

牛宁,任素玲,覃丹宇,2024. FY-4A 数据在 2021 年 1 月 6—8 日寒潮监测中应用[J]. 气象,50(6):661-674. Niu N, Ren S L, Qin D Y, 2024. Application of FY-4A satellite data in monitoring of the cold wave from 6 to 8 January 2021[J]. Meteor Mon, 50(6):661-674(in Chinese).

FY-4A 数据在 2021 年 1 月 6—8 日寒潮监测中应用^{*}

牛 宁^{1,3} 任素玲^{2,3,4} 覃丹宇^{2,3,4}

1 中国气象局干部培训学院,北京 100081

2 国家卫星气象中心/国家空间天气监测预警中心,北京 100081

3 许健民气象卫星创新中心,北京 100081

4 中国遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室,北京 100081

提 要: 基于静止气象卫星图像解译理论和位涡理论,应用 FY-4A 水汽图像、干涉式大气垂直探测仪(GIIRS)产品和欧洲中心第五代大气再分析资料(ERA5)对 2021 年 1 月 6—8 日我国中东部地区寒潮天气进行分析。结果表明:高空冷涡和地面冷高压是影响此次寒潮天气的主要影响系统,冷空气 5 日 08:00 从贝加尔湖南部向东、向南加强发展,8 日 20:00 减弱;对比 FY-4A/GIIRS 与 ERA5 850 hPa 24 h 变温数据发现:两种数据反映的对流层低层冷空气东移南下特征和正负变温区域分布特征基本一致,FY-4A/GIIRS 850 hPa 24 h 负变温中心和 0℃等变温线的位置与 ERA5 数据接近,FY-4A/GIIRS 850 hPa 24 h 变温中心值强度略大于 ERA5。水汽图像暗区变暗附近的高层位涡的增加激发高层气旋性环流后侧下沉运动增强,干空气下沉造成了地面高压增强;500 hPa 冷涡中心附近绝对涡度增加是引起冷空气增强的原因之一;冷空气急剧增强时段,中低层位涡的加大引起地面冷空气堆积,寒潮增强。FY-4A/GIIRS 温度产品反映的冷空气移动特征与位涡理论对冷空气增强原因分析结果一致,说明应用 FY-4A/GIIRS 温度产品能够有效监测分析寒潮冷空气演变特征。

关键词: FY-4A 水汽图像,GIIRS 温度廓线,位涡,寒潮

中图分类号: P412,P458

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2024.032601

Application of FY-4A Satellite Data in Monitoring of the Cold Wave from 6 to 8 January 2021

NIU Ning^{1,3} REN Suling^{2,3,4} QIN Danyu^{2,3,4}

1 CMA Training Centre, Beijing 100081

2 National Satellite Meteorological Centre/National Centre for Space Weather, Beijing 100081

3 Innovation Center for FengYun Meteorological Satellite (FYSIC), Beijing 100081

4 Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites, Beijing 100081

Abstract: Using the FY-4A satellite water vapor images and geostationary interferometric infrared sounder (GIIRS) products combined with potential vorticity products, the cold wave in central and eastern China from 6 to 8 January in 2021 is analyzed, based on the interpretation principle of meteorological satellite images and basic theory of potential vorticity conservation. It is found that this cold wave event was affected mainly by the high-altitude cold vortex and the surface cold high. The low-level cold air moved from the south of Baikal Lake to southeast and strengthened at 08:00 BT 5 January. By 20:00 BT 8, it weakened.

^{*} 国家自然科学基金项目(42175014)、中国气象局复盘总结专项(FPZJ2023-167)、风云卫星应用先行计划(2021YFB3900400)和东北冷涡研究重点开放实验室开放基金课题(2023SYIAEKF2D04)共同资助

