

大气环流 10~25 d 振荡 对佛山市冬半年空气质量的影响*

黄静^{1,2}, 樊琦^{1,2}, 简茂球^{1,2}, 司徒淑婷³, 邓思欣³

1. 中山大学大气科学学院 / 季风与环境研究中心 / 广东省气候变化与自然灾害研究重点实验室, 广东 珠海 519082
2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519082
3. 佛山市环境监测中心站, 广东 佛山 528000

摘要: 基于 2016/2017 年冬半年佛山市的空气质量数据以及大气环流资料, 分析了它们的显著变化周期以及大气环流对空气质量的影响过程。结果表明: 1) 大气环流、空气质量指数及污染物浓度具有显著的 10~25 d 周期变化特征。地表气压的逐日变化超前空气质量指数及污染物浓度变化 4~5 d, 前者是空气质量潜在的预测因子。2) 在冬半年, 当东亚区域大气环流 10~25 d 分量的地表高压系统、低层的偏北风以及伴随的下沉运动自北向南及东南移动至华南地区, 可使华南上空的大气层较稳定, 容易出现晴空少云天气, 有利于大气污染物的光化学反应以及不利于污染物的扩散, 从而导致污染物浓度升高及空气质量变差。3) 当 10~25 d 分量的地表低压系统、低层的偏南风以及伴随的上升运动自北向南及东南移动至华南地区, 则可得华南的大气层较不稳定, 容易出现阴雨天气, 有利于空气中污染物的净化 and 稀释, 污染物浓度降低, 空气质量变好。当南移的高压系统取代低压系统控制华南, 则空气质量又开始变差。

关键词: 大气环流; 10~25 d 振荡; 空气质量; 影响机理

中图分类号: X16 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137(2022)03-0076-07

Impacts of atmospheric 10-25-day oscillations on the air quality of Foshan in winter seasons

HUANG Jing^{1,2}, FAN Qi^{1,2}, JIAN Maoqiu^{1,2}, SITU Shuping³, DENG Sixin³

1. School of Atmospheric Sciences / Center for Monsoon and Environment Research / Guangdong Province Key Laboratory for Climate Change and Natural Disaster Studies, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China
2. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519082, China
3. Foshan Environmental Monitoring Center, Foshan 528000, China

Abstract: This study investigates the dominant cycles of air pollutant concentrations and meteorological elements and the influence of atmospheric circulation on air quality, based on the datasets of air quality and meteorological variables in the winter seasons of 2016/2017 in Foshan. The atmospheric variables, the air quality index, and the concentration of pollutants exhibit prominent 10-25-day oscillations.

* 收稿日期: 2021-02-08

录用日期: 2021-03-11

网络首发日期: 2021-05-21

基金项目: 国家自然科学基金(42088101, 42075181); 广东省气候变化与自然灾害研究重点实验室基金(2020B1212060025)

作者简介: 黄静(1996年生), 女; 研究方向: 季风与海-气相互作用; E-mail: huangj366@mail2.sysu.edu.cn

通信作者: 简茂球(1965年生), 男; 研究方向: 季风与海-气、陆-气相互作用, 热带大气环流, 区域气候变化, 能量与水分循环; E-mail: eesjmq@mail.sysu.edu.cn

lations. The surface air pressure shows a leading change 4-5 days ahead of the air quality index (AQI) and pollutant concentration, suggesting the former may be a potential predictor of air quality. In the winter seasons, as the surface high-pressure system, the northerly wind in the lower level layer and the accompanying sinking motion in 10-25-day components, move southward from north to South China, the atmospheric stratification over South China becomes more stable. Then, the clear sky and less cloud weather will easily appear, which is conducive to the photochemical reaction of atmospheric pollutants and not conducive to the diffusion of pollutants, increasing pollutant concentration and the air quality becomes worse. In another case, as the 10-25-day components of the surface low-pressure system, the southerly wind in the lower level and the accompanying upward motion move to South China from the north, the atmospheric stratification over South China will be more unstable and prone to cloudy or rainy weather, which is conducive to the purification and dilution of air pollutants. Then the concentration of pollutants will be reduced and the air quality will be improved. As the low-pressure system is replaced by the southward high-pressure system over South China, the air quality begins to deteriorate again.

