3 km^{-1} ,之后随时间推移,这一浓度逐步减轻,09:00开始,天气状况已由扬沙天气逐步转为浮尘天气,消光系数平均值 0.33 km^{-1} ,近地层气溶胶消光系数较前期已明显减小,最大值 0.92 km^{-1} ;12:00开始,垂直廓线再次较之前的趋势发生了变化:7 km范围处消光系数又再次出现大值区。此后一直到21:00,该气溶胶聚集区一直存在,近地层的气溶胶消光系数最大值逐步减小至 0.41

km^{-1} ,整层消光系数平均值也减小至 0.20 km^{-1} 。傍晚24时,大气逐步恢复清洁状态,气溶胶垂直分布较为均匀,整层消光系数平均值 0.15 km^{-1} ,沙尘天气也终于结束。同暖温带半湿润地区相比,半干旱地区的此次沙尘天气近地层气溶胶消光系数约大 $0.5\sim 1$ 个量级^[7]。

可以看出利用MPL作为监测大气气溶胶物理特性的遥感手段,可以很好地反映出春季半干旱区,晴朗、浮尘同扬沙天气背景下,气溶胶垂直分布特征的差异,并对晴朗日气溶胶日变化、沙尘过程的外源输送等特性做出宏观的展示。从表2中可以更为直观地了解上述特性的差异。

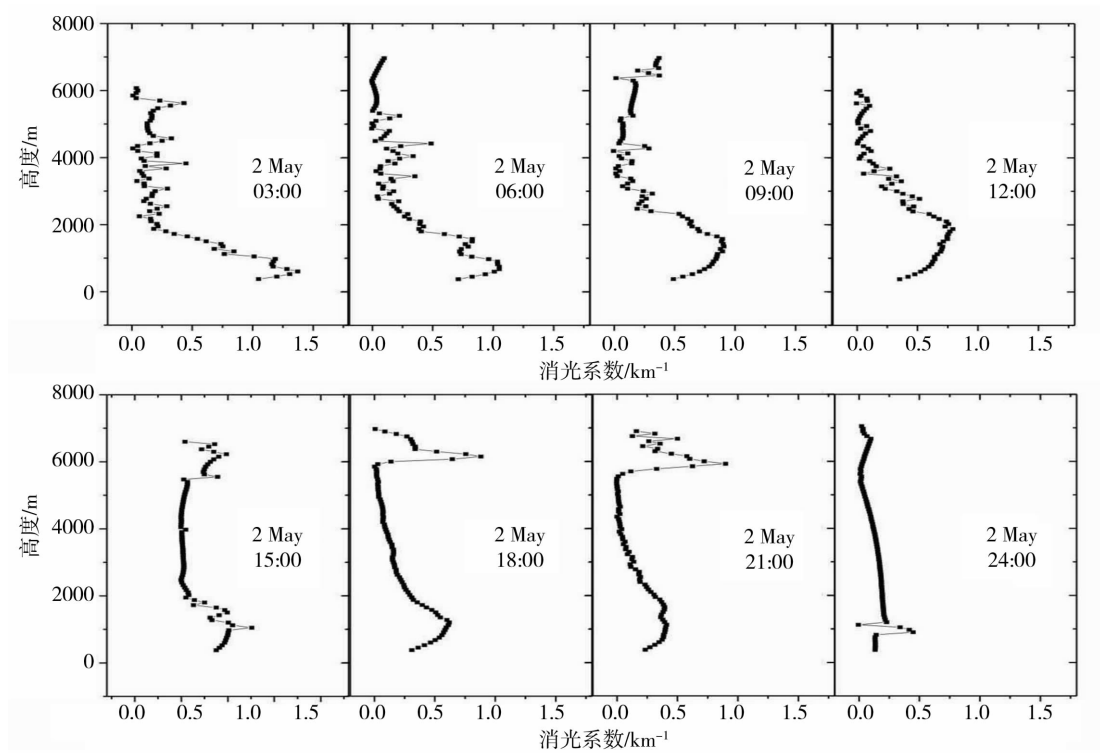


图3 2008年5月2日气溶胶消光系数垂直分布的时间变化

Fig. 3 Vertical distribution of the extinction coefficient of aerosol on May 2, 2008

表2 不同天气下气溶胶垂直分布特征的差异

Tab. 2 Vertical distribution of extinction coefficient of aerosol under different weather condition

	晴朗天气	浮尘天气	扬沙天气
探测高度	10~11 km	7~8 km	6~7 km
整层平均消光系数	$\leq 0.20\text{ km}^{-1}$	0.38 km^{-1}	$\geq 0.50\text{ km}^{-1}$
近地层(0~2 km)气溶胶聚集区	4月30日	5月1日 06:27~12:42	5月1日 12:42~19:36
出现时间	09:00~15:00	5月2日 9:10~15:30	5月2日 00:32~09:10
近地层气溶胶聚集区最大值	0.62 km^{-1}	0.73 km^{-1}	2.69 km^{-1}
近地层气溶胶聚集区平均消光系数	0.42 km^{-1}	0.47 km^{-1}	1.43 km^{-1}
高层(5~7 km)气溶胶富集区	很少存在	5月1日 06:27~12:42	很少存在
出现时间		5月2日 09:10~15:30	
高层气溶胶富集区最大值	/	1.76 km^{-1}	/
高层气溶胶富集区平均消光系数	/	0.75 km^{-1}	/

3 结 论

(1) MPL 作为当前监测大气气溶胶的光学特性、空间垂直分布及相关信息遥感探测手段,可以很好地反映出不同沙尘天气过程下大气气溶胶廓线的特征,为今后的研究提供依据。

