

# 珠江三角洲PM<sub>2.5</sub>局地污染时空特征及环流背景分析

张丽<sup>1,2</sup> 李磊<sup>1,2</sup> 梁碧玲<sup>1</sup> 王明洁<sup>1</sup> 冯碧锋<sup>3</sup> 陈林峰<sup>3</sup>

(1 深圳市气象局, 深圳 518040; 2 深圳市国家气候观象台, 深圳 518040; 3 深圳市强风暴科学研究院, 深圳518040)

**摘要:** 利用珠江三角洲56个环保监测站PM<sub>2.5</sub>浓度、广东省89个国家气象站的地面风向风速和2部风廓线雷达风、温廓线数据, 分析了珠江三角洲PM<sub>2.5</sub>局地污染事件的时空变化特征及其背景环流特征。结果表明: 1) 珠江三角洲广州、佛山和肇庆为PM<sub>2.5</sub>污染中心, 冬半年发生污染的频率高于夏半年, 一天内夜间至次日凌晨发生的频次最高。2) PM<sub>2.5</sub>局地污染的天气形势可分为大陆冷高压底部型、海上变性高压脊性、副热带高压型和热带气旋外围偏北下沉气流等四种。3) PM<sub>2.5</sub>局地污染受局地环流影响大, 山体、平原、海洋和城市的热力条件不同, 地面风场发生变化, 形成地面弱辐合线, 阻止了污染的水平扩散, 同时弱的偏北风从广东省北部山地倾泻下来, 在珠江三角洲形成边界层内的下沉气流, 抑制了污染的垂直输送, 导致近地面的污染出现。

**关键词:** 珠江三角洲, PM<sub>2.5</sub>污染, 天气分型, 局地环流

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2019.03.019

## Spatial-Temporal Characteristics and Background Circulations of Local PM<sub>2.5</sub> Pollution Episodes in the Pearl River Delta

Zhang Li<sup>1,2</sup>, Li Lei<sup>1,2</sup>, Liang Biling<sup>1</sup>, Wang Mingjie<sup>1</sup>, Feng Bingfeng<sup>3</sup>, Chen Linfeng<sup>3</sup>

(1 Meteorological Bureau of Shenzhen Municipality, Shenzhen 518040

2 Shenzhen National Climate Observatory, Shenzhen 518040

3 Shenzhen Strong Storm Science Research Institute, Shenzhen 518040)

**Abstract:** In this paper, the spatial-temporal characteristics and the background circulations of local PM<sub>2.5</sub> pollution (LPP) episodes in the Pearl River Delta are analyzed by using the PM<sub>2.5</sub> data from 56 air quality monitoring stations and the meteorological data from 89 National Basic Weather Stations and 2 wind profile radars. The conclusions are as follows. First, the LPP episodes recorded in Guangzhou, Foshan and Zhaoqing are more than those in other cities. The LPP episodes occur more frequently in winter than in summer, and most of them occur during the period from night to the next morning. Second, the LPP episodes are caused by different background circulations, namely the continental cold high bottom, transformed sea high ridge, subtropical high and northerly downdraft outside the tropical cyclone. Third, most typical LPP episodes are affected by the local circulations. Under the influence of mountains, plains and ocean thermal conditions, the surface wind changes, and the weak convergence line is formed, preventing the pollution from diffusing horizontally. At the same time, weak northerly winds from northern mountains of Guangdong Province arrive at the Pearl River Delta, causing downdrafts within the boundary layer, inhibiting the pollution from spreading vertically, resulting in the ground pollution.

**Keywords:** the Pearl River Delta, PM<sub>2.5</sub> pollution, synoptic pattern, local circulation

### 0 引言

珠江三角洲为国家大气污染防治新标准第一阶段

收稿日期: 2018年9月5日; 修回日期: 2019年4月9日  
第一作者: 张丽(1984—), Email: 351969182@qq.com  
资助信息: 国家重点研发计划项目(No.2016YFC0203600);  
广东省气象局科研项目(No.2016B37); 深圳  
市科技创新项目(JCYJ20170306150333250)

监测实施的三大重点区域之一, 也是相对京津冀、长三角地区大气污染治理起步较早、空气质量相对较优的区域。按照“大气污染防治行动计划”要求, 京津冀、长三角和珠江三角洲区域2017年PM<sub>2.5</sub>浓度需较2013年分别下降25%、20%和15%以上。2017年作为“大气污染防治行动计划”考核之年, 三大重点区域均超额完成了国家考核任务, 空气质量有了较为明显

