

海口地区2018年2月持续低能见度过程的气象条件分析

艳艳 缪育聪[†] 李建 郭建平

中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081; [†] 通信作者, E-mail: miaoyucong@yeah.net

摘要 利用海口地区的能见度资料、地表气象观测、探空数据和再分析资料, 对2018年2月发生在海口和琼州海峡地区的持续低能见度过程的气象学成因进行分析。结果表明, 海口地区冬季的低能见度事件通常出现在暖湿条件下; 能见度与相对湿度、温度和热力稳定度呈显著的负相关关系, 与风速和边界层高度呈显著的正相关关系。海口地区空气质量良好, 其能见度与PM_{2.5}浓度间无显著的相关性, 这一特点与我国其他污染较重的地区有所不同。在925 hPa高度上, 当海口处于高压系统的南侧, 受到东北风控制时, 能见度状况较好; 当受东南风控制时, 来自海上的暖湿气流有利于低能见度事件的出现和维持。

关键词 海口; 低能见度; 环流场; 大气边界层

Meteorological Characteristics of Prolong Low-Visibility Events in Haikou during February 2018

YAN Yan, MIAO Yucong[†], LI Jian, GUO Jianping

State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081;

[†] Corresponding author, E-mail: miaoyucong@yeah.net

Abstract To understand the meteorological characteristics associated with the prolong low-visibility events occurring in Haikou and Qiongzhou Strait during February 2018, we systematically analyzed the visibility data, surface meteorological observations, sounding data and reanalysis data. It's found that the low-visibility events in winter in Haikou typically occurred under relatively warmer and moister conditions. In winter, the visibility of Haikou was significantly anti-correlated with relative humidity, temperature and thermal stability, and was significantly correlated with wind speed and boundary layer height. No significant correlation was found between visibility and PM_{2.5} concentration. At the 925 hPa level, when Haikou was located to the south of high-pressure system, good visibility could be observed associated with the northeasterly winds; in contrast, when Haikou was controlled by the southeasterly winds, the warm and moisture air mass could be brought to Haikou, favoring the occurrence of low-visibility events.

Key words Haikou; low-visibility; synoptic patterns; planetary boundary layer

能见度是反映大气透明度的一个指标, 指视力正常的人在当时天气条件下, 从天空背景中看到和辨认出目标物(黑色, 大小适度)轮廓的最大水平距离。能见度会受一些气象因子和大气污染程度的影响^[1-2], 如相对湿度、风速、边界层高度以及气溶

胶浓度等。其中, 相对湿度是影响能见度的重要因素之一。相对湿度的增加会促进吸湿性粒子的吸湿增长, 增加散射截面, 进而导致能见度降低。边界层高度、温度和风速等要素也会通过影响相对湿度和气溶胶浓度来间接地影响能见度^[3-6]。

国家重点研发计划(2017YFA0603501, 2017YFC1501701)、国家自然科学基金(41705002, 41771399, 41875181)和中国气象科学研究院基本科研业务费专项基金(2017Y002, 2017Z005)资助

收稿日期: 2018-10-08; 修回日期: 2019-05-01

由于能见度对交通安全影响很大,因此不少学者对能见度及其影响因子进行研究。侯灵等^[7]对南京市能见度的变化特征进行分析,发现能见度与相对湿度负相关,与风速正相关,与温度和气压的相关性较小。于兴娜等^[8]利用2014年的观测资料,研究南京北郊地区能见度与气溶胶浓度间的关系,得到能见度与相对湿度和PM_{2.5}浓度负相关的结论。张剑等^[9]对苏州市城区能见度的影响因子进行分析,结果显示能见度与黑碳气溶胶浓度显著相关。王淑英等^[10]研究北京地区的低能见度事件,发现能见度与湿度、温度、风速、SO₂和PM₁₀浓度显著相关。Xue等^[11]对上海地区能见度与污染物间的关系进行分析,指出能见度与NO₂, CO, PM_{2.5}和PM₁₀等污染物浓度负相关;上海地区在高温和强风条件下能见度较高,在低温、弱风和高湿条件下能见度较低。陈义珍等^[12]对广州市和北京市的能见度和气溶胶浓度的观测结果进行对比分析,证明PM_{2.5}和相对湿度是影响能见度的主要因子,不同湿度条件下两地PM_{2.5}与能见度的相关性有所不同。钱峻屏等^[13]认为,广东地区的低能见度事件主要与雾有关。楚建杰^[14]分析广州白云机场的一次低能见度过程,证实西南气流对其有强烈的影响。罗云峰等^[15]研究华南沿海地区能见度的长期变化特征,发现海口地区冬季能见度是四季中最差的。王俞莹等^[16]分析海口美兰机场冬季能见度的日变化特征,发现低能见度过程主要出现在上午,且持续时间较长。上述研究表明,影响能见度的因子很多,且不同地区存在差异,因此需要对重点区域或城市进行系统的研究,以便为相关地区低能见度事件的预报和应对提供科学依据。