Key words: atmospheric circulation; 10-25-day oscillation; air quality; influence mechanism

珠江三角洲(简称珠三角)是我国经济最发达、城市化水平最高的三大城市群之一。经济的快速发展造成所排放的大气污染物急剧增加,由此也产生了诸多复杂的大气污染过程和问题^[1-2]。观测表明,近年来珠三角地区的臭氧污染日趋严重^[3-6],且臭氧已成为该地区首要污染物之一^[7]。事实上,空气质量的好坏不仅与污染物的排放有关,还与(天气)气象条件密切相关^[7-10],如臭氧浓度超标多出现在晴空少云、日照充足、气温较高、相对湿度和风速较小的天气。有研究表明,大气污染物浓度具有多种显著的周期变化,如华北上空PM_{2.5}浓度呈4~7 d的周期性变化^[11-13]。此外,李梓铭等^[13]分析北京城区PM_{2.5}变化周期时发现其还存在1、14和40~60 d的明显周期性。纪忠萍等^[14]对2002年11月~2004年9月广州市逐日空气污染指数和污染物浓度的周期分析也揭示出准单周、准双周和30~60 d的周期性变化,且冬半年污染物浓度较夏半年高,进一步证实了大气环流多尺度过程对污染天气周期性变化的影响。珠三角地区位于季风气候区,大气环流和气象要素变化具有多种显著周期,其中准双周和30~60 d是两种显著的季节内振荡周期^[15-17],且以前者为主。

目前对珠三角地区空气污染物浓度变化的周期性分析比较缺乏,特别是对大气环流及气象要素周期变化与大气污染物浓度周期变化的超前滞后关系,以及大气环流低频振荡如何影响污染物浓度的过程尚不清楚。为此,本文以珠三角佛山市作为典型研究对象,基于2016年10月~2017年3

月佛山市环境监测站的污染物浓度及空气质量指数(AQI),试图揭示该地区污染情况的周期变化规律及其与大气环流演变之间的联系,特别是在低频振荡周期上的联系,探讨相关的影响过程及机理。另外,选择冬半年,是因为冬半年污染物浓度相对较高,污染较为严重。2016年10月~2017年3月佛山空气质量有2 d属重度污染, AQI=200~300; 4 d属中度污染, AQI=151~200。

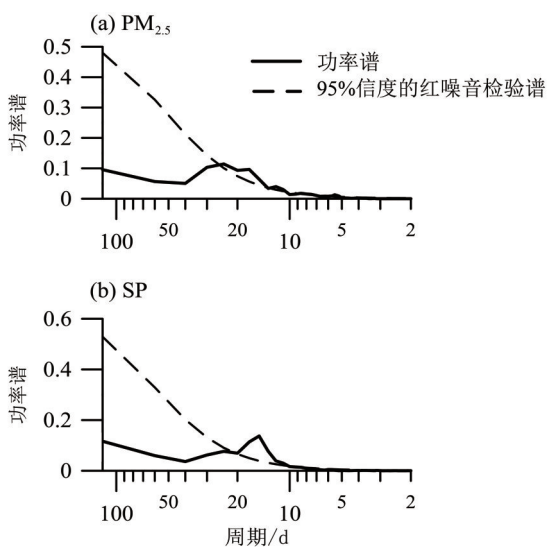
1 资料和方法

1) 佛山市8个环境监测站日平均空气质量指数(AQI)值, PM_{2.5}、臭氧(O₃)的浓度(均指质量浓度),并以8个测站的数据平均值代表整体状况。

2) 欧洲中期天气预报中心(ECMWF)提供的ERA-Interim逐日风场及地表气压资料^[18],分辨率为1.5°×1.5°。所用资料时段均为2016年10月1日至2017年3月31日。本文进行带通滤波所用的方法为一阶Butterworth带通滤波方法^[19]。此外,取两地点(22.5°N, 112.5°E和22.5°N, 114°E)的地表气压平均值近似代表佛山市的气压。