的改善。

在大尺度环境场稳定的条件下，容易产生局地环流，如山谷风、海陆风环流，对局地污染产生重要的影响<sup>[1-4]</sup>。在大尺度天气系统相对稳定的情况下，局地环流则对大气污染物的汇聚起主导作用<sup>[5-8]</sup>。邱晓暖<sup>[9]</sup>研究指出我国华南沿海有明显的海陆风环流，海陆风有可能造成污染物的累积，使空气质量变差，应引起沿海地区有关部门的重视。范绍佳等<sup>[10]</sup>认为不同来源和属性的气流对边界层混合层高度影响不同，下沉气流使珠江三角洲地区出现静小风，产生局地环流，混合层高度减小。赵敬国等<sup>[11]</sup>指出静稳型重污染的气象学成因主要是风速小，稳定能量大，大气环境稳定度大，不利于湍流扩散。杨洋等<sup>[12]</sup>发现由热力性质决定的局地环流占主导作用时，大气层结稳定，容易导致严重污染。Flocas等<sup>[13]</sup>和Bigot等<sup>[14]</sup>研究也指出局地重污染天气是多种尺度环流共同影响的综合结果。基于此，本文拟利用珠江三角洲区高密度排列的气象站和PM<sub>2.5</sub>监测站资料，探究珠江三角洲局地PM<sub>2.5</sub>局地污染事件的气象成因，为局地污染预警预报提供支撑。

## 1 数据来源与方法

### 1.1 数据来源

污染物数据选用2013—2017年珠江三角洲地区56个空气质量国控监测站点的逐小时PM<sub>2.5</sub>浓度数据（图1）。气象数据选用珠江三角洲1038个高密度自动气象站的风速、风向数据以及珠江三角洲2部边界层风廓线仪的风、温探测数据。

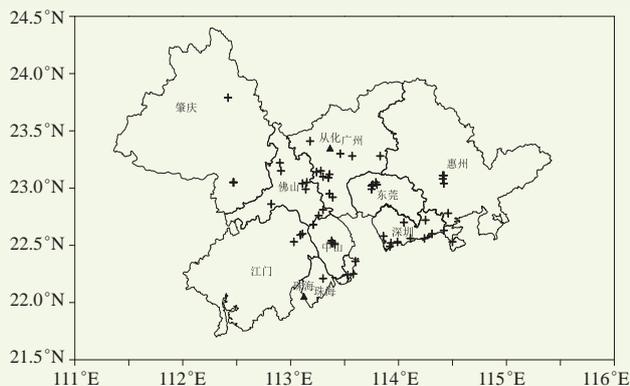


图1 珠江三角洲56个空气质量国控监测站点分布(+)和2个风廓线雷达站点(▲)

Fig. 1 56 environmental monitoring sites distribution and two wind profile radars in the Pearl River Delta

### 1.2 研究方法

PM<sub>2.5</sub>污染面积的计算方法：采用反距离加权法将56个站点的PM<sub>2.5</sub>数据，插值成1 km×1 km的网格，每个网格的面积为1 km<sup>2</sup>。珠江三角洲总面

积为1.1×10<sup>5</sup> km<sup>2</sup>，插值范围为111.9°—115.4°E、21.8°—24.4°N，总格点数为343×253。将网格值大于115 μg/m<sup>3</sup>的数累计起来，得到PM<sub>2.5</sub>污染面积。

以逐时PM<sub>2.5</sub>浓度观测数据为基础，将珠江三角洲污染事件定义如下：在某一时刻，全区域监测到PM<sub>2.5</sub>浓度≥115 μg/m<sup>3</sup>的面积在1~2500 km<sup>2</sup>时，为一次局地污染事件；PM<sub>2.5</sub>≥115 μg/m<sup>3</sup>的面积大于2500 km<sup>2</sup>时为一次大范围污染事件。某日珠三角范围内出现1 km<sup>2</sup>以上PM<sub>2.5</sub>≥115 μg/m<sup>3</sup>的污染事件，为一个污染日。某日24 h只出现局地污染事件（污染面积1~2500 km<sup>2</sup>），未出现大范围污染事件（污染面积≥2500 km<sup>2</sup>），为局地污染日。

