

一次局地辐射雾过程及其水汽来源的数值模拟*

崔寅平¹, 晋银保¹, 张娟¹, 沈傲¹,
吴蒙², 谭浩波², 刘一鸣¹, 卢骁¹, 樊琦¹

1. 中山大学大气科学学院 / 广东省气候变化与自然灾害研究重点实验室 / 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519082
2. 佛山市气象局, 广东 佛山 528000

摘要: 基于 WRF 中尺度数值预报模式和 HYSPLIT 后向轨迹模式对 2017 年 11 月 10~11 日发生在广东省佛山市的一次局地雾天气过程及其水汽来源进行高分辨率的数值模拟研究。WRF 模拟结果表明: 本次雾是一次典型的辐射雾过程; 晴朗夜晚地面长波辐射冷却降温使得区域范围内水汽聚集并凝结产生相变, 同时夜间存在逆温层以及局地低于 1 m/s 的静小风促进了此次雾过程的发展; 垂直方向上温度和水汽含量的变化较为一致, 揭示了近地面雾层的垂直发展情况。进一步利用 WRF 高分辨率模拟结果驱动 HYSPLIT 后向轨迹模式对此次雾天气过程的水汽来源进行分析发现: 除本地水汽凝结相变外, 佛山市辖区内珠江流域水汽的输送对本次雾天气有促进作用。

关键词: WRF 模式; 长波辐射冷却; 水汽条件; HYSPLIT

中图分类号: P426.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137(2023)05-0171-10

Numerical simulation of a local radiation fog process and its water vapor source

CUI Yinping¹, JIN Yinbao¹, ZHANG Juan¹, SHEN Ao¹,
WU Meng², TAN Haobo², LIU Yiming¹, LU Xiao¹, FAN Qi¹

1. School of Atmospheric Sciences, Sun Yat-sen University / Guangdong Province Key Laboratory for Climate Change and Natural Disaster Studies / Southern Laboratory of Ocean Science and Engineering (Zhuhai), Zhuhai 519082, China
2. Foshan Meteorological Bureau, Foshan 528000, China

Abstract: The WRF mesoscale meteorological model and the HYSPLIT model were used to investigate a local radiation fog that occurred in Foshan from Nov 10th to Nov 11th, 2017, and its sources of water vapor. The results show this is a typical radiation fog process. During the clear night, surface long-wave radiation cooling resulted in water vapor gathering and condensing, meanwhile, temperature inversion and wind speed that lower than 1 m/s in the area promoted the development of the fog. Vertical temperature variations were highly related to water vapor concentrations, which could represent the features of vertical development during the fogging process. To analyze the sources of water vapor in this fog, high-resolution simulation results from the WRF model were utilized to drive the HYSPLIT model. It is found that in addition to the local water vapor condensation, the transport of water vapor from the Pearl River in Foshan city also promoted fogging.

Key words: WRF model; long wave radiation cooling; water vapor; HYSPLIT model

* 收稿日期: 2022-08-06

录用日期: 2023-01-03

网络首发日期: 2023-06-16

基金项目: 国家自然科学基金(42075181); 国家重点研发计划大气专项(2019YFC0214605); 广东省科技计划项目(科技创新平台类)(2019B121201002); 广东省基础与应用基础研究重大项目(2020B0301030004)

作者简介: 崔寅平(1998年生), 男; 研究方向: 大气数值模拟; E-mail: cuiyp3@mail2.sysu.edu.cn

通信作者: 樊琦(1977年生), 女; 研究方向: 大气数值模拟; E-mail: eesfq@mail.sysu.edu.cn

雾是一种在近地层中悬浮大量细微水滴或冰晶而造成水平能见度降低的天气现象。根据我国地面气象观测规范,水平能见度在1~10 km范围内称为轻雾,水平能见度低于1 km称为雾,水平能见度低于500 m称为浓雾(中国气象局,2003)。大雾天气产生的低能见度对交通运输等社会活动造成了极大的威胁,对大雾天气的形成机制进行深入研究能够为大雾天气的预报预警提供重要技术支持,从而降低大雾天气产生的不利影响。

对雾天气过程的数值模拟研究是从雾模式开始的,利用雾模式对雾天气的研究取得了不少成果(Fisher et al., 1963; Chen et al., 1983; 濮梅娟等, 2001; 张福深等, 1987)。近年来,WRF模式作为新一代中尺度数值模式,得到了研究工作者的青睐,并广泛应用于大雾天气的研究中。有大量研究(夏凡等, 2018; Dimitrova et al., 2021; Guo et al., 2021; Kutty et al., 2021)对雾天气的形成机制和生消过程进行了模拟分析,发现稳定的环流形势、低于1 m/s的静小风场、中低层充足的水汽条件等是雾天气产生和发展的有利条件。张舒婷等(2016)对深圳市1953—2013年的气象资料进行了统计研究,并结合WRF模式建立了珠江口雾生消过程的概念模型。夏凡等(2017)利用WRF模式对2015年发生在济南的一次大雾天气进行了数值模拟研究,发现大雾过程中垂直方向上近地层高度以上为辐散下沉运动,以下为辐合上升运动,使得水汽聚集在近地层,配合近地层的冷平流,促进了大雾发生。

HYSPLIT模式作为一种有效的后向轨迹模式,被很多学者应用于气团追踪的研究。除气团追踪外,HYSPLIT后向轨迹模式亦可较好地应用于对水汽来源进行研究(杜亮亮等, 2012; 马京津等, 2006; Abel et al., 2022; Zhang et al., 2021; Chu et al., 2021)。田梦(2019)对环渤海区域大雾天气进行研究发现,来自渤海以南区域的水汽输送是造成雾天气的主要水汽来源,输送路径上的水汽通量较大,雾区出现水汽辐合,导致雾的发生。张礼春等(2014)利用HYSPLIT模式对南京市一次雾天气过程进行研究,发现来自海上的水汽输送过程是造成本次雾天气的重要原因,雾发生时南京上空水汽通量最大达到 $2 \text{ g}/(\text{s}\cdot\text{hPa}\cdot\text{cm})$ 。但对于局地雾天气过程中水汽来源的研究相对较少。相

