

秦庆昌,于波,徐路扬,等,2022.造成北京春季气温预报失误的持续性低云过程分析[J].气象,48(6):705-718. Qin Q C, Yu B, Xu L Y, et al, 2022. Analysis of a continuous low-cloud process causing spring temperature forecast errors in Beijing[J]. Meteor Mon, 48(6):705-718(in Chinese).

造成北京春季气温预报失误的持续性低云过程分析*

秦庆昌 于波 徐路扬 纪彬 王媛媛 张琳娜

北京市气象台,北京 100091

提 要: 2021 年 3 月 2—4 日北京地区受持续性的低云影响,导致气温预报出现较大偏差,全球数值模式、区域数值模式及预报员均未预报出此次低云天气过程。利用常规气象观测资料、ERA5 再分析资料、风云四号 A 星(FY-4A)高分辨率可见光云图及激光云高仪和毫米波云雷达等新型探测资料,对低云的形成和维持机制进行探讨。研究表明:此次低云过程是在前期降水过后无明显冷空气影响、近地面湿度未得到很好的清除这一有利背景下,配合稳定的大气层结、弱上升运动和地形因素的共同作用下得以维持和发展。925 hPa 暖平流发展和风速增强破坏了稳定层结,使得边界层内混合加强,进而导致低云消散。利用激光云高仪和毫米波云雷达可分别获取云底高度和云体结构的精细信息,可作为常规观测的有益补充。

关键词: 预报偏差,低云过程,形成机制,云高仪,云雷达

中图分类号: P458

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2022.030702

Analysis of a Continuous Low-Cloud Process Causing Spring Temperature Forecast Errors in Beijing

QIN Qingchang YU Bo XU Luyang JI Bin WANG Yuanyuan ZHANG Linna

Beijing Weather Forecast Centre, Beijing 100091

Abstract: During 2—4 March 2021, a continuous low-cloud process in Beijing caused large deviation of temperature forecast. Both the global/regional numerical models and the forecasters failed to predict this process. Using the conventional meteorological data, ERA5 reanalysis data and FY-4A high-resolution visible cloud images, combined with the data of ceilometer and cloud radar, this paper discusses the formation and maintenance mechanism of the low cloud. The results are as follows. The favorable background for the formation of the low cloud was that there was no influence of obvious cold air after precipitation and the ground humidity was not well removed in the boundary layer. Meantime, the low cloud developed and maintained with stable atmospheric stratification, weak ascending motion and topographic effect. The warm advection and the growth of wind speed at 925 hPa destroyed the stable stratification, leading to the enhancement of mixing activity in the boundary layer and thus the dissipation of the low clouds. Detailed information of the cloud base height and cloud structure can be obtained via the ceilometer and cloud radar, which can be served as a useful complement to conventional observation.

Key words: forecast deviation, low-cloud process, formation mechanism, ceilometer, cloud radar

* 中国气象局创新发展专项(CXFZ2022J013)、北京市科技计划项目(Z201100008220002、Z201100008220005、Z201100005820002)和北京市气象局科技项目(BMBKJ202001002)共同资助

2021 年 8 月 10 日收稿; 2022 年 3 月 7 日收修定稿

第一作者:秦庆昌,主要从事北京地区天气预报技术研究. E-mail: hubery1205@163.com

通讯作者:于波,主要从事灾害天气机理及天气预报技术研究. E-mail: yubo_0@126.com

引言

云是由大气中水汽凝结(凝华)而形成的微小水滴、过冷水滴、冰晶和雪晶等组成的。根据云底距离地面的高度不同,可分为高云、中云和低云,其中低云的云底距地面高度较低,一般低于 2 500 m,持续的低云和低能见度天气会对城市交通、飞行安全、农业生产等带来严重危害(文丹青和黄波,2010)。关于低云的形成条件,Stevens and Brenguier(2009)认为可分成气象要素条件和大气气溶胶条件:气象要素条件是指大尺度的环境热动力状态,决定了低云的宏观结构;气溶胶条件是指云凝结核,决定了低云的微观结构。Wood and Bretherton(2006)通过观测试验发现低云云量与大气低层的逆温层强度(estimated inversion strength, EIS)密切相关。水汽条件(Stevens and Brenguier, 2009)、低层垂直运动(Weaver and Pearson, 1990)等因素对低云的形成和消散也起着重要作用。另外,环境气溶胶浓度的变化会改变云的光学性质(Twomey and Wojciechowski, 1969),进而通过气溶胶-云的相互作用调节着低云的局地分布和气候特征(Rosenfeld, 2006)。

近年来一些国内外学者对持续性低云过程进行了研究分析,刘峰等(2007)认为低云的形成与大气稳定度、逆温层等因素有关;刘开宇等(2010)研究表明充沛的水汽、冷却过程和弱上升运动是形成低云的必要条件;文丹青和黄波(2010)研究认为,华南地区的低云有东路弱冷空气南下和海上冷空气由东路回流两种形成机制;Adler et al(2017)基于观测结果分析了与低云形成相关的物理过程,研究表明边界层内的冷却过程是持续性低云形成中最为关键的因素,且冷却过程主要是由水平冷平流引起的;向喆(2020)针对发生在福州长乐机场的一次低云低能见度天气进行了诊断分析,研究表明稳定的温度层结、极小的温度露点差和风速为 $3\sim 4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的东北风是此次低云得以持续维持的原因,而东北风逐渐增大是此次低云消散的主要原因。

由于低云本身的分布和特征总是在不断变化(熊秋芬等,2007),故低云的预报难度很大(刘开宇等,2010),持续性低云的预报则更加困难,目前数值模式通过云量计算方案(郑晓辉等,2013;姜晓飞等,2015;赵晨阳等,2020)可以直接输出低云量,供预报人员参考和使用。但是受到海陆分布、下垫面差异

和摩擦等因素的影响,数值模式对地面要素的直接预报存在一定的误差,故仅仅依靠模式的预报难以满足业务需求(陈德辉和薛纪善,2004;矫梅燕等,2006)。近年来,部分学者基于数值预报产品的解释应用对低云的预报做了探索,如利用支持向量机方法建立低云量预报的精细化模型,试验结果表明该方法在云量的释用预报方面具有较好的应用前景(熊秋芬等,2007;胡邦辉等,2011;赵文婧等,2016),但是该模型仅局限于单独的站点预报,无法形成区域预报;基于相似预报原理和相似离度判据,对云量进行时效为 10 d 的回代预报,该方案在山西低云云量上具有较好的预报能力(黄海亮等,2018),但该方法将所有站点的数据融合在一起建立预报方程,未考虑站点的差异性,预报不够精细化;基于全球天气预报系统(GFS)预报场资料,采用多元逐步回归预报方法建立了 0~168 h 逐小时精细化区域预报,实例预报结果显示该方法在低云云量预报上明显好于直接使用模式的预报结果(杜暉等,2021),但是多元逐步回归预报方法在因子选择、样本标定等方面具有难以回避的主观性,即人为干预较多。因此,寻求理想高效的低云云量预报模型仍在不断探索和研究中。

综上所述,已有不少研究涉及到低云过程的分析 and 预报。2021 年 3 月 2—4 日,北京地区出现了持续性低云过程,数值模式和预报员均未预报出此次低云过程,导致 3 月 2—4 日的气温预报出现较大偏差。此次低云过程发生在“春运”“两会”和冬奥测试赛等重大活动期间,给预报保障服务造成了一定影响。有鉴于此,本文利用欧洲中期天气预报中心第五代大气再分析全球数据(以下简称 ERA5 再分析资料)、风云四号 A 星(FY-4A)卫星的逐 5 min 可见光云图、北京地区常规气象观测资料以及激光云高仪、毫米波云雷达等新型探测资料,详细分析此次低云过程发生的气象要素条件,探讨出现预报偏差的原因,并为此类过程的监测预报提供思路,以期能加深预报员对低云过程的认识,从而有助于提高北京地区的精细化预报水平。

1 资料介绍

1.1 资料简介

本文所用观测资料包括 FY-4A 卫星的逐 5 min

可见光云图、北京地区加密自动气象站和探空等常规观测资料,以及海淀气象站激光云高仪和毫米波云雷达等新型探测资料。利用 ERA5 再分析资料分析天气形势,该资料包括纬向风、经向风、温度、位势高度等物理量,时间分辨率为 1 h,水平空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,垂直方向上 1000~1 hPa 共分为 37 层。本文时间均为北京时。

