

夏冬, 吴志权, 莫伟强, 等. 2013. 一次热带气旋外围下沉气流造成的珠三角地区连续灰霾天气过程分析. 气象, 39(6): 759-767.

一次热带气旋外围下沉气流造成的珠三角地区 连续灰霾天气过程分析^{*1}

夏冬^{1,2} 吴志权¹ 莫伟强¹ 谭浩波¹

1 广东东莞市气象局, 东莞 523086

2 广东新会区气象局, 江门 529100

提 要: 通过研究广州番禺大气成分站的气溶胶颗粒物质量浓度(PM_{10} 和 $PM_{2.5}$)、黑碳浓度、臭氧浓度等大气成分要素, 常规地面气象要素以及气流后向轨迹、垂直速度、位温和边界层高度等资料, 结合热带气旋路径和天气形势对热带气旋外围下沉气流造成的一次珠三角地区连续灰霾天气过程的形成原因和变化特征进行了分析。由于热带气旋移动缓慢, 其外围下沉气流使珠三角地区形成了层结稳定、静小风和晴朗少云的天气条件, 导致珠三角地区出现连续的灰霾天气。在这次灰霾过程中, 气溶胶粒子来源以本地源为主, 并且以细粒子为主, $PM_{2.5}$ 占 PM_{10} 的比例接近70%, 黑碳浓度占 PM_{10} 的6.0%左右; 在凌晨, 由于边界层高度降至最低, 垂直扩散条件差, 同时相对湿度也达到峰值, 气溶胶吸湿增长明显, 易出现能见度低值。

关键词: 灰霾, 热带气旋, 下沉气流

中图分类号: P458

文献标识码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2013.06.012

Analysis of a Haze Process Caused by Peripheral Subsidence of Tropical Cyclones over the Pearl River Delta Region

XIA Dong^{1,2} WU Zhiquan¹ MO Weiqiang¹ TAN Haobo¹

1 Dongguan Meteorological Office of Guangdong, Dongguan 523086

2 Xinhui Meteorological Office of Guangdong, Xinhui 529100

Abstract: A study is made by using the data obtained from Panyu Atmospheric Composition Station, Guangzhou, including aerosol particle mass concentration (PM_{10} , $PM_{2.5}$), black carbon concentration, ozone concentration, surface meteorological data, backward trajectories, vertical velocity, potential temperature and boundary layer. In this study, the causes of a haze process caused by peripheral subsidence of tropical cyclones over the Pearl River Delta region is analyzed. The results show that the peripheral subsidence of tropical cyclones make a stable meteorological condition for this haze process, in which the aerosol particles are mainly from local sources. The $PM_{2.5}$ and PM_{10} account for nearly 70% while black carbon and PM_{10} is nearly 6.0%. The visibility is low in the morning because of the lowest boundary layer and highest relative humidity during a day.

Key words: haze, tropical cyclone, subsidence

* 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2011CB403403)、国家自然科学基金项目(40905018)、广东省自然科学基金项目(9151008019000008)、广州市科技计划项目(2010Y1-C481)、广东省气象局科技创新团队计划(201103)和广东省气象局科学技术研究项目(2012C03)共同资助

2012年9月4日收稿; 2013年1月21日收修定稿

第一作者: 夏冬, 主要从事中短期天气预报和大气物理与大气环境研究. Email: 584131440@163.com

通信作者: 谭浩波, 主要从事大气物理与大气环境研究. Email: hbtan@grmc.gov.cn

引 言

灰霾是指大量气溶胶粒子浮游在空气中,使水平能见度小于 10 km 的空气混浊现象。珠江三角洲(以下称珠三角)地区是我国乃至世界上最活跃的经济区之一,也是我国最大最繁荣的城市群之一。随着珠三角地区经济快速发展,城市化水平的不断提高,环境问题日益严重。燃油和燃煤排入的烟尘,以及由汽车尾气排放的大量氮氧化物和挥发性有机物,通过光化学反应产生的二次气溶胶,使得灰霾天气日趋严重(Ansman et al, 2005; Wang et al, 2003; 吴兑等, 2006a; 谭浩波等, 2009)。

珠三角地区的灰霾问题是一个极为复杂的科学问题,不少学者已对其进行了卓有成效的研究。从 20 世纪 90 年代起,吴兑(1995; 2003)及吴兑等(1991; 1994a; 1994b; 1994c; 2001)对华南区域包括珠三角地区的气溶胶质量谱和水溶性成分谱分布进行了大量的研究;进入了 21 世纪以后,吴兑等(2006b)对珠三角地区灰霾天气的形成原因进行了深入的研究,认为高细粒子浓度是造成了珠三角地区的灰霾天气最主要的原因,并将灰霾日定义为排除降水等其他导致低能见度事件的情况下,日平均能见度小于 10 km 并且日平均相对湿度小于 90% (吴兑, 2005; 2006);他们对珠三角地区多次严重的灰霾天气过程进行了分析,认为灰霾天气的形成原因非常复杂。天气系统(冷高压脊或热带气旋)造成珠三角地区出现小风静风和稳定大气层结,有利于气溶胶粒子积累(Wu et al, 2005; 吴兑等, 2011a)是灰霾天气形成的重要原因,强的气溶胶粒子输送也会造成珠三角地区的灰霾天气(吴兑等, 2011b); Wang 等(2009)对珠三角城市群光化学烟雾污染生成二次气溶胶的物理化学机制进行了深入的研究;谭浩波等(2009)分析了珠三角地区气溶胶光学厚度的变化特征,并与 MODIS 卫星遥感的气溶胶光学厚度进行了对比分析。