对而言,利用数值模式对范围较大、浓度较高的平流雾及其水汽来源进行研究的成果较多,局地辐射雾过程的研究较少,而局地辐射雾过程发生概率较平流雾而言更高;随着数值模式的发展和高性能计算水平的提升,利用高水平分辨率模式开展局地雾过程的研究成为可能。

本文利用高分辨率WRF中尺度数值天气预报模式和HYSPLIT后向轨迹模式对发生在广东省佛山市的一次局地雾天气过程进行了分析,对雾天气的水汽来源及垂直结构进行模拟研究,揭示局地雾天气的水汽特征和雾天气过程中的垂直结构的变化情况,更全面地了解雾天气的特征并还原局地雾天气发生、发展、消散的过程,为局地雾的预报预警提供技术支持。

1 资料和方法

1.1 数据资料

本文气象观测数据来自佛山市气象局,时间为2017年11月8~14日,观测站点位置见图1。数据包括地面气压、气温、相对湿度、风向风速、能见度。

1.2 模式介绍

WRF(Weather Research and Forecasting)是美国国家大气研究中心(NCAR)、美国环境预报中心(NCEP)等机构联合研发的新一代中尺度数值天气预报系统。模式适用于多尺度天气应用,尺度范围涵盖了数十米到几千公里,并具有可移植性、维护便利、扩充性好、能够同化数据等优势,为大气研究和业务预报提供高效的计算平台。WRF模式中包含了微物理过程、长波辐射、短波辐射、边界层、积云对流参数化方案等多种物理参数化方案供用户选择使用。目前,国内外许多研究机构都利用WRF模式开展了大量的研究和预报工作,并取得了显著的成果(Skamarock et al., 2019)。

HYSPLIT(hybrid single-particle lagrangian integrated trajectory model)是一种研究大气传输和扩散的模式,采用拉格朗日方法,利用移动的参考系对扩散等过程进行计算。HYSPLIT目前广泛应用于大气科学研究中,常见的应用是后向轨迹分析,确定气团的来源并建立源和受体之间的关系,以及描述污染物和有害物质在大气中的传播、扩散和沉积。其应用实例包括了跟踪和预测放射性物质、野火烟尘、飞尘等各种固定和移动排放源的

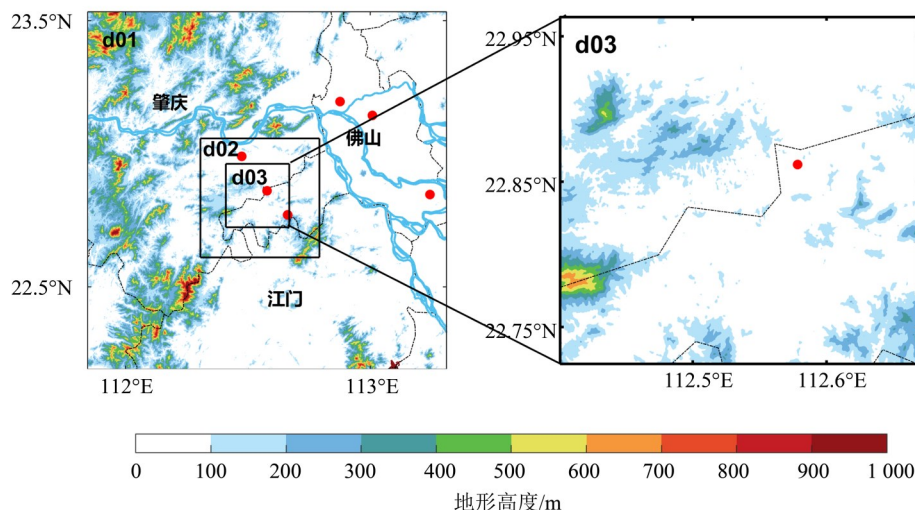


图1 WRF三重嵌套网格及气象站点位置(红色实心点)

Fig. 1 The figure of WRF domains and weather stations (red spots)

污染物以及过敏源和火山灰的释放(Stein et al., 2015)。

1.3 模式设置

WRF模式采用了v4.0版本,模拟采用的气象场初始边界条件是NCEP提供的再分析格点资料,资料分辨率为 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$,时间间隔为6 h,模拟时间段为2017年11月8日08:00到11日20:00(北京时)。模式采用三重嵌套(图1),其网格点水平格距分别为3, 1和0.33 km,模拟中心点位于 22.86°N , 112.58°E ,模式采用的物理参数化方案如表1所示,由于模拟水平格距 <3 km,模拟过程关闭了积云对流参数化方案,模式垂直方向共设置了35层,模式层顶为50 hPa。

表1 模式物理参数化方案设置
Table 1 Model configuration in WRF

物理参数化方案	方案设置
微物理	WDM6
短波辐射	RRTM
长波辐射	Dudhia
陆面模式	Noah-MP
边界层	MYNN3

HYSPLIT模式版本为5.1.0,采用WRF模式第一重嵌套模拟得出的结果作为输入数据,通过HYSPLIT模式中设置的默认文件转换过程,将WRF模式模拟得到的NetCDF文件转换为HYSPLIT可读入的arl文件,作为HYSPLIT模式进行后向轨迹模拟的驱动文件,从而对雾天气过程

