

珠三角 2009 年 11 月严重灰霾天气过程分析*

吴 兑^{1,2}, 吴 晟³, 陈欢欢¹, 廖碧婷², 邓 涛²,
谭浩波², 李海燕², 陈慧忠², 范绍佳¹

(1. 中山大学环境科学与工程学院大气科学系, 广东 广州 510275;

2. 中国气象局广州热带海洋气象研究所, 广东 广州 510080;

3. 香港科技大学环境学部, 香港 九龙清水湾)

摘 要: 由于经济规模迅速扩大和城市化进程加快, 大气气溶胶污染日趋严重, 由细粒子气溶胶造成的能见度恶化事件越来越多, 这些人类活动排放的污染物, 可形成灰霾天气致使能见度下降。2009 年 11 月 23 - 29 日, 在珠三角地区发生了一次典型的严重灰霾天气过程, 是近 10 年来最严重的灰霾天气过程之一。从天气分析、流场分析、遥感分析和气溶胶物理化学特征分析, 探讨了这次过程的成因, 结论是这次灰霾过程具有持续时间长、范围广、强度大的特点。这次严重灰霾过程持续 7 d, 仅次于 2004 年 1 月 3 - 10 日持续 8 d 的过程; 范围广, 笼罩整个珠三角, 多个台站出现小于 1 km 的低能见度事件; 强度大, 珠三角大气成分监测网数据, 都出现多项建站以来最强值, 许多指标都超过缺省预设的坐标上限, 超标均以倍数计。

关键词: 珠三角; 严重灰霾; 低能见度; 空气质量

中图分类号: X513 文献标志码: A 文章编号: 0529 - 6579 (2011) 05 - 0120 - 08

An Analysis of Severe Haze Process in November 2009 over the Pearl River Delta

WU Dui^{1,2}, WU Cheng³, CHEN Huanhuan¹, LIAO Biting², DENG Tao²,
TAN Haobo², LI Haiyan², CHEN Huizhong², FAN Shaojia¹

(1. Department of Atmospheric Science, School of Environmental Science and Engineer,

Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;

2. Institute of Tropical and Marine Meteorology, CMA, Guangzhou 510080, China;

3. Institute for the Environment, The Hong Kong University of Science and Technology,
Clear Water Bay, Kowloon, Hong Kong, China)

Abstract: With the rapid economy expansion and urbanization, atmospheric aerosol pollution is getting serious, which leads to a number of visibility degradation events caused by increasing fine particle aerosol. These pollutant emissions from human activities produce haze and cause low visibility. During 23 - 29 November 2009, an extremely severe haze process over the Pearl River Delta region was observed, which is one of the worst climate events in the past decade. In this paper, the causes of this particular event were discussed based on weather analysis, flow field analysis, remote sensing analysis, and physical and chemical characteristics of aerosols. This event was characterized by a long duration, a wide range influence and strong strength. Firstly, the event lasted for 7 days, just shorter than that one lasting for 8 days occurred during 3 - 10 January 2004. Secondly, it enveloped the entire Pearl River Delta,

* 收稿日期: 2010 - 12 - 12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40775011, U0733004); 国家“973”计划资助项目 (2011CB403403); 国家“863”计划资助项目 (2006AA06A306, 2006AA06A308)

作者简介: 吴兑 (1951 年), 男, 二级研究员, 博士生导师; E-mail: wudui@gmrc.gov.cn

making the visibility of a number of stations less than 1km. Thirdly, the aerosol concentrations based on atmospheric composition monitoring network data showed the largest values since the establishment of the stations, greatly exceeding the coordinate default preset limit.

Key words: the Pearl River Delta; severe haze; low visibility; air quality

由于经济规模迅速扩大和城市化进程加快, 大气气溶胶污染日趋严重, 由气溶胶造成的能见度恶化事件越来越多, 这些人类活动排放的污染物, 包括直接排放的气溶胶和气态污染物通过化学转化与光化学转化形成的细粒子二次气溶胶, 可形成灰霾天气致使能见度下降。也有人将其称为烟尘雾、烟雾、干雾、烟霞、气溶胶云、大气棕色云^[1-12]。

形成灰霾天气的气溶胶组成非常复杂。近年来由于灰霾天气日趋严重引发的环境效应问题, 和气溶胶辐射强迫引发的气候效应问题, 广泛地引起科学界、政府部门和社会公众的关注, 而成为热门话题^[13-16]。1999年 Ramanathan 等^[19]发现, 在亚洲南部上空经常笼罩着一层3 km厚的棕色气溶胶云, 并称其为亚洲棕色云, 我国有人将其称为灰霾天气, 后来发现各大洲都存在类似现象, 又将其称为大气棕色云。并进而提出, 原来假定的气溶胶辐射强迫的冷却效应要作一定的修正, 尤其认为大气灰霾中的黑碳气溶胶是气候变暖的重要角色, 这就使得气溶胶辐射强迫对气候变化影响的不确定性增加, 而且也存在国际上发达国家, 主要是美国利用减排黑碳气溶胶对我国进行经济遏制, 对我国进行打压的外交压力^[8]。

2009年11月23-29日, 在珠三角地区发生了一次典型的严重灰霾天气过程, 是近10年来最严重的灰霾天气过程之一。本文从天气分析、流场分析、遥感分析和气溶胶物理化学特征分析, 探讨了这次过程的成因, 结论是这次严重灰霾过程具有持续时间长、范围广、强度大的特点。这次严重灰霾过程持续7天仅次于2004年1月3-10日持续8天的过程; 范围广, 笼罩整个珠三角, 多个台站出现小于1 km的低能见度事件; 强度大, 珠三角大气成分监测网与珠三角粤港空气质量监测网数据, 都出现多项建站以来最强值, 许多指标都超过缺省预设的坐标上限, 超标均以倍数计。