气象条件是灰霾天气形成的重要因素。周明煜等(2005)分析研讨北京城市大气边界层低层的湍流垂直结构特征,认为其与大气污染物稀释扩散能力密切相关;罗森波等(2006)统计分析了广州市大气污染与气象条件的关系,认为气象条件对污染物的

稀释和扩散、传播、聚积和清除有密切的关系;Feng 等(2007)用数值模式结合地面观测资料分析了 2003 年热带气旋茉莉(Melor)与珠三角地区 PM_{10} 浓度的关系,认为热带气旋外围下沉气流造成了珠三角地区稳定的大气层结,从而导致 PM_{10} 浓度升高,同时地面的偏北风场是造成香港地区高 PM_{10} 浓度的重要原因;范绍佳等(2006)建立了珠三角地区大气边界层的概念模型,认为大气边界层的结构与灰霾天气密切相关。

2012 年第 9 号台风苏拉(Saola)、第 10 号台风达维(Damrey)和第 11 号台风海葵(Haikui)先后登陆我国台湾、福建、浙江及江苏一带,给我国造成了严重的影响。在靠近大陆的过程中,“苏拉”和“海葵”的外围下沉气流给广东特别是珠三角地区造成了连续的灰霾天气。受“苏拉”外围的下沉气流影响,珠三角地区 7 月 29 日至 8 月 2 日(以下称过程 1),出现了明显的灰霾天气。“苏拉”登陆后,灰霾天气逐渐缓解。随后,“海葵”外围的下沉气流也造成了珠三角地区较长时间的灰霾天气(8 月 3—9 日,以下称过程 2)。在此次连续灰霾过程中,珠三角城市深圳、东莞和中山先后共 5 次发布灰霾黄色预警信号,灰霾给公共交通和人体健康等造成了较大的影响。本文主要分析了此次珠三角地区连续灰霾天气过程,旨在揭示其形成原因和变化特征。

1 资料和方法

本文利用了 MICAPS 的气象场资料,热带气旋定位、强度和移速资料,以及广州番禺大气成分站的各种大气成分资料和常规地面气象要素资料。

番禺大气成分站位于广州市番禺南村镇大镇岗山山顶,是番禺第一高峰,海拔 141 m,地处珠三角腹地,可代表珠三角地区大气成分均匀混合的平均特征(邓雪娇, 2008)。主要的大气成分监测仪器包括:颗粒物监测仪(Grimm 180, GRIMM Aerosol Technik GmbH & Co. KG)、积分式浊度仪(澳大利亚 Nephelometer M9003)、黑碳仪(欧洲 Megee Scientific Aethalometer AE-31 型)、前向散射式能见度仪(美国 Belfore M6000 型)及臭氧仪(EC9810B O₃ 分析仪)等。其中颗粒物监测仪、积分式浊度计和黑碳仪都对进气采取干燥处理,使测量颗粒物的

相对湿度保持在 40%左右。

番禺大气成分站的原始监测数据分辨率均为 5 min,由于短历时资料的波动较大,代表性不强,故用以下筛选野点处理方法。取 1 h 为时间间隔,作归一化处理,取偏离平均值 $\delta=3$,将归一化时偏离平均值大于 3 的数据剔除后,统计平均得到小时均值。

本文还利用了美国国家大气与海洋局(NOAA)的气流后向轨迹模型(hysplit),NCEP 再分析资料中的垂直速度、位温和边界层高度资料,以及香港科技大学的 MODIS 卫星反演的气溶胶光学厚度资料。

2 灰霾的形成和演变特征

2.1 能见度和气溶胶粒子浓度的变化特征

图 1 是珠三角地区主要站点能见度的变化。在此次灰霾过程中,珠三角地区主要城市广州、深圳、中山和佛山都出现了极低的能见度值,过程能见度最低值小于 3 km。

图 2 是此次灰霾过程中气溶胶浓度、黑碳浓度、

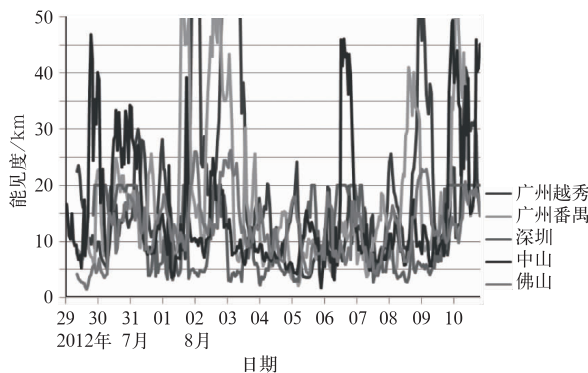


图 1 珠三角部分城市能见度变化
Fig. 1 The variation of visibility in some cities in Pearl River Delta

能见度和臭氧浓度的变化图。过程 1 的 PM_{10} 平均浓度为 $102.1 \mu g \cdot m^{-3}$, $PM_{2.5}$ 平均浓度为 $70.7 \mu g \cdot m^{-3}$,均高于过程 2 的 PM_{10} 平均浓度 $95.7 \mu g \cdot m^{-3}$ 和 $PM_{2.5}$ 平均浓度 $66.8 \mu g \cdot m^{-3}$;过程 1 和 2 的 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 都接近 70%,气溶胶以细粒子为主。过程 1 中,气溶胶浓度在 29 日白天达到一个峰值,超过 $150 \mu g \cdot m^{-3}$,之后浓度迅速下降至 $50 \mu g \cdot m^{-3}$ 以下,这与风速增大有关,随后呈逐渐上升的趋势。过程 2 中的前中期气溶胶浓度很高,后期由于降水的清除作用,浓度降低。