中的水汽来源进行分析和研究。

2 天气实况及模式评估

2.1 天气实况

2017年11月11日00:00~08:00,广东省佛山市高明区与肇庆市交界区域出现了一次雾天气过程,根据此次雾天气发生的时间段,初步可判定此次雾过程属于辐射雾。由10日20:00~11日12:00中心位置气象站(图1中d03实心点)观测数据和该点模式模拟结果的时间序列(图2)可见,在10日20:00,观测站的2 m温度约 23°C ,相对湿度约90%,能见度约6 km,随后2 m温度受到地面长波辐射冷却过程的影响开始逐渐降低,相对湿度则开始升高,能见度随之逐渐下降。11日00:00后,2 m温度持续下降,最低降至 20°C 以下,降温率约为 $0.5^{\circ}\text{C}/\text{h}$,而相对湿度在11日约02:00达到100%并维持,能见度下降至1 km以下,在06:00过后低于0.1 km,达到了浓雾级别。11日08:00后,受日出太阳短波辐射的影响,2 m温度快速回升,11日中午时达到 26°C 以上,而观测站相对湿度因凝结的水汽蒸发迅速降低,11日12:00已经低于80%,能见度在11日8:00后迅速上升,11日12:00能见度达到了10 km以上。根据天气记录等信息,11月10日晚到11日上午高明区等地未出现降水,且日间天气晴好。结合上述温度、湿度以及能见度的逐小时变化分析,此次大雾属于由于夜间晴朗少云,地面长波辐射冷却作用下形成的典型局地辐射雾天气。

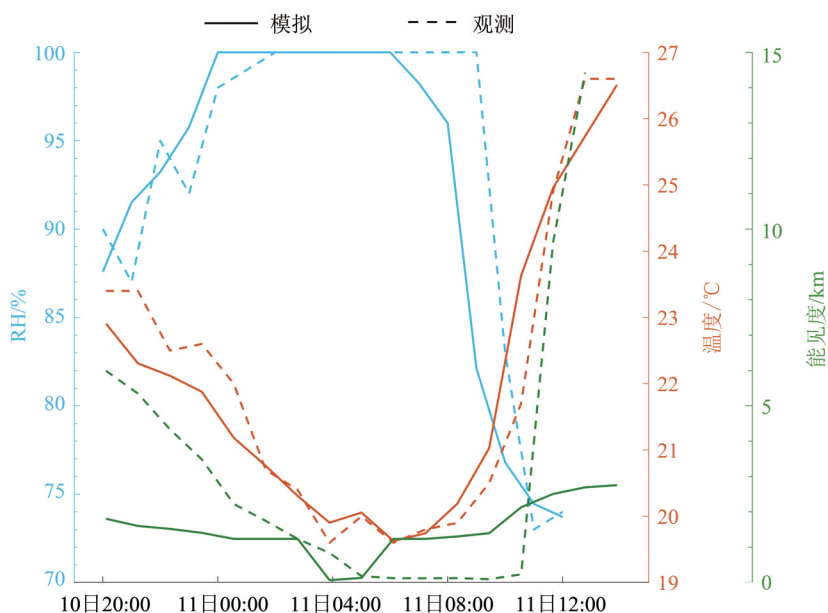


图2 11月10日20:00~11日12:00模拟中心点气象站主要气象要素观测数据及模拟结果时间序列图

Fig. 2 Time series of observed and simulated main meteorological elements at simulation center

2.2 模式评估

图2为2017年11月10日20:00~11日12:00的2 m温度、相对湿度和能见度的模式模拟结果和观测数据时间序列。能见度(Vis)计算分2种情况:

研究格点存在云水含量时(崔强等, 2014),

$$Vis = \frac{-\ln(0.02)}{144.7(\rho_0 q)^{0.88}}; \quad (1)$$

研究格点无云水含量时(包云轩等, 2013),

$$Vis = 26.12263 \exp(-0.0352RH), \quad (2)$$

式中 ρ_0 为大气密度(kg/m^3); q 是云水含量(g/kg); RH是相对湿度(%)。

由图2可看出, 模式模拟得到的10日20:00的2 m温度约为23°C, 随后开始降低; 到11日04:00趋于20°C并维持在该温度水平, 降温率为0.4°C/h; 从11日08:00开始, 模拟的2 m温度开始快速升高, 到11日中午达到了26°C以上。相对湿度的模拟结果在10日20:00约为87%, 随后相对湿度开始逐步上升; 在11日00:00达到100%, 说明模拟结果的水汽达到了饱和; 该状态维持到11日07:00左右, 随后模拟的相对湿度开始迅速降低, 在11日10:00后已经低于75%。能见度的模拟结果在10日20:00为2 km, 之后能见度的模拟结果缓慢降低; 到11日约04:00能见度迅速降低到1 km以下; 11日06:00起, 能见度的模拟结果缓慢上升, 到11日中午时为3 km。模式模拟的2 m温度和相对湿度

能够较好地反映观测结果的发展趋势和数值变化, 而能见度的模拟结果在雾出现阶段的变化趋势符合观测结果, 是由于式(2)适用于能见度为1~10 km的雾过程, 对于能见度较高时段不适用。

对模式模拟的气象场结果进行统计验证以了解模式模拟的效果, 统计检验选取了2 m温度、相对湿度、地面气压和10 m风速进行检验。表2给出了相应的统计验证结果, 从平均值情况看, 地面气压和10 m风速的模拟结果高于观测结果, 而2 m温度和相对湿度则相差不大。地面气压、2 m温度和相对湿度相关系数都超过了0.85, 并且从偏差情况看, 模拟结果和观测结果偏差较小。10 m风速的相关系数仅约0.57, 但从偏差情况来看, 模拟结果和观测结果相差不大。总体而言, 模拟结果较为理想。

表2 模拟值统计验证参数

Table 2 Statistic validation of modeled results

项目	地面 气压/hPa	2 m 温度/°C	RH/%	10 m风速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
观测平均值	1 012.7	23.17	80.76	1.49
模拟平均值	1 014.8	22.74	79.98	2.29
相关系数	0.88	0.96	0.88	0.58
平均偏差	2.09	-0.43	-0.78	0.80
均方根误差	2.23	1.10	8.03	1.26