2 空气质量和大气环流的功率谱分析

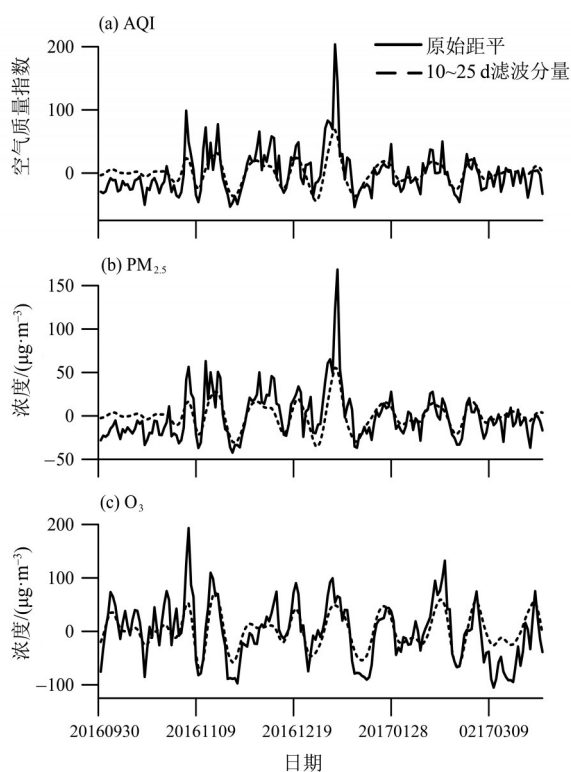
对2016年10月~2017年3月佛山市逐日PM_{2.5}浓度以及地表气压作功率谱分析,发现它们的显著变化周期均为10~25 d(如图1)。另外,对AQI和臭氧浓度的功率谱分析显示,它们的显著变化周期也是10~25 d(图略)。结果表明大气环流场与佛山市的空气质量等变量的周期变化具有高度的一致性。图2



The dashed lines denote the spectra for red noise at 95% confidence level.

图1 2016年10月~2017年3月佛山市逐日PM_{2.5}浓度(a)和地表气压(SP)(b)的功率谱

Fig. 1 Power spectra of daily PM_{2.5} concentration (a) and surface pressure (b) in Foshan from October 2016 to March 2017



The solid lines denote the raw anomalies, and the dashed lines denote the 10-25-day components.

图2 2016年10月~2017年3月佛山市逐日空气质量要素距平曲线

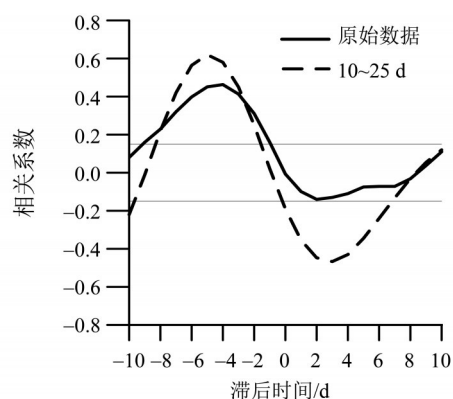
Fig. 2 Time series of daily anomalies of air quality variables in Foshan from October 2016 to March 2017

给出了佛山市的AQI、PM_{2.5}和O₃浓度距平(相对于时段平均值的距平)曲线及对应的10~25 d滤波分量。由图可知,各要素的原始距平曲线和滤波曲线是非常吻合的,这进一步证实佛山市空气质量要素的时间变化在研究时段具有显著的10~25 d振荡特征。

为了进一步了解气压和空气质量周期变化的位相匹配特征,我们计算了佛山市地表气压和PM_{2.5}浓度的超前-滞后的相关系数(图3)。结果表明,无论是基于原始资料还是10~25 d滤波分量,地表气压的变化在超前PM_{2.5}浓度4~5 d具有最显著的正相关,而在气压落后PM_{2.5}浓度2~3 d有显著的负相关,但最显著的负相关系数的绝对值要小于最显著的正相关系数。换言之,当地表气压出现峰值时,那么4~5 d后PM_{2.5}浓度也将达到最大值,反之亦然。对地表气压和AQI、臭氧浓度分别作超前-滞后相关分析,也得出类似的结果(图略)。这些结果表明地表气压的逐日变化对空气质量及污染物浓度的变化是一个非常好的潜在预测因子,也说明大气环流的变化可能影响着空气质量的变化,具体影响过程将在下一节讨论。

3 大气环流10~25 d振荡对空气质量的影响过程

基于上一节的地表气压分别和PM_{2.5}浓度、AQI及O₃浓度之间的超前-滞后相关关系,我们根据佛



横坐标负值表示气压超前PM_{2.5};

水平直线表示95%信度水平的相关系数阈值。

The negative x -axis value denotes the leading days of SP ahead of PM_{2.5}. The horizontal lines denote the threshold values for the correlation coefficient significant at 95% confidence level.