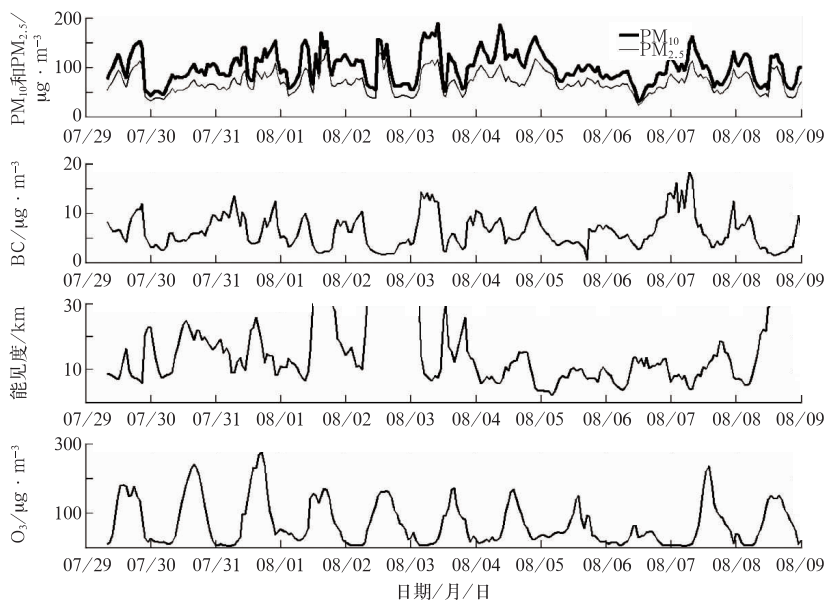


图 2 2012 年 7 月 29 日至 8 月 9 日番禺气溶胶浓度、黑碳浓度、能见度 and 臭氧浓度的变化

Fig. 2 The variation of aerosol concentration, black carbon concentration, visibility and ozone concentration in Panyu, Guangzhou from 29 July to 9 August 2012

黑碳(BC)是一次气溶胶,主要来自不完全燃烧。过程1和2中黑碳浓度平均值分别为 6.6 和 $5.7 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,低于吴兑等(2009)分析的珠三角地区雨季的平均值 $8.0 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。过程1和2中黑碳占 PM_{10} 的比例分别为 6.1% 和 6.0% ,低于典型灰霾过程的比例(李菲等,2012)。

地面臭氧是光化学反应的直接产物,其浓度能代表光化学反应的强度。过程1的臭氧平均浓度达到 $81.3 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,高于过程2的平均浓度 $60.9 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,说明过程1的光化学反应比过程2强,产生了更多的二次气溶胶。过程1中7月29—31日白天的臭氧浓度都出现很高的峰值,其中7月31日峰值接近 $300 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,过程2中臭氧浓度白天的峰值明显小于过程1,这主要是由于过程2的云量较多,并且出现了降水所造成的。

能见度反映了大气浑浊的程度,气溶胶颗粒物的消光作用是影响能见度的主要因素(Jacob,1999; Seinfeld et al,1998)。一般来说气溶胶浓度越高,

能见度越低。过程1的气溶胶浓度高于过程2,但平均能见度却也高于过程2,这主要跟气溶胶吸湿增长有关。过程1和2中的能见度均表现出明显的日变化特征,最低值一般出现在夜间到凌晨,这主要与边界层高度和相对湿度的日变化有关。夜间到凌晨边界层高度降低,气溶胶浓度增大;相对湿度的峰值一般也出现在凌晨,气溶胶吸湿增长明显,消光作用增强。

2.2 气溶胶光学厚度的分布特征

图3为MODIS卫星反演的华南地区 550 nm 气溶胶光学厚度(AOD)分布图。图3显示,7月30日华南地区已出现以珠三角地区为中心的高污染区域;8月2日粤西地区和海南的污染加重;8月7日,整个珠三角地区都是高污染区,AOD值普遍超过 0.8 ;到8月8日05时随着“海葵”登陆减弱,珠三角地区的污染逐渐缓解。