3 结果与分析

选取温度场、水汽场和风场等对本次辐射雾过程进行分析, 从而揭示本次辐射雾过程的主要气象场特征, 并进一步对此次雾过程的水汽来源进行分析。

3.1 气温场

下面对模式模拟得到的气温场有关数据进行

分析。从模拟结果(图3)可以看出, 10日20:00区域内2 m温度整体高于23℃, 随后2 m温度开始逐渐降低; 到11日00:00大部分区域的2 m温度已经降至22℃以下; 随后, 2 m温度持续下降, 到11日06:00, 区域内2 m温度整体低于20℃。因日出太阳短波辐射增加, 后期区域内2 m温度开始快速上升, 11日10:00的区域内2 m温度已经达到26℃。

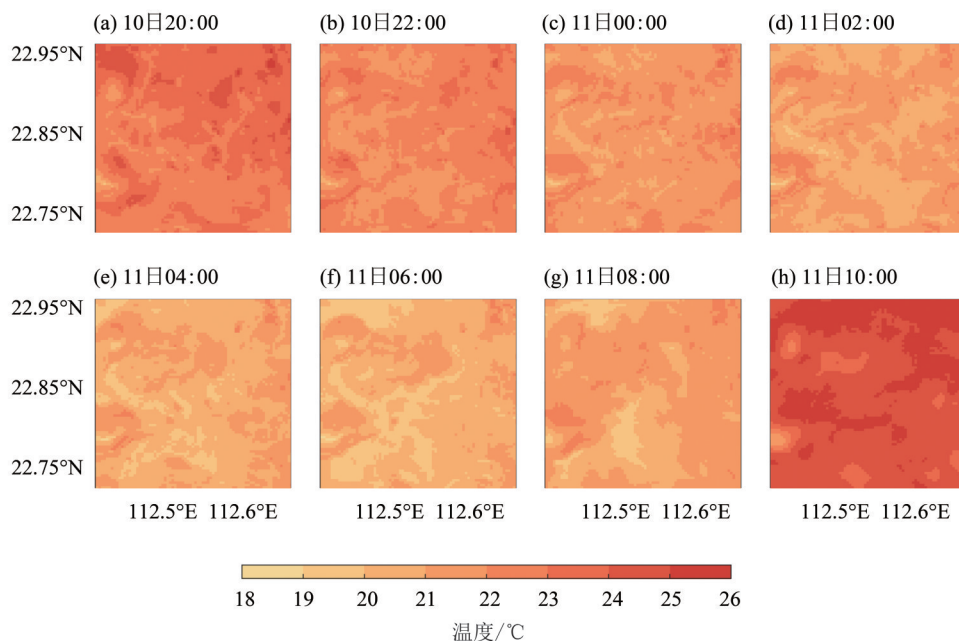


图3 11月10日20:00~11日10:00第三重嵌套范围内2 m温度逐2 h空间分布图

Fig. 3 Simulated spatial distribution of 2 m temperature

由图4可见, 在11日00:00前, 模拟中心的近地面高度已经出现轻微的逆温现象, 该时刻的地面温度为22℃。进入11日00:00后, 伴随着近地面温度的下降, 近地面的逆温层逐渐发展增强; 逆温现象在11日06:00达到最强, 此时的减温率达到了每100 m降1.8℃, 逆温层高度约在400 m, 逆温的出现表明较稳定的大气, 凝结的水汽在垂直方向上的扩散过程受到限制, 从而促进了辐射雾的发展。到11日8:00后, 前期形成的逆温因日出带来的太阳短波辐射加热迅速崩溃消散。

3.2 水汽场

水汽场的变量反映了空气中湿度特征。相对湿度和云水含量的变化能体现空气中湿度的情况, 大量研究都采用了大气中云水含量对雾的特征和发展进行分析研究, 一般定义雾中云水含量范围0.05~0.2 g/kg, 本文采用地面云水含量0.05 g/kg为出现雾的临界值(邹进上等, 1982; 梁爱民等,