图3 佛山市地表气压与PM_{2.5}浓度的原值和10~25 d分量的超前-滞后相关曲线

Fig. 3 Lead correlation coefficients between SP and raw PM_{2.5} concentration, 10-25-day component of PM_{2.5}, respectively

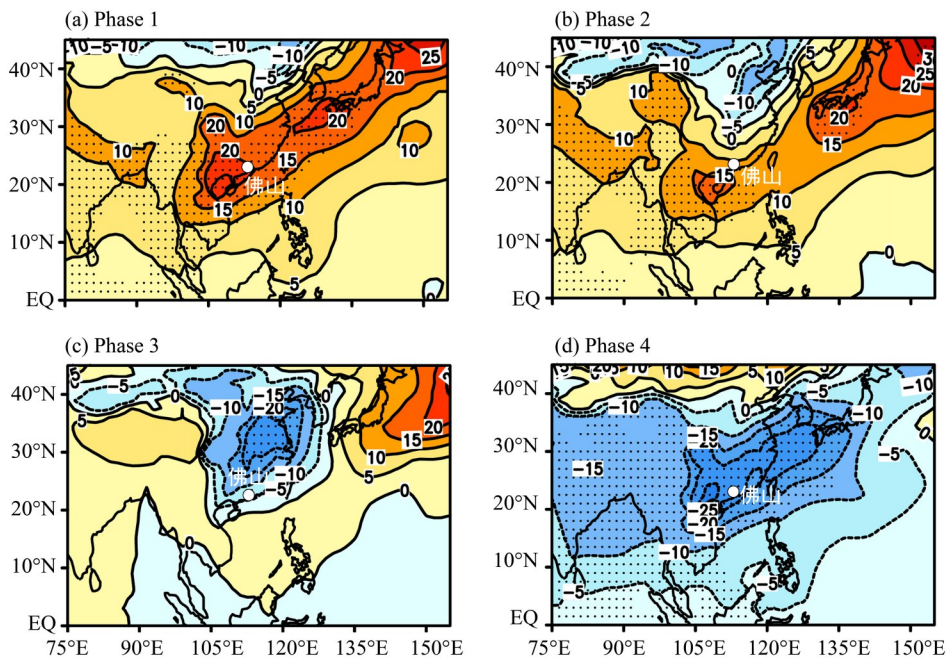
山市PM_{2.5}浓度的10~25 d滤波曲线(图2b), 可以划分出绝对值超过一倍标准差的7次极大值(峰值)和6次极小值(谷值)出现的时间如表1所示。然后以峰值出现时间为参考时间0 d, 分别找出其之前由负转为正负值出现日期(定义为位相1), 以及峰值前后的e折时间(即峰值前后最接近峰值的1/e倍(e为自然数)的数值对应的日期, 分别代表峰值过程的发展位相和衰减位相), 并分别定义为位相2和位相4, 而峰值日期本身则定义为位相3, 因此位相1~4分别表示峰值过程的转换

表1 PM_{2.5}浓度10~25 d分量的极值日期
Table 1 Extremum date of 10-25-day component of PM_{2.5} concentration

极大值日期	极小值日期
06/11/2016	10/11/2016
17/11/2016	25/11/2016
04/12/2016	15/12/2016
21/12/2016	29/12/2016
05/01/2017	14/01/2017
25/01/2017	24/02/2017
02/03/2017	

位相、发展位相、成熟位相和衰减位相。对谷值过程可类似去找出其位相1~4的对应日期。平均而言, 峰值演变过程的位相1~4分别出现在峰值前4.3、2.6、0 d及峰值后3.3 d; 而谷值演变过程的位相1~4则分别出现在谷值前的4.5、3、0 d及谷值后2.5 d。依据上述划分得到的4个位相对应时间, 可分别合成峰值和谷值过程4个位相对应的10~25 d滤波大气环流场, 以探讨大气环流10~25 d振荡的演变特征及其对佛山市空气质量的影响过程。