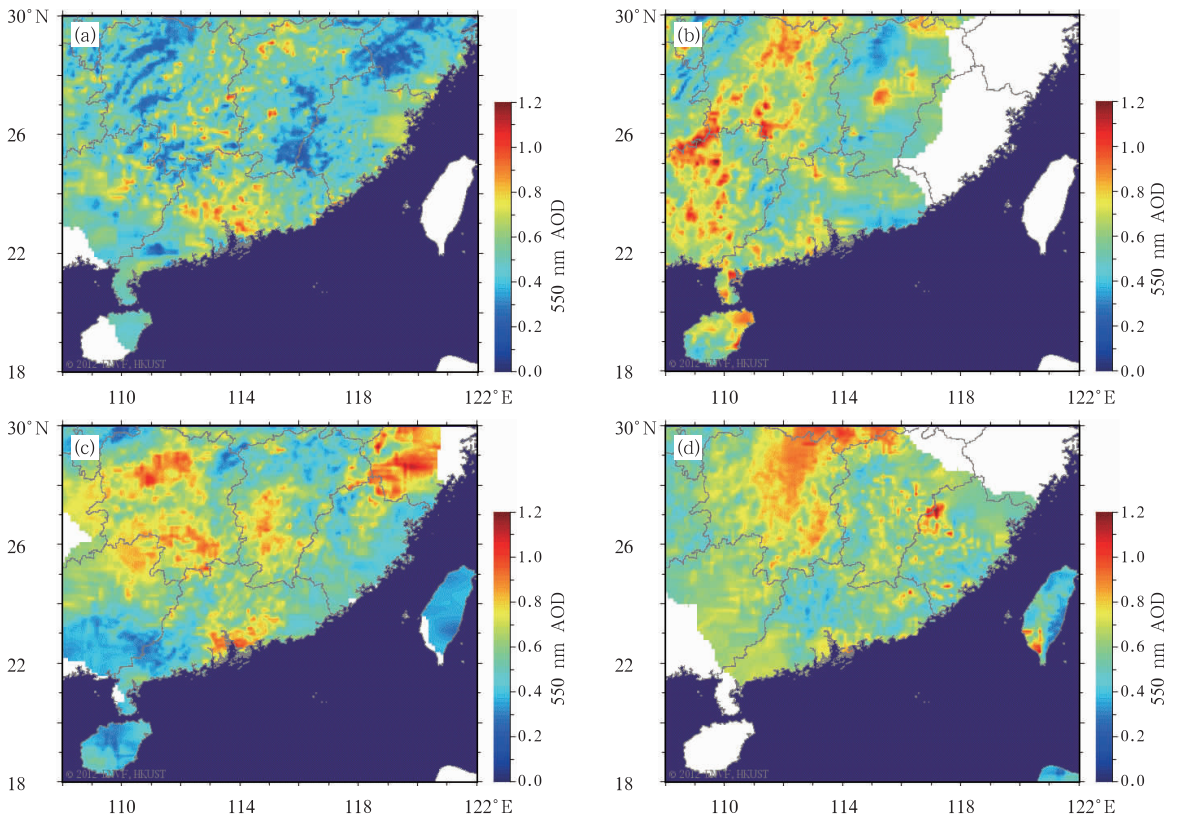


图3 华南地区气溶胶光学厚度(AOD)分布

(a) 7月30日05时20分, (b) 8月2日05时55分, (c) 8月7日02时55分, (d) 8月8日05时45分

Fig. 3 The distribution of AOD in southern part of China

(a) 05:20 BT 30 July, (b) 05:55 BT 2 August, (c) 02:55 BT 7 August, (d) 05:45 BT 8 August

2.3 气溶胶吸湿增长因子的变化特征

气溶胶的吸湿特性描述的是气溶胶粒子与水汽的相互作用。在一定水汽条件下,气溶胶粒子中的无机盐成分(主要是硝酸盐和硫酸盐)可以吸收水分,表现为气溶胶粒子的粒径增大,光学特性也发生改变。研究人员(刘新罡等,2009;Liu et al,2008)利用“光学综合法”计算气溶胶吸湿增长因子 $f(RH)$ 计算公式为:

$$f(RH) = \frac{\sigma_{ext}(RH) - \sigma_{sg} - \sigma_{ag} - \sigma_{ap}}{\sigma_{sp}(dry)} \quad (1)$$

式中, $\sigma_{ext}(RH)$ 为在一定相对湿度下的消光系数, σ_{sg} 为分子的瑞利散射系数, σ_{ag} 为气体的吸收系数, σ_{ap} 为气溶胶粒子的吸收系数, $\sigma_{sp}(dry)$ 为干燥后的气溶胶粒子的散射系数。以上系数均为 550 nm 波段的值。由能见度传感器中输出的消光系数为 880 nm 的消光系数,通过 Angstrom 指数关系: $\tau = \beta \lambda^{-\alpha}$ (其中 α 为波长指数, β 为大气浑浊度系数),可以转换为 550 nm 的消光系数;气体的吸收系数一般与 NO_2 浓度有关,由式(2)(Bond et al,1999)得到;分子的瑞利散射系数一般为 $13.2 \times 10^{-6} m^{-1}$;将黑碳浓度通过吴兑等(2009)的转换方法得到吸收系数;由于番禺大气成分站的浊度计对进气进行干燥处理,相对湿度维持在 40% 左右,可直接视为 $\sigma_{sp}(dry)$ 。番禺大气成分站能见度传感器采用前向散射的原理,得到的消光系数可能存在一定的误差,所以用以上方法计算得到的气溶胶吸湿增长因子,特别是在低相对湿度的情况下,可能出现一定偏差。

$$\sigma_{ag} \approx \sigma_{NO_2} = 3.3 \cdot C_{NO_2} \quad (2)$$

图 4 为 2012 年 7 月 29 日至 8 月 10 日气溶胶吸湿增长因子和相对湿度的变化图。图 4 显示,过程 1 中,只有 7 月 29 日吸湿增长因子较高,随着相对湿度降低,之后吸湿增长因子均较低。过程 2 的相对湿度和吸湿增长因子都明显高于过程 1,吸湿增长因子最高达到 5 以上,与毕凯等(2012)的研究结果较接近。