1 资料来源与处理说明

珠江三角洲是中国大陆第2大的三角洲, 位于大陆海岸线南端, 河网纵横, 孤丘散布, 平均海拔1~20 m。本文主要使用了广州观象台和珠三角大气成分站网的能见度、湿度、天气现象资料, 气溶

胶粒子谱和质量谱资料。EOS/MODIS 卫星反演的气溶胶光学厚度资料等。

珠江三角洲大气成分站网始建于2003年, 先后建设了中国气象局广州番禺大气成分站等9个大气成分观测站点, 其中本文使用的资料主要涉及2个站, 中国气象局广州番禺大气成分站位于广州市番禺区南村镇大镇岗山山顶, 是番禺第一高峰, 海拔141 m, 23°00.236'N, 113°21.292'E, 地处珠江三角洲腹地, 本站代表珠江三角洲经济圈大气成分均匀混合的平均特征。番禺气象局位于番禺区西部, 海拔13 m, 22°56.265'N, 113°19.143'E, 代表珠江三角洲典型地形。两站直线距离8 km。

本文使用的高时间分辨率的气溶胶仪器包括: 德国气溶胶粒子谱仪 (Model 1.180, Grimm Technologies, Inc. Germany) 观测连续的气溶胶粒子谱, 黑碳仪 (欧洲 Magee Scientific Aethalometer AE-31-HS, AE-31-ER, AE-16-ER)、积分式浊度仪 (澳大利亚 Nephelometer M9003), 得到连续的黑碳气溶胶浓度与大气气溶胶散射系数、吸收系数、消光系数、单次散射反照率等重要的气溶胶辐射强迫参数资料。使用瑞士 MARGA 气溶胶和气体在线观测系统观测连续的气溶胶可溶性离子成分 (NH_4^+ , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-}) 和气体 (NH_3 , HNO_2 , HNO_3 , HCl , SO_2) 浓度。资料均经过质量控制、野点剔除等处理。

另外, 使用了由美国 Radiometrics 公司生产的地基35通道微波辐射计 MP3000。通道包括K波段22GHz-30GHz 21个, V波段51GHz-59GHz。该仪器除了35通道的微波辐射计仪器以外, 还包含有温、湿、压探头; 测量云底高度和云底温度的红外仪; 检测降水是否发生的仪器, 以及用于吹去微波辐射计天线罩上尘土、雨水等的鼓风机。该仪器共生成3级数据, LV0数据为电压值, LV1数据为各个通道的亮温值, LV2数据为由斯图加特神经网络 (记为RNN) 反演得到的地面到10 km的温度、湿度、水汽和液态水廓线。

使用的偏振微脉冲激光雷达系统是由美国 Sigma Space 公司生产出品。激光器发出的波长527 nm的绿色激光束, 最小垂直分辨率为15 m, 最大探测高度为60 km。激光雷达系统由三部分组成:

发射系统 (包括激光与发射器)、接收器和探测器与数据采集系统。该激光雷达垂直探测分辨率高,体积小,质量小,便于运输,可连续观测。

使用美国国家宇航局 (NASA) 利用地球观测系统计划 (EOS) 的卫星 Terra 和 Aqua 所搭载的 MODIS 仪器对地球的多光谱高分辨率观测,得到的 NASA 建立的 MODIS 资料业务处理系统中提供的分辨率为 $10\text{ km} \times 10\text{ km}$ 的气溶胶光学厚度 (AOD) Level2 产品。作者^[20]曾利用在华南地区长期的太阳光度计观测得到气溶胶光学厚度并与 NASA 的气溶胶产品进行详细对比,认为这一产品具有较高的精度描述我国华南这样常年植被密集、地表可见光反射率比较低的地区的气溶胶特征。

使用美国国家海洋和大气局 (NOAA) 等开发的 HYSPLIT-4 模式分析了其气流的后向轨迹,以位于珠江三角洲腹地的广州番禺 ($23^{\circ}00.236'N$, $113^{\circ}21.292'E$) 为参考点,选取 150 m 高度层 (测站传感器高度),分别计算了后向轨迹,以追踪抵达珠三角的气团过去 24 ~ 72 h 所经过的路径。

2 天气背景情况

当气溶胶的自然排放和人类活动排放在一时期内相对稳定时,区域内能见度和空气质量变化的控制因素是气象条件,或者说是边界层对气溶胶等污染物质的稀释扩散能力^[5]。从 2009 年 11 月 23 - 29 日的天气图的变化可看出,这个过程连续有三个变性高压脊出海 (图 1),地面常有静小风出现,珠三角地区交替出现气流停滞区,不利于污染物扩散,导致出现严重灰霾天气,29 日开始有较强冷空气南下,强劲的偏北风将气溶胶粒子输送至南海,污染物浓度降低,空气质量好转。

灰霾天气是细粒子气溶胶在一段时间内在近地层堆积的结果,对近地层风求一定范围一段时间内的时间空间矢量和,可以更清晰地了解一段时间内珠江三角洲近地层空气流动的总效果,从而更直观的判断近地层风对灰霾天气的影响^[5]。