图4和图5分别给出了以佛山市PM_{2.5}浓度的10~25 d振荡峰值过程合成的地表气压、低层风场和垂直运动的10~25 d分量的时间演变。在位相1, 即峰值前4~5 d, 地表气压10~25 d分量的高压系统位于日本到中国南方一带, 其中心轴线呈东北-西南走向, 与冬季影响我国东部的锋面系统的空间走向有非常好的一致性, 华南受高压中心控制(图4a), 并在上述地表高压中心带及其北侧上空伴随有下沉运动和偏北风(图5a), 表明华南上空的大气层结较稳定及晴空少云, 这种大气环流背景不利于空气污染物的扩散及稀释, 却有利于接收阳光照及污染物的生成^[7-9], 且华南上空的

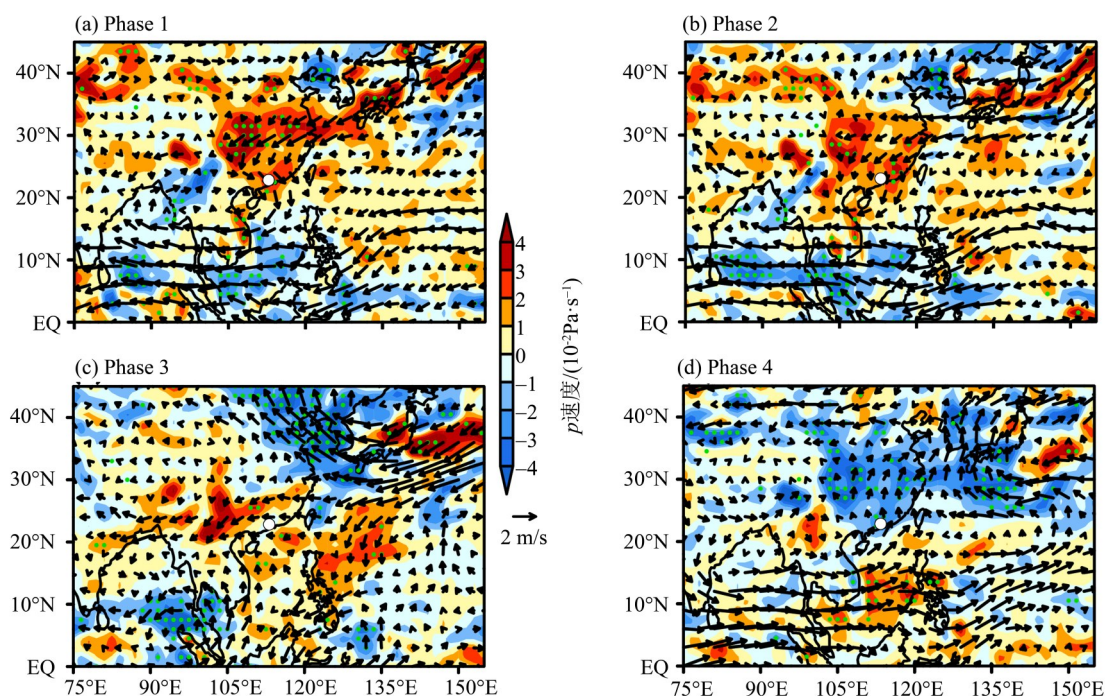


(a~d) 分别代表位相1~4的合成结果, 打点区表示通过95%置信度的t检验。

Stippling denotes surface pressure anomalies significant over the 95% confidence level based on the *t* test, and the closed circle in the coastal areas of South China indicates the location of Foshan.

图4 佛山市PM_{2.5}浓度极大值过程合成的地表气压10~25 d分量(单位: 10 Pa)

Fig. 4 Compositd 10-25-day component of surface pressure (units: 10 Pa) during Phase 1 to Phase 4 for the maximum cases of PM_{2.5} concentration, respectively



打点区表示垂直速度通过95%置信度的 t 检验。

Stippling denotes the p -velocity anomalies significant over the 95% confidence level based on t -test.