1.2 激光云高仪

激光云高仪(下文简称云高仪)是一种结构紧凑、功能强大的激光雷达系统,由于其价格低、易于维护、可以全天候高效运行,目前已广泛用于气象站、机场等无人值守平台。北京市气象局已建成由 10 部云高仪(Vaisala CL51 型)组成的观测网,分别安装在海淀、朝阳、丰台、房山、大兴、通州、昌平、顺义、怀柔和平谷等国家气象站,用来开展气溶胶垂直分布和边界层高度的连续监测,并在此基础上研发了全天边界层高度的反演算法。云高仪以气溶胶作为示踪物,利用气溶胶的浓度差异导致的后向散射信号在垂直方向上的梯度变化来确定大气边界层高度(Dang et al, 2019),其确定的边界层高度为物质边界层高度(Shi et al, 2020)。

云高仪通过向天空发射激光短脉冲,穿过大气时测量光的反射(由霾、雾、轻雾、雨幡、降水和云层引起的后向散射)来获取整个探测路径上的后向散射廓线,并同时探测云底。云高仪的探测精度高,后向散射数据具有 10 m 的垂直分辨率和 16 s 的时间分辨率,且对地面可见的云的观测效果好,但其受雾-霾影响较严重,对多层云的观测能力有限(吴翀等, 2017)。

云高仪返回信号功率可由下式获得:

$$P_r(z) = E_0 \frac{c}{2} \frac{A}{z^2} \beta(z) e^{-2 \int_0^z \sigma(z') dz'} \quad (1)$$

式中: $P_r(z)$ 代表从距离 z 处接收的瞬时功率, E_0 为有效脉冲能量, c 是光速, A 是接收器孔径, z 代表距离, $\beta(z)$ 为距离 z 位置处的容积后向散射系数, $e^{-2 \int_0^z \sigma(z') dz'}$ 为双向大气透射率,表征传送功率和后向散射功率的衰减。

根据激光脉冲发出和接收到后向散射信号之间的时间差,可以计算出云底高度、云层厚度等(朱君等, 2017)。

1.3 毫米波云雷达

毫米波云雷达(下文简称云雷达)工作在 Ka 波段,中心频率为 35 GHz,采用全固态、准连续波体制和脉冲压缩的信号形式,以顶空垂直固定扫描的方式工作。具有一 40~40 dBz 的探测能力,并且达到垂直方向距离上为 30 m、时间为 1 min 的分辨率要求。测量并输出云回波的反射强度、垂直速度和速度谱宽等一次产品,并在此基础上反演获得云顶高、云底高、云厚和云量等二次产品(仲凌志等, 2011; 赵静等, 2017)。目前,北京市气象局已在大兴、通州、海淀等区安装了多部云雷达。由于云雷达采用波长为毫米级的微波信号,故具备探测小粒子的优势以及良好的穿透能力,可以探测到云体的内部垂直结构(崔延星等, 2018),尤其是对非降水云和弱降水云的探测效果较好,是云三维精细结构探测的重要工具。

云雷达的工作原理是基于云和降水粒子对云雷达发射的电磁波产生散射作用,其中返回到天线方向被天线接收的部分称为后向散射,利用后向散射信号可探测到云的宏观和微观物理结构。云和降水粒子的回波强度是由后向散射强度决定的,根据雷达气象方程可获取雷达反射率因子:

$$P_r = \frac{\pi^3}{1024 \ln 2} \frac{P_t h G^2 \theta \varphi}{\lambda^2} \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2 \frac{Z}{R^2} \quad (2)$$

式中: P_r 为雷达回波功率, P_t 为雷达发射功率, h 为有效照射深度, G 为天线增益, λ 为雷达波长, θ 和 φ 分别为波束横截面在水平和垂直方向上的角宽度, R 为目标物离雷达的距离, Z 为雷达反射率因子, m 为和降水目标物相态有关的参数。

2 过程实况与预报情况

2.1 过程实况

2021 年 2 月 28 日 05 时至 3 月 1 日 12 时北京地区出现雨雪天气过程,全市平均降水量为 7.9 mm,受降水影响,近地层增湿明显。降水结束后,2—4 日北京地区 850~500 hPa(图 1a~1c)一直受西北偏西气流控制,无明显冷空气活动,同时地面由高压后部转到弱辐合区控制(图 1d)。

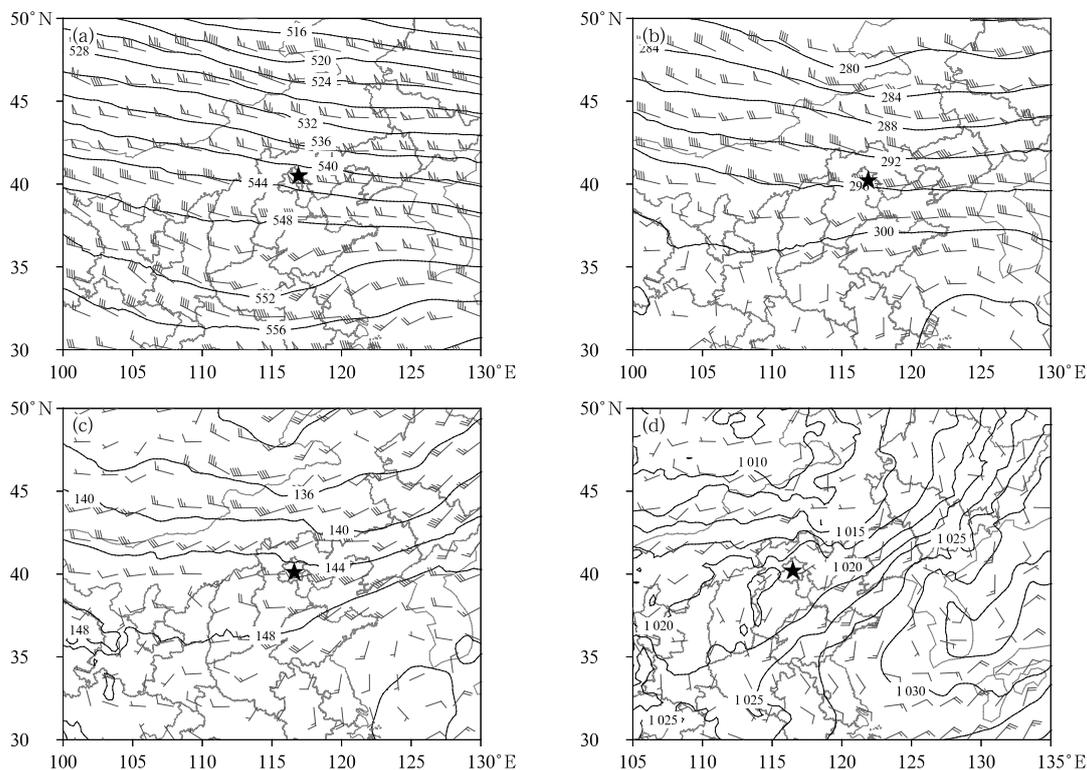


图 1 2021 年 3 月 3 日 08 时 (a)500 hPa, (b)700 hPa, (c)850 hPa 高度场(等值线, 单位: dagpm) 和风场; (d)海平面气压场(等值线, 单位: hPa) 和风场
(五角星所示为北京地区, 下同)

Fig. 1 The (a) 500 hPa, (b) 700 hPa, (c) 850 hPa geopotential height field (contour, unit: dagpm) and wind field, (d) surface pressure field (unit: hPa) and wind field at 08:00 BT 3 March 2021
(The star represents Beijing Area, the same below)

FY-4A 卫星可见光云图(图 2a~2e)显示, 从 2 日上午至 4 日中午前后, 北京地区持续受到表现为白亮特征的密实云层覆盖, 结合该期间红外云图(图 2g~2h), 该云层的云顶亮温较高, 可见这是一次低云影响, 直至 4 日下午(图 2f, 2i)低云逐渐消散, 在此时段内北京城区全天能见度大部分为 1~3 km(图 3); 同时地面相对湿度维持在 70%~80% 的高湿状态。受天空云量覆盖的影响, 北京平原地区白天太阳短波辐射增温作用和夜间地表长波辐射降温作用都非常有限, 2—4 日最高气温分别为 4.2、6.8 和 11.1℃, 最低气温分别为 1.7、2.5 和 2.0℃。

