

利用偏振-米散射激光雷达研究广州一次浮尘天气过程

刘文彬*,刘 涛,黄祖照,刘叶新,邝俊侠 (广州市环境监测中心站,广东 广州 510030)

摘要: 利用偏振-米散射激光雷达、颗粒物监测仪数据,结合风廓线等气象资料分析讨论了 2012 年 3 月 25 日广州浮尘天气气溶胶污染事件,通过气团后向轨迹分析了沙尘气溶胶的来源及路径.结果表明本次污染过程与我国西北地区大部沙尘暴产生的浮尘远距离输送有关;浮尘期间相对湿度迅速下降,测点 PM_{10} 中 $PM_{2.5}$ 所占的比例在 28%~31% 之间,与广州地区以细粒子污染为特征不同,本次气溶胶污染事件主要是由粗粒子引起;影响近地面的沙尘层主要分布高度在 1000~2000m 区域;沙尘过境期间探测到气溶胶最大退偏比为 0.34.

关键词: 偏振-米散射激光雷达; 退偏比; 浮尘

中图分类号: X87 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2013)10-1751-07

Study of a dust case in Guangzhou using polarization mie-scattering lidar. LIU Wen-bin, LIU-tao, HUANG Zu-zhao, LIU Ye-xin, KUANG Jun-xia (Guangzhou Municipal Environmental Monitoring Center, Guangzhou 510030, China). *China Environmental Science*, 2013,33(10): 1751~1757

Abstract: The paper presents the systematic observational results of a dust case over Guangzhou at 25 Mar 12. The source and tracks of dust aerosol were analyzed by back-trajectory simulation. The results indicate that this pollution case has something to do with long distance transportation of sand dust storm burst out in the west of China. The relative humidity has a significant decrease during the dust case. The ratio of $PM_{2.5}$ in PM_{10} is about 28%~31% in monitoring station. This was very different from the typical air pollution characteristics in Guangzhou region where the ambient aerosols are generally dominated by fine particles. This aerosol pollution case was caused by coarse particles. The dust layer that has an influence on the ground was mainly distributed between 1000~2000m. The maximal depolarization ratio of sand dust aerosol is about 0.34 during the dust case.

Key words: polarization mie-scattering lidar; depolarization ratio; dust

气溶胶是指液态或固态微粒均匀散布在气体中形成的相对稳定的悬浮体系,其粒径区间为 0.001~100 μm ,气溶胶在诸多的大气过程中扮演着重要角色,是大气边界层的垂直结构和时空变化观测的天然载体^[1-2].按照形态来分,气溶胶总体上可以分为两类:球形和非球形.不同类型的气溶胶有不同的形状特征,一般气溶胶、大气污染生成的二次气溶胶、海盐微粒等均近似球形,沙尘气溶胶和生物碎片如花粉等粗粒子属于非球形^[3].

激光雷达是以激光为光源的主动探测雷达,相对于传统的微波、电磁波雷达来说,其发射波长较短,因而可以探测以大气气溶胶和大气分子为媒介的各种大气参量.激光雷达利用大气中存在的空气分子、少量悬浮微粒物质、气溶胶颗粒等对激光的散射来遥感大气.高分辨率、高精度

和适于实时观测的独特优点,使得激光雷达技术成为探测大气气溶胶的有效手段^[4-6].偏振-米散射雷达将偏振雷达和米散射雷达相结合,在探测大气气溶胶和卷云方面有独特的优势.它具有一般米散射雷达的功能,可以用来探测大气气溶胶消光系数的垂直廓线、气溶胶的光学厚度及云高.通过其偏振功能探测大气中沙尘气溶胶和卷云中非球形冰晶粒子后向散射光的退偏振比可以研究它们的形态^[7].