3 气象要素的变化特征

3.1 热带气旋路径和气象场分析

图 5 为 2012 年第 9 号强台风苏拉、第 10 号强热带风暴达维和第 11 号强台风海葵的路径图。“苏

拉”于 7 月 28 日 08 时在西北太平洋洋面上生成,之后基本维持向西北偏北的方向移动,强度不断加强,最大强度达到强台风的级别。“达维”于 7 月 28 日 20 时在西北太平洋洋面上生成,之后稳定向西北偏西方向移动。随着“苏拉”与“达维”之间的距离不断减小,两者形成了双台风作用,使“苏拉”移速减慢。如图 6 所示,“苏拉”7 月 29 日至 8 月 2 日移速大致维持在 $10 km \cdot h^{-1}$ 左右。8 月 2 日 03 时 15 分前后,“苏拉”在台湾登陆,登陆后强度很快减弱。与此同时由于“达维”也快速继续靠近大陆,双台风作用有所减弱,“苏拉”移速加快,并于 8 月 3 日 06 时 50 分前后在福建登陆。受“苏拉”外围的下沉气流影响,珠三角地区 7 月 29 日至 8 月 2 日,出现了明显的灰霾天气,“苏拉”登陆后,灰霾天气逐渐缓解。

“海葵”于 8 月 3 日在西北太平洋生成,之后稳定向西北偏西方向移动,逐渐靠近我国大陆。6 日 17 时,“海葵”加强为台风,7 日 14 时加强为强台风,8 月 8 日 03 时 20 分前后在浙江登陆。由于副热带高压强度较弱,范围较小,位置偏北(如图 7),“海

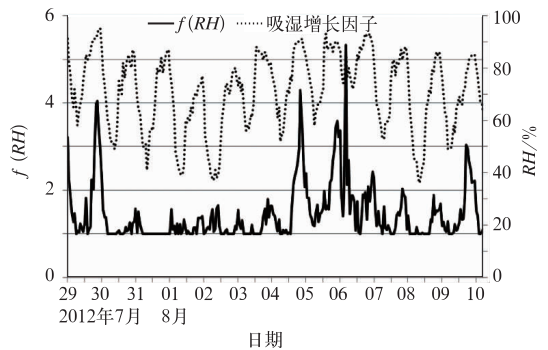


图 4 2012 年 7 月 29 日至 8 月 10 日吸湿增长因子和相对湿度的变化特征
Fig. 4 The variation of Growth Factor and relative humidity from 29 July to 10 August 2012

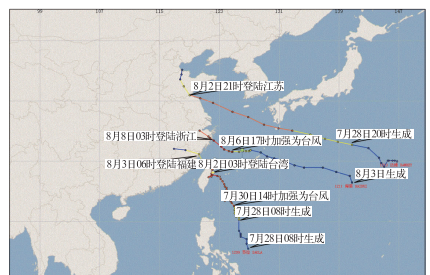


图 5 热带气旋路径图
Fig. 5 The path of tropical cyclones

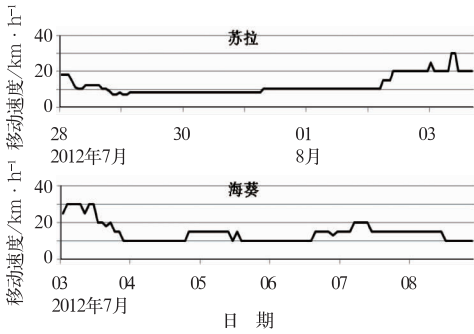


图 6 热带气旋移速速度的变化图

Fig. 6 The moving speed of tropical cyclones

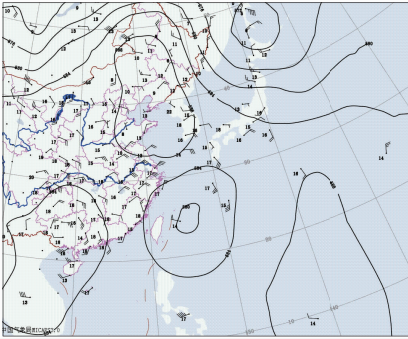


图 7 2012 年 8 月 6 日 08 时 500 hPa 高度场和 850 hPa 风场

Fig. 7 500 hPa geopotential height and 850 hPa wind at 08:00 BT 6 August 2012

葵”的引导气流较弱,在靠近大陆的过程中“海葵”移速减慢。如图 6 所示,8 月 5—8 日,“海葵”的移速在 $10\sim 15\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 之间。8 月 3—9 日,“海葵”外围的下沉气流也造成了珠三角地区较长时间的灰霾天气。

3.2 常规气象要素的变化特征

图 8 是 7 月 29 日至 8 月 8 日广州番禺地面测站的风速、风向、气压、气温、相对湿度和逐小时降水量的变化图。从图 8 中可以看到,过程 1 中,风速维持基本维持在 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下,8 月 3 日“苏拉”登陆前后,风速有所增大,但很快受“海葵”外围下沉气流影响,风速降至 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下;从风向上看,由于“苏拉”和“海葵”均位于珠三角地区的东到东北方向,因此过程 1 和 2 都以东风到北风为主;气压的变化主要受“苏拉”和“海葵”影响,台风越近,气压越低,“苏拉”登陆福建时,气压降至最低;“苏拉”和“海葵”外围的下沉气流造成了连续的高温天气,过程 1 中,气温呈现逐日上升的趋势,7 月 31 日、8 月 1—2 日的最高气温均超过了 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$,过程 2 的气温略低于过程 1,8 月 8 日的最高气温也超过了 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$;过程 1 的相对湿度变化趋势与气温的变化相对应,呈逐日下降的趋势,其中 7 月 29—30 日凌晨的最大相对湿