2.2 预报情况

针对此次过程, 北京市气象台 2 日 06 时预报 2—4 日以晴为主, 预报最高气温分别为 8、10 和 13℃, 最低气温分别为 -4、-2 和 0℃, 与实况相比, 对天空状况和气温的预报均出现了较大偏差, 其中最高气温的预报偏差分别为 3.8、3.2 和 1.9℃, 最

低气温的预报偏差分别为 5.7、4.5 和 2.0℃。

ECMWF(以下简称 EC)模式对此次过程的天形势预报较为准确, 但对边界层内相对湿度的预报较实况显著偏低(温度露点差显著偏高), 如表 1 所示, 其中 2 日 08 时 925 hPa 的相对湿度预报偏差达 60%, 而且对边界层内的湿层预报较实况明显偏薄, 故模式未能预报出低云的存在。当模式对云量的预报出现偏差时, 由于云量导致的温度预报也随之出现了偏差。图 4 为多家数值模式预报 3 月 1 日 20 时至 5 日 08 时 2 m 温度与实况的偏差, 可以看出 CMA、EC 和 NCEP 的温度预报偏差都较大, 最大偏差达到 6.3℃(EC, 3 日 05 时), 虽然偏差的具体数值大小不同, 但偏差的趋势是一致的, 即预报白天高温偏高、夜间低温偏低。

2.3 低云的云高仪观测特征

从海淀站云高仪反演的云底高度和边界层高度(图 5a~5d)可以看出, 低云维持期间云顶平坦, 基

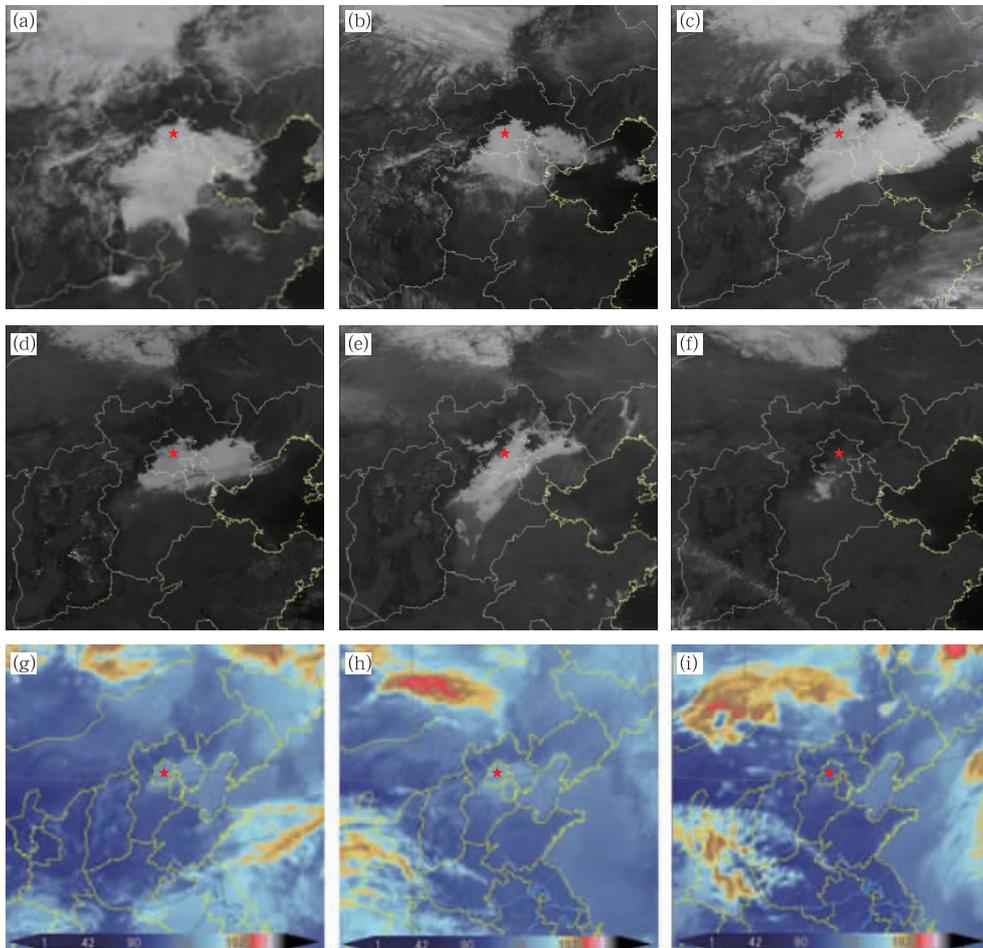


图 2 2021 年 3 月(a)2 日 11 时,(b)2 日 15 时,(c)3 日 11 时,(d)3 日 15 时,(e)4 日 10 时,(f)4 日 14 时 FY-4A 卫星可见光云图和(g)2 日 15 时,(h)3 日 15 时,(i)4 日 14 时 FY-4A 卫星红外云图

Fig. 2 Visible cloud images of FY-4A satellite at (a) 11:00 BT 2, (b) 15:00 BT 2, (c) 11:00 BT 3, (d) 15:00 BT 3, (e) 10:00 BT 4, (f) 14:00 BT 4 and infrared cloud images at (g) 15:00 BT 2, (h) 15:00 BT 3, (i) 14:00 BT 4 March 2021

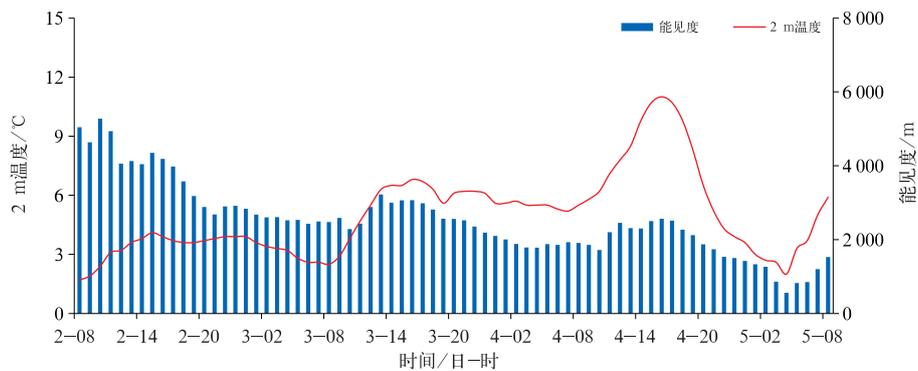


图 3 2021 年 3 月 2 日 08 时至 5 日 08 时北京观象台 2 m 温度及能见度时序图
Fig. 3 The 2 m temperature and visibility in Beijing Meteorological Observatory from 08:00 BT 2 to 08:00 BT 5 March 2021

本呈水平状分布,2 日 00 时至 3 日 04 时云底高度一直在 500 m 附近;3 日 11 时至 4 日 04 时云底高度

升高至 600~800 m,云层增厚。图 5 显示 2 日 00 时至 4 日 13 时前后,边界层高度维持在 500~800 m,且

无明显日变化,4日下午随着低云的逐渐消散,受太阳辐射的影响,湍流交换加强,边界层高度升至

1 km 左右。因此,2—4日边界层高度几乎与云底高度一致。

表 1 2021年3月1日20时EC模式预报2日08时至4日08时北京观象台925 hPa与1000 hPa相对湿度、实况相对湿度及偏差大小

Table 1 The predicted relative humidity of EC forecast at 20:00 BT 1 March 2021, the observed relative humidity and the deviation from 08:00 BT 2 to 08:00 BT 4 March 2021 at Beijing Observatory

时间/BT	高度层/hPa	实况相对湿度/%	预报相对湿度/%	偏差大小/%
2日08时	925	100	40	60
	1000	92	87	5
2日20时	925	94	67	27
	1000	78	53	25
3日08时	925	100	63	37
	1000	90	86	4
3日20时	925	100	55	45
	1000	75	48	27
4日08时	925	100	68	32
	1000	90	73	17