从矢量和来看 (图 2a), 23 - 29 日珠三角地区近地层风的 168 小时矢量和很小,输送能力很差,造成了持续 7 天的严重灰霾天气。当时珠三角处于变性高压脊控制,近地层风持续偏小,出现气流停滞区,使得污染物扩散不出去,致使该时间段灰霾天气非常严重。而 29 日矢量和表明珠三角腹地形成一致的较强的持续性偏北气流 (图 2b), 扩散条件好转,清除了持续 7 天的灰霾天气。

后向轨迹分析表明,珠江口低空流场比较复杂 (图 3), 100、500、1 000 m 高度气流分别来自不同方向,在珠三角地区形成了辐合,再加上珠三角近地层流场表现为气流停滞区 (图 2), 水平方向扩散能力也比较差,因而造成污染物堆积,形成了这次严重灰霾天气过程。

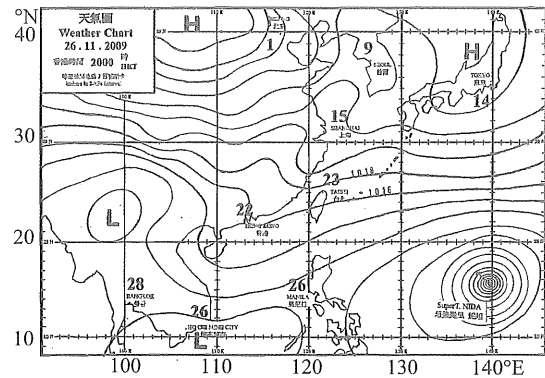


图 1 2009 年 11 月 26 日 20 时地面天气图

Fig. 1 The ground weather chart of 20:00 Nov 26, 2009

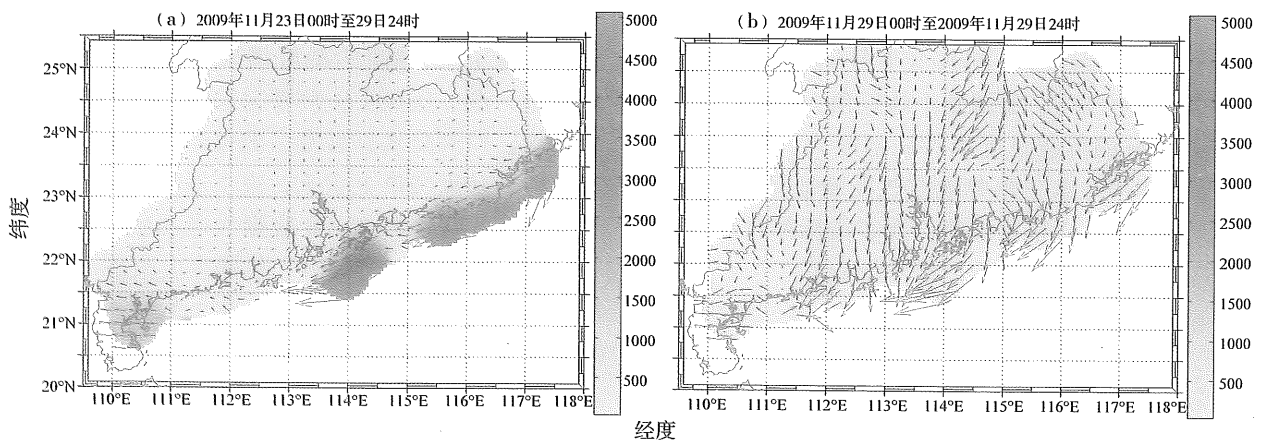


图 2 珠三角风矢量和 (单位: m/s)

Fig. 2 Wind vector sum in the Pearl River Delta (unit: m/s)

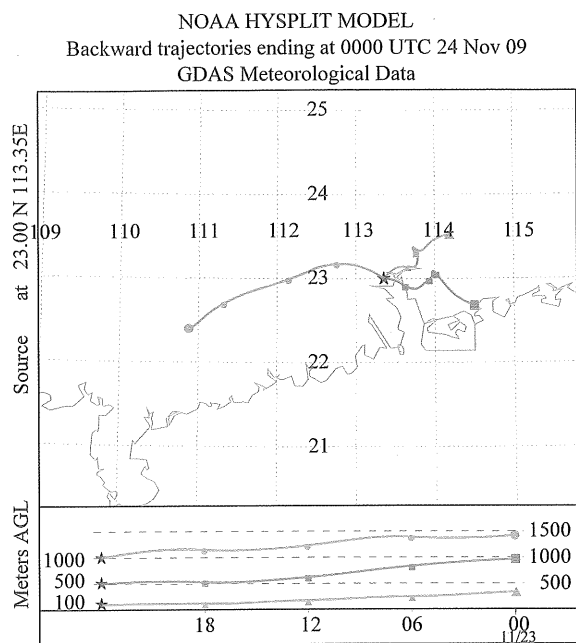


图 3 珠江三角洲 24 h 后向轨迹图

Fig. 3 24 hours backward trajectory in the Pearl River Delta

3 主要结果

2009 年 11 月 23 - 29 日，在珠三角地区发生了一次典型的严重灰霾天气过程，是近 10 年来最严重的灰霾天气过程之一。本文从天气分析、流场分析、遥感分析和气溶胶物理化学特征分析，探讨了这次过程的成因，结论是这次严重灰霾过程具有持续时间长、范围广、强度大的特点。这次严重灰霾过程持续 7 d，仅次于 2004 年 1 月 3 - 10 日持续 8 d 的过程，在 10 年中排第二位；这次灰霾的范围广，笼罩整个珠三角，多个台站出现小于 1 km 的低能见度事件；这次灰霾的强度大，珠三角大气成分监测网与珠三角粤港空气质量监测网数据，都出现多项建站以来最强值，许多指标都超过缺省预设的坐标上限，超标均以倍数计。