(2) 受到能量衰减的影响,沙尘天气下 MPL 的有效探测高度较晴朗天气有所降低。即当对流层内气溶胶含量越多,平均消光系数值越大,有效探测高度越低。

(3) 在晴朗天气下,受人类活动影响,09:00 ~ 15:00,在边界层会出现相对较大的气溶胶高值区。

(4) 浮尘天气下,气溶胶聚集区高度范围为 1 ~ 2 km,高层气溶胶聚集区高度范围为 5 ~ 7 km;扬沙天气下,气溶胶聚集区高度范围为 0 ~ 1 km,平均浓度远大于浮尘天气,但高层气溶胶分布较均匀,即浮尘天气状况下,近地层气溶胶消光系数较扬沙天气的小,却在高层(5 ~ 7 km)存在一个气溶胶的聚集区。

(5) 此次沙尘过程输送特征明显,高层气溶胶富积现象出现在过程前期,此时近地层相对清洁;过程后期近地层气溶胶聚积,高层相对清洁。

致谢:兰州大学半干旱气候与环境观测站(Semi-Arid Climate and Environment Observatory of Lanzhou University, SACOL)提供数据支持。

参考文献:

- [1] 张存杰,宁惠芳. 甘肃省近 30 年沙尘暴、扬沙、浮尘天气空间分布特征[J]. 气象,2002,28(3):28-32.

- [2] Myhre G, and Stordal F. Global sensitivity experiments of the radiative forcing due to mineral aerosols[J]. J. Geophys. Res., 2001, 106(18):193-204.
- [3] 颜宏. 全国沙尘暴天气研讨会会议总结[J]. 甘肃气象,1993,11(3):6-11.
- [4] 康富贵,李耀辉. 近 10 a 西北地区沙尘气溶胶研究综述[J]. 干旱气象,2011,29(2):144-150.
- [5] 贺千山,毛节泰. 微脉冲激光雷达及其应用研究进展[J]. 气象科技,2004,32(4):219-224.
- [6] Ken J K. Lidar observation of the Asian dust (kosa) over the Gobi desert during the dust season of 1991[A]. International symposium on HEIFE 1993[C]. 1993. 634-641.
- [7] 郭本军,刘莉,黄丹萍,等. 激光雷达对一次沙尘天气探测与分析[J]. 气象,2008,34(5):52-57.
- [8] 董旭辉,杉本伸夫,白雪椿,等. 激光雷达在沙尘观测中的应用[J]. 中国沙漠,2009,45(6):942-947.
- [9] 孔丹,何清,张瑞军,等. 塔克拉玛干沙漠腹地春季一次沙尘暴沙尘气溶胶的辐射特征[J]. 干旱气象,2008,26(2):36-40.
- [10] 王玉洁,黄建平,王天河. 一次沙尘暴过程中沙尘气溶胶对云物理量和辐射强迫的影响[J]. 干旱气象,2006,24(3):14-18.
- [11] 张强,王胜. 论特强沙尘暴(黑风)的物理特征及其气候效应[J]. 中国沙漠,2005,25(5):675-681.
- [12] 沈建国,李嘉鹏,牛生杰. 沙尘天气中气溶胶光学特性的时空分布特征[J]. 中国沙漠,2007,27(3):465-501.
- [13] Klett J D. Stable analytical inversion solution for processing lidar returns[J]. Appl Opt, 1981, 20(2):211-220.
- [14] Klett J D. Lidar inversion with variable backscatter/extinction ratios[J]. Appl opt, 1985, 24(11):1638-1643.
- [15] 杨昭,孙东松,李强. 成像激光雷达大气消光系数的反演方法[J]. 红外与激光工程,2004, 33(3):239-242.
- [16] 张文煜,王音淇,宋嘉尧,等. 激光雷达反演参数 k 值的研究[J]. 高原气象,2008,27(5):1083-1087.

Analysis of Aerosol Extinction Coefficient Under Different Weather Condition Based on MPL Monitoring Data in the Semi-arid Region in Northwest China

SONG Jiayao^{1,2}, ZHANG Wenyu², ZHANG Yu², TIAN Meng²

(1. Weather Modification Office of Shaanxi Province, Xi'an 710014, China;
2. Key Laboratory for Semi-Arid Climate Change of the Ministry of Education,
College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Based on the daily observational data of the micro pulse laser radar (MPL) from April 30 to May 2 in the Semi-Arid Climate and Environment Observatory of Lanzhou University (SACOL), the returned signals were measured and the aerosol extinction coefficient was calculated to analyze the variation of vertical distribution of aerosol extinction coefficient under different weather conditions. The results show when sky was clear, the aerosol accumulation area appeared in the range of 0-2 km from 09:00 to 15:00 due to the influence of human activity, and the mean value of aerosol extinction coefficient was less than 0.20 km^{-1} . Under the floating dust weather condition, the aerosol concentrated in lower level ranged from 1 to 2 km and higher level ranged from 5 to 7 km, which influenced by sand transport, and the mean value of aerosol extinction coefficient was 0.38 km^{-1} . Under the blowing sand weather condition, the aerosol concentrated in the level of 0-1 km, and the aerosol concentration was so much higher than that under the floating dust weather condition, and in higher level, the aerosol distributed less and evenly, the mean value of aerosol extinction coefficient was more than 0.50 km^{-1} .

Key words: micro pulse laser radar (MPL); atmospheric aerosols; dust weather; vertical distribution