海淀站云高仪的后向散射系数时序图(图 5e~5h)显示,2日00时至4日12时(图 5a~5c),在低云内部后向散射强度呈现出随高度变化不均匀的特征,2日14—21时随高度增加,后向散射系数逐渐增大,其中0~400 m后向散射强度约为 $3\,000 \times 10^{-9} \text{ m}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$,400 m至云底高度处,后向散射强度为 $10\,000 \times 10^{-9} \text{ m}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$,而在2日21时至3日10时,后向散射系数随高度变化不明显,一直维持在 $10\,000 \times 10^{-9} \text{ m}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ 左右,这表明该时段内云体非常密实。后向散射强度的这种变化特征与云中气溶胶粒子分布不均匀有关,云高仪的后向散射廓线,实时反馈了大气气溶胶粒子的实际情况。另外,低云区与晴空区的后向散射强度差别较大,故两者的界限十分清楚。晴空区后向散射强度全天都很小,不超过 $100 \times 10^{-9} \text{ m}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$,各高度后向散射强度差别不大,且没有明显的日变化。

3月5日北京地区受东路冷空气的影响,大部分地区出现了小雨天气,并伴有3、4级偏北风的影响。为便于对比分析不同天气形势下云高仪和云雷达的观测数据特征,在本节和2.4节中把5日的两种观测资料特征一起进行讨论。5日08时之后(图 5d),与2—4日相比,后向散射系数出现了较大幅度的波动,这一方面是由于受东北路径冷空气的影响,海淀上空风速变大,空气流动造成气溶胶浓度等发生变化所致;另一方面,5日白天海淀站出现了弱的降水天气,由于云高仪的波长为910 nm,恰好是水汽的一个吸收带,云高仪的后向散射信号会受

到降水粒子的干扰,故后向散射强度波动范围较大(朱君等,2017)。5日16时之后,云的结构由单层变成了双层,但是双层云的结构并不是特别清楚,这主要是由于云体对云高仪的衰减作用很强,发射的激光在云底时就会产生较强的后向散射,使得激光强度迅速衰减,在穿过较高层次的云体时,穿透作用弱,故很难清晰探测到高层的云。已有研究表明云高仪对云层的穿透能力平均在300~400 m,大于1 km时一般无法穿透(李思腾等,2015)。

2.4 低云的云雷达观测特征

整体来看,与云高仪的观测结果相比,云雷达(图 6)对低云内部结构的观测较为粗略,且在4日11:50至5日08:10期间(图 6d,6e)没有探测到低云。

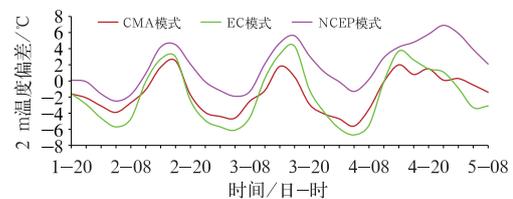


图 4 2021年3月1日20时至5日08时各家数值模式CMA、ECMWF和NCEP预报北京观象台2 m温度偏差图

Fig. 4 The deviation of 2 m temperature prediction of CMA, ECMWF, NCEP at Beijing Meteorological Observatory from 20:00 BT 1 to 08:00 BT 5 March 2021

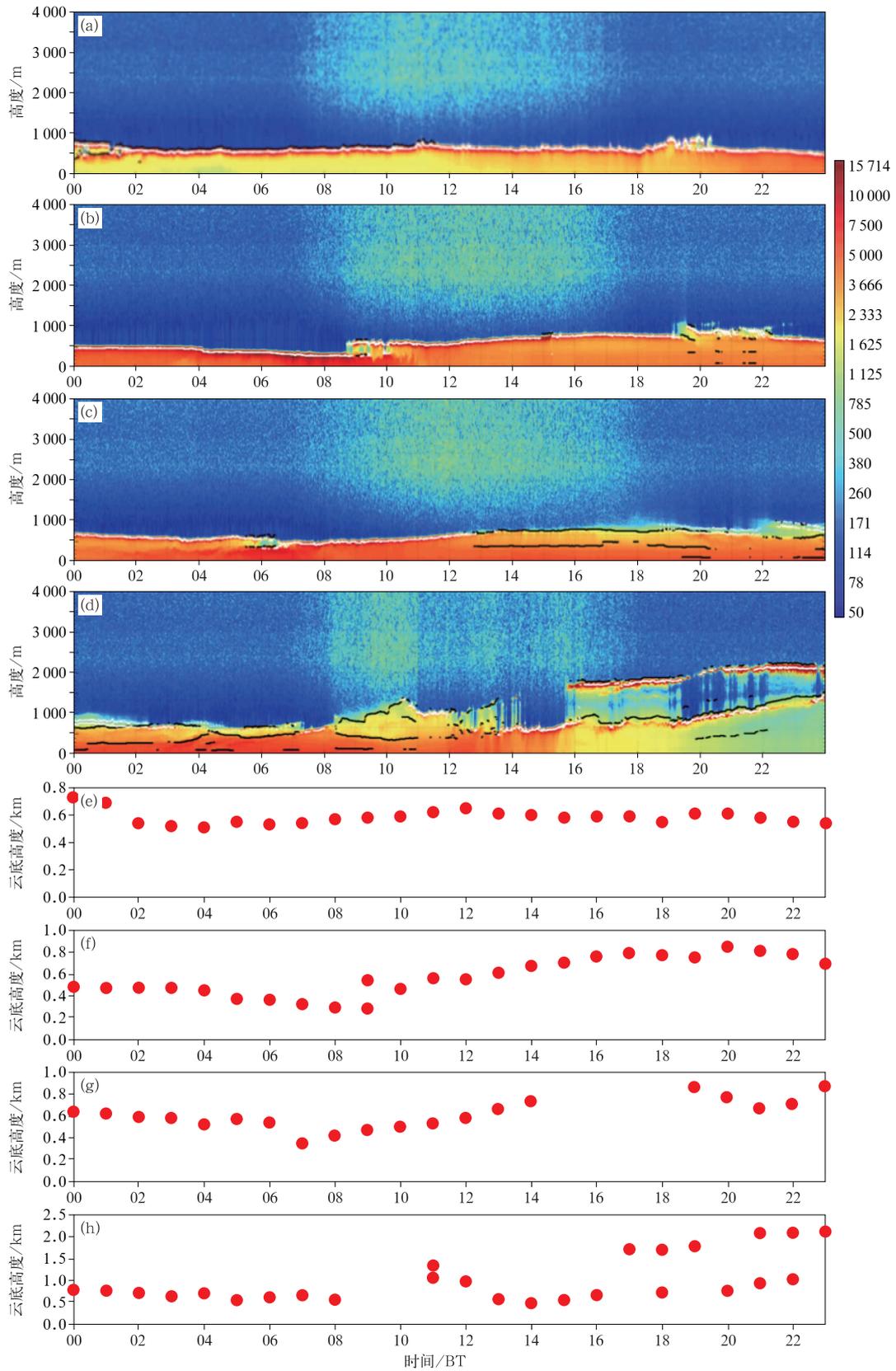


图 5 2021 年 3 月(a,e)2 日,(b,f)3 日,(c,g)4 日和(d,h)5 日海淀站(a~d)云高仪后向散射系数(填色,单位: $10^{-9} \text{ m}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$)、边界层高度(黑色实线)及(e~h)相应的云底高度

Fig. 5 (a~d) Backscatter coefficient (colored, unit: $10^{-9} \text{ m}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$), boundary layer height (black solid line) and (e~h) cloud base height from Haidian Ceilometer on (a, e) 2, (b, f) 3, (c, g) 4, (d, h) 5 March 2021