海口市地处海南岛北部,北濒琼州海峡,年平均气温为24.2℃,年平均降水量为1684 mm,常年以东南风和东北风为主,夏季多为南风 and 西南风,

属于热带海洋性季风气候^[17],空气质量良好^[18]。除马鞍山(海拔222.2 m)、旧州岭(199.9 m)等山丘地势较高外,海口市绝大部分地区都在海拔100 m以下。2018年2月,海口地区和琼州海峡发生持续性大雾过程,连续数天内能见度不足1 km,严重影响琼州海峡的通航条件,造成历史上最严重的出岛车辆滞留事件^[19]。目前,关于海口和琼州海峡能见度的研究较少。本研究结合再分析资料和海口地区多源气象观测资料,对2018年2月的持续低能见度过程进行系统的分析。

1 数据和方法

本研究所用的气象观测资料由中国气象局国家气象信息中心提供,主要包括海口地区2018年2月的能见度、2 m气温、2 m相对湿度和探空数据(表1)。除探空数据外,其他气象资料均为逐小时记录数据。探空站每天观测两次(北京时间08时和20时)。此外,还使用中国环境监测总站提供的逐小时大气污染物浓度数据(表1)。为了研究大尺度环流场与局地能见度间的关系,本研究还使用美国国家环境预报中心提供的NCEP-FNL再分析资料(<http://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2/>),其水平分辨率为1°×1°,时间分辨率为6小时(北京时间02, 08, 14和20时)。由于不同资料的时间分辨率不同,为了便于比较,本研究主要分析北京时间08时和20时的数据,日均值为这两个时次数据的平均值。为了研究边界层的结构与能见度间的关系,我们利用探空观测的位温垂直廓线,计算边界层高度(boundary layer height, BLH)和热力稳定性(lower tropospheric stability, LTS)两个参量^[20-22]。大气边界层位于对流层底部,受下垫面的强烈影响,其厚度随时间和空间的变化而变化,变化幅度从几百米到几千米^[23-24]。由于边界层顶部附近常常存在逆温层结,

表1 海口市地面气象站、高空气象站及空气质量监测站信息

Table 1 Information of surface meteorological station, sounding station and pollution monitoring stations in Haikou

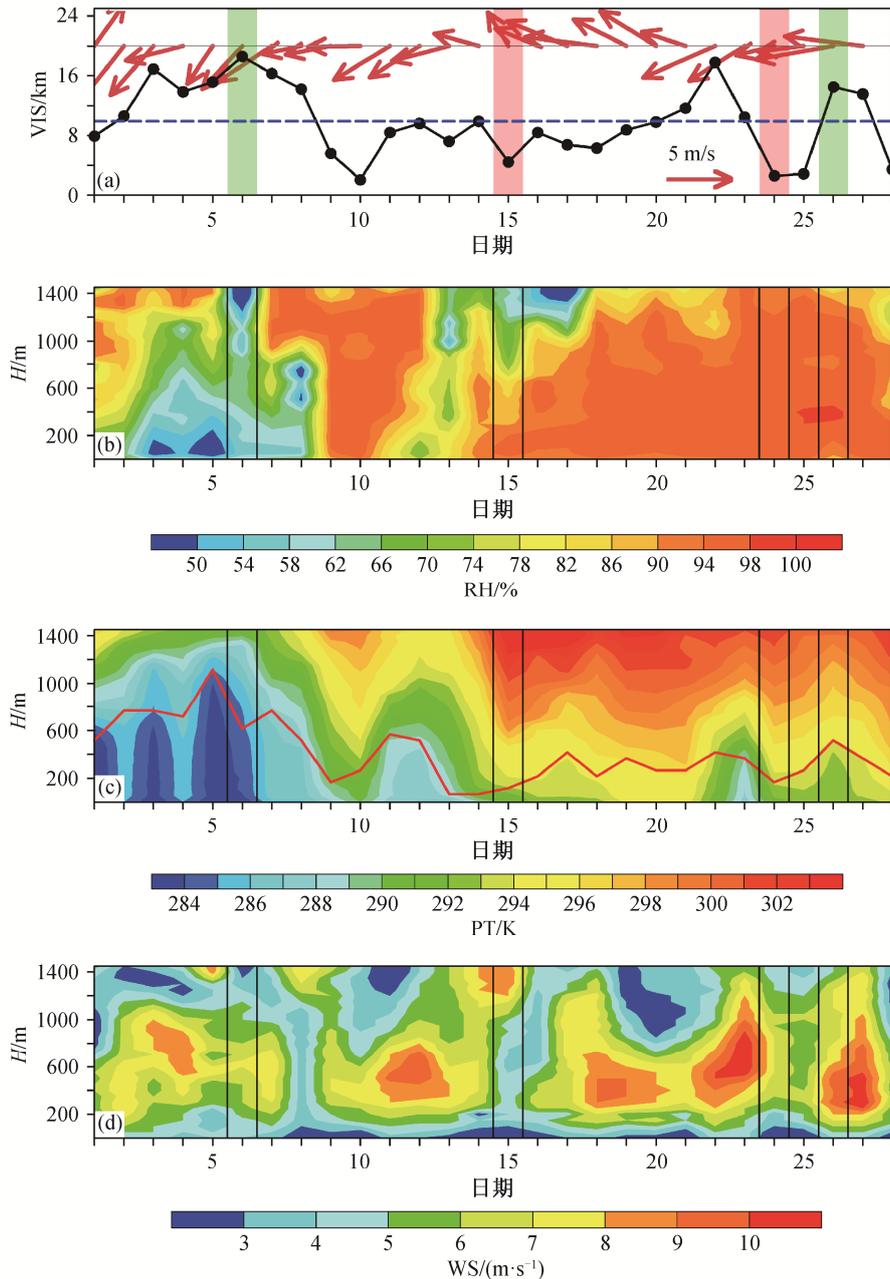
观测站类型	纬度/(°N)	经度/(°E)	观测要素	观测频次
地面气象站	20.00	110.25	2 m 温度, 2 m 湿度, 10 m 风速, 能见度	逐小时
高空气象站	20.00	110.25	温度, 湿度, 风速, 气压	每日两次
	19.97	110.61		
	20.06	110.34		
空气质量监测站	20.00	110.35	PM _{2.5} 浓度	逐小时
	20.03	110.33		
	19.88	110.26		