## 2 结果与讨论

### 2.1 珠江三角洲污染分布特征

广东省地形地貌复杂，珠江三角洲平原周围被山地、丘陵和台地包围，地势较低，南临南海，从北到南，地势逐渐降低，同时地面属性不同导致热力条件差异大（图2）。2013—2017年珠江三角洲地区平均PM<sub>2.5</sub>污染日空间分布不均（图3），局地性明显，佛山地区为污染中心，平均污染日60 d以上。四周城市平均污染日逐渐递减：肇庆地区年平均污染日

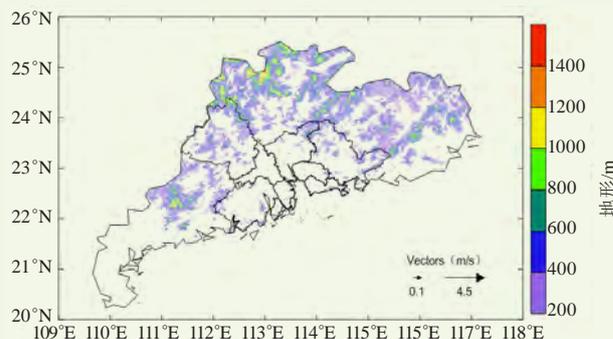


图2 广东省地形高度分布（图中标出了珠三角城市群的行政区划区）

Fig. 2 Terrain height distribution in Guangdong Province

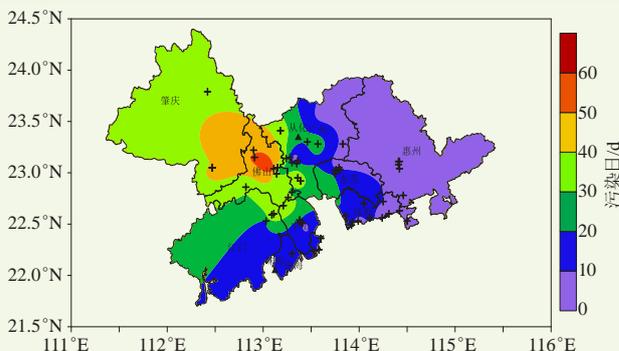


图3 2013—2017年珠江三角洲总平均PM<sub>2.5</sub>污染日  
Fig. 3 Average days of PM<sub>2.5</sub> pollution in the Pearl River Delta from 2013 to 2017

30~50 d; 江门、中山北部, 东莞、广州西部地区平均污染日为30~40 d, 江门、中山、东莞南部, 深圳西部以及广州中部地区平均污染日为20~30 d, 深圳东部、东莞东北、广州东部和惠州地区平均污染日在20 d以下。

## 2.2 局地 PM<sub>2.5</sub> 污染时间分布特征

统计表明, 2014—2017年珠江三角洲PM<sub>2.5</sub>局地污染日呈上升趋势(图4)。2014年局地污染日为77 d, 占有污染日的45%, 2017年局地污染日增加至133 d, 占有污染日的比例也增加至79%。可见在总污染日减少的基础上, 局地污染不降反升, 是珠江三角洲新的污染特征。