偏振-米散射激光雷达是一种研究沙尘气溶胶和卷云等大气非球形粒子形态的有效工具.在大气环境探测特别是气溶胶探测和卷云探测研究方面,偏振-米散射雷达发挥了重要的作用^[8].近年来,随着科技的进步偏振-米散射激光雷达

收稿日期: 2013-01-06

* 责任作者,工程师, gz_emc@163.com

得到了迅速的发展和应用.如 2001 年 2 月亚洲建立了 AD-NET(Asian Dust Network),主要用于监测亚洲沙尘暴的起源和沙尘粒子的输送.2004 年中国科学院安徽光机所研制了便携式偏振-米散射激光雷达,并作为科技部基础性工作专项重点项目“我国东部整层大气重要参数高分辨垂直分布探查”的探测仪器之一,承担了昼夜观测卷云退偏比的相关任务.欧洲的 EARLNET(European Aerosol Research Lidar Network)计划,到 2004 年共建成 24 个激光雷达站点,主要用于监测和研究欧洲范围内大气气溶胶的输送特征以及大气气溶胶对气候的影响.

本文对偏振-米散射激光雷达的原理进行了介绍,利用广州市环境监测中心站城市超级站配备的偏振-米散射激光雷达,对沙尘过境期间广州上空大气气溶胶进行探测,对 Mie 散射回波信号进行了反演,得到大气气溶胶消光系数.利用退偏比探测功能获得气溶胶退偏比垂直分布.结合风廓线雷达和颗粒物监测仪数据分析了沙尘过境过程,以为广州市气溶胶来源和污染分析提供经验,提高环境空气质量预测预报的精度.

1 偏振-米散射激光雷达测量原理

偏振-米散射雷达结构主要由激光发射单元、接收光学单元、信号采集与处理单位 3 个部分组成.激光发射器向大气中发射 532nm 波长的线偏振脉冲光,每一束激光脉冲会被传输路径上的空气分子、大气气溶胶粒子、云散射,大气的后向散射光被接收望远镜接收.激光雷达垂直发射的激光光束通过大气时,其接收到的高度 Z 处的大气后向散射回波信号的能量 $P(Z)$ 由激光雷达方程决定:

$$P(Z) = P_0 k Z^{-2} \beta(Z) \exp\{-2 \int_0^Z \alpha(Z') dZ'\} \quad (1)$$

式中: P_0 是激光的发射能量; k 为激光雷达系统常数; $\beta(Z) = \beta_p(Z) + \beta_s(Z)$, $\beta_m(Z)$ 和 $\beta_s(Z)$ 分别是高度 Z 处大气分子和气溶胶粒子的后向散射系数; $\alpha(Z) = \alpha_a(Z) + \alpha_m(Z)$, $\alpha_m(Z)$ 和 $\alpha_a(Z)$ 分别是高度 Z 处大气分子和气溶胶粒子的消光系数.用 Fernald 方法求解激光雷达方程,得到气溶胶消光

系数 $\alpha_a(Z)$.

在进行偏振探测时,激光雷达方程表示为:

$$P_p(Z) = P_0 k_p Z^{-2} \beta_p(Z) \exp\{-2 \int_0^Z \alpha_p(Z') dZ'\} \quad (2)$$

$$P_s(Z) = P_0 k_s Z^{-2} \beta_s(Z) \exp\{-\int_0^Z [\alpha_p(Z') + \alpha_s(Z')] dZ'\} \quad (3)$$

式中:下标 p 和 s 分别表示与发射激光偏振方向平行和垂直的两个方向; K_p 和 K_s 分别是接收平行分量通道和垂直分量通道的雷达系统常数; $\beta_p(Z)$ 和 $\beta_s(Z)$ 分别是高度 Z 处大气后向散射系数的平行分量和垂直分量; $\alpha_p(Z)$ 和 $\alpha_s(Z)$ 分别是高度 Z 处大气消光系数的平行分量和垂直分量.

一般情况下, $\alpha_p(Z) = \alpha_s(Z)$, 由公式(2)、(3)可得到气溶胶的退偏比 $\delta(Z)$ 为

$$\delta(Z) = \frac{\beta_s(Z)}{\beta_p(Z)} = k \frac{P_s(Z)}{P_p(Z)} \quad (4)$$

式中: $k = k_p/k_s$. 通过分析偏振-米散射雷达接收到的各个高度处大气后向散射回波功率的平行分量 $P_p(Z)$ 和垂直分量 $P_s(Z)$ 以及 2 个通道的增益常数比 k , 利用公式(4)可以获得大气退偏比的廓线 $\delta(Z)$.