因此使用位温增值法估算边界层高度^[25], 即当某一高度的位温比其下方所有观测层的最低值高 1.5 K 时, 定义这个高度为边界层高度。该方法已广泛用于边界层结构和过程的相关研究^[5,22,25-28]。热力稳定度定义为距离地面 1200 m 高度与 100 m 高度间的位温差值^[20,22]。

2 结果与讨论

2.1 能见度与局地气象条件的关系

图 1(a) 给出海口地区 2018 年 2 月能见度的逐日变化情况。可以看出, 月初(2—8 日)的能见度相对较好, 基本上在 10 km 以上。8—10 日, 能见度很快降到 2 km 以下, 之后数日维持在较低的水平。月



(a)中红色箭头为 100 m 高度水平风矢量, 蓝色虚线为 10 km 能见度的参照线, 红(绿)色填充区分别指示两次典型的低(高)能见度过程; (c)中红线给出边界层高度的逐日变化

图 1 海口地区 2018 年 2 月能见度(VIS) (a)、相对湿度(RH) (b)、位温(PT) (c)和水平风速(WS) (d)的逐日变化
 Fig. 1 Time series of observed visibility (a), relative humidity (RH) (b), potential temperature (PT) (c) and horizontal wind speed (WS) (d) in Haikou in February 2018

末,能见度略有改善,21—23日和26—27日的能见度都大于10 km。与能见度的变化趋势相反,海口地区近地面温度和湿度在2月呈现由低到高的变化过程(图1(b)~(c)),即低能见度事件常出现在暖湿条件下。如图1中显示的两次低能见度事件,近地面相对湿度都超过95%,温度较高,且伴随南风或东风。这些特征与图1中显示的两次高能见度过程明显不同,表明海口地区的低能见度事件与特定的气象条件有关。

为了解不同因子对海口地区能见度的影响,本文对2 m温度(T)、2 m相对湿度(RH)、100 m风速(WS)、边界层高度(BLH)、热力稳定度(LTS)和 $PM_{2.5}$ 浓度6个潜在影响因子的相关性进行分析,结果见图2。可以看出,能见度与2 m相对湿度显著负相关($R=-0.67, p<0.05$);热力稳定度以及2 m温度也与能见度显著负相关,相关系数分别为-0.51和-0.41;能见度与100 m风速和边界层高度显著正相关,相关系数达到0.60和0.66。当边界层高度较低且风速较小时,边界层内的垂直湍流和水平扩散能力都相对较弱,有利于维持近地层的暖湿状态,使得低能见度事件得以出现或维持。