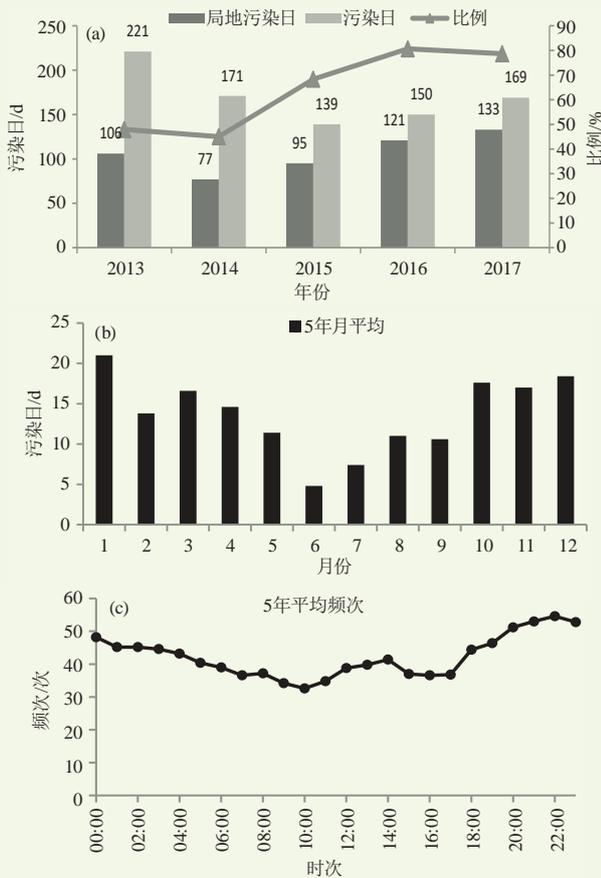


图4 2013—2017年珠江三角洲局地PM<sub>2.5</sub>污染事件年(a)、月(b)和日(c)变化

Fig. 4 Annual (a), monthly (b) and daily (c) variation of local PM<sub>2.5</sub> pollution incident frequency in Shenzhen

2013—2017年珠江三角洲局地PM<sub>2.5</sub>污染平均每年有106 d, 冬半年发生频率高于夏半年, 1—3月、10—12月平均频次17 d/月, 夏半年4—9月平均污染10 d/月。这与珠江三角洲的季风气候有关, 冬半年受东北季风及冷空气的影响, 静稳天气多发, 大气边界层高度低, 容易发生局地污染。夏季西南季风带来了海上洁净的

空气, 对流旺盛, 降雨量大, 污染物的清除效率高。珠江三角洲局地PM<sub>2.5</sub>污染事件在夜间至次日凌晨(即19时—次日03时)发生的频次高(图4c), 每年平均45次以上。主要是由于在夜间易形成晴空辐射逆温层, 大气稳定, 污染多发, 逆温一般在日出后随大气对流加强而消失, 污染频次也随之减小。

## 2.3 局地 PM<sub>2.5</sub> 污染的环流特征分析

2013—2017年统计局地污染出现的大尺度环流分类可分为3大类, 分别为大陆冷高压底部(包括均压场、高压脊、冷锋前), 主要出现在秋冬季节, 约占54%; 海上变性高压脊, 主要出现在春季, 约占27%; 副热带高压或热带气旋外围下沉气流(夏季、秋季)19%。

### 2.3.1 大陆冷高压底部型

冬季当珠江三角洲地区处于冷高压底部时, 弱冷空气影响不断渗透到珠江三角洲, 容易形成静稳的污染天气。2017年1月4—6日珠江三角洲500 hPa受副热带高压北缘的西南风影响, 850 hPa受暖性高压脊控制, 地面处于冷高压底部, 受东北风弱冷空气影响, 整层大气上暖下冷, 层结稳定(图5a)。地面风场微弱, 风速在2.0 m/s以下。在山体、平地、城市等

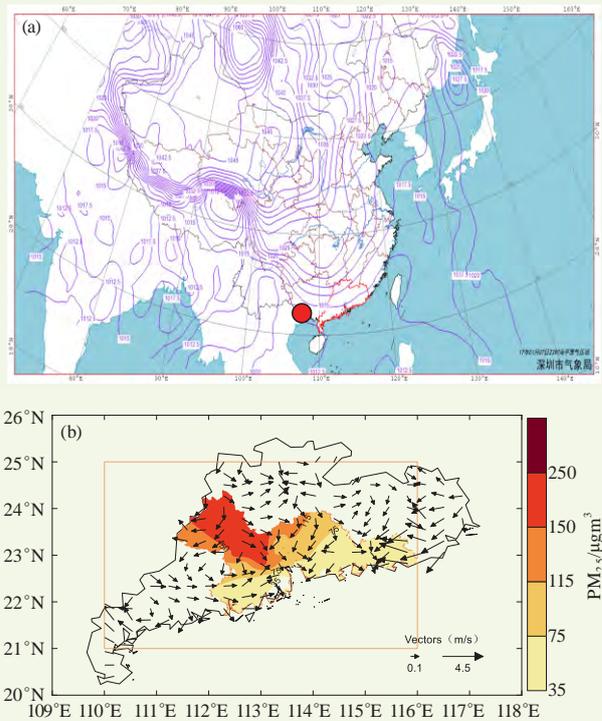


图5 2017年1月4日08时海平面气压场(a)和20时地面风场与污染物浓度(b)

Fig. 5 Sea level pressure field at 08:00 BT (a), surface wind field and pollutant concentration at 20:00 BT (b) 4 January 2017