2 结果与分析

2.1 北方沙尘过程

2012 年 3 月 19~23 日,我国西北、内蒙古华北至黄淮一带自西向东出现大风天气.同时,西北部分地区及内蒙古西部出现大范围沙尘天气,其中新疆若羌、民丰出现强沙尘暴(图 1).此次沙尘过程是今年以来我国出现的第一次沙尘天气过程^[9].

这次沙尘暴使得华北至华东多个城市均受到不同程度的浮尘或扬尘天气影响,沙尘源区到广州沿途城市 API 先后出现异常快速上升(图 2).从图 2 中可以看出距离沙尘暴地区最近的西宁、兰州在 19~22 日期间 API 均大于 100,最大达到 156,为轻度污染.23 日、24 日浮尘东移南下,24 日武汉、长沙空气质量转坏,出现轻微污染.随着浮尘的继续南下,广州自北向南的空气质量迅速转坏,24 日 8:00 开始广州北部花都师范站点 PM_{10} 浓度开始突然升高,此后从北往南所有空气

监测国控点 PM_{10} 浓度普遍开始升高,12:00 出现第 1 个峰值,21:00 出现第 2 个峰值.25 日(24 日 12:00~25 日 12:00)全市 API 达到 109,空气质量为 III 级,为轻微污染,首要污染物是 PM_{10} .25 日 4:00 之后 PM_{10} 浓度有所回落,但在 18:00 左右所有空气监测国控点 PM_{10} 浓度再次升高,晚上 20:00 左右出现第 3 个峰值(图 3).



图 1 2012 年 3 月 20~23 日全国沙尘天气实况
Fig.1 Sand and dust activity weather chart, 20~23 March, 2012

图 4 给出了市监测站测点的 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度和相对湿度之间的关系.由图 4 可见,24~26 日,受到沙尘过境影响的主要是 24 日 08:00 至 25 日 04:00(时段 I)和 25 日 15:00~23:00(时段 II)两个时段.24 日 08:00 PM_{10} 浓度开始急速升高,在

12:00 出现第 1 个峰值 $0.211\text{mg}/\text{m}^3$;21:00 出现第 2 个峰值 $0.244\text{mg}/\text{L}$;此后 PM_{10} 浓度逐渐降低至 $0.100\text{mg}/\text{m}^3$ 左右并持续了 10h.伴随着沙尘的沉降,25 日 15:00 PM_{10} 浓度又开始升高,在 20:00 出现第 3 个峰值 $0.227\text{mg}/\text{m}^3$.与 PM_{10} 浓度变化不同, $\text{PM}_{2.5}$ 在沙尘过境影响的 2 个时段内只出现 2 个峰值,浓度上升速度较为缓慢,并且出现时间较 PM_{10} 滞后 1h.第 1 个峰值是 24 日 22:00 的 $0.086\text{mg}/\text{m}^3$,第 2 个峰值是 25 日 21:00 的 $0.106\text{mg}/\text{m}^3$.沙尘过境期间相对湿度迅速下降,时段 I 期间相对湿度由 63%迅速下降到 32%,时段 II 期间最低相对湿度达到 25.5%.

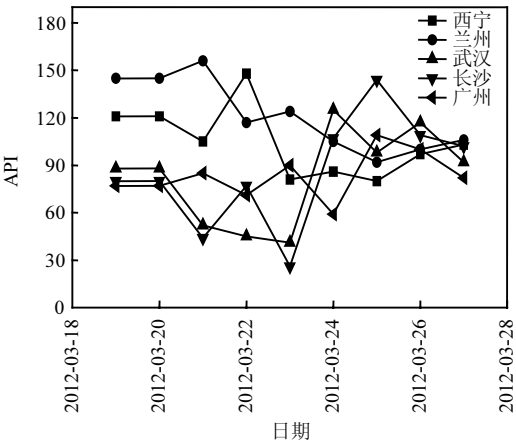


图 2 沙尘源区到广州沿途城市 API 变化
Fig.2 Changes of API from sand dust source area to cities over the pathway of Guangzhou