从图2看出,海口地区空气质量良好,整个2

月的平均 $PM_{2.5}$ 浓度小于 $25 \mu g/m^3$,能见度与 $PM_{2.5}$ 浓度间无显著的相关性,这与其他气溶胶污染较严重的地区有所不同,如南京、上海和北京等地区能见度与气溶胶浓度负相关^[8,10-12]。因此,海口地区冬季能见度有显著影响的因子主要有温度、相对湿度、风速、边界层高度和热力稳定度。

为了进一步了解上述气象因子与能见度的关系,我们对2018年2月的能见度日值进行排序,利用能见度的25百分位数(Bottom 25%)和75百分位数(Top 25%)定义两种极端的能见度状况:当能见度大于75百分位数(14.2 km)时,为“良好”的能见度状况;当能见度小于25百分位数(6.3 km)时,则为“较差”的能见度状况。图3对比2 m温度(T)、2 m相对湿度(RH)、100 m风速(WS)、边界层高度(BLH)和热力稳定度(LTS)5个因子在能见度良好和较差状态下的数值。2018年2月,海口地区良好和较差状态下对应的能见度均值分别为16.2和3.9 km。当较差能见度事件发生的时候,海口地区2 m相对湿度的变化范围为90%~97%,均值为94%,良好能见度事件对应的相对湿度则明显偏小(均值为70%)。较差能见度事件对应的2 m温度均值为 $18.5^\circ C$,也明显高于良好能见度的情况。另外,较

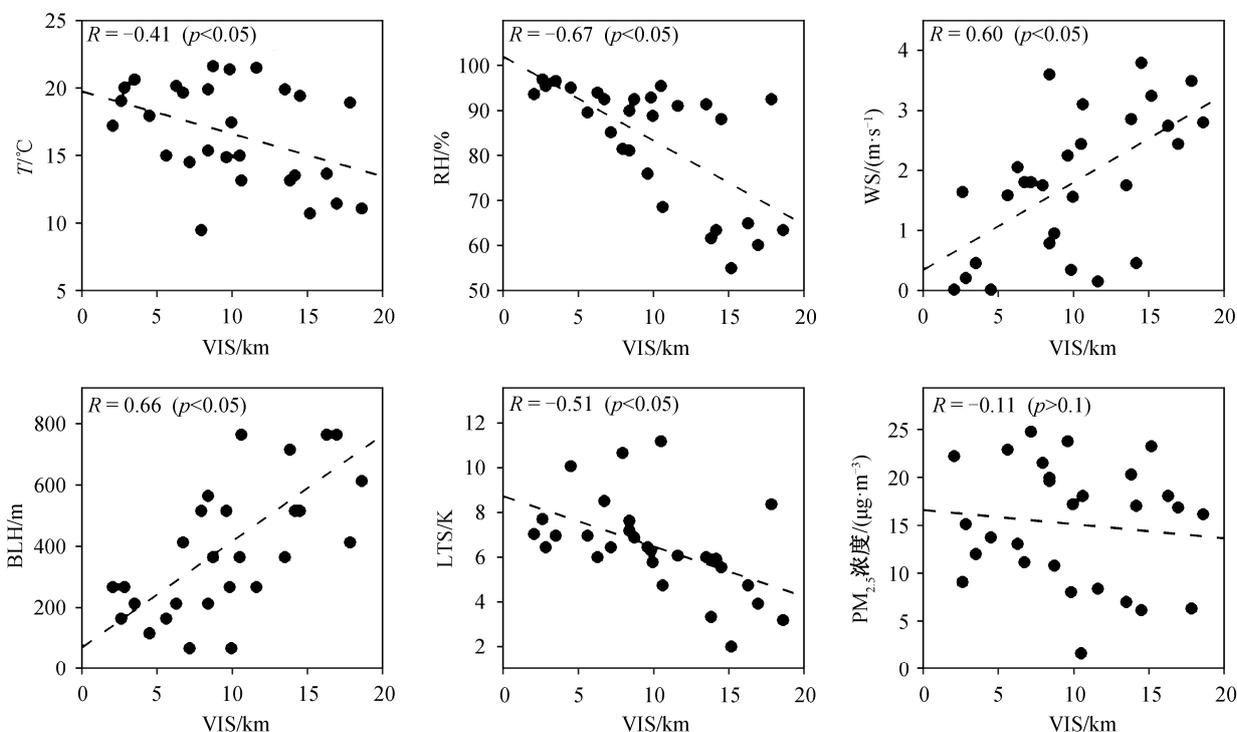
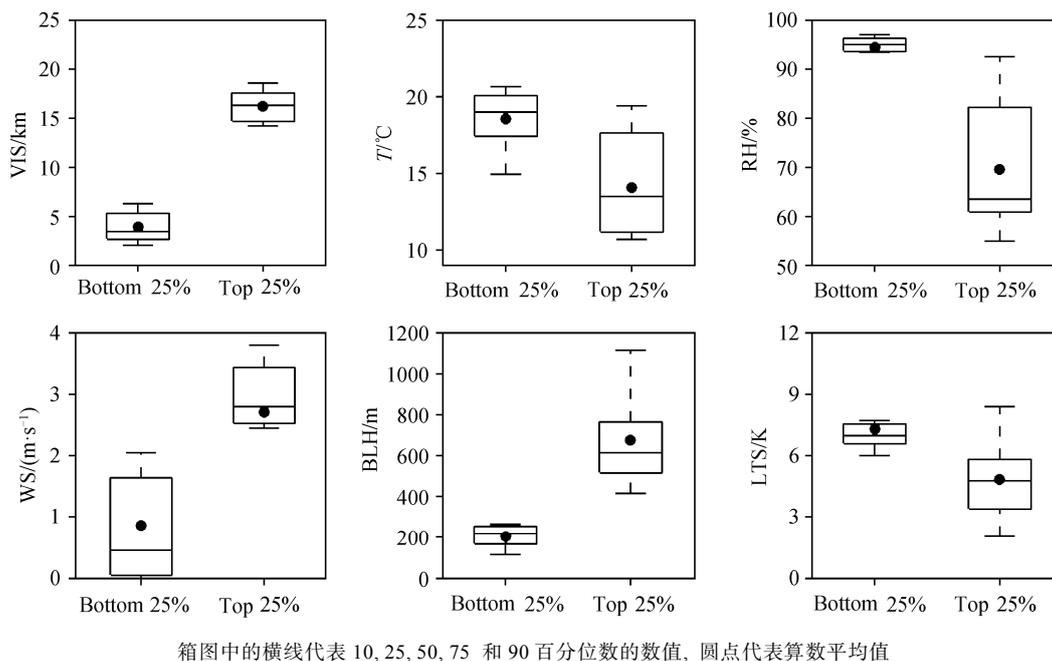