这次过程的特点是能见度极低，污染物浓度非常高。如广州五山站能见度仪测量到最低能见度只有 0.8 km，出现在 27 日 01 时。番禺大气成分站能见度仪最低记录到 0.8 km，出现在 28 日 02 时。黑碳浓度最高达 49.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，超标 6.21 倍，出现在 27 日 19 时。PM₁₀ 浓度最高 379.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，超标 2.53 倍，出现在 27 日 19 时。PM_{2.5} 浓度最高 291.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，超标 3.89 倍，出现在 27 日 19 时。PM₁ 浓度最高 253.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，超标 3.90 倍，也出现在 27 日 19 时。

从图 4 相对湿度的变化来看，虽然其有明显的

日变化特征，但过程相对湿度均未超过 85%，远未达到能形成雾与轻雾的饱和状态，因而是典型的灰霾过程。图 5a 表明过程中广州市全市都在灰霾笼罩之中，图 5b 珠三角地区的粤港空气污染形势图^[21]也证实，珠三角中西部地区空气污染相当严重。

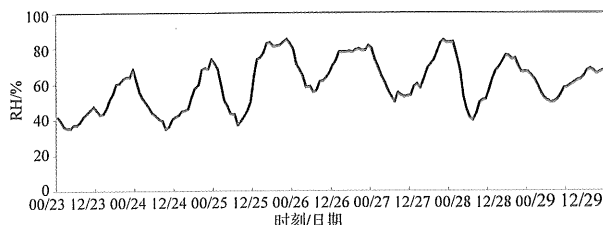


图 4 2009 年 11 月 23 - 29 日相对湿度变化过程

Fig. 4 Relative humidity variation during 23 - 29 November 2009

下面进一步分析这次过程各要素的详细变化，从图 6a 可看出，23 日能见度较好，日均能见度高于 15 km，24 - 26 日能见度逐日恶化，其中 25、26 日日均能见度甚至低于 5 km，之后略有上升，但日均能见度均低于 10 km。广州五山站能见度仪最低记录到 0.8 km，出现在 27 日 01 时。能见度与颗粒物之间的关系非常密切，从图 6b 可见，该过程中颗粒物质量浓度非常高，且变化趋势很一致，PM_{2.5}、PM₁ 浓度基本都超过国家气象行业标准《霾的观测和预报等级》中关于灰霾的大气成分指标的规定（PM_{2.5}、PM₁ 浓度的限值为 75、65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ）^[22]。颗粒物质量浓度在 24 - 26 日浓度较高，出现了持续 3 天的第一个高值时段，在 27 日夜间浓度进一步上升，28 日出现了这次过程的最高值。其中 PM₁₀ 浓度最高 379.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，超标 2.53 倍；PM_{2.5} 浓度最高 291.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，超标 3.89 倍；PM₁ 浓度最高 253.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，超标 3.90 倍，都出现在 28 日 03 时。

在影响能见度的诸多因素中，气溶胶粒子对可见光的消光是限制对流层能见度的主要因素^[8, 23 - 24]。消光作用包括气溶胶的吸收作用与散射作用。在珠三角可认为大气气溶胶的吸收主要是由于黑碳气溶胶引起，因此可以从黑碳仪监测得到的质量浓度计算得到吸收系数。我们在 2004 年的 PRIDE - PRD2004 实验中番禺大气成分站的 Aethalometer 与德国 Max Planck 研究所的 Photoacoustic Spectrometer (PAS, 532nm) 进行了平行对比观测，拟合得到公式 (1)^[8]。根据公式 (1) 计算可得到吸收系数。

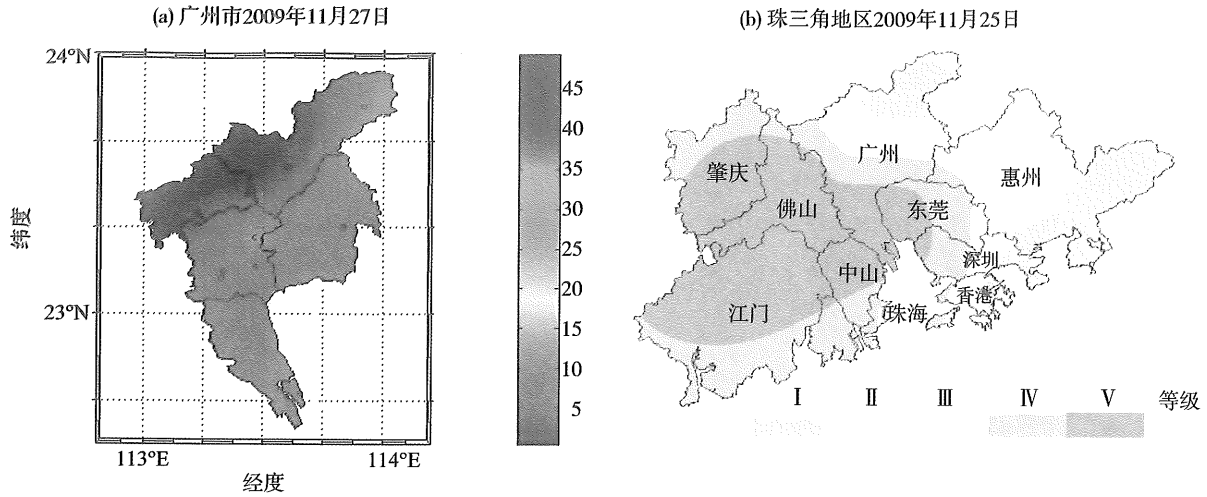


图 5 广州市与珠三角灰霾天气与空气质量形势图

Fig. 5 The Situation figure of haze and air quality in Guangzhou and the Pearl River Delta