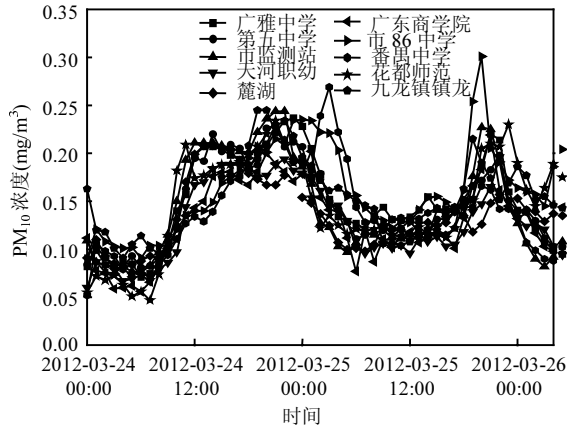


图 3 3 月 24~25 日广州市空气监测国控点 PM_{10} 浓度变化
Fig.3 PM_{10} concentration changes of 24~25 March 2012

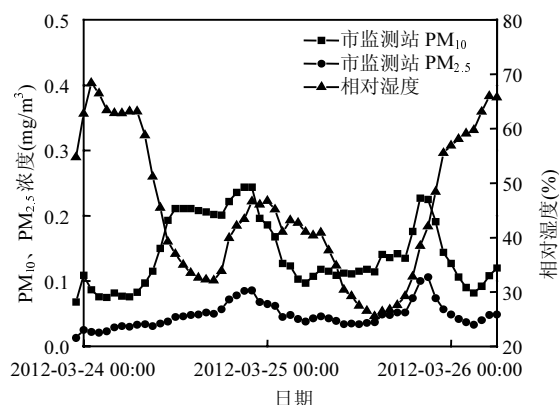


图4 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 小时均值浓度与相对湿度

Fig.4 The hour average concentration of PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ and RH%

2.2 近地面颗粒物浓度分析

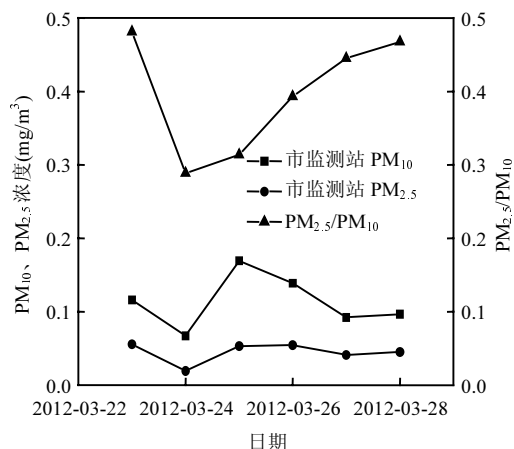


图5 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 日均值浓度

Fig.5 The daily average concentration of PM_{10} 、 $PM_{2.5}$

图5给出了市监测站测点的 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 日均值(12:00~12:00 的平均值)浓度时间序列,从图5中可见25日 PM_{10} 日均值浓度为 0.170mg/m^3 ,超出国家二级标准 0.150mg/m^3 浓度限值。 $PM_{2.5}$ 日均值浓度为 0.053mg/m^3 ,但未超出国家二级标准 0.075mg/m^3 浓度限值^[10]。与 PM_{10} 日均值浓度大幅增加不同, $PM_{2.5}$ 日均值浓度增幅并不明显,造成 PM_{10} 中 $PM_{2.5}$ 比例显著下降,从23日的48%下降到24日的28%,27日恢复到沙尘来临之前水平。25日 PM_{10} 中 $PM_{2.5}$ 比例仅为31%,粒径大于 $2.5\mu\text{m}$ 的颗粒物占69%。这与广州地区的气溶胶

污染以细粒子为主的特点不同,本次气溶胶污染主要是由粗粒子引起。

2.3 消光系数和退偏比垂直分布

观测地点位于广州市城市超级站,利用 Fernald 方法对24~26日3个晴天的探测 Mie 散射信号进行反演,对偏振通道数据进行处理和分析,得到气溶胶消光系数与退偏比的垂直分布。