图2 海口地区2018年2月能见度与不同气象因子的相关性
Fig. 2 Correlation relationships between daily visibility and other variables in Haikou in February 2018



箱图中的横线代表 10, 25, 50, 75 和 90 百分位数的数值, 圆点代表算数平均值

图 3 海口地区 2018 年 2 月较差能见度事件(Bottom 25%)与良好能见度事件(Top 25%)的不同气象因子对比

Fig. 3 Box-whisker plots showing the different characteristics between Top 25% and Bottom 25% visibility in Haikou in February 2018

较差能见度事件的风速均值不足 1.0 m/s, 远小于良好能见度对应的风速。在垂直方向上, 较差能见度事件的边界层高度远低于良好能见度事件的边界层高度, 这与其较强的热力稳定度有关。基于这些显著相关的气象因子, 可以拟合得到一个关于能见度的多元线性回归方程:

$$EST = 29.020 + 0.941T - 0.492RH + 1.938WS - 0.003BLH - 0.650LTS,$$

其中, EST 代表能见度的估算值, T , RH 和 WS 分别

代表 2 m 温度、2 m 相对湿度以及 100 m 风速。如图 4 所示, 拟合方程可以很好地预测海口地区 2 月份的能见度变化过程, 估算值与实测值的相关系数高达 0.80。在 2018 年 2 月, 海口地区共有 16 天的能见度低于 10 km, 拟合方程可以准确地估算出其中的 14 天。整体而言, 该拟合方程可以根据局地气象条件准确地估算出海口地区能见度的状况, 但估算值与实测值仍存在差异, 表明海口地区的能见度不仅受局地过程的影响, 还可能受大尺度环流特征和