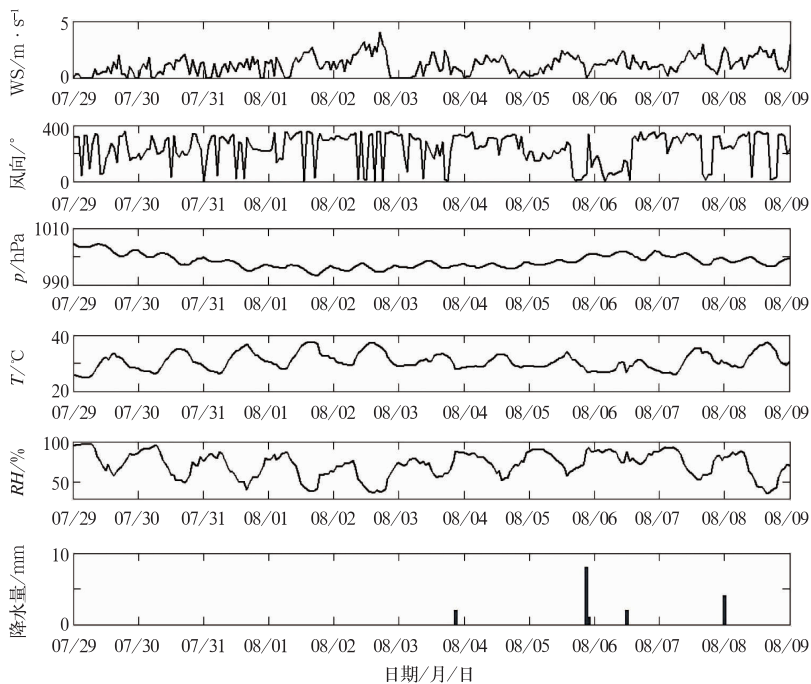


图 8 2012 年 7 月 29 至 8 月 9 日风速、风向、气压、气温、相对湿度和降水的变化

Fig. 8 The variation of wind speed, wind direction, pressure, temperature, relative humidity and precipitation from 29 July to 9 August 2012

度超过 90%，之后降至 90% 以下，过程 2 的相对湿度总体高于过程 1，8 月 4—7 日的日最大相对湿度均高于 90%；降水量的变化趋势图显示，过程 1 没有出现降水，过程 2 中出现了降水，但降水量较小和降水时间较短，对气溶胶的湿清除作用有限。

3.3 气流轨迹分析

图 9 是 8 月 1 和 8 日 08 时的不同高度上(5、500 和 1500 m)的 72 h 气流后向轨迹图。从图 9 可

以看到，8 月 1 和 8 日的气流后向轨迹类似，低层(10~1500 m)的都以偏北到东北气流为主，其中近地面(10~500 m)主要是偏北气流影响，气流相对比较干燥；大气层结相对比较稳定，近地面(10~500 m)气流以水平输送为主，1500 m 层的气流来自上层，说明受下沉气流的影响；气流的移动缓慢，说明气溶胶粒子以本地源为主。气流的后向轨迹与风速风向的变化趋势一致。

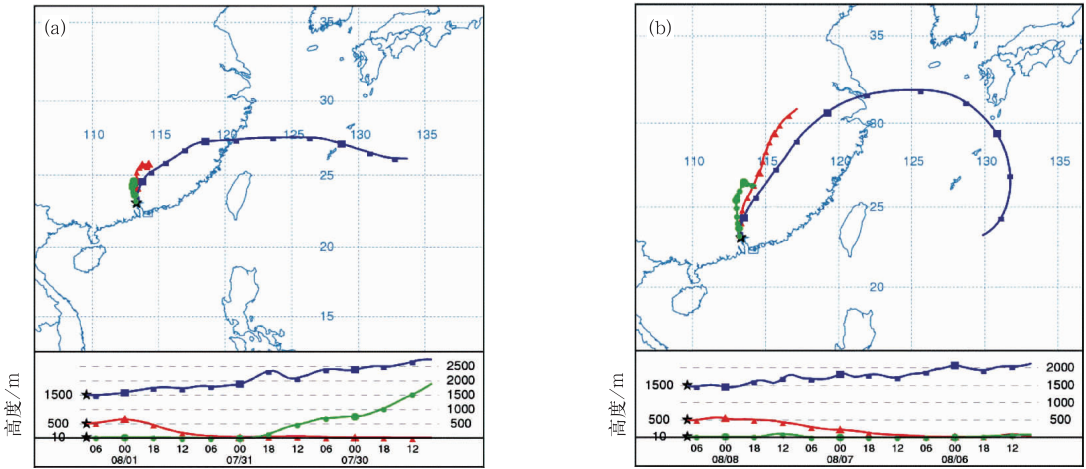


图 9 广州番禺 72 h 气流后向轨迹
(a) 8 月 1 日 08 时, (b) 8 月 8 日 08 时
(* 为起始点位置)

Fig. 9 The 72 h backward trajectories in Panyu, Guangzhou
(a) 08:00 BT 1 August, (b) 08:00 BT 8 August
(* denotes the starting point of the trajectory)

3.4 边界层高度、垂直速度和位温的变化趋势

图 10 为番禺边界层高度的变化图。在过程 1 中，7 月 29 日白天的边界层高度达到最低。随着“苏拉”靠近，边界层高度逐日升高。过程 2 中，8 月 4 和 5 日白天的边界层高度达到最低。随着“海葵”的靠近，边界层高度逐渐升高。总体上，过程 1 和 2 中边界层高度的日最低值均在 100 m 以下，不利于气溶胶粒子的垂直扩散。边界层高度呈现出明显的日变化特征，从晚上 20 时到早上 08 时最低，08 时以后逐渐升高，在 14—17 时达到日最高值。