2023 年 5 月 19 日收稿; 2024 年 2 月 24 日收修定稿

第一作者:牛宁,主要从事风云卫星数据在寒潮和强对流天气中应用研究. E-mail:niun@cma.gov.cn

通讯作者:任素玲,主要从事风云卫星数据在灾害性天气分析中应用研究. E-mail:rensl@cma.gov.cn

The comparison of 850 hPa 24 h temperature changes of FY-4A/GIIRS and ERA5 shows that the characteristics of the low troposphere cold air moving to southeast and the cold and warm temperature change regional distribution monitored by FY-4A/GIIRS are basically consistent with the ERA5 data. The 24 h negative temperature change center at 850 hPa and the location of 0°C isallotherm by FY-4A/GIIRS were similar to the ERA5 data. The intensity of the 24 h temperature change center at 850 hPa by FY-4A/GIIRS was slightly higher than that of ERA5. The increase of high-level potential vorticity near the enhancement of the dark area of the water vapor image triggered the enhancement of the subsidence movement behind the high-level cyclonic circulation, and the dry air subsidence caused the enhancement of the surface high pressure. The increase of absolute vorticity near the center of 500 hPa cold vortex was one of the reasons for the enhancement of cold air. During the period of sharp strengthening of cold air, the increase of vortices in the middle and lower layers resulted in the accumulation of cold air on the ground and the enhancement of cold wave. The analysis result of potential vorticity theory on the enhancement mechanism of cold air is consistent with the development characteristic of cold wave movement of FY-4A/GIIRS temperature data. This indicates that the application of FY-4A/GIIRS temperature data can be effectively used to analyze the evolution characteristics of cold wave.

Key words: FY-4A water vapor image, FY-4A/GIIRS temperature profile, potential vorticity, cold wave

引 言

寒潮是地面大规模强冷空气带来的剧烈降温和大风的天气过程,其核心是冷空气在源地不断增强,继而在大气环流系统的作用下向南推进和发展的天气过程(康志明等,2010;于波等,2019)。我国寒潮天气和冷空气的分布有明显的季节性分布特征,主要发生在秋、冬季(朱万林等,2022)。寒潮冷空气的堆积增强、移动发展与高空冷涡、高空槽和高空急流以及地面冷高压等天气系统直接关联(Demirtas, 2017;高守亭等,1992;支蓉和高辉,2019;聂羽等,2016;陶亦为等,2017;齐道日娜等,2024),欧亚遥相关型(EU)活跃位相以及北极涛动异常对我国寒潮天气发生的频次和冷空气路径有一定的指示作用(黄丹等,2021;司东等,2016)。中高纬阻塞高压对东亚地区寒潮的推进有很大的影响(彭京备等,2023;黄雯菁和王蕾,2023)。此外,许多针对寒潮天气成因的研究结果表明:东西伯利亚高压、东亚冬季风强度和我国寒潮天气存在明显的负相关关系(王遵娅和丁一汇,2006),北大西洋移入北极地区的极端气旋能够促使极涡断裂和中高纬低压槽的加深从而引发我国寒潮天气的发生(张琳等,2020),中高纬地区的温度梯度变化的纬向分量会导致东亚地区降温和寒潮天气爆发(谢韶青和卢楚翰,2018)。

天气系统异常是寒潮天气爆发的主要影响因

子,寒潮发展中天气系统演变往往带来涡度的变化。位势涡度作为能够综合表征大气热力和动力特征的物理量被广泛应用于寒潮天气的研究(Ding, 1990; Yang and Krishnamurti, 1981)。20 世纪 40 年代,位涡和广义位涡的概念被先后提出(Rossby, 1940; Ertel, 1942),之后位涡理论和位涡守恒原理被大量应用于追踪寒潮冷空气演变和发展特征(张培忠等, 1994;李牧原和罗德海,2019;Li and Luo, 2019;Zhu and Mao, 2019;布和朝鲁等,2018),位涡扰动的强度和时曲线的转折点对寒潮酝酿和爆发具有指示性意义,还可以应用位涡变化来追踪分析寒潮天气过程中高层冷空气的下传特征(寿绍文,2010),并讨论冷空气下传过程中的传播机制(吴志彦等,2017;陆光明等,1983;高松影等,2020),研究发现:寒潮过程中,由于冷堆与低压中心相对位置发生变化,冷堆中心温度最低处随着冷堆的运动绝对涡度增加,寒潮冷堆加强(张弛等,2021)。

静止气象卫星水汽图像的暗区表示对流层中上层大气较干的区域,白亮的区域则表示对流层中上层大气较湿的地方(李大山等,1998)。因此可以根据静止气象卫星水汽图像暗区和边界变化等特征,解译寒潮天气过程中对流层中上层干冷气流运动,温度廓线产品能够定量地反映寒潮天气过程中冷空气移动、强度和具体影响范围演变。我国气象卫星快速发展(李俊和方宗义,2012;许健民等,2010;陆风等,2017),风云四号 A 星(FY-4A)作为我国新一