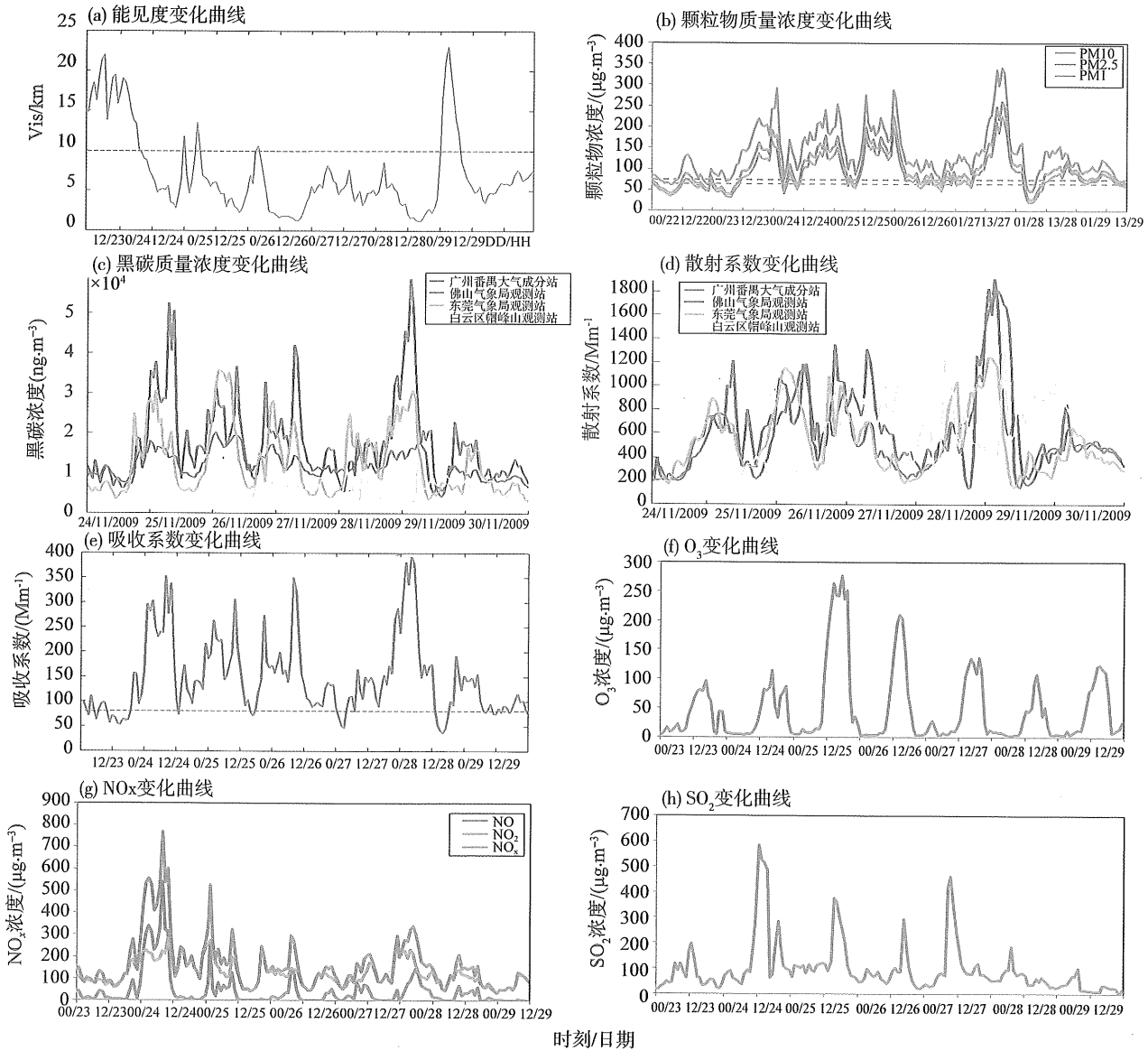


图 6 2009 年 11 月 23 - 29 日气溶胶与气态污染物变化特征

Fig. 6 Aerosol and gaseous pollutants variation during 23 - 29 November 2009

$$\text{Abs}_{532} = 8.28 \times M_{BC} + 2.23, \quad R^2 = 0.92 \quad (1)$$

由图 6c 可见黑碳浓度变化与颗粒物质量浓度的变化非常一致，在午后浓度较低，是由于混合层高度升高，有利于污染物的扩散，而峰值与上下班高峰时间吻合较好，说明 BC 主要的来源可能来自于机动车的排放。BC/PM₁₀ 平均为 0.116，随时间变化不大。

大气气溶胶成分中的硫酸盐、硝酸盐、铵盐等对可见光具有很强的散射作用而吸收作用较弱。由图 6c、d 可见，散射系数加吸收系数基本都超过国家气象行业标准《霾的观测和预报等级》中关于霾的大气成分指标的限值 480 Mm⁻¹。