垂直速度可以有效表征大气受热带气旋外围下沉气流的影响程度。图 11 为珠三角地区上空大气的垂直速度变化图，其中正值为下沉速度，负值为上升速度。从图 11 中可以看到，受“苏拉”外围下沉影

响，过程 1 中大气从低层到中层(1000~500 hPa)都以下沉气流为主。“苏拉”登陆前后，下沉气流减弱，低层(1000~850 hPa)转为上升气流。受“海葵”下沉气流的影响，8 月 3 日后中高层(850~500 hPa)转为下沉气流为主，但低层有弱的上升气

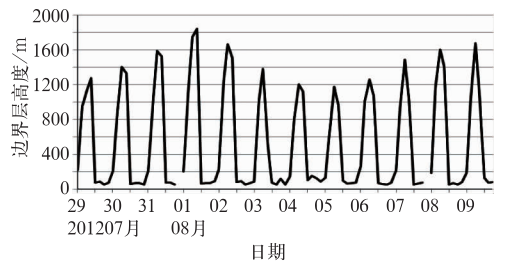


图 10 2012 年 7 月 29 日至 8 月 9 日
边界层高度的变化

Fig. 10 The height variation of boundary layer

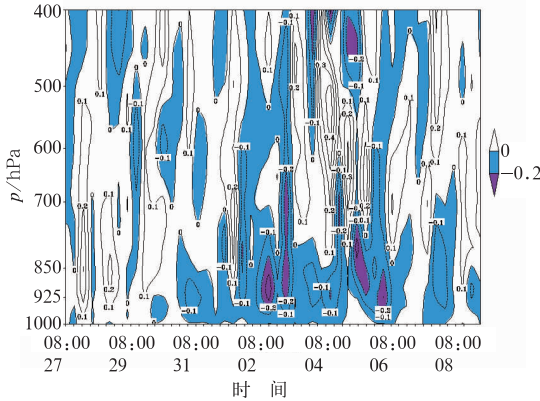


图 11 2012 年 7 月 27 日至 8 月 8 日
垂直速度变化 (单位: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 11 The variation of vertical velocity from
27 July to 8 August 2012 (unit: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$)

流,这主要是由于 925~850 hPa 转东南风场影响,有微弱的风速辐合。总体上过程 1 的下沉气流强于过程 2。

图 12 是番禺的位温的垂直分布变化。从图 12 可以看出,过程 1 和 2 中番禺上空的位温都是随着高度增加而增加的,位温垂直递减率为正值,说明大气层结是稳定的。过程 1 的位温垂直递减率要略高于过程 2,说明过程 1 的大气层结相对过程 2 更为稳定。

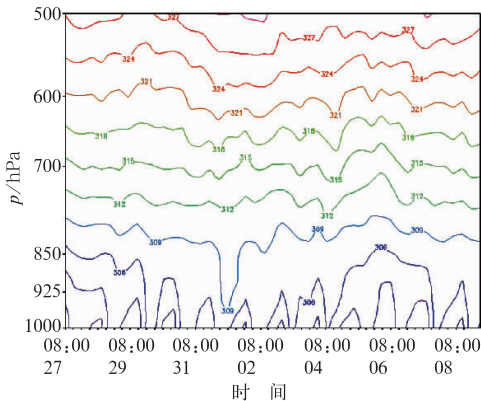


图 12 2012 年 7 月 27 日至 8 月 8 日
位温垂直分布变化

Fig. 12 The variation of the vertical
distribution of potential temperature
from 27 July to 8 August 2012

在靠近大陆的过程中,由于“苏拉”和“海葵”移动速度缓慢,其外围下沉气流使珠三角地区形成了层结稳定、静小风和晴朗少云的天气条件,是导致珠三角地区出现连续灰霾天气的直接原因。

在层结稳定及大气扩散条件较差的情况下,珠三角地区的大气气溶胶粒子来源以本地源为主,并且以光化学反应产生的细粒径二次气溶胶粒子为主, $\text{PM}_{2.5}$ 占 PM_{10} 的比例接近 70%, 黑碳浓度占 PM_{10} 的 6.0% 左右。这与之前一些研究结论有相同之处。此次灰霾天气过程是在一定的气象条件(如热带气旋外围、高压脊等)下,本地的空气污染物通过排放、气粒转化和积累等物理化学过程,气溶胶粒子浓度不断升高,形成灰霾天气。此次灰霾过程与外来污染源入侵形成的灰霾过程不同。

能见度还与气溶胶吸湿增长因子有密切的关系。过程 1 的气溶胶浓度高于过程 2,但由于空气相对较干燥,气溶胶吸湿增长因子低于过程 2,平均能见度反而高于过程 2。

能见度表现出明显的日变化特征,主要与边界层高度和相对湿度的日变化有关。在凌晨,由于边界层高度降至 100 m 以下,垂直扩散条件差,同时相对湿度达到峰值,使气溶胶粒子吸湿增长明显。吸湿增长导致气溶胶粒子平均粒径增大,消光系数明显增大,这时候易出现一天内的最低能见度值。

本文的分析结果对于发布灰霾预警的有重要的参考意义。发布灰霾预警的最好时间在夜间到凌晨,发布灰霾预警时应兼顾大气扩散条件和相对湿度条件。

致谢:美国国家大气海洋局(NOAA)空气资源实验室(ARL)提供的后向轨迹模型、NCEP 再分析资料,以及香港科技大学 MODIS 卫星反演的气溶胶光学厚度资料在本文中使用,在此表示衷心的感谢。