不同热力条件影响下，北、东、西3个方向三股气流在广佛一带汇合，形成地面弱辐合（图5b），污染物也在这里汇合，佛山、肇庆、广州一带出现重度—严重局地污染，1月5日三水站最高PM<sub>2.5</sub>浓度达274 μg/m<sup>3</sup>。

广州从化风廓线监测边界层内风速弱（图6a），

底层以偏北风为主，上层以偏南风为主，形成弱的局地环流，污染在边界层内回旋，不宜扩散。同时在200 m以下从06时开始出现持续的偏北风下沉气流，导致PM<sub>2.5</sub>浓度从07时开始持续增加，23时升至129 μg/m<sup>3</sup>，形成局地污染事件（图6b）。

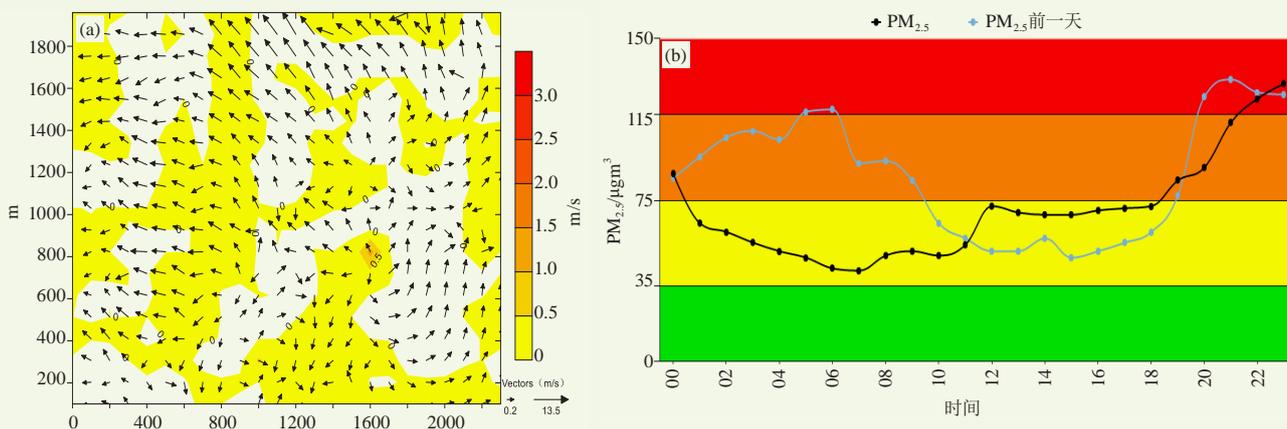


图6 2017年1月4日广州从化风廓线水平风速（箭头）、垂直速度（填色）(a)及广州市监测站PM<sub>2.5</sub>浓度日变化(b)

Fig. 6 Horizontal wind and vertical velocity of wind profile radars (a) at Conghua and daily variation of PM<sub>2.5</sub> concentration (b) at Guangzhou On 4 January 2017

### 2.3.2 海上变性高压脊型

春季、秋季冷空气强度较冬季减弱，一般以东移为主，当冷空气主体移至海上，珠江三角洲地区受海上变性高压脊影响，地面气压梯度小，甚至出现均压场等静稳天气，容易形成PM<sub>2.5</sub>污染天气。2017年5月7日受地面变性高压脊控制（图7a），冷空气主体东

移至海上，东路弱冷空气回流影响珠江三角洲，在珠江三角洲佛山、肇庆一带有偏东风、偏北风气流的辐合。地面辐合线与PM<sub>2.5</sub>污染中心一致（图7b），辐合线阻挡了污染物进一步向南扩散，有利于形成污染中心。

虽然从化风廓线监测200 m以下有弱的上升运

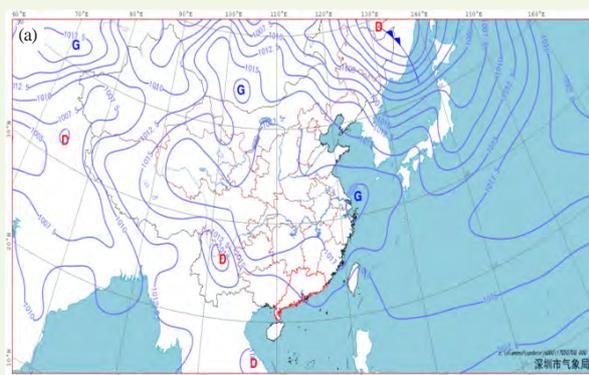


图7 2017年5月7日08时海平面气压场 (a) 和14时地面风场、PM<sub>2.5</sub>浓度 (b)