2009; Zhou et al., 2010)。

模拟得到的第三重嵌套区域相对湿度的空间分布结果显示(图5), 在10日20:00, 区域内的大

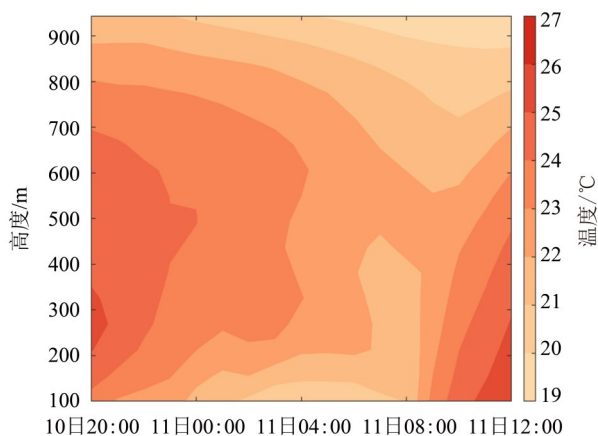


图4 模拟中心点位置温度垂直变化时间序列图

Fig. 4 Time and space distribution of temperature at simulation center

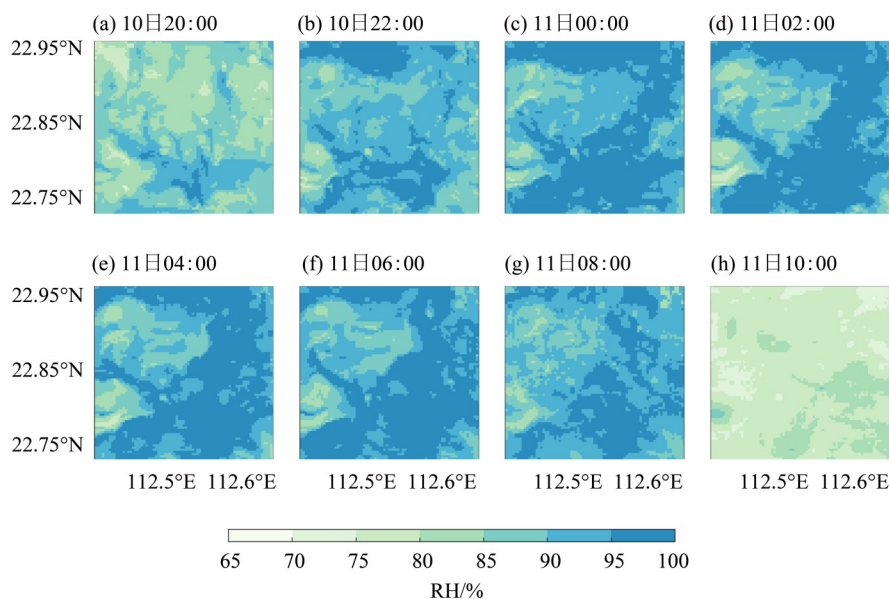


图5 11月10日20:00-11日10时第三重嵌套范围内相对湿度逐2h空间分布图

Fig. 5 Simulated spatial distribution of surface relative humidity

部分地面 $RH \approx 85\%$, 在区域的中心附近 $RH \approx 0\%$; 11日00:00起, 研究区域内的相对湿度显著上升, 可以看出在研究区域中心附近出现了大面积的 $RH \approx 100\%$ 的区域, 在11日02:00~06:00, $RH = 100\%$ 的区域占据了区域的中心位置及周围, 此时辐射雾天气达到较强的阶段; 到11日08:00后, 由于日出导致凝结的水汽蒸发, 研究区域中的相对湿度迅速降低, 11日10:00区域内 $RH < 85\%$, 表明辐射雾的消散。

模式模拟的中心点位置相对湿度垂直变化(图6)表明, 在11日00:00之前, 近地面开始出现相对湿度的高值区。进入11日00:00后, 近地面的相对湿度开始逐渐增大, 相对湿度达到100%, 且高相对湿度区域开始向上发展, 相对湿度在垂直方向上的发展伴随着逆温层的演变, 在11日06:00, 相对湿度100%的区域最高达到了近100m的高度, 此时逆温层也发展到最强盛的阶段, 逆温层使得近地面水汽聚集难以扩散。11日08:00后的相对湿度出现明显下降, 此时逆温层因太阳短波辐射增加导致的温度上升而崩溃, 水汽的扩散条件改善, 近地面的相对湿度逐渐下降到80%以下。

地面云水含量的模拟结果(图7)说明, 11日00:00之前因大气的温湿条件尚未达到水汽凝结的要求, 在研究区域内没有出现云水含量的分布。从11日00:00起, 由于温度下降导致水汽凝结, 辐射雾逐渐发展, 研究区域内出现了云水含量的

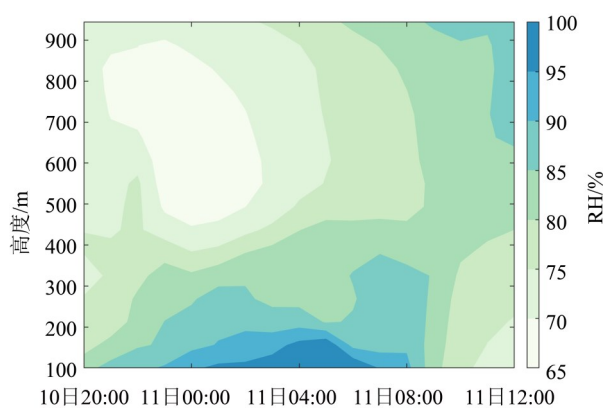


图6 11月10日20:00~11日10:00模拟中心点位置相对湿度垂直变化时间序列图

Fig. 6 Time and space distribution of relative humidity at simulation center

分布, 分布区域从模拟中心的附近扩散发展, 随着时间推移, 云水含量的分布范围逐渐扩大, 到了11日06:00, 云水含量分布范围达到最大, 其峰值达到 0.5 g/kg 。到11日08:00后, 由于日出导致太阳短波辐射增加, 凝结水汽的蒸发, 区域内的辐射雾消散, 云水含量分布相应消失。