图5 同图4, 但为10~25 d滤波的850 hPa风场和700 hPa的 p 坐标垂直速度

Fig. 5 Same as Fig. 4, but for the 10-25-day component of 850 hPa wind and 700 hPa p -velocity

北风分量还有利于将北侧的污染物向南输送, 因此在排放源不变的背景下, 可使得佛山市的大气污染物如 O_3 和 $PM_{2.5}$ 等浓度上升以及空气质量变差。在2 d后的发展位相 (位相2), 东亚的地表高压系统中心带南移, 华南沿海地区仍然受高压系统覆盖, 并在我国北方又有准双周变化分量的低压系统出现及南移 (图4b), 我国南方上空维持有偏北风及下沉运动 (图5b), 这种大气环流背景可使佛山市的大气污染物浓度上升以及空气质量变差状态得以维持。到峰值位相 (位相3), 东亚地表高压系统向东南移动入海, 北方的低压系统同时南移覆盖我国东部地区, 南边界 (零线) 移到南海北部 (图4c), 此时, 华南上空为偏东风控制, 下沉运动明显减弱 (图5c)。这种环流背景已转向有利于空气污染物的稀释净化以及空气质量的好转, 这也正好对应着佛山市污染物浓度及AQI指数达到峰值的时间。在峰值后约3 d的衰减位相 (位相4), 我国南方地区为低压系统所覆盖 (图4d), 其上空伴随有上升运动及偏南风 (图5d), 大气环流条件继续有利佛山市空气质量的好转。可见, 大气环流的10~25 d振荡对佛山市冬半年的空气质量具有显著的影响。

以佛山市 $PM_{2.5}$ 浓度的10~25 d振荡谷值过程合

成的地表气压、850 hPa风场和700 hPa垂直运动的10~25 d分量的时间演变如图6和图7所示。在谷值前4~5 d的位相1, 地表气压场的低压系统覆盖南亚和东亚大部分地区, 中心位于华南地区 (图6a), 我国东部上空为偏南风及上升运动控制 (图7a), 此时华南地区上空的偏南风及上升运动容易导致该地区出现阴雨天气, 有利于空气中污染物的稀释净化和空气质量的好转。到峰值位相2, 东亚的低压南移至华南和南海北部, 长江以北地区为地表高压系统控制 (图6b), 华南 (包括佛山市) 上空继续维持上升运动及偏南风 (图7b), 大气环流条件继续有利佛山市空气质量的好转。到谷值位相 (位相3), 我国东部已完全受南移的高压系统控制 (图6c), 长江以北地区出现偏北风和下沉运动, 而华南上空的偏南风及上升运动减弱甚至在佛山市及附近地区上空出现弱下沉运动 (图7c), 此时的环流形势将不再有利于佛山市地区空气污染物继续净化, 这也正好对应着污染物浓度及AQI指数达到谷值的时间。在谷值后约3 d的位相4, 我国南方为地表高压系统控制 (图6d), 华南沿海地区上空为下沉运动及偏西风 (图7d), 大气环流条件开始有利于佛山市大气污染物浓度的升高和空气质量的变差。

根据上述图4~7的结果, 只要在高压/低压控制下, 佛山市的空气质量便持续变差/好, 且污染物峰值出现在高压转为低压时, 谷值则出现在低压转为高压控制时。这表明佛山市的大气污染物