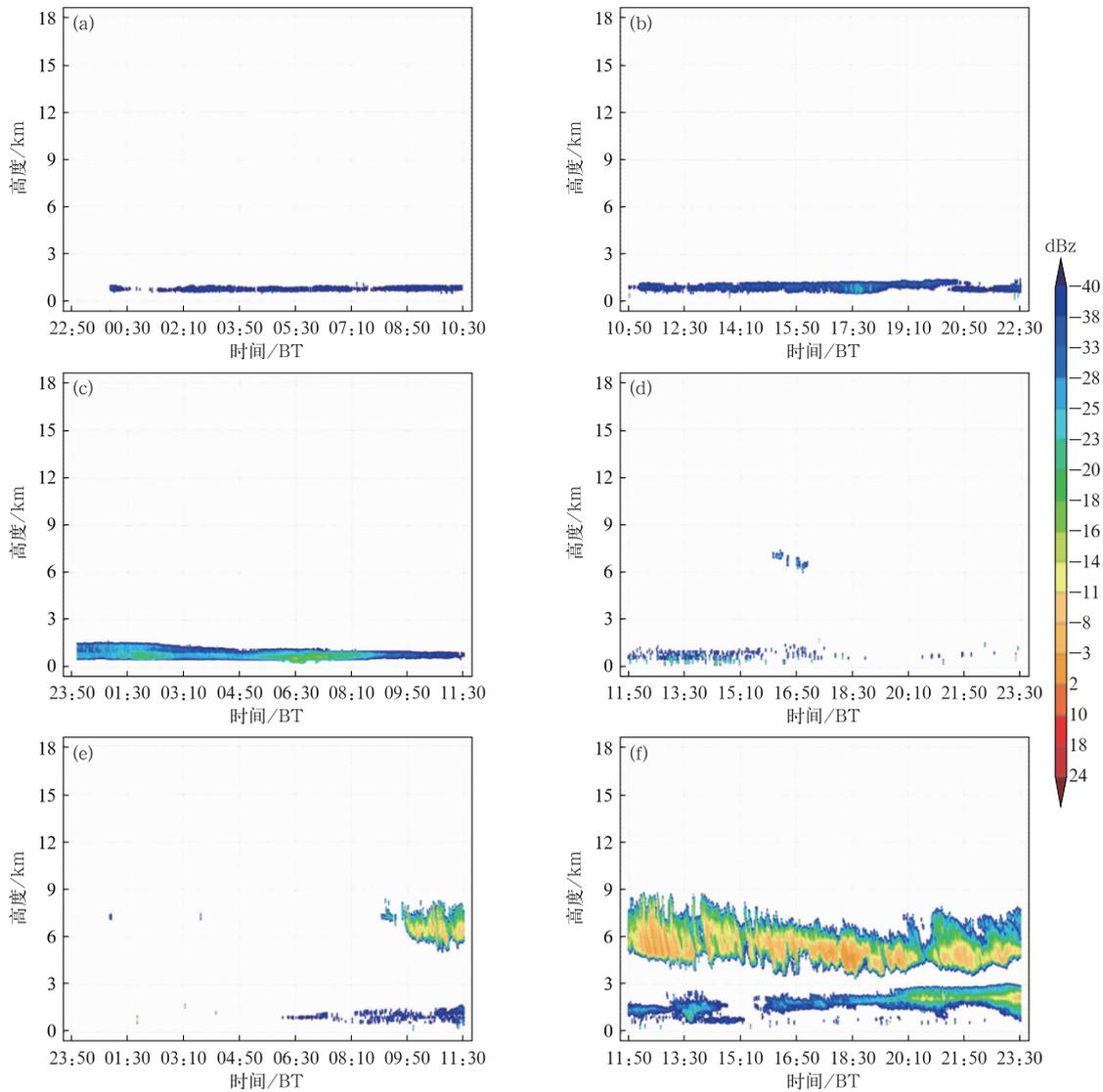


图 6 2021 年 3 月 1—5 日海淀云雷达反射率因子时序图

(a)1 日 22:50 至 2 日 10:30,(b)2 日 10:50—22:35,(c)2 日 23:50 至 3 日 11:30,

(d)4 日 11:50—23:30,(e)4 日 23:50 至 5 日 11:30,(f)5 日 11:50—23:30

Fig. 6 Reflectivity factor from Haidian Cloud Radar from 1 to 5 March 2021

(a) 22:50 BT 1 to 10:30 BT 2, (b) 10:50 BT to 22:35 BT 2, (c) 23:50 BT 2 to 11:30 BT 3,

(d) 11:50 BT to 23:30 BT 4, (e) 23:50 BT 4 to 11:30 BT 5, (f) 11:50 BT to 23:30 BT 5

在云微物理学中,云体是由云粒子(云滴、冰晶)和降水粒子(雨、雪、雹)组成的。Kogan et al(2005)提出了非降水云的标准,认为 -17 dBz 是出现降水粒子的最低反射率值。1 日 22:50 至 5 日 00:00 (图 6a~6e),云内粒子的最大回波强度几乎都小于 -17 dBz,这与在此期间实况未观测到降水是相吻合的,同时也说明云体内部粒子主要是云滴。5 日 09:50—23:30(图 6e,6f),与云高仪相比,云雷达可以清楚地探测到海淀上空的两层云,这是由于云雷达的波长较短,对云滴粒子的散射特性明显,能够穿

透云层,探测到多层云的垂直结构。以 5 日 15 时上空的云为例(图 6f),第一层云厚为 1500 m,云顶高度接近 3000 m,云中反射率因子强度最大为 -23 dBz;第二层云出现在 3600~8000 m 的高层云区,云厚约为 4400 m,云中反射率因子强度最大达到 9 dBz,而从海淀站逐小时自动站观测可知 15 时前后该站出现了弱降水,说明降水主要是由高度在 3600~8000 m 的高层云产生的。

通过 2.3 节和 2.4 节的分析可知,由于云雷达和云高仪的探测原理不同,导致两者探测结果的差

异也是显而易见的。云雷达的反射率因子强度与云滴粒径和浓度有关,且波长较短,因此具有穿透云层,给出多层云垂直结构信息的能力;云高仪作为一个低能量的观测方向为天顶的激光雷达,通常无法穿透浓密的低层云,因而主要用于云底高度的探测。所以两者在云的观测方面都有其各自的优势,在有云时可综合利用云高仪和云雷达的探测结果进行分析,才能获得相对准确的云的信息。

对于3月2—4日的持续性低云过程,可利用云高仪后向散射强度、云底高度等的大小和变化趋势,实现对低云天气的实时监测,而且云高仪作为一种可全天候无间歇的观测设备,可以满足连续性和时效性的要求。而从云雷达的反射率时序图中可以获得云体的垂直结构信息,为预测云体的发展、研究云的宏观结构特征提供良好的基础。因此,相对于常规观测资料,云高仪和云雷达可获取到云体结构更为精细的信息,可作为常规观测的有益补充。

3 低云的形成和维持机制

3.1 水汽条件

利用 ERA5 再分析资料进行诊断分析。首先

分析成云的水汽条件,3日08时是这次低云过程中逆温最强、云体最厚的时段,故着重分析该时段的水汽条件。3日08时北京观象台附近900 hPa以下为水汽辐合区,最大水汽通量散度出现在950 hPa,达到 $-0.36 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1}$ (图7a),同时900 hPa以下比湿大于 $3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。因此,水汽的辐合使得900 hPa以下大量的水汽汇集,形成一个稳定的高湿区。

结合前期地面物理量的变化(图8)可以发现,降水于3月1日08时逐渐结束,降水结束之后露点温度存在短暂的下降,从1日08时的 -2.5°C 降至11时的 -6.3°C ,11时后露点温度迅速上升,这意味着1日08—11时只有短暂的弱冷空气影响使得北京地区的绝对湿度下降。地面逐小时自动站观测资料显示2月28日08时至3月1日13时北京观象台一直为东北气流,从1日14时开始地面转为偏南风,随着偏南风的建立,露点温度升高(图8),绝对水汽含量增大。降水过后,冷空气的强度较弱、近地层水汽几乎没有被清除,是低云形成的有利背景,也是这次低云过程产生的主要原因。而这种现象在北京地区并不多见,通常情况下,一次降水过后,随着冷空气南下影响,露点往往急剧下降,整层变干(孙兴池等,2017)。