硫酸盐、硝酸盐和铵盐的形成与光化学过程有密切关系。从图 6f 可见，光化学烟雾的标识物 O₃ 有明显的日变化，可以看到 25、26 日 O₃ 浓度较高，光化学烟雾污染比较严重，日最大值分别达到 264, 210 μg/m³。光化学过程与前体物、气溶胶浓度和光辐射通量都有密切的关系。从图 6g 中可见，23 日 NO_x 和 NO 的浓度都较低，而且云量较多，所以抑制了光化学烟雾的发生，O₃ 浓度较低。24-25 日云量较少，NO_x 和 NO 的浓度都较高，而且在 24 日浓度高于 25 日的浓度，但是 O₃ 却在 25 日达到最高值，由于 24 日 NO 浓度高于 NO₂，NO 的

还原性强，消耗了大量的 O₃。26-27 日云量较多，O₃ 随着前体物 NO_x 和 NO 的浓度逐渐下降而下降。28 日前体物 NO_x 尤其是 NO 的浓度上升，但云量较多，抑制了光化学过程，O₃ 浓度继续降低。29 日虽然 NO_x (NO) 的浓度下降，但云量减少，光辐射通量增加，O₃ 浓度没有下降反而略有上升。可见光化学过程是非常复杂的。

4 讨 论

这次灰霾过程的气溶胶水溶性成分分析表明 (图 7)，从 11 月 20-23 日能见度较好演变到 11 月 24-28 日能见度恶化，各离子成分占总离子的比例发生了变化，Cl⁻、Na⁺ 和 SO₄²⁻ 离子浓度均有所增加，尤其是 SO₄²⁻ 浓度增加最多，从 45.70% 增加到 57.47%，所以 24-28 日广州的低能见事件，可能主要是硫酸盐二次粒子形成所引起的。从图 7c 中我们可以看出 24 日起 SO₂ 的浓度开始迅速增加，而 SO₄²⁻ 在 28 日浓度达到了最大，为 459.95 μg/m³，这可能是因为云量较多，湿度较大，SO₂ 通过云中过程非均相反应生成了硫酸盐。28 日 SO₂ 的迅速减少和 SO₄²⁻ 浓度的突然增加可以证实这个过程的发生。

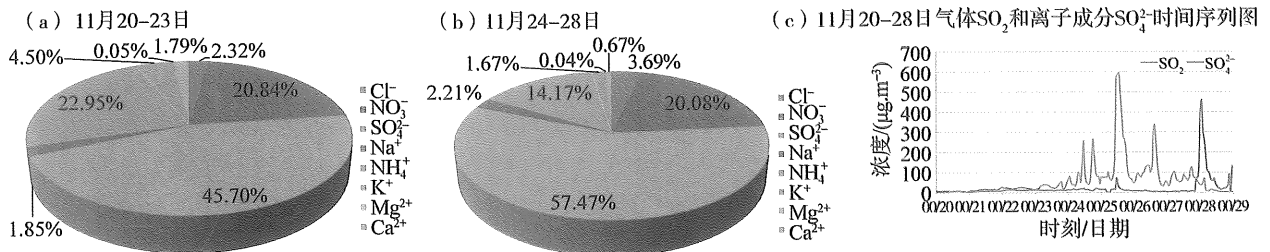


图 7 各离子成分占总离子浓度的比例情况及 SO₄²⁻ 时间序列图

Fig. 7 The ratios of different ionic components to total ionic concentration

形成这次严重灰霾天气过程除去近地层水平流场形成气流停滞区外，垂直方向的扩散能力也十分重要。从图 8 可看出，23 日白天的地面热力作用显著，混合层高度达到 1.3 km 以上，有利于污染物的扩散；而 24-27 日混合层的高度均在 1 km 以下，并呈逐渐下降趋势，不利于污染物的扩散，使得污染物在近地面层积聚，形成严重的灰霾天气。

灰霾过程和大气边界层有很密切的关系，从图 8 微波辐射计反演的边界层顶可看到，边界层高度有明显的日变化，在午后由于地面的加热作用，边界层发展最为旺盛达到最高值，夜间和早上边界层较低。从图 9 中也可看出演变过程，在 23 日之

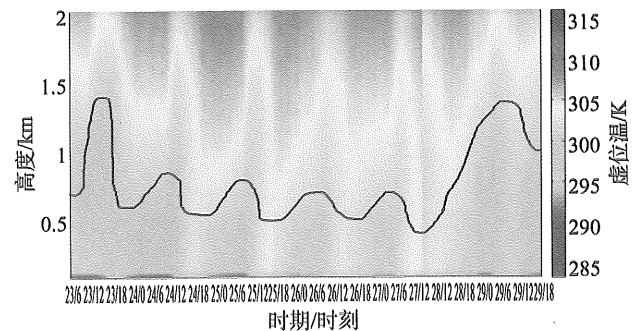


图 8 2009 年 11 月 23-29 日微波辐射计虚位温廓线时间序列图与边界层高度变化图

Fig. 8 Time Series variation of virtual temperature of microwave radiometer and the variations of boundary layer height during 23-29 November 2009

前, 边界层高度最高可以发展到 1 km 以上, 在 24 日之后, 边界层高度逐日明显降低, 几乎均在 1 km 以下, 形成了区域性的大范围灰霾天气 (图 10), 直到 29 日冷空气南下, 边界层顶明显抬高, 整个灰霾过程结束。从激光雷达回波信号来看, 整个过程污染物主要在 2 km 以下, 灰霾天气严重的时候, 污染物主要累积在 1.5 km 以下。气溶胶的消光系数是大气中各种气溶胶成分对可见光衰减的综合描述。消光系数越大, 能见度越低, 即灰霾越严重。从图 9 可以看到, 消光系数的时空演变和边