可能更多是来源于局地, 也因此而导致污染物浓度的增加/降低主要取决于局地的大气扩散条件, 而外来污染物输入的影响可能是次要的。

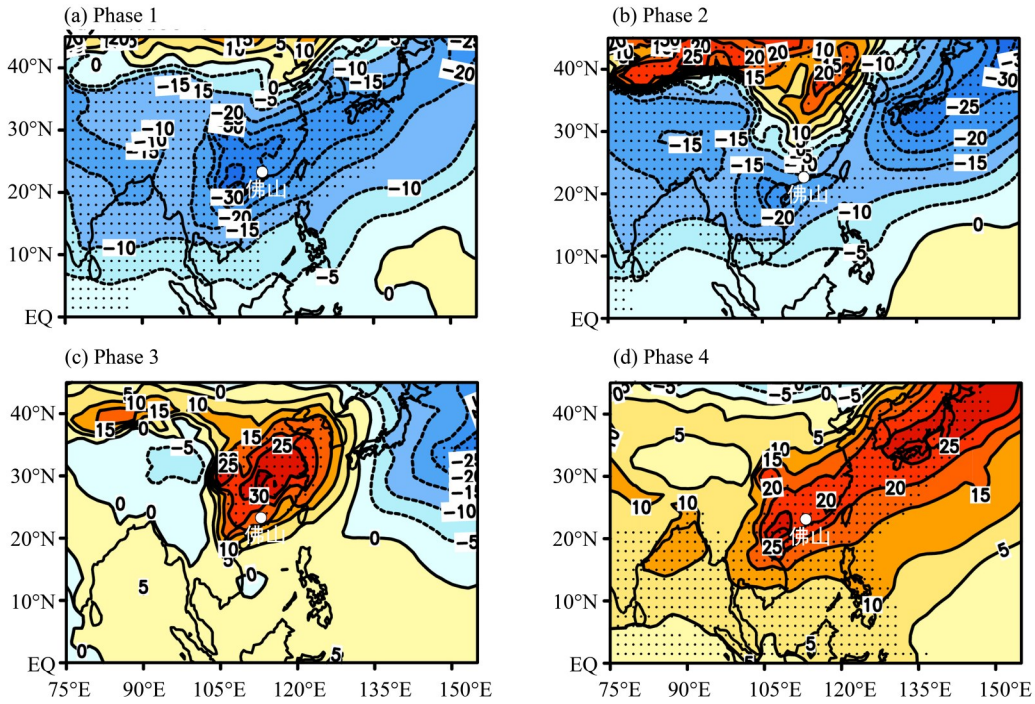


图6 同图4, 但为极小值过程合成结果
Fig. 6 Same as Fig. 4, but for the minimum cases

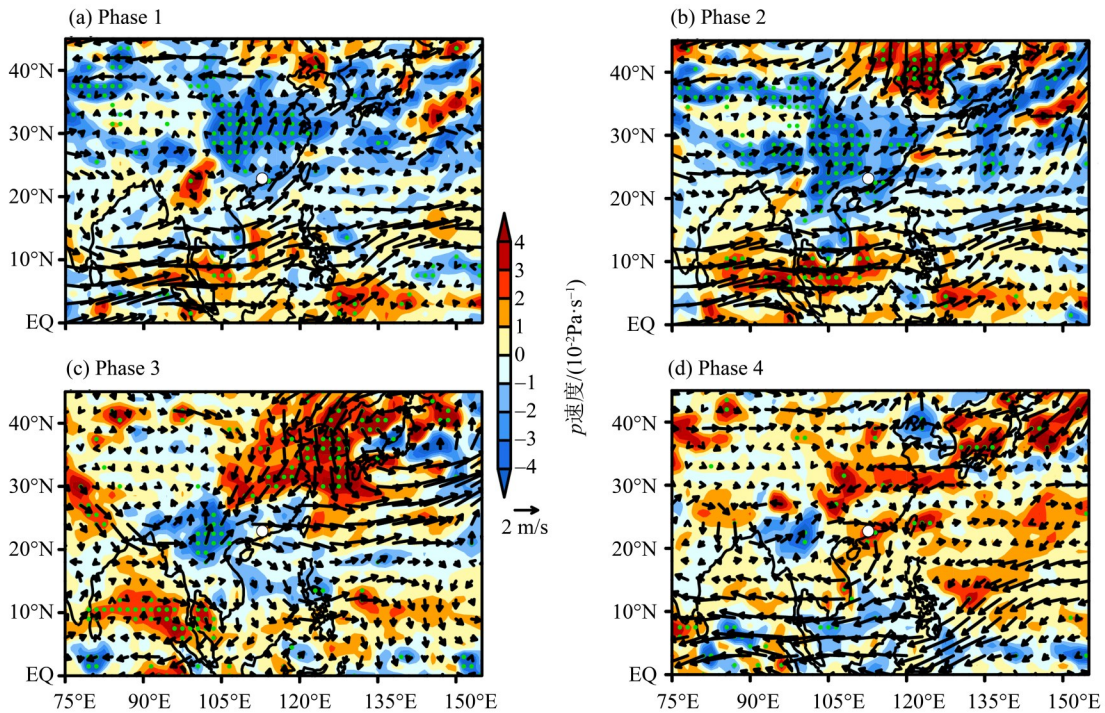


图7 同图5, 但为极小值过程合成结果
Fig. 7 Same as Fig. 5, but for the minimum cases

4 结 论

本文基于2016年10月~2017年3月冬半年佛山地区的空气质量指数、PM_{2.5}及臭氧浓度数据,以及ERA-Interim再分析大气环流资料,分析了它们的显著变化周期以及大气环流对空气质量的影响过程,得到以下一些结论:

1) 大气环流、空气质量指数及污染物浓度具有10~25 d的显著周期变化。地表气压的逐日变化超前空气质量指数及污染物浓度变化4~5 d,前者可作为空气质量一个有效的潜在预测因子。