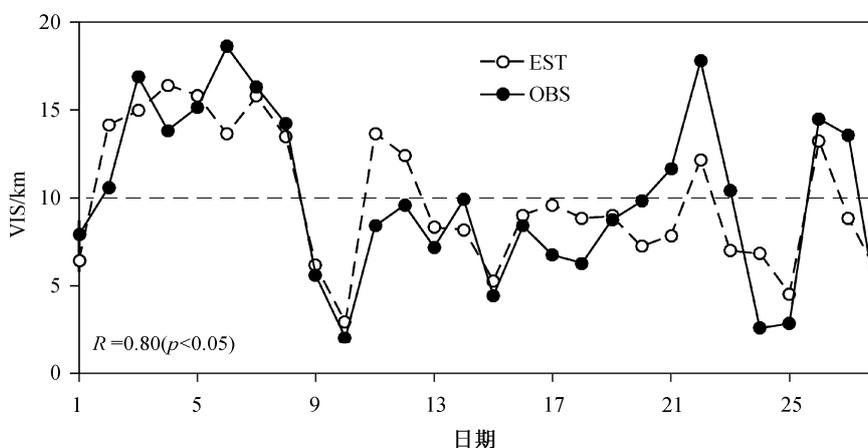
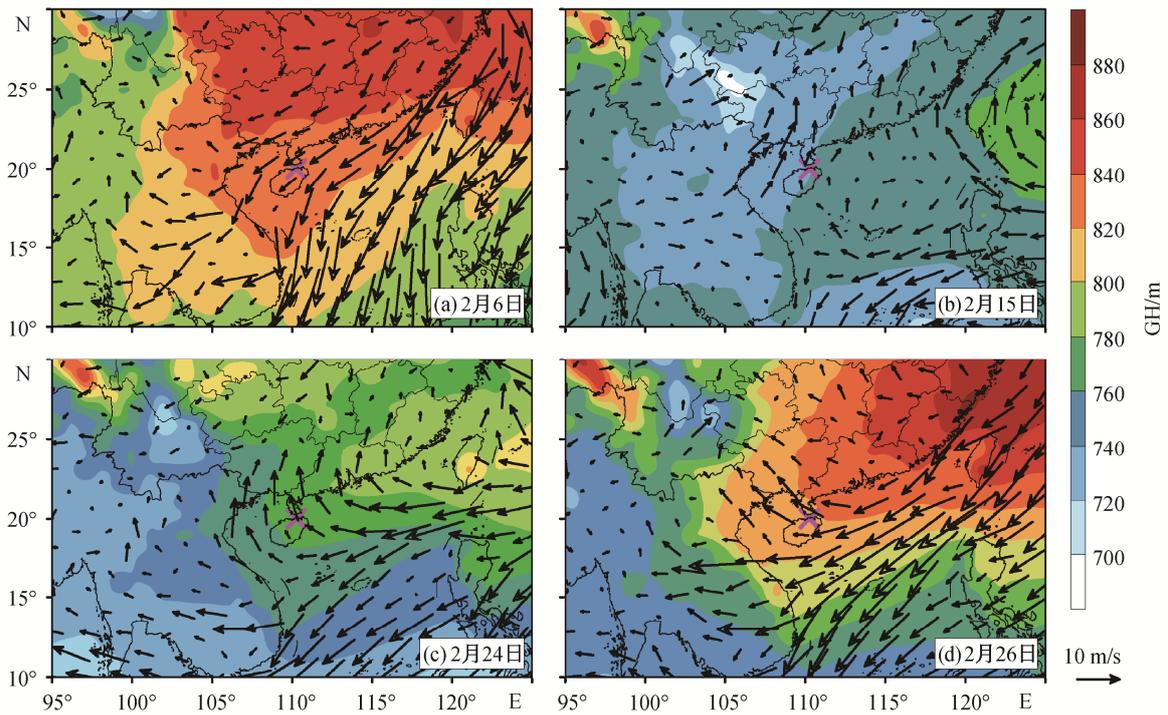


图 4 海口地区 2018 年 2 月能见度实测值(OBS)与线性拟合值(EST)的时间序列

Fig. 4 Time series of observed (OBS) and estimated (EST) visibilities in Haikou during February 2018



红色叉号标注海口的位置, 下同

图 5 南海地区 2018 年 2 月 6, 15, 24 和 26 日 925 hPa 位势高度场和水平风场的空间分布
 Fig. 5 Spatial distribution of 925 hPa geopotential height (GH) and overlaid with wind vectors fields on 6, 15, 24 and 26 February 2018 in the South China Sea