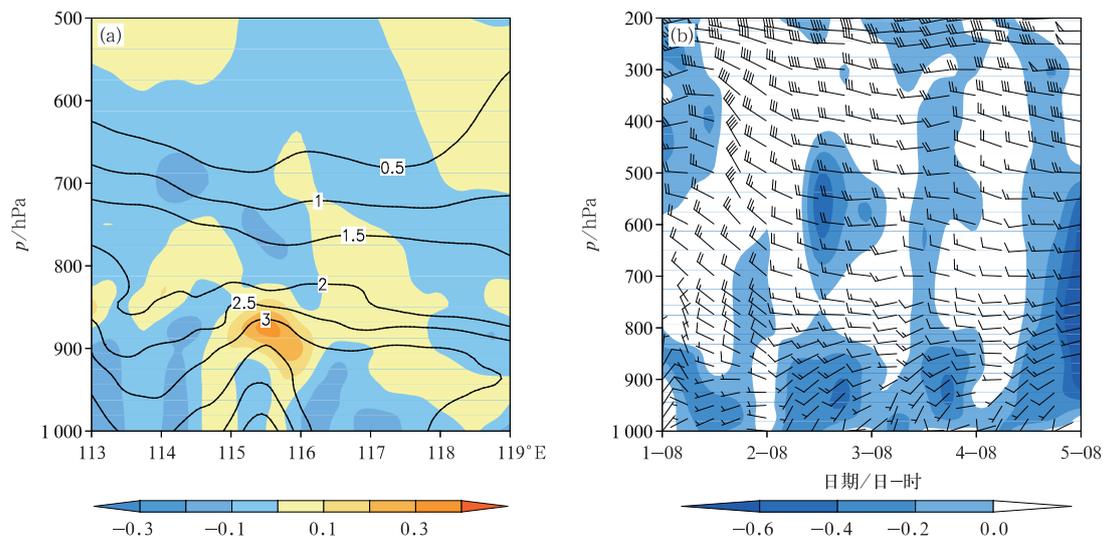


图7 2021年3月(a)3日08时沿 39.8°N 的水汽通量散度(填色,单位: $10^{-7} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1}$,负值代表水汽辐合区)和比湿(等值线,单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)的高度-经度剖面,
(b)1日08时至5日08时北京观象台的垂直速度(填色,单位: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$)和水平风场的高度-时间剖面
Fig. 7 (a) The water vapor flux divergence (colored, unit: $10^{-7} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1}$; negative value; water vapor convergence area) and specific humidity (contour, unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) along 39.8°N at 08:00 BT 3,
(b) time-height cross-section of vertical velocity (colored, unit: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$) and horizontal wind field at Beijing Meteorological Observatory from 08:00 BT 1 to 08:00 BT 5 March 2021



图 8 2021 年 2 月 28 日 08 时至 3 月 1 日 20 时北京观象台逐小时露点(绿色曲线,单位:℃)、温度(红色曲线,单位:℃)及逐小时降水量(蓝色柱状,单位:mm)时序图

Fig. 8 Dew-point temperature (green curve, unit: °C), temperature (red curve, unit: °C) and hourly precipitation (blue column, unit: mm) at Beijing Meteorological Observatory from 08:00 BT 28 February to 20:00 BT 1 March 2021

3.2 动力条件

云的形成一般伴随有上升运动。3 月 2 日 08 时至 4 日 08 时观象台上空 800 hPa 以上层次以下下沉气流为主(图 7b),800 hPa 以下为弱上升运动区,其中 2 日 20 时前后,弱上升运动区扩展至 400 hPa,最大垂直速度为 $-0.5 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ (约 $0.04 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),出现在 950 hPa 附近,因此,低云过程期间弱上升气流能够将湿空气带到空中,附着在凝结核上形成云滴,并受到持续的弱上升气流的影响,漂浮在低空而使低云维持。

3.3 层结条件

层结条件对于低云的发展和维持至关重要(刘峰等,2007),利用北京观象台的秒探空资料对低云期间大气垂直结构的变化进行分析。3 月 1 日 08 时(图 9a),温度廓线和露点温度廓线几乎完全重合,此时降水处于尾声,整层饱和程度高。至 1 日 20 时(图 9b),900 hPa 高度处的逆温已经形成,这与 850 hPa 以上层次存在干冷空气下沉增温有关,但露点温度在此期间并无变化。2 日 08 时(图 9c)和 3 日 08 时(图 9d),温度和露点温度廓线在 900 hPa 处都呈现出明显的向上张口趋势,表明高空的干冷空气出现下沉,温度增加,露点温度减小,因此此次低云过程中逆温的形成主要是由下沉逆温造成的。表 2 所示,2 日 08 时至 3 日 08 时逆温层厚度不断增强,3 日 08 时 1~1.5 km 逆温强度达到 $7.5 \text{ }^\circ\text{C}$,

与 2 日 08 时的逆温强度 $3.7 \text{ }^\circ\text{C}$ 相比明显增强,是这次低云过程中逆温最强、云体最厚的时段,强烈发展的逆温层使得逆温以下的大气非常静稳。逆温形成后,垂直方向的交换极其微弱,难以突破逆温,同时水平方向上风较弱,2 日 08 时至 4 日 08 时观象台附近 950 hPa 以下风速仅为 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 7b),静稳形势得以长时间维持。

另外,这次低云过程中 850 hPa 以上的中高空虽然都为西北气流控制,但是西北气流的偏北风分量没有足够大,所以下沉运动没有强到可以影响至地面,来打破逆温层。如果西北气流再强些,或偏北风分量再大些,下沉气流也许可以冲破逆温层影响至地面,那么北京地区将会是晴朗的天气。所以定性去判断西北气流带来的影响比较困难,需结合西北气流的层次、厚度、偏北风分量的大小等分析,但这不是本文研究的重点。

3.4 地形作用

北京地区地处华北平原的北部,西靠太行山北尾,北侧为燕山山脉。雷蕾等(2020)表明,地形在暴雨过程中起着重要作用。那么地形与低云的形成有怎样的联系?利用 ERA5 再分析资料得到的低云量进行分析,以低云发展最明显的 3 月 3 日 08 时为例,可以发现低云量大于 6 成的分布区域边界位于北京沿山一带,与海拔 400 m 的高度线相吻合(图 10),而 2 日 20 时云底高度也恰为 400 m 左右,低云期间的其他时刻也有类似的规律特征(图略),这说

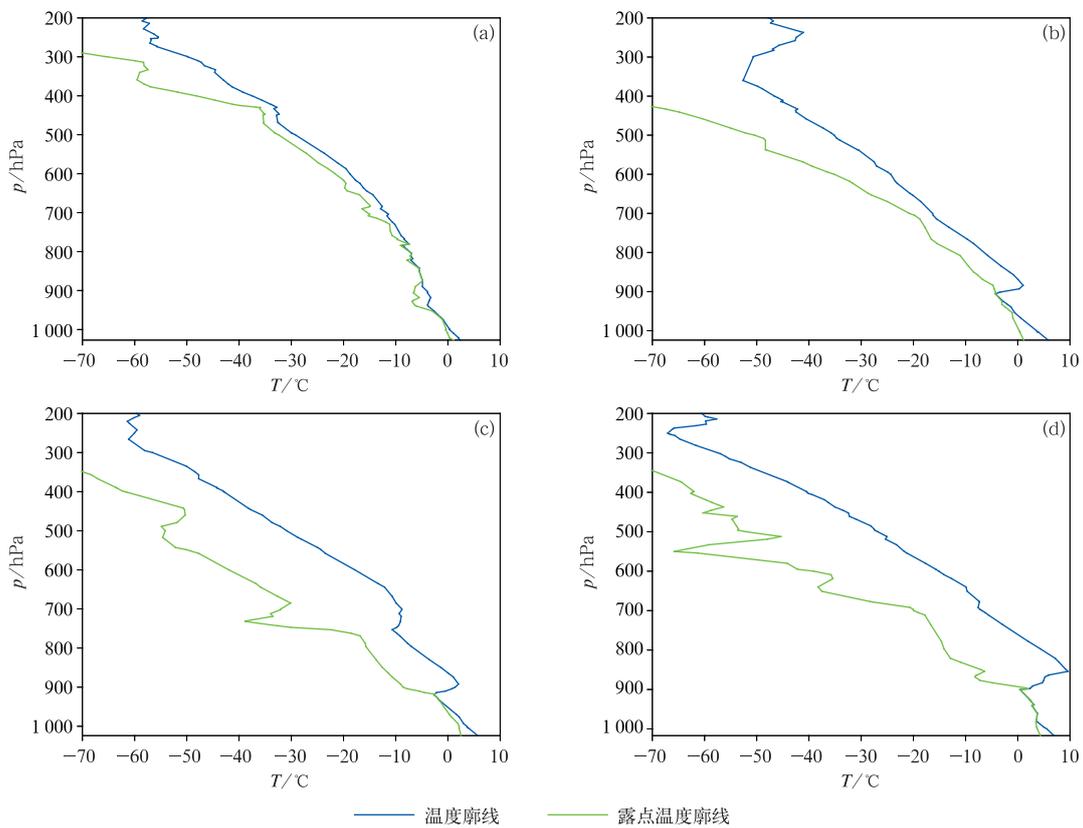


图 9 2021 年 3 月(a)1 日 08 时,(b)1 日 20 时,(c)2 日 08 时和(d)3 日 08 时北京观象台大气层结
 Fig. 9 Atmospheric stratification at Beijing Meteorological Observatory at
 (a) 08:00 BT 1, (b) 20:00 BT 1, (c) 08:00 BT 2, (d) 08:00 BT 3 March 2021