代静止气象卫星,其产品的获取具有较好的时效性和便捷性(万晓敏等,2019;王清平等,2021)。干涉式大气垂直探测仪(GIIRS)是 FY-4A 的主要载荷之一,是国际上首次实现地球静止轨道的大气高光谱垂直探测,主要功能是实现对大气温度和湿度参数的垂直结构探测(陈仁等,2019;Ren et al, 2023a),其产品在近年来也被广泛地应用到各种研究领域(冯绚等,2019;范润龙等,2022;齐道日娜等,2022;李琦等,2021;Ren et al,2023b)。宋慈和尹球(2021)应用 FY-4A/GIIRS 产品探测大气水汽和臭氧的垂直分布特征并对其特性进行评估。Gao et al (2022)应用 FY-4A/GIIRS 温度产品分析了 2022 年华南的一次冬季风暴并指出:700 hPa 的 GIIRS 温度产品对于判别雨雪类型有着重要的指示作用。Maier and Knuteson(2022)利用该产品计算了 2019 年 5 月 10—16 日香港附近的对流有效位能和抬升指数并指出:2 小时间隔的 FY-4A/GIIRS 产品能够刻画大气从稳定到不稳定的转化过程。

2021 年 1 月 6—8 日的寒潮天气影响范围大,华北、黄淮地区降温幅度大并伴有大风天气。我国中东部大部分地区出现 6~12℃ 的强降温,最大降温幅度超过 12℃,最低日平均气温距平达到 -4.4℃ (韩荣青等,2021;徐冉等,2021);北京、河北和山东等 50 余个县(市)最低气温超过历史极值,北京最低气温在 -24~-18℃,达到了 1951 年以来第三低。山西大同最低气温为 -31.1℃,为 1955 年以来最低值。内蒙古呼和浩特时隔 50 年再次降低到 -30℃;降温期间,北方大部地区及东部沿海最大阵风普遍有 6~8 级,山西、河北西部等地局地有 9~11 级。华北、山东及东部沿海地区 6 级以上大风持续时间多在 12~25 h。这次寒潮给交通运输、人民生活和社会生产带来了极大的影响。因此,本文选择此次寒潮过程作为研究对象,应用 FY-4A 水汽图像和 GIIRS 温度产品监测寒潮天气中冷空气发展特征,为改进寒潮天气业务预报提供参考。

本文综合应用 FY-4A 多通道辐射数据、GIIRS 温度产品以及欧洲中心第五代大气再分析资料(ERA5)讨论了 2021 年 1 月 6—8 日我国中东部寒潮天气过程。首先简要分析寒潮过程的天气形势;其次综合应用 FY-4A 水汽图像、FY-4A/GIIRS 温度产品定性和定量分析此次寒潮天气过程中冷空气移动特征;最后应用不同高度的 FY-4A/GIIRS 温度产品对寒潮急剧增强时段的冷空气发展进行追踪,并结合位涡理论对冷空气增强原因进行讨论。

1 数据和方法

1.1 研究数据

本文中使用的数据包括 2021 年 1 月 5—9 日 FY-4A/GIIRS 温度产品、FY-4A 气象卫星高分辨率水汽图像和 ERA5 数据。

FY-4A/GIIRS 为国际上首个静止轨道干涉式垂直探测仪器,在长波红外和中波红外波段实现 1650 个细分光谱通道,光谱分辨率为 0.625 波数,根据大气红外辐射传输原理,经数值计算可以获得温度等参数的垂直分布。产品主要包括:每条扫描各个视场的地理经纬度、海陆掩码、高程、太阳天顶角、太阳方位角、卫星天顶角、卫星方位角,以及每个视场的大气温度廓线产品。其中大气温度廓线产品的观测区域为(15°~55°N、70°~140°E),主要覆盖中国及其周边区域,一天观测 10 次,观测时次分别为 04:00、06:00、08:00、10:00、12:00、14:00、16:00、18:00、20:00、22:00(北京时,下同),星下点分辨率为 16 km,垂直方向上有 101 个探测层。Ren et al (2022)研究了 FY-4A/GIIRS 温度产品对寒潮冷空气的监测能力,和气象探空观测温度数据相比,冬季 FY-4A/GIIRS 温度精度垂直分布如图 1,平均而言,对流层中高层误差相对较小,700 hPa 以下低层相对较大。10 个气压层平均偏差为 0.07℃,平均绝对误差为 1.80℃,均方根误差为 2.46℃。FY-4A/GIIRS 温度能够有效监测冷空气的移动和强度特征。