3.3 风场

风场特征对于雾的生消演变有重要影响, 区域内的风场变化会对水汽输送产生重要影响, 局地的水平和垂直风场则对水汽聚集有极大的作用。

从第三重嵌套范围内10m风速的模拟结果(图8)来看, 从10日20:00~11日08:00, 区域内10m风速基本低于 1 m/s , 表明在这段时间内区域中的

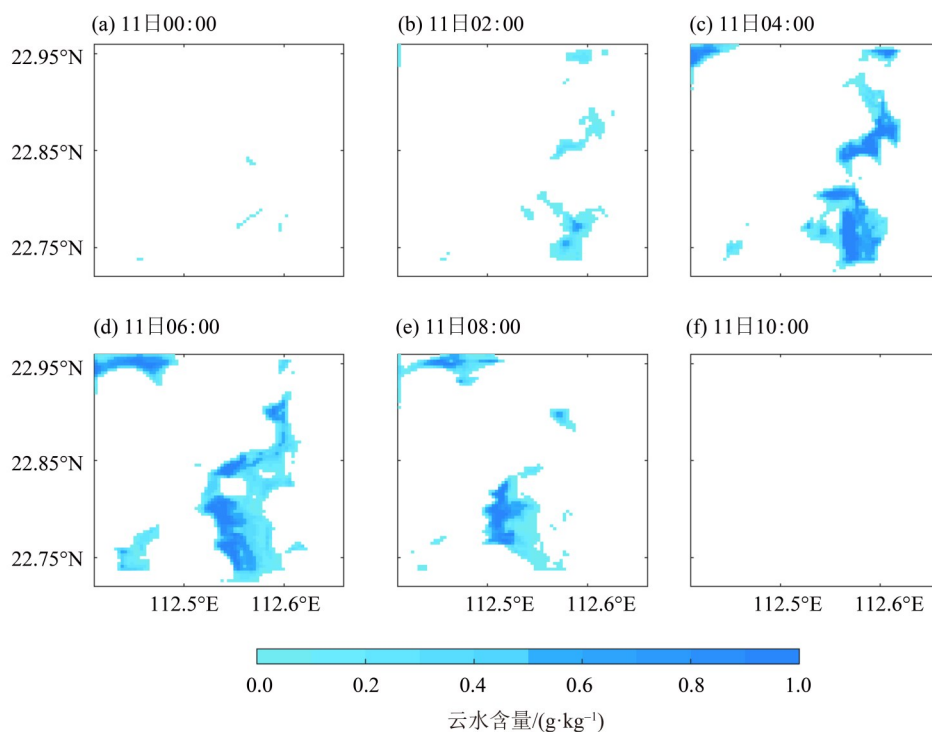


图7 11月10日20:00~11日10:00第三重嵌套范围内地面云水含量逐2 h空间分布图

Fig. 7 Simulated spatial distribution of surface cloud water content

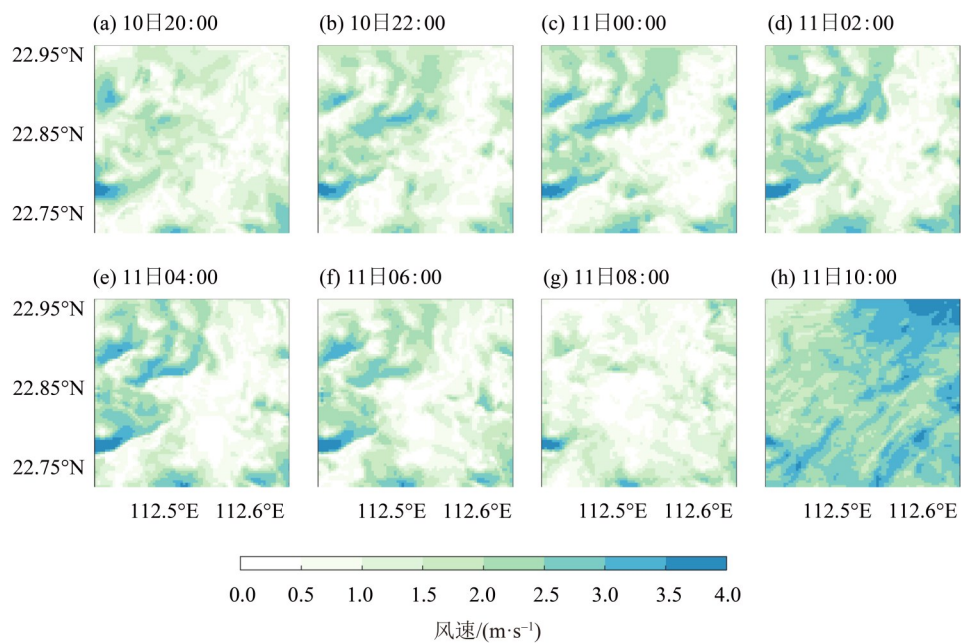


图8 11月10日20:00~11日10:00第三重嵌套范围内10 m风速逐2 h空间分布图

Fig. 8 Simulated spatial distribution of 10 m wind

风场较弱, 不利于区域内水汽在水平方向上的输送和扩散, 促进了水汽在辐射雾过程中的汇集和凝结。而到11日10:00, 区域内的10 m风速基本上高于2 m/s, 表明区域内空气流动加快, 区域内水平方向上的输送和扩散加强, 促进了辐射雾的

消散过程。

3.4 水汽来源

雾天气的形成和水汽有很大关系(田梦, 2019; 张礼春等, 2014)。本文借助3 km分辨率的WRF模式结果驱动5.1.0版本的HYSPLIT后向轨迹追踪模

式,对本次雾天气过程的水汽来源进行分析。水汽通量 F_q (单位: $\text{g}/(\text{s}\cdot\text{hPa}\cdot\text{cm})$) 及其散度 F_{div} (单位: $\text{g}/(\text{s}\cdot\text{hPa}\cdot\text{cm}^2)$) 分别为

$$F_q = \frac{1}{g} qV, \quad (3)$$

$$F_{\text{div}} = -\nabla \cdot \left(\frac{1}{g} qV \right) = -\left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{g} uq \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{g} vq \right) \right], \quad (4)$$

式中 q 代表比湿 (g/kg), V 代表风速矢 (m/s)。

首先对第一重嵌套范围内不同高度的比湿和水汽通量散度进行研究,分析雾天气发生区域及周边湿度情况以及湿度要素的运动情况,结果如图9所示。从空间分布上看,雾发生前后雾区本身的比湿维持在 $14 \text{ g}/\text{kg}$ 以上,属于较高的比湿条件,且区域内的水汽通量散度处在较弱的辐合辐散状态,说明在雾天气发生前后雾区的水汽运动不强,此次雾天气的主要水汽来源是本地的水汽凝结。