图6和图7分别给出了3月23日~26日沙尘过境过程大气气溶胶消光系数和退偏比廓线。由图6可见,23~26日混合层高度均在2000m以下。23日测站上空被云层覆盖;24日08:00,2000~3500m区域探测到一个沙尘气溶胶聚集层。到12:00随着太阳辐射的增强,温度升高,大气湍流增强,沙尘层逐渐进入大气混合层内,近地面消光系数增大到 0.58km^{-1} 。22:00左右沙尘层的中心主要在1600m左右,1700~2300m高度内出现一层洁净层,层内消光系数先减小后增大。在2500~4000m区域高度有沙尘补充,并且浓度较高,沙尘层最大消光系数达到 0.50km^{-1} 。4000m以上有云层出现,消光系数较大(一般认为高空消光系数大于 0.8km^{-1} 的为云);25日全天在1800m左右一直存在厚度约为700m的沙尘层。08:00在重力作用下高空沙尘层的中心位置下降至3000m左右,15:00随着混合层的发展,1800m左右的沙尘层高度有所抬升,消光系数极大区在2000m以下。20:00左右2500~3500m区域内又有浓度较高的沙尘层补充,沙尘层内最大消光系数在 0.6km^{-1} 左右;26日8:00消光系数极大值位于800以下区域,最大消光系数在 0.55km^{-1} 左右。在1600~2100m和2500~3200m区域还存在少量沙尘气溶胶,消光系数极大值减小到 0.15km^{-1} 左右。14:00混合层高度达到1600m左右,整个混合层内都具有较大的消光系数,这是由于细粒子比例升高所致。22:00在3500m左右探测到一个厚度约为400m的云层。

偏振-米散射雷达具有偏振功能,可以有效识别球型和非球型粒子。球型气溶胶不改变后向散射光的偏振状态,而非球型颗粒物会使后向散射光产生退偏。由于大气中气体分子的退偏比较小,仅为 $0.0297^{[11]}$,因此,激光雷达探测大气中非

球形粒子获得的退偏比 $\alpha(Z)$ 主要来自卷云和沙尘气溶胶等非球形粒子的贡献.一般以 $\alpha(Z)$ 的阈值大小来判别本地气溶胶和沙尘气溶胶,当 $\alpha(Z)$ 大于0.10时为沙尘气溶胶; $\alpha(Z)$ 小于0.10时为人为气溶胶.由图7可见,24日12:00测站上空630m高度气溶胶粒子最大退偏比已达到0.17,2500m高度气溶胶粒子最大退偏比更是达到了0.34.

22:00退偏比的极大区下降至2000以下区域,测站上空非球形粒子比例增多,对应沙尘过境影响广州的第1个时段;25日20:00测站上空1200m高度气溶胶粒子最大退偏有所减小至0.10左右,26日22:00测站上空气溶胶粒子退偏比已经减小至0.07以下,此时沙尘气溶胶过境结束,对广州空气质量的影响也大幅减小.