2) 冬半年,当东亚区域大气环流的10~25 d分量,包括地表的高压系统、低层的偏北风以及伴随的下沉运动自北向南及东南移动至华南地区,

使得华南地区的大气层结较稳定,容易出现晴空少云天气,有利于空气污染物的光化学反应以及不利于污染物的扩散,而导致污染物浓度升高以及空气质量变差。当上述系统移出华南陆地,及其北侧南移低压系统及上升运动的到来,佛山市的空气质量开始好转。

3) 在冬半年,当10~25 d分量的地表低压系统、低层的偏南风以及伴随的上升运动自北向南及东南移动至华南地区,使得华南的大气层结不稳定,容易出现阴雨天气,有利于空气中污染物的净化和稀释,而导致空气污染物浓度降低以及空气质量好转。随着低压系统的减弱南移以及自北边向南移动的高压系统的到来,华南的空气质量又开始变差。

参考文献:

- [1] CHAN C, YAO X. Air pollution in mega cities in China [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, 42(1): 1-4.
- [2] ZHANG Y H, HU M, LIU S C, et al. The special issue on PRIDE-PRD2004 campaign [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, 42(42): 6155-6156.
- [3] 张亮,朱彬,高晋徽,等. 长江三角洲夏季一次典型臭氧污染过程的模拟[J]. *环境科学*, 2015, 36(11): 3981-3988.
- [4] 陆克定,张远航,苏杭,等. 珠江三角洲夏季臭氧区域污染及其控制因素分析[J]. *中国科学:化学*, 2010, 40(4): 407-420.
- [5] 邓雪娇,周秀骥,吴兑,等. 珠江三角洲大气气溶胶对地表臭氧变化的影响[J]. *中国科学:地球科学*, 2011, 41(1): 93-102.
- [6] 刘建,吴兑,范绍佳,等. 前体物与气象因子对珠江三角洲臭氧污染的影响[J]. *中国环境科学*, 2017, 37(3): 813-820.
- [7] 王媛林,王哲,陈学舜,等. 珠三角秋季典型气象条件对空气污染过程的影响分析[J]. *环境科学学报*, 2017, 37(9): 3229-3239.
- [8] 耿福海,刘琼,陈勇航. 近地表臭氧研究进展[J]. *沙漠与绿洲气象*, 2012, 6(6): 8-14.
- [9] 李明华,甘泉,曹静,等. 惠州市臭氧污染特征及其与气象条件关系研究[J]. *热带气象学报*, 2019, 35(3): 324-331.
- [10] 权建农,徐祥德,贾星灿,等. 影响我国霾天气的多尺度过程[J]. *科学通报*, 2020, 65: 810-824.
- [11] QUAN J, GAO Y, ZHANG Q, et al. Evolution of planetary boundary layer under different weather conditions, and its impact on aerosol concentrations [J]. *Particuology*, 2013, 11(1): 34-40.
- [12] ZHANG Z, ZHANG X, GONG D, et al. Evolution of surface O₃ and PM_{2.5} concentrations and their relationships with meteorological conditions over the last decade in Beijing [J]. *Atmos Environ*, 2015, 108: 67-75.
- [13] 李梓铭,孙兆彬,邵颢,等. 北京城区PM_{2.5}不同时间尺度周期性研究[J]. *中国环境科学*, 2017, 37: 407-415.
- [14] 纪忠萍,罗森波,邝建新,等. 广州市空气污染的变化特征及预报[J]. *热带气象学报*, 2006, 22(6): 574-581.
- [15] 纪忠萍,谷德军,吴乃庚,等. 广东省前汛期暴雨与500 hPa 关键区准双周振荡[J]. *应用气象学报*, 2010, 21(6): 671-684.
- [16] 谷德军,纪忠萍,林爱兰,等. 广州逐日降水振荡及其延伸期预报的简谐波模型[J]. *热带气象学报*, 2013, 29(6): 899-906.
- [17] 陈思,简茂球. 影响华南前汛期降水异常的准双周振荡传播特征[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2015, 54(3): 130-137.
- [18] DEE D P, UPPALA, S M, SIMMONS A J, et al. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system [J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 2011, 137(656): 553-597.
- [19] MURAKAMI M. Large-scale aspects of deep convective activity over the GATE area [J]. *Mon Wea Rev*, 1979, 107: 994-1013.