界层高度的时空演变有很好的一致性, 在 23 日之前, 边界层高度较高, 消光系数较小, 23 日之后边界层较低, 不利于污染物扩散, 消光系数变大, 能见度减低, 灰霾天气形成。在整个过程中, 消光系数在夜间和早上较大, 午后较小。29 日以后, 边界层顶高度抬升, 消光系数变小, 能见度好转, 灰霾过程结束。从消光系数的变化来看, 很好地印证了天气条件对灰霾天气的形成和维持起到了非常关键的作用。

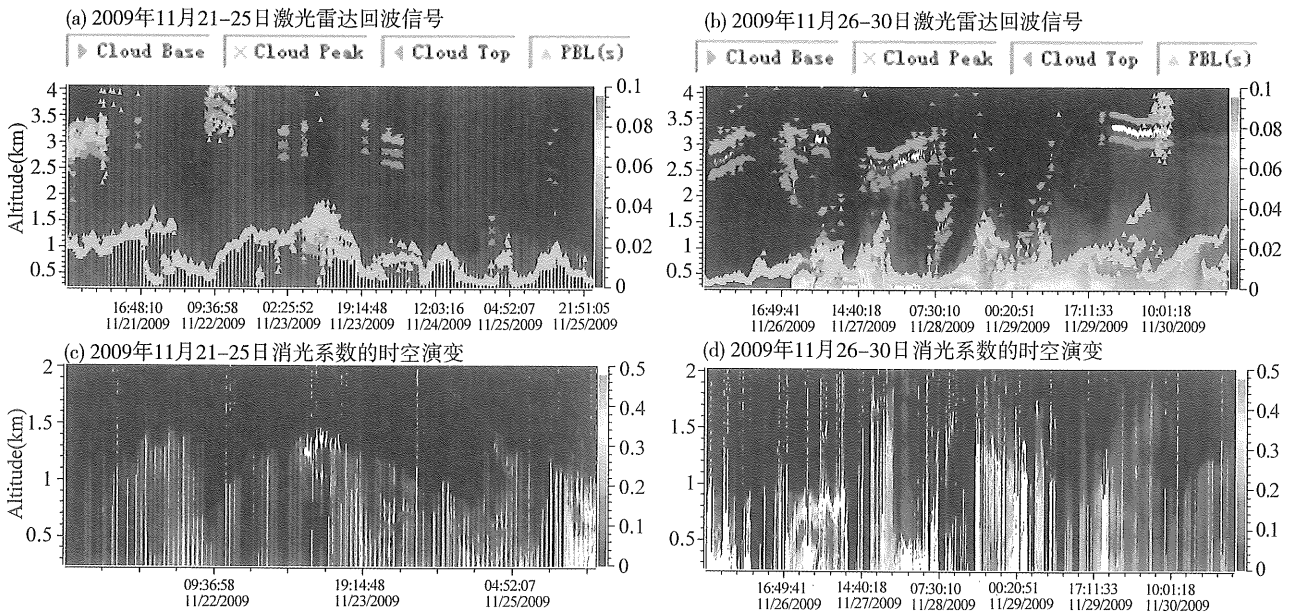


图 9 4 km 以下经过订正归一化的激光雷达回波信号和消光系数的时空演变

Fig. 9 Radar echo signals with normalized correction below 4 km and spatial-temporal evolution of extinction coefficient

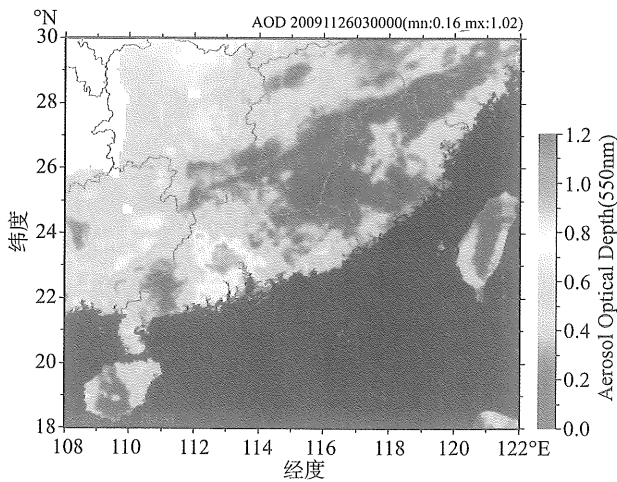


图 10 2009 年 11 月 26 日 11 时气溶胶光学厚度的 EOS/MODIS 卫星图片

Fig. 10 Satellite image of aerosol optical depth by EOS/MODIS at 11: 00 of Nov. 26, 2009

5 结 论

1) 这次严重的灰霾天气过程, 是近 10 年来最严重的灰霾天气过程之一, 具有持续时间长、范围广、强度大的特点。这次严重灰霾过程持续 7 d, 仅次于 2004 年 1 月 3 - 10 日持续 8 d 的过程; 范围广, 笼罩整个珠三角, 多个台站出现小于 1 km 的低能见度事件; 强度大, 珠三角大气成分监测网与珠三角粤港空气质量监测网数据, 都出现多项建站以来最强值, 许多指标都超过缺省预设的坐标上限, 超标均以倍数计。

2) 灰霾天气过程时 API、PM₁₀、PM_{2.5}、PM₁ 质量浓度、黑碳、NO、NO₂、NO_x 浓度约为平时的 3 ~ 4 倍; 灰霾天气过程时 SO₂ 浓度约为平时的 6 倍; O₃ 浓度和 PM₁/PM₁₀、PM₁/PM_{2.5}、PM_{2.5}/PM₁₀ 等比值变化不大。