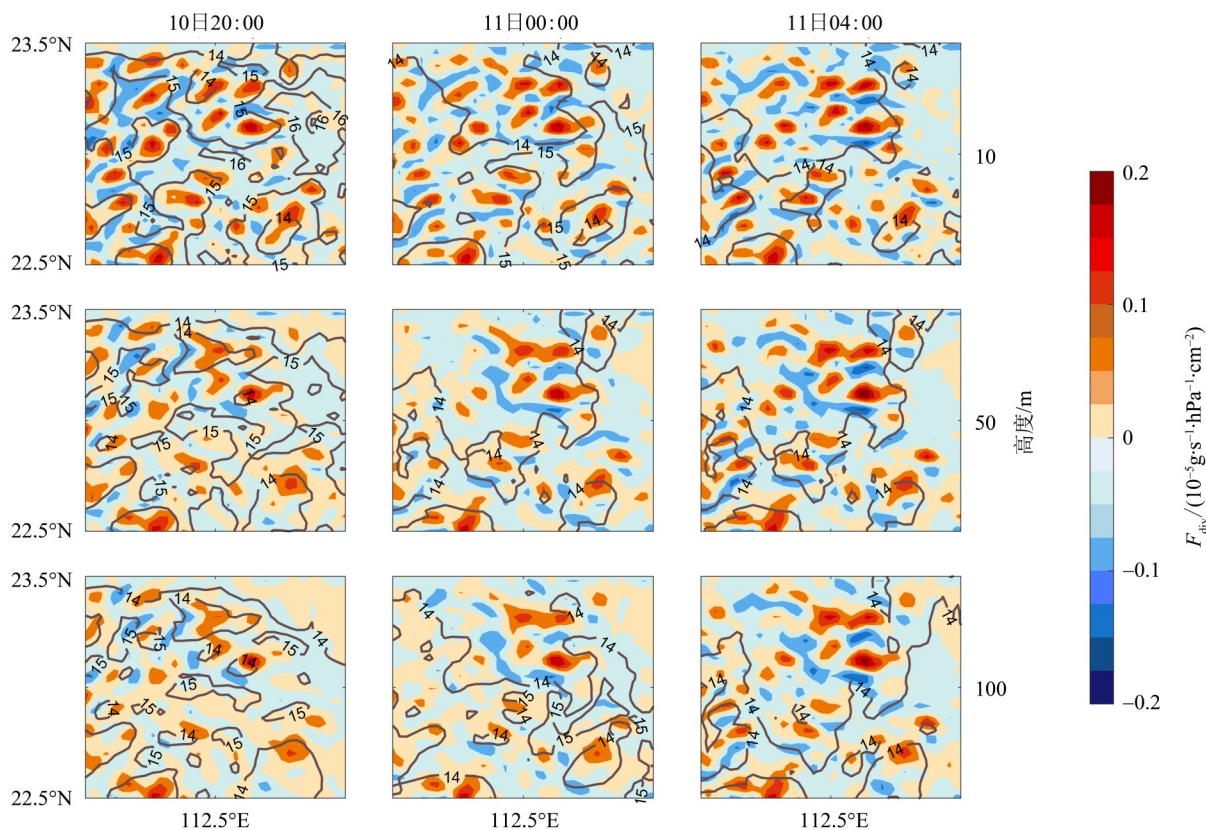


图9 11月10日20:00~11日04:00第一重嵌套范围内不同高度比湿(等值线)和水汽通量散度(填色)逐4 h空间分布图
Fig. 9 Simulated spatial distribution of specific humidity (line) and water vapor flux divergence (color) on different altitudes

进一步对外来输送的水汽来源进行分析,结果如图10所示。首先对不同高度层的气团进行24 h的后向轨迹分析,发现在本次雾天气发生时,10、50和100 m高度的气团最终影响到了本次雾发生的空间范围,因此对这3个高度的气团进行了分析。从结果来看,在雾发生前后,3个高度的气团均从第一重嵌套区域东北方向输送到模拟中心点,区域东北方是珠江水域流经佛山市的流域,且输送路径中有经过水汽通量较高的区域,说明这些气团在输送过程中携带了一定量的水汽,并最终到达雾区。综合来看,外来输送对本次雾天气有一定的贡献,是雾天气发展的一个促进

因素。

4 结 论

利用高分辨率WRF模式和后向轨迹模式对2017年11月10~11日发生在广东省佛山市的一次局地雾天气过程进行了研究分析,模拟了局地雾天气发生过程中气象要素的变化和造成本次雾天气的水汽来源,探讨了造成局地雾天气的气象和水汽条件,所得结论包括:

1) 造成本次雾天气的气象场特征比较明确。研究时段和区域范围内晴朗夜晚地面长波辐射冷却效应显著,进而导致近地面区域温度下降;雾

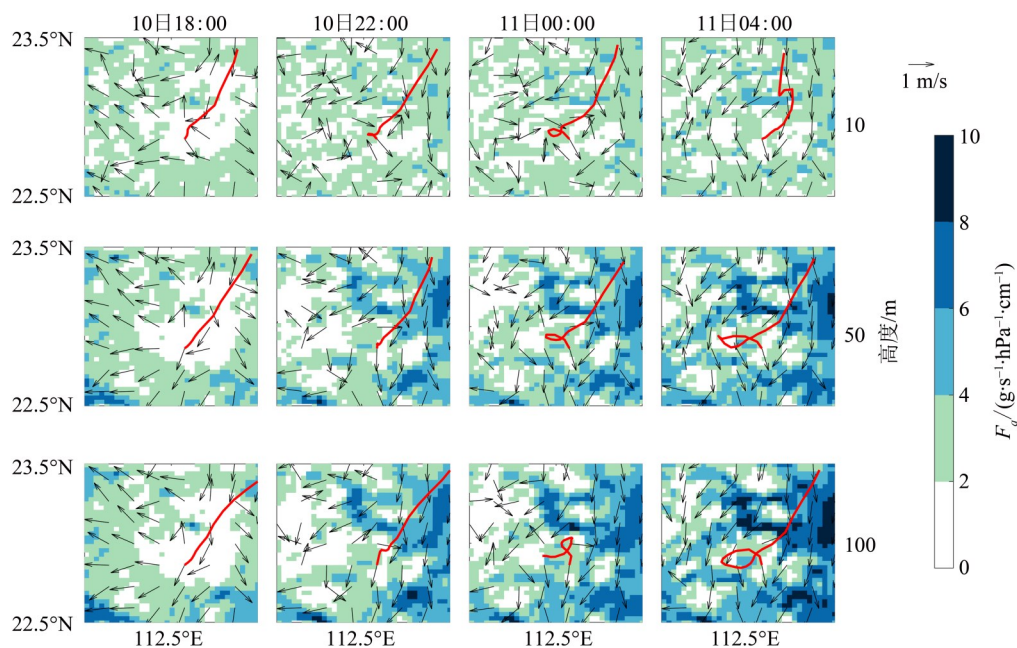


图10 11月10日18:00~11日04:00第一重嵌套范围内不同高度后向轨迹(线条)、风向(矢量)、水汽通量(填色)空间分布
Fig. 10 Simulated spatial distribution of backward trajectory (line), wind direction (vector) and water vapor flux (color) on different altitudes