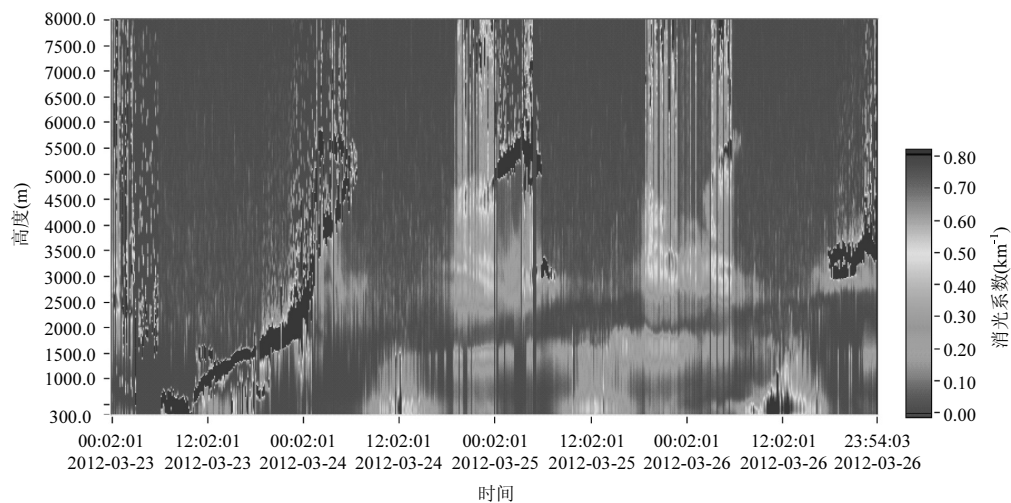


图6 2012年3月23~26日气溶胶消光系数
Fig.6 Extinction coefficients of 24~26 March 2012

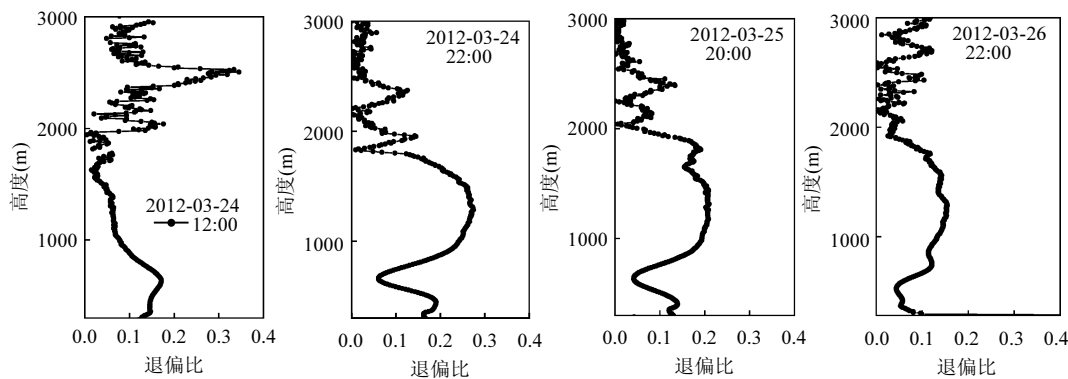


图7 2012年3月24~26日退偏比垂直分布
Fig.7 Depolarization ratio profile of 24~26 March 2012

2.4 气象条件与后向轨迹分析

选用距广州较近 PING YUAN 59280station (23.66,113.05)Vertical Soundings 探空数据,在大的天气系统下,广州和清远两地探空数据的具有一定的可比性.图8给出了24日、25日早上08:00

和晚上20:00温度和露点温度曲线,24~25日1500~2500m高度范围一直存在逆温层并且逆温强度较强,持续时间长,逆温层高度与激光雷达探测到的洁净层高度基本一致.在4300m高度以下气温均在0℃以上,可以判断24日、25日激光雷

达探测到大的退偏是由沙尘气溶胶等非球形粒子引起.