新一代静止气象卫星 FY-4A 图像和产品具有

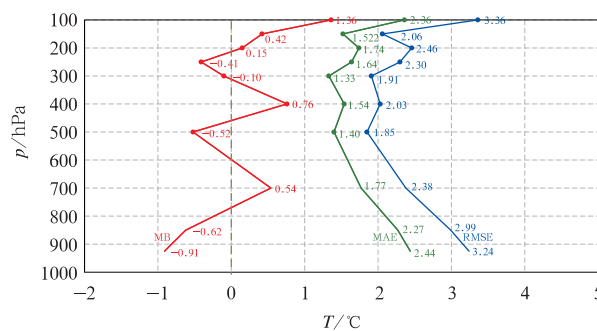


图 1 FY-4A/GIIRS 温度平均偏差(MB)、平均绝对误差(MAE)和均方根误差(RMSE)垂直分布(Ren et al,2022)

Fig. 1 Vertical distribution of FY-4A/GIIRS temperature mean bias (MB), mean absolute error (MAE) and root-mean-square error (RMSE) (Ren et al, 2022)

较高的时空分辨率(Xian et al, 2021; 杨军等, 2018; 陆风等, 2017), 本文应用波段范围为 $5.8 \sim 6.7 \mu\text{m}$ 的对流层中高层水汽图像, 最高时间分辨率为 5 min, 星下点空间分辨率为 4 km, 其较高的时空分辨率有利于监测寒潮天气过程中冷空气变化。

本文中应用的 ERA5 资料是 ECMWF 提供的第 5 套逐小时再分析资料(Hersbach et al, 2020), 资料应用时段为 2021 年 1 月 5—9 日, 数据的气象要素为: 海平面气压、位势高度、温度、位涡和绝对涡度, 水平分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, 时间分辨率为 1 h, 分为 37 个气压层。

1.2 分析方法

本文依据位涡和位涡守恒原理(张述文和王式功, 2001), 结合静止气象卫星水汽图像解译理论(许健民和方宗义, 2008), 对寒潮天气过程中冷空气移动发展特征进行分析, 并对冷空气增强的原因做讨论。

1.2.1 位涡和位涡守恒

位涡是“位势涡度”的简称, 通常应用如下公式计算:

$$PV = g(f + \zeta_0) \left(-\frac{\partial \theta}{\partial p} \right) \quad (1)$$

式中: PV 为位涡, g 为重力加速度, f 为地转涡度的垂直分量, ζ_0 是等熵面涡度垂直分量, $\partial \theta / \partial p$ 为静力稳定度。

位涡守恒原理: 在位涡守恒的情况下, 考虑绝对涡度变化对寒潮冷空气柱的影响, 根据位涡守恒公式:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\xi + f}{h} \right) = 0 \quad (2)$$

式中: ξ 是相对涡度, 当冷槽加深时, 相对涡度增加; f 为地转涡度, 当冷槽南下时, 地转涡度减小; h 为空气柱的厚度。随着寒潮冷空气的南下, 地转涡度减小, 相对涡度有可能增加。因此, 需要考虑绝对涡度($\xi + f$)的变化。在位涡守恒的情况下, 如果绝对涡度增加, 则 h 增大, 冷空气柱被拉伸, 空气绝热冷却, 冷空气更加深厚; 如果绝对涡度减小, 则 h 减小, 冷空气柱被压缩, 空气绝热增温, 冷空气变得浅薄。

1.2.2 静止气象卫星水汽图像解译理论

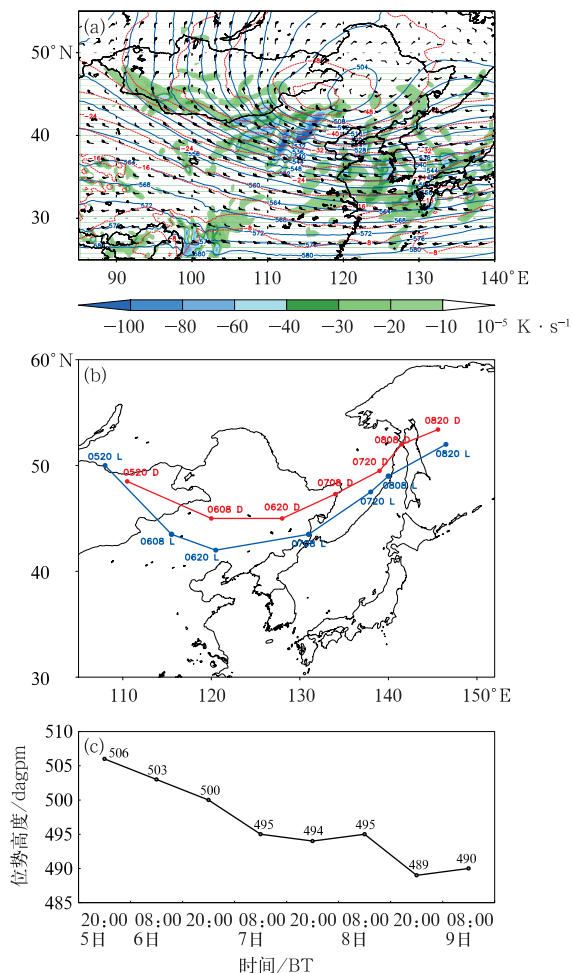
静止气象卫星水汽通道位于大气中水汽的吸收波段, 水汽对来自下方的辐射具有吸收和再发射的特征, 使得最大权重高度位于对流层中上层, 因此卫星水汽图像反映了对流层中高层云和水汽的分布特