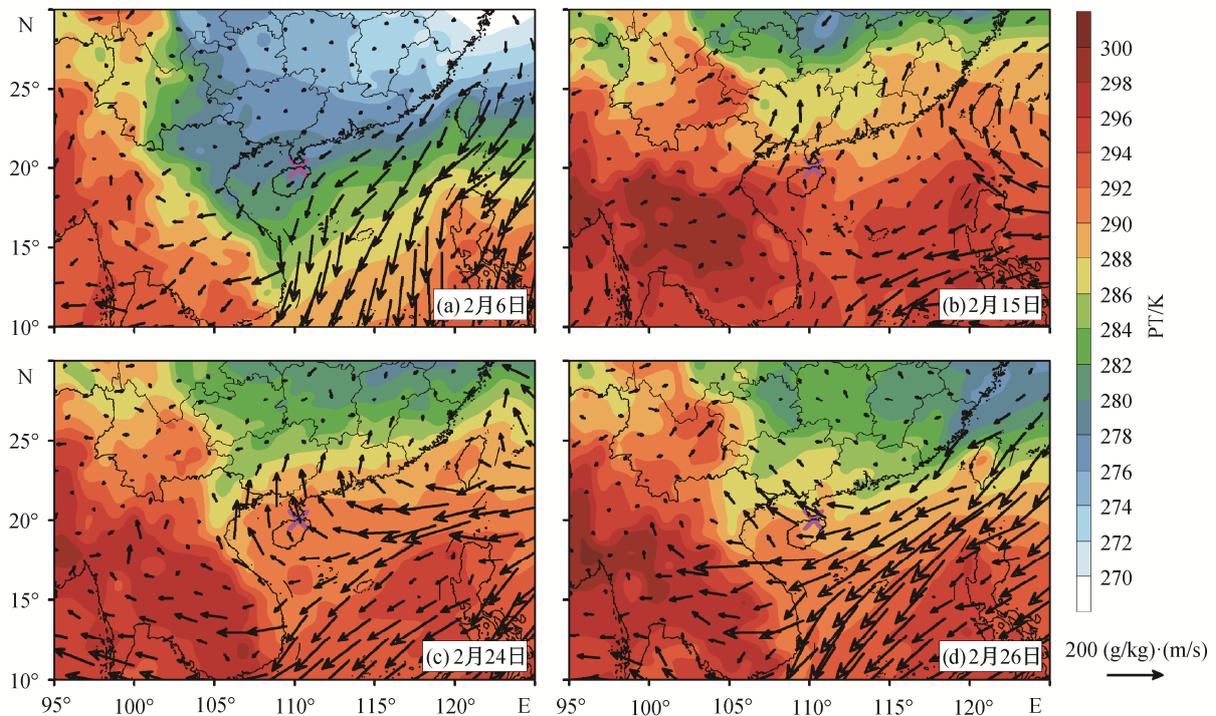


图 6 南海地区 2018 年 2 月 6, 15, 24 和 26 日 925 hPa 位温和水汽通量的空间分布
 Fig. 6 Spatial distribution of 925 hPa potential temperature (PT) and moisture flux vectors fields on 6, 15, 24 and 26 February 2018 in the South China Sea

非线性过程的影响。

2.2 大尺度环流对能见度的影响

如图 1(a)所示,海口地区 2018 年 2 月的能见度在月初和月末较高,而在其他时间偏低。因此,本文分别在月初和月末选取一个高能见度的个例(6日和 26日),与 2 月中段的低能见度个例(15日和 24日)进行比较。

2月6日和26日,海口地区的能见度分别高达 18.6 和 14.5 km。图 5(a)和(d)分别给出这两日的 925 hPa 位势高度场,可以发现海口地区处于高压系统的南侧,受东北风控制。图 6(a)和(d)分别给出这两日的 925 hPa 位温场和水汽通量分布(其中水汽通量为对应高度上比湿与水平风的矢量积),可以看出,2月6日和26日海口地区主要受东北方向干冷气团的影响。与上述个例不同,在2月15日和24日,海口地区受 925 hPa 东南风(图 5(b)和(c))和海上暖湿气团的影响(图 6(b)和(c)),有利于低能见度事件的出现和维持。

3 结论

本文利用海口地区的能见度资料、地表气象观测、探空数据和再分析资料,对影响能见度的气象条件进行系统的分析,得到以下主要结论。

1) 海口地区冬季的低能见度事件通常出现在暖湿条件下。通过多因子的相关分析,发现该地区的能见度与相对湿度、温度和热力稳定度显著负相关,与风速和边界层高度显著正相关。当边界层高度较低且风速较小时,边界层内的垂直湍流和水平扩散能力相对较弱,有利于维持近地层的暖湿状态,使得低能见度事件得以出现或维持。

2) 海口地区空气质量良好,其能见度与 $PM_{2.5}$ 浓度间无显著的相关性,这一特点与我国其他气溶胶污染较严重的地区有所不同。

3) 基于温度、相对湿度、风速、边界层高度和热力稳定度,可以拟合得到一个关于能见度的多元线性回归方程,能较准确地估算出海口地区冬季的能见度状况。

4) 在 925 hPa 高度上,当海口地区处于高压系统的南侧,受东北风控制时,能见度状况较好;而当受东南风和海上的暖湿气团影响时,有利于低能见度事件的出现和维持。

参考文献

[1] Lee D O. The influence of wind direction, circulation

type and air pollution emissions on summer visibility trends in southern England. *Atmospheric Environment*, 1990, 24(1): 195–201