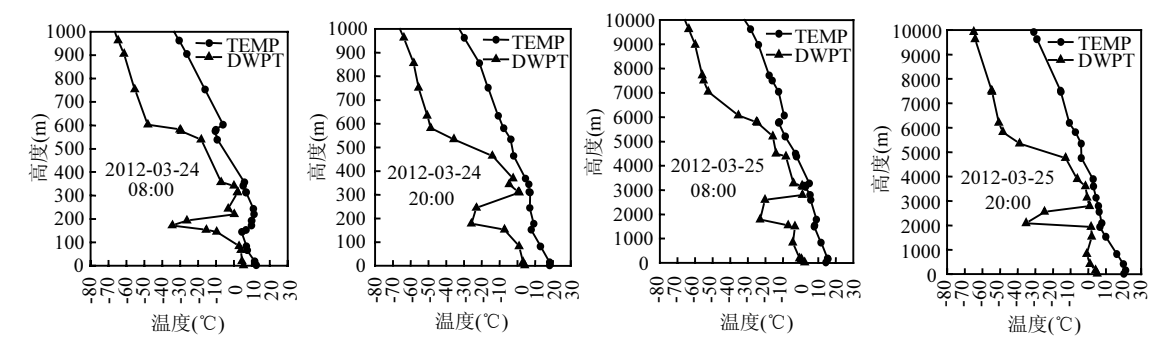


图 8 2012 年 3 月 24~25 日探空数据
Fig.8 Vertical Soundings of 24~25 Mar 12

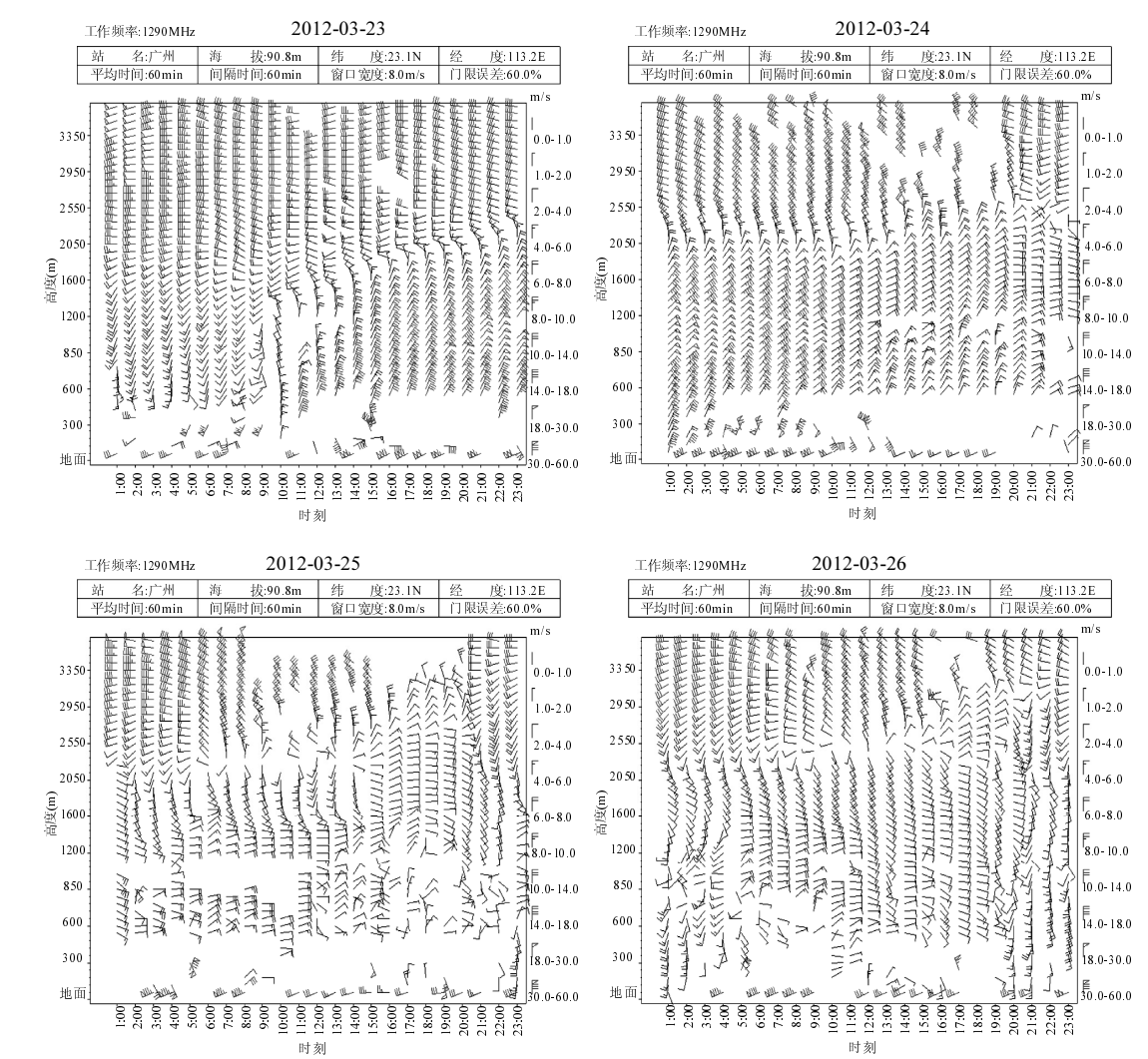


图 9 2012 年 3 月 23~26 日测站上空风廓线数据
Fig.9 The wind profile data of 23~26 March 2012

图9给出23~26日风廓线雷达数据,23日11:00至24日11:00测点出现大风天气,近地面至2500m高度风向以东北风为主,录得最大风力22m/s(9级);23日00:00至25日08:00测点上空2500m至3800m高空风向以西北风为主,录得最大风力19m/s(8级),24日11:00开始近地面至2500m高度风力逐渐减弱,25日和26日出现静风天气,风向偏东风为主;沙尘气溶胶伴随着23日11:00至24日11:00的大风降温天气远距离输送到广州上空,大风天气提供了动力条件,24日至26日出现的颗粒物污染是典型的高空沉降性沙尘天气引起。