Fig. 7 Sea level pressure field at 08:00 BT (a), surface wind field and pollutant concentration at 14:00 BT (b), on 7 May 2017

动，但是200~1800 m大范围的下沉气流抑制了污染的扩散，形成局地污染时间（图8a），佛山三水云海东站在00—07时PM<sub>2.5</sub>浓度超标，出现轻度至重度污染，08时之后随着降雨的出现，污染物浓度也迅速下降（图8b）。

### 2.3.3 副热带高压型

秋季当副热带高压控制广东，珠江三角洲处于大

陆副热带高压东北侧的西北下沉气流影响时，容易出现PM<sub>2.5</sub>污染天气。2017年9月17日受大陆副高边缘的西北风影响（图9a），中山、珠海、深圳等地出现轻度至重度污染。珠海唐家站在11—14时出现中度—重度污染，PM<sub>2.5</sub>最高浓度达182 μg/m<sup>3</sup>。从地面风场来看，主导风为西北风，由于地形的热力不均造成了地面风向的变化，12时前后粤东沿海产生了东北风与西

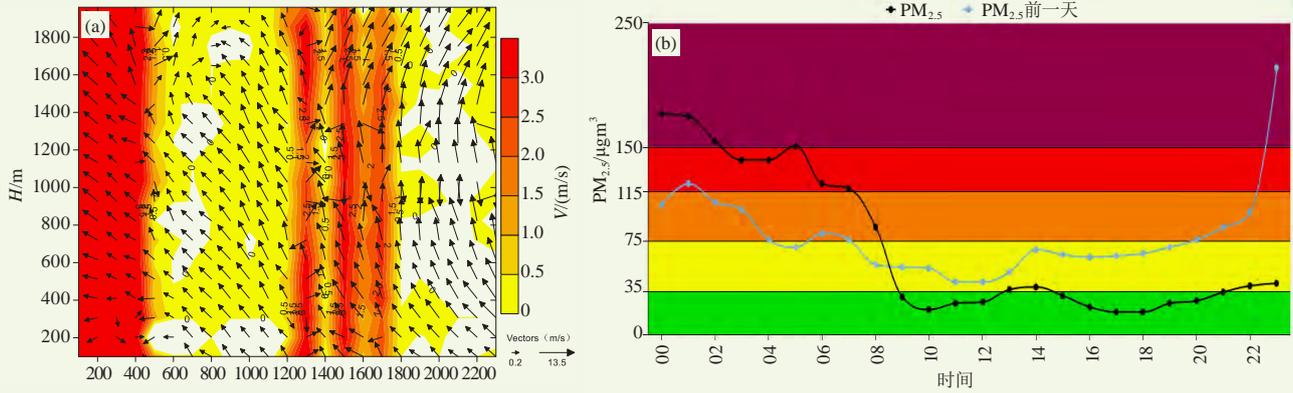


图8 2017年5月7日从化风廓线水平风速(箭头)、垂直速度(填色)(a)和佛山三水云东海PM<sub>2.5</sub>浓度日变化(b)  
Fig. 8 Horizontal wind and vertical velocity of wind profile at Conghua (a) and daily variation of PM<sub>2.5</sub> concentration at Foshan Shanshui-Yundonghai Station (b) on 7 May 2017