发生时, 区域内湿度条件显著增强, 相对湿度达到100%; 在日出之后, 雾因近地面区域温度上升而消散。这是一次典型的辐射雾天气过程。

2) WRF模式较好地模拟出了雾天气生成、发展和消散的过程以及相应的特征。WRF模式对于2 m温度和近地面相对湿度的模拟结果和观测数据比较吻合, 温度和相对湿度随时间发展的特征和辐射雾不同阶段的特点相对应; WRF模式模拟出的云水含量结果能够较为准确地对应上辐射雾发展的强盛阶段, 温度和水汽条件在垂直高度上的分布能较好地还原雾天气在垂直方向上的发展; 模拟得到的区域风速特征表明局地的静小风场促

进了本次辐射雾天气的发展。

3) 模式得到的结果较好地追踪到了本次辐射雾天气的水汽来源。利用WRF模式模拟结果得到比湿、水汽通量散度等要素发现本次雾天气主要水汽来源是本地水汽累积; 利用WRF模式驱动HYSPLIT模式得到的后向轨迹表明本次辐射雾天气的外部水汽来源于佛山市东北部珠江区域。

4) 对于局地辐射雾的预报, 需要了解可能发生辐射雾天气的时间前区域的天气情况, 掌握区域内可能的水汽来源及相关的区域风场, 从而研判天气条件和水汽条件是否可能造成辐射雾天气的发生。

参考文献:

- 包云轩, 丁秋冀, 袁成松, 等, 2013. 沪宁高速公路一次复杂性大雾过程的数值模拟试验[J]. 大气科学, 37(1): 124-136.
- 崔强, 王春明, 岳甫璐, 等, 2014. 南京2013年12月一次大雾天气过程的数值模拟及诊断分析[C]//第31届中国气象学会年会. 北京.
- 杜亮亮, 李江萍, 陈晓燕, 等, 2012. 2001—2011年青藏高原东北边坡地带云水资源分析[J]. 干旱区研究, 29(5): 862-869.
- 梁爱民, 张庆红, 申红喜, 等, 2009. 北京地区一次平流雾过

程的分析和数值模拟[J]. 应用气象学报, 20(5): 612-621.

马京津, 高晓清, 2006. 华北地区夏季平均水汽输送通量和轨迹的分析[J]. 高原气象, 25(5): 893-899.

濮梅娟, 李良福, 李子华, 等, 2001. 西双版纳地区雾的物理过程研究[J]. 气象科学, 21(4): 425-432.

田梦, 2019. 环渤海大雾形成的观测和模拟分析及影响机制研究[D]. 兰州: 兰州大学.

夏凡, 李昌义, 2018. 基于3种能见度方案山东地区雾天气预报试验研究[J]. 气象与环境学报, 34(3): 48-57.

- 夏凡, 杨晓霞, 2017. 济南一次雾过程的数值模拟试验和成因分析[J]. 气象科技, 45(1): 164-170.
- 张福深, 周明煜, 吕乃平, 1987. 地面辐射雾和低层云对夜间边界层影响的数值研究[J]. 大气科学, 11(2): 128-137.
- 张礼春, 朱彬, 耿慧, 等, 2014. 南京一次持续性浓雾天气过程的边界层特征及水汽来源分析[C]//第31届中国气象学会年会. 北京.
- 张舒婷, 王明洁, 刘一鸣, 等, 2016. 珠江口雾过程数值模拟及生消概念模型建立[J]. 热带气象学报, 32(4): 467-476.
- 中国气象局, 2003. 地面气象观测规范[M]. 北京: 气象出版社.
- 邹进上, 刘长盛, 刘文保, 等, 1982. 大气物理基础[M]. 北京: 气象出版社.
- ABEL B D, RAJAGOPALAN B, RAY A J, 2022. Understanding the dominant moisture sources and pathways of summer precipitation in the southeast prairie pothole region[J]. Earth Space Sci, 9(3): e2021EA001855.
- CHEN C, COTTON W R, 1983. A one-dimensional simulation of the stratocumulus-capped mixed layer [J]. Boundary-Layer Meteorol, 25(3): 289-321.
- CHU Q C, WANG Q G, FENG G L, et al, 2021. Roles of water vapor sources and transport in the intraseasonal and interannual variation in the peak monsoon rainfall over East China[J]. Climate Dynamics, 57(7): 2153-2170.
- DIMITROVA R, SHARMA A, FERNANDO H J S, et al, 2021. Simulations of coastal fog in the Canadian Atlantic with the weather research and forecasting model [J]. Boundary-Layer Meteorol, 181(2): 443-472.
- FISHER E L, CAPLAN P, 1963. An experiment in ghemerical prediction of fog and stratus[J]. Journal of the Atmosphere Sciences, 20(5): 425-437.
- GUO J, XU J, XU X, 2021. An observational and modeling study of a sea fog event over the yellow and East China Seas on 17 March 2014 [J]. Trop Cyclone Res Rev, 10(3): 182-190.
- KUTTY S G, DIMRI A P, GULTEPE I, 2021. Physical processes affecting radiation fog based on WRF simulations and validation[J]. Pure Appl Geophys, 178(10): 4265-4288.
- SKAMAROCK W C, KLEMP J B, DUDHIA J, et al, 2019. A description of the advanced research WRF model version 4[P]. National Center for Atmospheric Research.
- STEIN A F, DRAXLER R R, ROLPH G D, et al, 2015. NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system [J]. Bull Am Meteorol Soc, 96(12): 2059-2077.
- ZHANG S, LIU B, REN G, et al, 2021. Moisture sources and paths associated with warm-season precipitation over the Sichuan Basin in southwestern China: Climatology and interannual variability[J]. J Hydrol, 603: 127019.
- ZHOU B, DU J, 2010. Fog prediction from a multimodel mesoscale ensemble prediction system [J]. Weather Forecast, 25: 303-322.

(责任编辑 秦社彩)