表 2 2021 年 3 月 2 日 08 时至 4 日 20 时北京观象台探空物理量列表
 Table 2 Physical quantities of Beijing Meteorological Observatory radiosonde
 from 08:00 BT 2 to 20:00 BT 4 March 2021

时间/BT	逆温层次/m	逆温厚度/m	逆温强度/°C	完全饱和层次/m
2 日 08 时	909~1148	239	3.7	775~909
2 日 20 时	1280~1601	321	5.5	1027~1306
3 日 08 时	1014~1429	415	7.5	330~1014
3 日 20 时	1384~1600	216	2.9	715~1056
4 日 08 时	765~1379	614	6.9	465~899
4 日 20 时	840~1103	263	5.2	/

注:“完全饱和层次”是指相对湿度达到 100% 的层次
 Note:“Fully saturated level” represents the level at which the relative humidity reaches 100%

明地形对低云的形成密切相关。不难理解,地形一方面使得湿空气抬升达到饱和和形成云,另一方面地形的阻挡作用使得云体稳定维持在山前。

综上所述,此次低云过程是在前期降水过后无明显冷空气影响,近地面湿度未得到很好的清除这一有利背景下,配合稳定的大气层结、弱上升运动和地形因素的共同作用下得以维持和发展。

4 低云的消散机制

低云过程在 3 月 4 日下午逐渐减弱,实况高空观测显示 4 日 08 时北京观象台 925 hPa 的温度为 0.8°C,位于北京地区以南的河北邢台站温度为 12°C,存在 11.2°C 的温差,至 20 时,北京观象台的

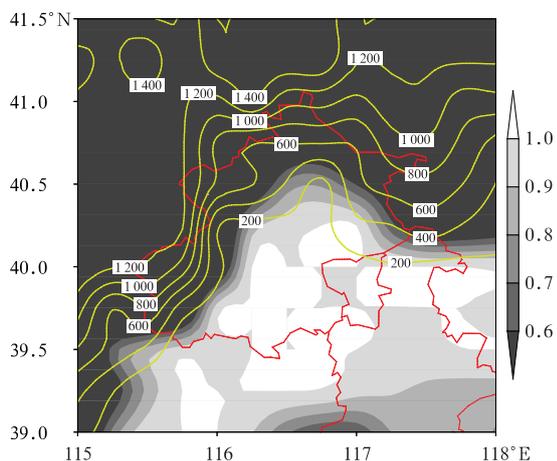


图 10 2021年3月3日08时北京地区低云量(阴影)及地形高度分布(等值线,单位:m)

Fig. 10 Distributions of low cloud cover (shaded) and topography height (contour, unit: m) in Beijing at 08:00 BT 3 March 2021

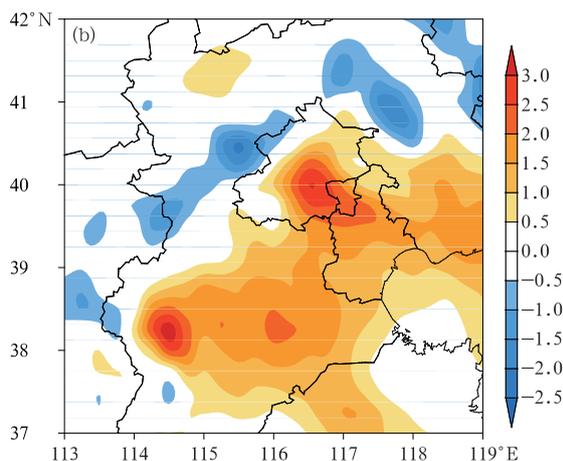
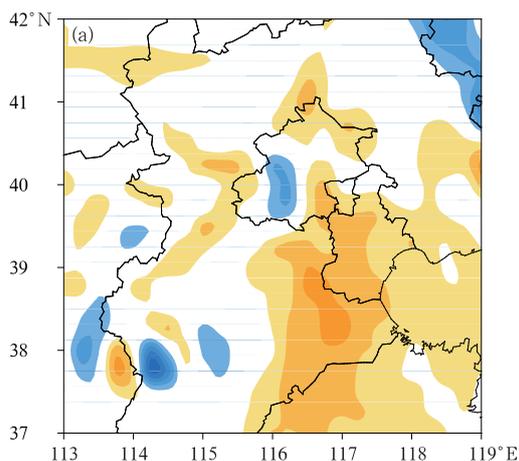


图 11 2021年3月4日(a)08时和(b)20时北京地区925 hPa温度平流分布(单位: $10^{-4} \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 11 The 925 hPa temperature advection (unit: $10^{-4} \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$) in Beijing at (a) 08:00 BT and (b) 20:00 BT 4 March 2021

云高仪也显示此时边界层高度升高。综上所述,925 hPa 暖平流发展和风速增大的共同作用,使得大气湍流增强,边界层内混合加强,进而导致相对湿度减小,低云消散。

5 结论与讨论

本文利用常规气象观测资料、ERA5 再分析资料、FY-4A 可见光云图及云高仪和云雷达等新型探测资料,分析了2021年3月2—4日发生在北京地区的一次持续性低云过程,探讨了本次过程的形成

和维持机制,得到以下主要结论:
(1)多家数值模式对2—4日的云量预报均出现了较大偏差,从而导致气温的预报也出现了较大偏差。
(2)此次低云过程是在前期降水过后无明显冷空气影响、近地面湿度未得到很好的清除这一有利背景下,配合稳定的大气层结、弱上升运动和地形因素的共同作用下得以维持和发展。
(3)925 hPa 暖平流发展和风速增强破坏了稳定层结,使得边界层内混合加强,进而导致低云消散。

气温升至 4°C ,而且4日白天河北中南部925 hPa至地面一直都为偏南风控制(图略),表明925 hPa 暖平流的影响使北京平原地区温度升高。利用ERA5再分析资料计算出的925 hPa 温度平流分布显示4日08时(图11a)北京北部和城区东部均为弱的暖平流控制,最大暖平流强度为 $1.2 \times 10^{-4} \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$,北京城区西部为冷平流控制,最大冷平流强度为 $-1.5 \times 10^{-4} \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$,而20时(图11b)从河北的中南部至北京大部分地区都为较强的暖平流控制,北京城区暖平流强度达到 $3.5 \times 10^{-4} \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ 。北京观象台实况自动气象站监测显示4日08时2 m相对湿度为89%,15时2 m相对湿度减小至61%,而露点温度在4日08时和15时均为 3.7°C 。因此,气温升高后,当绝对湿度不变时,相对湿度下降,低云减弱消散。同时,20时925 hPa 风速增大至 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图略),使得水平方向上的交换增强,海淀站

(4)相对于常规观测资料,云高仪和云雷达可获取到云体结构更为精细的信息,可作为常规观测的有益补充。两者在云的观测方面都有其各自的优势,可以利用云高仪后向散射强度、云底高度等的大小和变化趋势,实现对低云天气的实时监测;可以利用云雷达的反射率时序图获得不同天气状况下云体的内部结构信息,为预测云体的发展、研究云的宏观结构特征提供良好的基础。