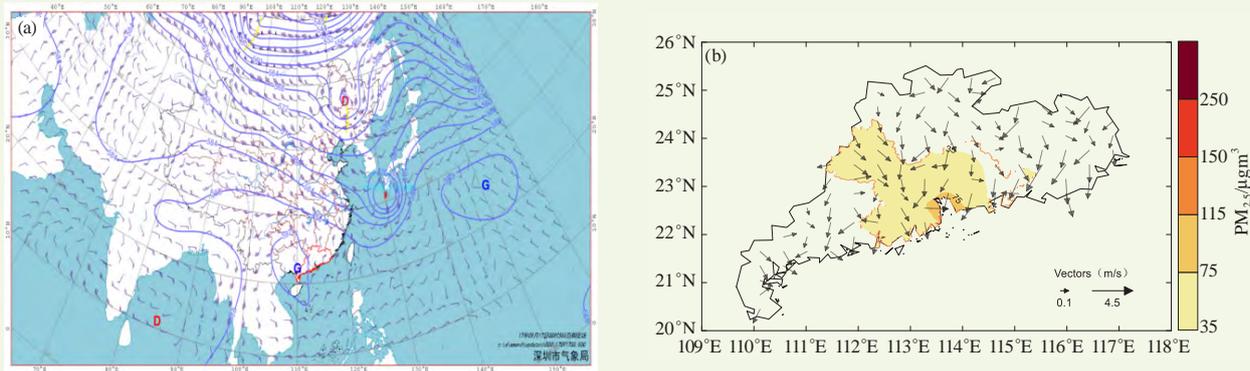


图9 2017年9月17日08时500 hpa位势高度、风场(a)和12时地面风场、PM<sub>2.5</sub>浓度和地形高度(b)  
Fig. 9 Sea level pressure field at 08:00 BT (a), surface wind field and pollutant concentration at 12:00 BT (b), on 17 September 2017

北风在珠江口的辐合,阻止了污染物水平扩散,有利于局地污染事件的形成(图9b)。

从边界层垂直风速来看(图10a),边界层多个时刻都有下沉气流,中午前后下沉气流达到地面,与最大污染出现的时间(12时)一致(图10b)。由此可见,偏北风下沉气流抑制了污染的垂直扩散,同时地面辐合线阻止了污染物的水平扩散,形成了局地污染事件。

由上述分析可知,PM<sub>2.5</sub>局地污染受局地环流影响大,山体、平原、海洋和城市的热力条件不同,地面风场发生变化,形成地面弱辐合线,阻止了污染的水平扩散,同时弱的偏北风从广东省北部山地倾泻下来,在珠江三角洲形成边界层内的下沉气流,抑制了污染的垂直输送,导致近地面的污染出现。

### 3 结论

本文对珠江三角洲2015—2017年局地PM<sub>2.5</sub>污染事件的时空分布特征及典型事件的局地环流特征进行了集中分析,结果表明:

1) 珠江三角洲局地PM<sub>2.5</sub>污染空间分布不均,以佛山和肇庆地位为污染中心,向四周递减。佛山年均污染在60 d以上;肇庆年均污染在40~50 d;江门、中山北部,东莞、广州西部年均污染在30~40 d,江门、中山、东莞南部,深圳西部,广州中部年均污染为20~30 d,深圳东部、东莞东北、广州东部,惠州年均污染在20 d以下。

2) 珠江三角洲PM<sub>2.5</sub>局地污染多发,冬半年发生频率高于夏半年,夜间至次日凌晨(19时—次日03时)发生的频次高。

3) 珠江三角洲局地污染发生的天气形势可分为:大陆冷高压底部型、海上变性高压脊性和副热带高压性和热带气旋外围下沉气流影响型。

4) PM<sub>2.5</sub>局地污染事件受局地气流影响大,在大尺度静稳天气影响下,地面风场受山体、平原、海洋、城市等热力条件不同的影响,形成地面弱辐合线,阻止了污染的水平扩散,同时弱的偏北风从广东省北部山地倾泻下来,形成边界层内的下沉气流,抑