参考文献

- 毕凯,王广河,毛节泰. 2012. 2009 年上海浦东新区能见度资料的深度分析——兼论高时间分辨率地面观测资料的应用. *气象*, 38(2): 220-227.
- 邓雪娇. 2008. 珠江三角洲气溶胶的特征及其对能见度与地面臭氧变化的影响. 北京: 北京大学博士论文.
- 范绍佳,王安宇,樊琦,等. 2006. 珠江三角洲大气边界层特征及其概念模型. *中国环境科学*, 26(Suppl): 4-6.
- 李菲,吴兑,谭浩波,等. 2012. 广州地区旱季一次典型灰霾过程的特征及成因分析. *热带气象学报*, 28(1): 113-122.
- 刘新盟,张远航. 2009. 广州市大气气溶胶散射吸湿增长因子的观测研究. *中国环境科学*, 29(11): 1128-1133.

4 讨论与小结

台风苏拉和海葵先后登陆我国的福建和浙江。

- 罗森波,罗秋红,谢炯光,等. 2006. 广州市大气污染与气象条件关系的统计分析. *热带气象学报*, 22(6):567-573.
- 谭浩波,吴兑,邓雪娇,等. 2009. 珠江三角洲气溶胶光学厚度的观测研究. *环境科学学报*, 29(6):1146-1155.
- 吴兑. 1995. 南海北部大气气溶胶水溶性成分谱分布特征. *大气科学*, 19(5):615-622.
- 吴兑. 2005. 关于霾与雾的区别和灰霾天气预警的讨论. *气象*, 31(4):3-7.
- 吴兑. 2006. 再论都市霾与雾的区别. *气象*, 32(4):9-15.
- 吴兑,毕雪岩,邓雪娇,等. 2006b. 珠江三角洲大气灰霾导致能见度下降问题研究. *气象学报*, 64(4):510-517.
- 吴兑,陈位超. 1994a. 广州气溶胶质量谱与水溶性成分谱的年变化特征. *气象学报*, 52(4):499-505.
- 吴兑,陈位超. 1994b. 华南地区大气气溶胶质量谱和水溶性成分谱分布的初步研究. *热带气象学报*, 10(1):85-96.
- 吴兑,邓雪娇,叶燕翔. 2006a. 岭南山地气溶胶物理化学特征研究. *高原气象*, 25(5):877-885.
- 吴兑,甘春铃,何应昌. 1994c. 广州夏季硫酸盐巨粒子的分布特征. *气象*, 21(3):44-47.
- 吴兑,关越坚,毛伟康. 1991. 广州盛夏期海盐核(Cl^-)巨粒子的分布特征. *大气科学*, 15(5):124-128.
- 吴兑,黄浩辉,邓雪娇. 2001. 广州黄埔工业区近地层气溶胶分级水溶性成分的物理化学特征. *气象学报*, 59(2):213-219.
- 吴兑,毛节泰,邓雪娇,等. 2009. 珠江三角洲黑碳气溶胶及其辐射特性的观测研究. *中国科学 地球科学*, 39(11):1542-1553.
- 吴兑,吴晟,陈欢欢,等. 2011a. 珠三角 2009 年 11 月严重灰霾天气过程分析. *中山大学学报(自然科学版)*, 50(5):120-127.
- 吴兑,吴晟,李海燕,等. 2011b. 穗港晴沙两重天——2010 年 3 月 17—23 日珠三角典型灰霾过程分析. *环境科学学报*, 31(4):695-703.
- 周明煜,姚文清,徐祥德,等. 2005. 北京城市大气边界层低层垂直动力和热力特征及其与污染物浓度关系的研究. *中国科学 地球科学*, 35(z1):20-30.
- Ansman A, Engemann R, Althausen D, et al. 2005. High aerosol load over Peral River Delta, China, observed from Raman Liar and Sun photometer. *Geophys Res Lett*, 32(L13815). Doi:10.1029/2005GL023094.
- Bond T C, Anderson T L, Campbell D. 1999. Calibration and inter-comparison of filter-based measurements of visible light absorption by aerosols. *Aerosol Sci Tech*, 30(6):582-600.
- Feng Yerong, Wang Anyu, Wu Dui, et al. 2007. The influence of tropical cyclone Melor on PM_{10} concentrations during an aerosol episode over the Pearl River Delta region of China: Numerical modeling versus observational analysis. *Atmos Environ*, (21):4349-4365.
- Jacob D J. 1999. *Introduction to Atmospheric Chemistry*. Princeton, New Jersey, Princeton University Press, 266.
- Liu Xingang, Cheng Y F. 2008. Influences of relative humidity and particle chemical composition on aerosol scattering properties during the 2006 PRD campaign. *Atmos Environ*, 42(7):1525-1536.
- Seinfeld J H, Pandis S N. 1998. *Atmospheric Chemistry and Physics: from Air Pollution to Climate Change*. New York, John Wiley & Sons Inc, 724-743.
- Wang T, Poon C, Kwok Y, et al. 2003. Characterizing the temporal variability and emission patterns of pollution plumes in the Pearl River Delta of China. *Atmos Environ*, 37(25):3539-3550.
- Wang Xuemei, Wu Zhiyong, Liang Guixiong. 2009. WRF/CHEM modeling of impacts of weatherconditions modified by urban expansion on secondary organic aerosol formation over Pearl River Delta. *Particuology*, 7(5):384-391.
- Wu Dui, Tie Xuexi. 2005. An extremely low visibility event over the Guangzhou region: A case study. *Atmos Environ*, 39(35):6568-6577.