3) $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 浓度、吸收系数 + 散射系数都超过国家气象行业标准《霾的观测和预报等级》中关于灰霾的大气成分指标规定的限值。

4) 黑碳浓度变化与颗粒物的变化特征非常一致, BC/PM_{10} 平均为 0.116。

5) SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 NH_4^+ 所占的比例很大, 三者的和达到 80% 以上, 说明二次污染非常严重, 而且在 28 日更高达 97.5%, 可能由于云量较多, 湿度增大, SO_2 可通过云中过程非均相反应生成硫酸盐。

6) 矢量和的分析说明灰霾过程与气流停滞区的关系密切, 而清除过程则与强水平输送有关。

7) 边界层高度决定垂直扩散条件, 影响污染物浓度的重要因素; 灰霾天气严重的时候, 气溶胶主要累积在 1 km 以下。

致谢: 感谢美国国家大气海洋局大气资源实验室提供的 HYSPLIT 后向轨迹模型 (<http://www.arl.noaa.gov/ready.php>) 数据分析。

参考文献:

- [1] WU Dui, TIE Xuexi, LI Chengcai, et al. An extremely low visibility event over the Guangzhou region: A case study [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, 39 (35): 6568 - 6577.
- [2] WU Dui, TIE Xuexi, DENG Xuejiao. Chemical characterizations of soluble aerosols in Southern China [J]. *Chemosphere*, 2006, 64(5): 749 - 757.
- [3] TIE Xuexi, WU Dui, BRASSEUR Guy. Lung cancer mortality and exposure to atmospheric aerosol particles in Guangzhou China [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, 43(14): 2375 - 2377.
- [4] 吴兑, 毕雪岩, 邓雪娇, 等. 珠江三角洲大气灰霾导致能见度下降问题研究 [J]. *气象学报*, 2006, 64(4): 510 - 517.
- [5] 吴兑, 廖国莲, 邓雪娇, 等. 珠江三角洲霾天气的近地层输送条件研究 [J]. *应用气象学报*, 2008, 19(1): 1 - 9.
- [6] 吴兑, 邓雪娇, 毕雪岩, 等. 细粒子污染形成灰霾天气导致广州地区能见度下降 [J]. *热带气象学报*, 2007, 23(1): 1 - 6.
- [7] 吴兑, 毕雪岩, 邓雪娇, 等. 珠江三角洲气溶胶云造成严重灰霾天气 [J]. *自然灾害学报*, 2006, 15(6): 77 - 83.
- [8] 吴兑, 毛节泰, 邓雪娇, 等. 珠江三角洲黑碳气溶胶及其辐射特性的观测研究 [J]. *中国科学 D 辑*, 2009 (11): 1542 - 1553.
- [9] 吴兑. 关于霾与雾的区别和灰霾天气预警的讨论 [J]. *气象*, 2005, 31(4): 3 - 7.
- [10] 吴兑. 再论都市霾与雾的区别 [J]. *气象*, 2006, 32(4): 9 - 15.
- [11] 吴兑. 霾与雾的识别和资料分析处理 [J]. *环境化学*, 2008, 27(3): 327 - 330.
- [12] 吴兑. 大城市区域霾与雾的区别和灰霾天气预警信号发布 [J]. *环境科学与技术*, 2008, 31(9): 1 - 7.
- [13] 车慧正, 张小曳, 石广玉, 等. 沙尘和灰霾天气下毛乌素沙漠地区大气气溶胶的光学特征 [J]. *中国粉体技术*, 2005, (3): 4 - 7.
- [14] 陈训来, 冯业荣, 王安宇, 等. 珠江三角洲城市群灰霾天气主要污染物的数值研究 [J]. *中山大学学报: 自然科学版*, 2007, 46(4): 103 - 107.
- [15] 段菁春, 毕新慧, 谭吉华, 等. 广州灰霾期大气颗粒物中多环芳烃粒径的分布 [J]. *中国环境科学*, 2006, 26(1): 6 - 10.
- [16] 朱彤, 尚静, 赵德峰. 大气复合污染及灰霾形成中非均相化学过程的作用 [J]. *中国科学: 化学*, 2010, 40(12): 1731 - 1740.
- [17] 吴兑, 吴晓京, 朱小祥. 雾和霾 [M]. 北京: 气象出版社, 2009.
- [18] 吴兑, 邓雪娇, 叶燕翔, 等. 岭南山地气溶胶物理化学特征研究 [J]. *高原气象*, 2006, 25(5): 877 - 885.
- [19] RAMANATHAN V, CRUTZEN P J, MITRA A P, et al. The Indian Ocean experiment and the asian brown cloud [J]. *Current Science*, 2002, 83(8): 947 - 955.
- [20] 谭浩波, 吴兑, 邓雪娇, 等. 珠江三角洲气溶胶光学厚度的观测研究 [J]. *环境科学学报*, 2009, 29(6): 1146 - 1155.
- [21] 广东省环保厅. 粤港珠三角空气污染形势图 [EB/OL]. (2009-11-25) http://www-app.gdepb.gov.cn/raqi3/RAQI_chs.htm/.
- [22] 中国气象局. 霾的观测和预报等级 [S]. 中华人民共和国气象行业标准, 2010.
- [23] JACOB D J. Introduction to atmospheric chemistry [M]. Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 1999.
- [24] SEINFELD J H, PANDIS S N. Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change [M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 1998.