征, 水汽图像色调亮的地方为亮温低值区(对流层中高层湿), 色调暗的地方为亮温高值区(对流层中高层干)。根据水汽图像色调亮暗可以解译大气中高层水汽分布特征。对流层中高层上升或下沉运动会显著改变水汽分布, 水汽图像亮暗变化在一定程度上能够反映对流层中上层大气的垂直运动, 水汽图像上多种水汽边界型和天气系统演变有关。水汽图像上的干区、湿区以及它们之间的边界, 经常和重要的高空气流特征相关联, 例如槽、对流层顶动力异常和急流等, 这些边界被用来确定正在缓慢移动的天气系统中高层气流的方向; 一般而言, 图像上的暗区与对流层中部的槽有联系, 而白亮的灰度则是暖脊。与天气尺度环流系统有关的水汽图像干区, 表现为暗灰色到近黑色, 经常在对流层中高层的下沉运动区和对流层顶高度低的区域被观测到。一旦某区域高空已经开始变干, 水汽图像上开始出现暗的灰度并会维持下去, 直到被湿空气替代, 但是如果没有变湿的过程发生, 高层剩余的干空气将会随风场移动, 并演变成各种形状。由于这个原因, 从业务观点看, 并非所有干区都有重要的天气学意义(帕特里克·桑特里特和克里斯托·G. 乔治夫, 2008)。因此, 我国北方地区上空的水汽图像中的变暗区一般与高空槽上游的干空气下沉运动对应, 南方地区上空水汽图像的变暗区一般与副热带地区上空的下沉气流相对应。本研究将应用 FY-4A 水汽图像暗区和边界追踪寒潮天气中对流层高层干空气的下沉运动和强度变化。

2 寒潮过程天气形势

2.1 高空形势分析

2021 年 1 月 6—8 日 ERA5 位势高度场演变可知: 亚洲中高纬 500 hPa 平均高空环流为两槽一脊(图略), 位于东西伯利亚地区的冷涡是造成本次寒潮的主要天气系统。1 月 5 日 08:00, 冷涡中心位于贝加尔湖附近, 6 日 08:00 冷涡中心东移至内蒙古东部(图 2a), 强度加强, 冷涡中心位势高度最低值下降至 504 dagpm, 最低温度达 -52°C , 我国中东部受到高空槽系统影响, 槽后有明显的冷平流。同时, 高空冷涡中心西侧有明显的西北偏北风和西北偏西风, 这种分布特征表明高空冷涡将加强并向东、向南移动影响我国中东部地区。为了进一步描述寒潮高



注:图 a 中蓝线为等高线,单位: dagpm; 红线为等温线,单位: $^{\circ}\text{C}$; 填色为温度平流。图 b 中 D 为位势高度低值中心, L 为冷中心, 数字为时间。

图 2 2021 年 1 月 (a) 6 日 08:00 的 500 hPa 环流特征, (b) 5 日 20:00 至 8 日 20:00 的 500 hPa 冷涡低值中心和冷中心位置的演变, (c) 5 日 20:00 至 9 日 08:00 500 hPa 冷涡中心位势高度时间序列
Fig. 2 (a) Characteristics of geopotential height at 500 hPa at 08:00 BT 6, (b) temporal evolution of 500 hPa low center and cold center from 20:00 BT 5 to 20:00 BT 8, and (c) time series of geopotential height of 500 hPa cold vortex center from 20:00 BT 5 to 08:00 BT 9 January 2021