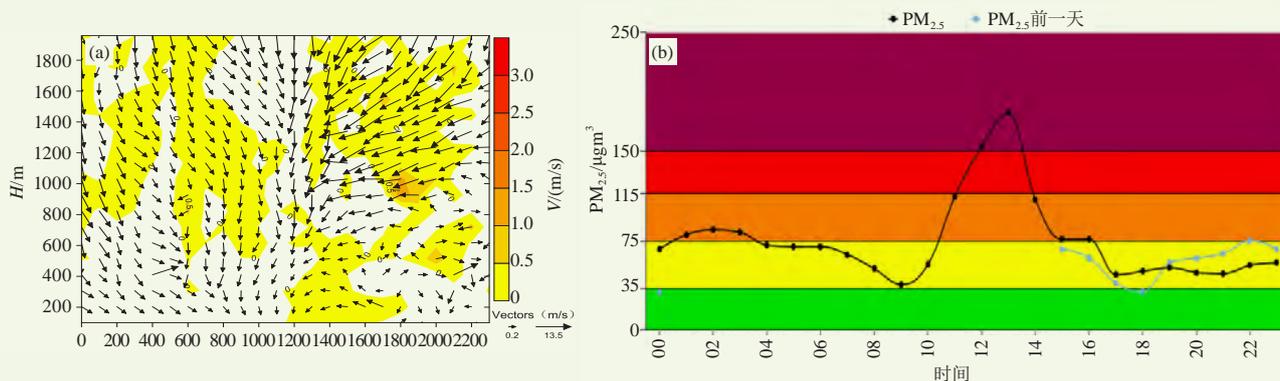


图10 2017年9月17日珠海风廓线水平风速(箭头)、垂直速度(填色)(a)和珠海唐家PM<sub>2.5</sub>浓度(b)  
Fig. 10 Horizontal wind and vertical velocity of wind profile at Zhuhai (a) and daily variation of PM<sub>2.5</sub> concentration at Zhuhai Tangjia Station (b) on 17 September 2017

制了污染的垂直输送, 导致近地面的污染出现。

### 参考文献

[1] 陈燕, 蒋维楣, 郭文利, 等. 珠江三角洲地区城市群发展对局地大气污染物扩散的影响. 环境科学学报, 2005, 25(5): 700-710  
 [2] 刘振鑫, 刘树华, 胡非, 等. MM5和WRF对北京地区低层大气局地环流模拟能力的对比研究. 中国科学(地球科学), 2012, 42(2): 301-312.  
 [3] 刘树华, 刘振鑫, 李炬, 等. 京津冀地区大气局地环流耦合效应的数值模拟. 中国科学(地球科学), 2009, 39(1): 88-98.  
 [4] 吕雅琼, 杨显玉, 马耀明. 夏季青海湖局地环流及大气边界层特征的数值模拟. 高原气象, 2007, 26(4): 686-692.  
 [5] 李维亮, 刘洪利, 周秀骥, 等. 长江三角洲城市热岛与太湖对局地环流影响的分析研究. 中国科学(地球科学), 2003, 33(2): 97-104.  
 [6] 马艳, 高荣珍, 苗世光, 等. 城市化对青岛夏季海陆风环流影响的个例分析. 环境科学学报, 2013, 33(6): 1690-1696  
 [7] 邱晓暖, 范绍佳. 自动气象站资料在海陆风等局地环流研究中的应用. 中山大学学报(自然科学版), 2013, 52(2): 133-136.  
 [8] 吴蒙, 吴兑, 范绍佳. 基于风廓线仪等资料的珠江三角洲污染气象

条件研究. 环境科学学报, 2015, 35(3): 619-626  
 [9] 邱晓暖, 范绍佳. 海陆风研究进展与我国沿海三地海陆风主要特征. 气象, 2013, 39(2): 186-193.  
 [10] 范绍佳, 王安宇, 樊琦, 等. 天气系统对珠江三角洲大气边界层影响及其模拟// 中国气象学会2007年年会大气成分观测、研究与预报分会场论文集. 2007.  
 [11] 赵敬国, 王式功, 张天宇, 等. 兰州市大气重污染气象成因分析. 环境科学学报, 2015, 35(5): 1547-1555.  
 [12] 杨洋. 局地环流对京津冀地区大气污染影响研究. 南京: 南京信息工程大学, 2014.  
 [13] Flocas H, Kelessis A, Helmis C, et al. Synoptic and local scale atmospheric circulation associated with air pollution episodes in an urban Mediterranean area. Theoretical and Applied Climatology, 2009, 95(3-4): 265-277.  
 [14] Bigot S, Delbarre H, Augustin P, et al. Atmospheric pollution dispersion under sea breeze circulation in the Nord-Pas-de-Calais region: Surface data analysis and remote sensing with a lidar system. Pollution Atmosphérique, 2003, (179): 391-404.

## 深圳气象发展呈现快速良好发展态势

深圳气象发展指数(MDI)以“创新、协调、绿色、开放、共享”发展理念为指导,构建了以发展环境支撑为基底、以发展质量为核心、以发展效益为外围辐射贡献力的气象服务发展评价模型。分析表明,2010年以来,深圳气象发展呈现快速良好发展态势。2017年MDI为223.32,较2016年增长了8.62%,较2010年增长了123.32%。党的十八大以来,MDI年均增长12.16%,较全国水平高1.86%。其中,生态气象服务力指数高于全国4.37%,气象创新驱动动力、气象环境支撑力指数分别高于全国3.39%和4.37%。



——摘自《深圳气象发展指数报告》;  
中国气象局发展研究中心、新华社共同发布, 2018年