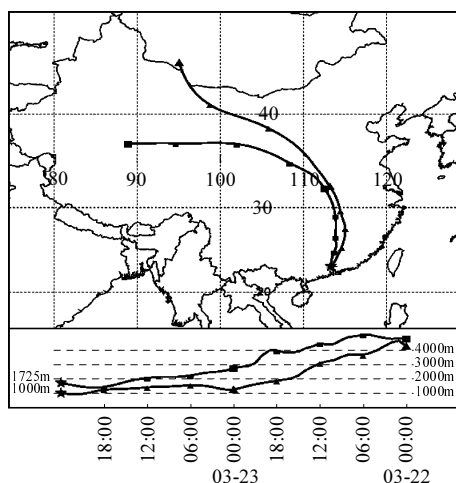


图10 NOAA HYSPLIT 模式气团后向轨迹

Fig.10 Air mass back-trajectory by HYSPLIT model

为了研究沙尘气溶胶的来源,选取气溶胶消光廓线一直出现峰值的高度,利用 NOAA 的 HYSPLIT 模式来进行气溶胶的轨迹倒推,计算点选择广州(23.12°N,113.27°E),回算时间选择3月24日00:00(UCT),对应地面监测站点 PM_{10} 浓度开始升高的时刻。从图10中48h气团后向轨迹可见,离地高度1000和1725m的气溶胶主要来自我国西北地区大部(包括新疆南部、青海中北部、甘肃东部、内蒙古中西部),3月22日08:00位于蒙古国西部和新疆若羌县境内,此时离地高度4500左右。3月23日08:00已经到湖北省境内,而垂直剖面由4500m下降到1000~3000m,3月24日08:00沙尘到达广州地区,垂直剖面下降到1000~2000m。这与激光雷达探测到的沙尘层高

度一致。表明造成广州地区24~25日颗粒物污染事件源地确实来自我国西北地区大部。

3 结论

3.1 沙尘过境期间相对湿度迅速下降,测点 PM_{10} 中 $PM_{2.5}$ 比例在28%~31%之间,与广州以细粒子污染为特征不同,本次颗粒物污染事件主要是由粗粒子引起。

3.2 从激光雷达探测的气溶胶消光廓线看出,沙尘层主要分布高度在1000~2000m。

3.3 沙尘过境期间,沙尘气溶胶粒子退偏比的极大值均分布在2500m以下区域,最大退偏比达到0.34。

3.4 利用NOAA的HYSPLIT模式48h后向轨迹证明24~25日影响广州的沙尘气溶胶来自我国西北地区大部(包括新疆南部、青海中北部、甘肃东部、内蒙古中西部)。

参考文献:

- [1] 韩道文,刘文清,张玉钧,等.激光雷达监测北京城区冬季边界层气溶胶[J]. 大气与环境光学学报, 2007,2(2):104-109.
- [2] 刘 强,王明星,李 晶,等.大气气溶胶研究现状和发展趋势[J]. 中国粉体技术, 1999,5(3):17-23.
- [3] Young J Kim, Ulrich Platt. Advanced environmental monitoring [M]. Springer, 2008:136.
- [4] 白宇波,石广玉,田村耕一,等.拉萨上空大气气溶胶光学特性的激光雷达探测[J]. 大气科学, 2000,24(4):559-567.
- [5] 邱金桓,郑斯平,黄其荣,等.北京地区对流层中上部云和气溶胶的激光雷达探测[J]. 大气科学, 2003,27(1):1-7.
- [6] Spinhirne J D. Micro pulse lidar. IEEE transaction on geoscience and remote sensing [J]. 1993,31(1):48-54.
- [7] Cairof, Don Francescogd, anriana, et al. Comparison of various linear depolarization parameters measured by lidar [J]. Applied Optics, 1999,38(21):4425-4432.
- [8] 迟如利,刘 东,范爱媛,等.偏振-米散射激光雷达的研制[J]. 应用光学, 2008,29(5):777-784.
- [9] http://www.china.com.cn/zhibo/2012-03/31/content_25018758.htm [EB/OL].
- [10] GB3095-2012 环境空气质量标准 [S].
- [11] UCHINOO, TABATA I, KAI K, et al. Polarization properties of middle and high lever clouds observed by lidar [J]. J. Meteor. Soc., 1988,66(4):6072616.

作者简介: 刘文彬(1982-),男,安徽萧县人,工程师,硕士,主要从事环境空气监测工作。