参考文献

- 陈德辉,薛纪善,2004.数值天气预报业务模式现状与展望[J].气象学报,62(5):623-633. Chen D H, Xue J S, 2004. An overview on recent progresses of the operational numerical weather prediction models[J]. Acta Meteor Sin, 62(5):623-633(in Chinese).
- 崔延星,刘黎平,何建新,等,2018.基于云雷达、C波段连续波雷达和激光云高仪融合数据的华南夏季云参数统计分析[J].成都信息工程大学学报,33(3):242-249. Cui Y X, Liu L P, He J X, et al, 2018. Statistical analysis of South China summer cloud parameters based on cloud radar, C-band continuous wave radar and ceilometer fusion data[J]. J Chengdu Univ Inf Technol, 33(3):242-249(in Chinese).
- 杜晖,蔡占文,殷启元,等,2021.基于全球天气预报系统对河套周边地区低云量精细化预报[J].兰州大学学报:自然科学版,57(2):176-184. Du H, Cai Z W, Yin Q Y, et al, 2021. Refined forecast of low cloud cover around Hetao Area based on global weather forecasting system forecast field[J]. J Lanzhou Univ: Nat Sci, 57(2):176-184(in Chinese).
- 胡邦辉,刘丹军,王学忠,等,2011.最小二乘支持向量机在云量预报中的应用[J].气象科学,31(2):187-193. Hu B H, Liu D J, Wang X Z, et al, 2011. Application of least squares support vector machine in prediction of cloud cover[J]. J Meteor Sci, 31(2):187-193(in Chinese).
- 黄海亮,靳双龙,王式功,等,2018.相似预报方法在山西省云量预报中的应用[J].干旱气象,36(5):845-851. Huang H L, Jin S L, Wang S G, et al, 2018. Application of analog forecast method in cloud cover prediction in Shanxi Province[J]. J Arid Meteor, 36(5):845-851(in Chinese).
- 姜晓飞,刘奇俊,马占山,2015. GRAPES全球模式浅对流过程和边界层云对低云预报的影响研究[J].气象,41(8):921-931. Jiang X F, Liu Q J, Ma Z S, 2015. Influences of shallow convective process and boundary layer clouds on cloud forecast in GRAPES Global Model[J]. Meteor Mon, 41(8):921-931(in Chinese).
- 矫梅燕,龚建东,周兵,等,2006.天气预报的业务技术进展[J].应用气象学报,17(5):594-601. Jiao M Y, Gong J D, Zhou B, et al, 2006. An overview of the development of weather forecasting[J]. J Appl Meteor Sci, 17(5):594-601(in Chinese).
- 雷蕾,邢楠,周璇,等,2020.2018年北京“7.16”暖区特大暴雨特征及形成机制研究[J].气象学报,78(1):1-17. Lei L, Xing N, Zhou X, et al, 2020. A study on the warm-sector torrential rainfall during 15-16 July 2018 in Beijing Area[J]. Acta Meteor Sin, 78(1):1-17(in Chinese).
- 李思腾,马舒庆,高玉春,等,2015.毫米波云雷达与激光云高仪观测数据对比分析[J].气象,41(2):212-218. Li S T, Ma S Q, Gao Y C, et al, 2015. Comparative analysis of cloud base heights observed by cloud radar and ceilometer[J]. Meteor Mon, 41(2):212-218(in Chinese).
- 刘峰,林智,钟加杰,2007.广州白云机场一次低云低能见度天气过程的成因[J].广东气象,29(3):21-23. Liu F, Lin Z, Zhong J J, 2007. Case study on a low visibility event caused by low stratus in Guangzhou Bai-Yun Airport[J]. Guangdong Meteor, 29(3):21-23(in Chinese).
- 刘开宇,张云瑾,田军,2010.贵阳机场一次低云天气的诊断分析[J].云南大学学报(自然科学版),32(S2):213-216, 221. Liu K Y, Zhang Y J, Tian J, 2010. The analysis of low clouds weather in Guiyang Airport[J]. J Yunnan Univ, 32(S2):213-216, 221(in Chinese).
- 孙兴池,韩永清,李静,等,2017.垂直运动对雾-霾及空气污染过程的影响分析[J].高原气象,36(4):1106-1114. Sun X C, Han Y Q, Li J, et al, 2017. Analysis of the influence of vertical movement on the process of fog and haze with air pollution[J]. Plateau Meteor, 36(4):1106-1114(in Chinese).
- 文丹青,黄波,2010.广州白云机场两次低云低能见度过程对比分析[J].气象研究与应用,31(S2):16-17. Wen D Q, Huang B, 2010. Comparative analysis of two low cloud and low visibility processes in Guangzhou Bai-Yun Airport[J]. J Meteor Res Appl, 31(S2):16-17(in Chinese).
- 吴翀,刘黎平,翟晓春,2017. Ka波段固态发射机体制云雷达和激光云高仪探测青藏高原夏季云底能力和效果对比分析[J].大气科学,41(4):659-672. Wu C, Liu L P, Zhai X C, 2017. The comparison of cloud base observations with Ka-band solid-state transmitter-based millimeter wave cloud radar and ceilometer in summer over Tibetan Plateau[J]. Chin J Atmos Sci, 41(4):659-672(in Chinese).
- 向喆,2020.福州机场冬季低云低能见度天气个例研究[J].农业灾害研究,10(5):56-62. Xiang Z, 2020. A study on low clouds and low visibility weather in winter at Fuzhou Changle International Airport[J]. J Agric Catastrophol, 10(5):56-62(in Chinese).
- 熊秋芬,胡江林,陈永义,2007.天空云量预报及支持向量机和神经网络方法比较研究[J].热带气象学报,23(3):255-260. Xiong Q F, Hu J L, Chen Y Y, 2007. The study on forecast of cloud amount with SVM and ANN methods[J]. J Trop Meteor, 23(3):255-260(in Chinese).
- 赵晨阳,徐国强,黄守友,2020.应用卫星资料改进云计算过程的初步试验研究[J].气象,46(12):1586-1595. Zhao C Y, Xu G Q, Huang S Y, 2020. Preliminary experimental study on improving cloud computing process with satellite data[J]. Meteor Mon, 46(12):1586-1595(in Chinese).
- 赵静,曹晓钟,代桃高,等,2017.毫米波云雷达与探空测云数据对比分析[J].气象,43(1):101-107. Zhao J, Cao X Z, Dai T G, et al, 2017. Comparative analysis of cloud observed by millimeter

- wave cloud radar and sounding[J]. Meteor Mon, 43(1):101-107 (in Chinese).
- 赵文婧, 赵中军, 汪结华, 等, 2016. 基于支持向量机的云量精细化预报研究[J]. 干旱气象, 34(3):568-574, 589. Zhao W J, Zhao Z J, Wang J H, et al, 2016. A study on refined forecast of cloud cover based on support vector machine[J]. J Arid Meteor, 34(3):568-574, 589(in Chinese).
- 郑晓辉, 徐国强, 魏荣庆, 2013. GRAPES 新云量计算方案的引进和影响试验[J]. 气象, 39(1):57-66. Zheng X H, Xu G Q, Wei R Q, 2013. Introducing and influence testing of the new cloud fraction scheme in the GRAPES[J]. Meteor Mon, 39(1):57-66 (in Chinese).
- 仲凌志, 刘黎平, 葛润生, 等, 2011. 毫米波测云雷达的系统定标和探测能力研究[J]. 气象学报, 69(2):352-362. Zhong L Z, Liu L P, Ge R S, et al, 2011. A study of the calibration of the new generation of millimeter-wave-length cloud radar (HMBQ) and its detection capability[J]. Acta Meteor Sin, 69(2):352-362 (in Chinese).
- 朱君, 曹晓钟, 李晓兰, 2017. 激光云高仪与可见光测云仪观测试验对比[J]. 气象科技, 45(4):611-615. Zhu J, Cao X Z, Li X L, 2017. Comparative observational experiment between laser ceilometers and visible cloudmeter[J]. Meteor Sci Technol, 45(4):611-615 (in Chinese).
- Adler B, Kalthoff N, Gantner L, 2017. Nocturnal low-level clouds over southern West Africa analysed using high-resolution simulations[J]. Atmos Chem Phys, 17(2):899-910.
- Dang R J, Yang Y, Hu X M, et al, 2019. A review of techniques for diagnosing the atmospheric boundary layer height (ABLH) using aerosol Lidar Data[J]. Remote Sens, 11(13):1590.
- Kogan Z N, Mechem D B, Kogan Y L, 2005. Assessment of variability in continental low stratiform clouds based on observations of radar reflectivity [J]. J Geophys Res: Atmos, 110 (D18): D18205.
- Rosenfeld D, 2006. Aerosols, clouds, and climate [J]. Science, 312 (5778):1323-1324.
- Shi Y, Hu F, Xiao Z S, et al, 2020. Comparison of four different types of planetary boundary layer heights during a haze episode in Beijing[J]. Sci Total Environ, 711:134928.
- Stevens B, Brenguier J L, 2009. Cloud-controlling factors: low clouds [M]// Heintzenberg J, Charlson R J. Clouds in the Perturbed Climate System: Their Relationship to Energy Balance, Atmospheric Dynamics, and Precipitation. Cambridge: MIT Press: 173-196.
- Twomey S, Wojciechowski T A, 1969. Observations of the geographical variation of cloud nuclei[J]. J Atmos Sci, 26(4):648-651.
- Weaver C J, Pearson Jr R, 1990. Entrainment instability and vertical motion as causes of stratocumulus breakup[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 116(496):1359-1388.
- Wood R, Bretherton C S, 2006. On the relationship between stratiform low cloud cover and lower-tropospheric stability[J]. J Climate, 19(24):6425-6432.

(本文责编:王婷波)