- [2] Tsai Y I, Cheng M T. Effects of sulfate and humidity on visibility in the Taichung harbor area (Taiwan). *Journal of Aerosol Science*, 1998, 29: S1213–S1214
- [3] 崔健. 江苏省能见度时空分布特征及其影响因子分析[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2012
- [4] 缪育聪, 郑亦佳, 王姝, 等. 京津冀地区霾成因机制研究进展与展望. *气候与环境研究*, 2015, 20(3): 356–368
- [5] Miao Y C, Liu S H, Zheng Y J, et al. Numerical study of the effects of planetary boundary layer structure on the pollutant dispersion within built-up areas. *Journal of Environmental Sciences*, 2015, 32: 168–170
- [6] Li J, Li C C, Zhao C S. Changes in surface aerosol extinction trends over China during 1980–2013 inferred from quality-controlled visibility data. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43(16): 8713–8719
- [7] 侯灵, 安俊琳, 朱彬. 南京大气能见度变化规律及影响因子分析. *大气科学学报*, 2014, 37(1): 91–98
- [8] 于兴娜, 马佳, 朱彬, 等. 南京北郊秋冬季相对湿度及气溶胶理化特性对大气能见度的影响. *环境科学*, 2015, 36(6): 1919–1925
- [9] 张剑, 刘红年, 唐丽娟, 等. 苏州城区能见度与颗粒物浓度和气象要素的相关分析. *环境科学研究*, 2011, 24(9): 982–987
- [10] 王淑英, 张小玲, 徐晓峰, 等. 北京地区大气能见度变化规律及影响因子统计分析. *气象科技*, 1989, 31: 109–114
- [11] Xue D, Li C F, Liu Q. Visibility characteristics and the impacts of air pollutants and meteorological conditions over Shanghai, China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015, 187: doi: 10.1007/s10661-015-4581-8
- [12] 陈义珍, 赵丹, 柴发合, 等. 广州市与北京市大气能见度与颗粒物质量浓度的关系. *中国环境科学*, 2010, 30(7): 967–971
- [13] 钱峻屏, 黄菲, 杜鹃, 等. 广东省雾霾天气能见度的时空特征分析 I: 季节变化. *生态环境*, 2006, 15(6): 1324–1330
- [14] 楚建杰. 白云机场低云低能见度天气的几个影响因素. *广东气象*, 2003(1): 30–31
- [15] 罗云峰, 吕达仁, 何晴, 等. 华南沿海地区太阳直接辐射、能见度及大气气溶胶变化特征分析. *气候与环境研究*, 2000, 5(1): 36–37

- [16] 王俞萱, 王锡东. 海口美兰机场能见度特征分析. 气象研究与应用, 2011, 32(2): 51–54
- [17] 何玉生. 海口城市土壤重金属污染特征与生态风险评估. 生态学杂志, 2014, 33(2): 421–428
- [18] Miao Y C, Liu S H, Guo J P, et al. Unraveling the relationships between boundary layer height and PM_{2.5} pollution in China base on four-year radiosonde measurements. Environmental Pollution, 2018, 243: 1186–1195
- [19] 吴婷. “雾锁”琼州海峡——一场平流雾导演的“人在囧途”[EB/OL]. 北京: 中国气象报. (2018–03–02) [2018–09–17]. http://www.cma.gov.cn/kppd/kppdrt/201803/t20180302_463249.html
- [20] Guo J P, Miao Y C, Zhang Y, et al. The climatology of planetary boundary layer height in China derived from radiosonde and reanalysis data. Atmospheric Chemistry and Physics, 2016, 16: 13309–13319
- [21] Miao Y C, Guo J P, Liu S H, et al. Classification of summertime synoptic patterns in Beijing and their association with boundary layer structure affecting aerosol pollution. Atmospheric Chemistry and Physics, 2017, 17: 3097–3110
- [22] Miao Y C, Liu S H, Guo J P, et al. Impacts of meteorological conditions on wintertime PM_{2.5} pollution in Taiyuan, North China. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25: 21855–21866
- [23] Garratt J. Review: the atmospheric boundary layer, Earth Science Reviews, 1994, 37(1/2): 89–134
- [24] Stull R B. An introduction to boundary layer meteorology. Dordrecht: Springer, 1988
- [25] Nielsen-Gammon J W, Powell C L, Mahoney M J, et al. Multi-sensor estimation of mixing heights over a coastal city. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2008, 47: 27–43
- [26] Hu X M, Nielsen-Gammon J W, Zhang F. Evaluation of three planetary boundary layer schemes in the WRF model. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2010, 49: 1831–1844
- [27] Hu X M, Ma Z, Lin W, et al. Impact of the Loess Plateau on the atmospheric boundary layer structure and air quality in the North China Plain: a case study. Science of the Total Environment, 2014, 499: 228–237
- [28] Miao Y C, Liu S H. Linkages between aerosol pollution and planetary boundary layer structure in China. Science of the Total Environment, 2019, 650: 288–296