空冷涡的移动路径和强度变化,图 2b 和 2c 给出了冷涡的低值中心和冷中心位置及中心位势高度随时间演变,5 日 20:00,500 hPa 低值中心和冷中心位于贝加尔湖东南部,中心最低位势高度为 506 dagpm;随着上游冷空气不断补充加强,低值中心和冷中心不断加强向东移动;从移动路径来看,6 日 20:00 之

前冷涡中心位置向东移动中有明显的南压,之后冷涡开始向北移动,7 日 20:00 移出我国。

2.2 海平面气压场

地面冷高压是影响此次寒潮过程的重要天气系统之一。地面冷高压中心从 5 日 20:00 开始逐渐加强并向南移动(图 3a),地面冷空气前沿移至我国境内。随着地面冷高压系统向南移动,6 日 08:00 (图 3a),地面冷高压中心进入我国并持续发展,地面冷锋影响我国中东部大部分地区,稳定维持一段时间后向东移动。为了进一步描述此次寒潮天气过程中地面冷高压强度演变,图 3b 给出海平面气压中心值随时间演变,可以看出:5 日 20:00 海平面气压中心为 1059 hPa,6 日 08:00 显著加强至 1067 hPa,这一时段为寒潮地面冷空气急剧发展加强的关键时段;随后地面冷高压中心强度有所降低。地面冷高压位置和强度的演变与寒潮天气在我国中东部地区的爆发推进特征一致。

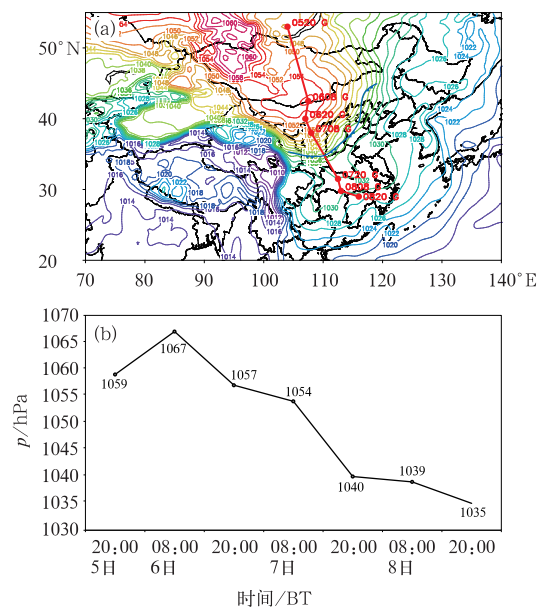


图 3 2021 年 1 月 (a) 6 日 08:00 海平面气压(单位: hPa)和锋面分布以及 5 日 20:00 至 8 日 20:00 海平面气压中心位置(红色粗线), (b) 5 日 20:00 至 8 日 20:00 海平面气压中心最大值时间序列

Fig. 3 (a) Sea level pressure (unit: hPa) and cold front at 08:00 BT 6 and the location of sea level pressure center from 20:00 BT 5 to 20:00 BT 8 (red thick line), and (b) time series of the maximum sea level pressure center from 20:00 BT 5 to 20:00 BT 8 January 2021

3 FY-4A 数据和位涡分析寒潮天气冷空气移动

高空冷空气的移动发展是监测和预报寒潮天气的重要因子,应用高时空分辨率的 FY-4A/GIIRS 温度产品和水汽图像可以监测此次寒潮天气过程中对流层低层冷空气移动和高层干空气的下沉运动。

3.1 FY-4A/GIIRS 分析冷空气推进特征

对流层低层冷空气的分布特征在一定程度上能

够反映寒潮发展变化,应用 FY-4A/GIIRS 850 hPa 温度监测对流层低层冷空气的推进。图 4 为 2021 年 1 月 6 日 08:00 至 7 日 20:00 ERA5 和 FY-4A/GIIRS 的 850 hPa 24 h 变温。ERA5 850 hPa 24 h 变温(图 4a₁~4a₄)显示:6 日 08:00 至 7 日 20:00,我国中东部地区 850 hPa 24 h 负变温中心和 0℃等变温线持续向南移动。7 日 06:00 之前我国中东部地区 850 hPa 基本是 24 h 负变温区域,之后 24 h 正变温区域逐渐进入我国并向南发展,冷空气逐渐减弱。通过同时次的 FY-4A/GIIRS 850 hPa 24 h 变温(图 4b₁~4b₄)和 ERA5 资料对比分析可以看出,

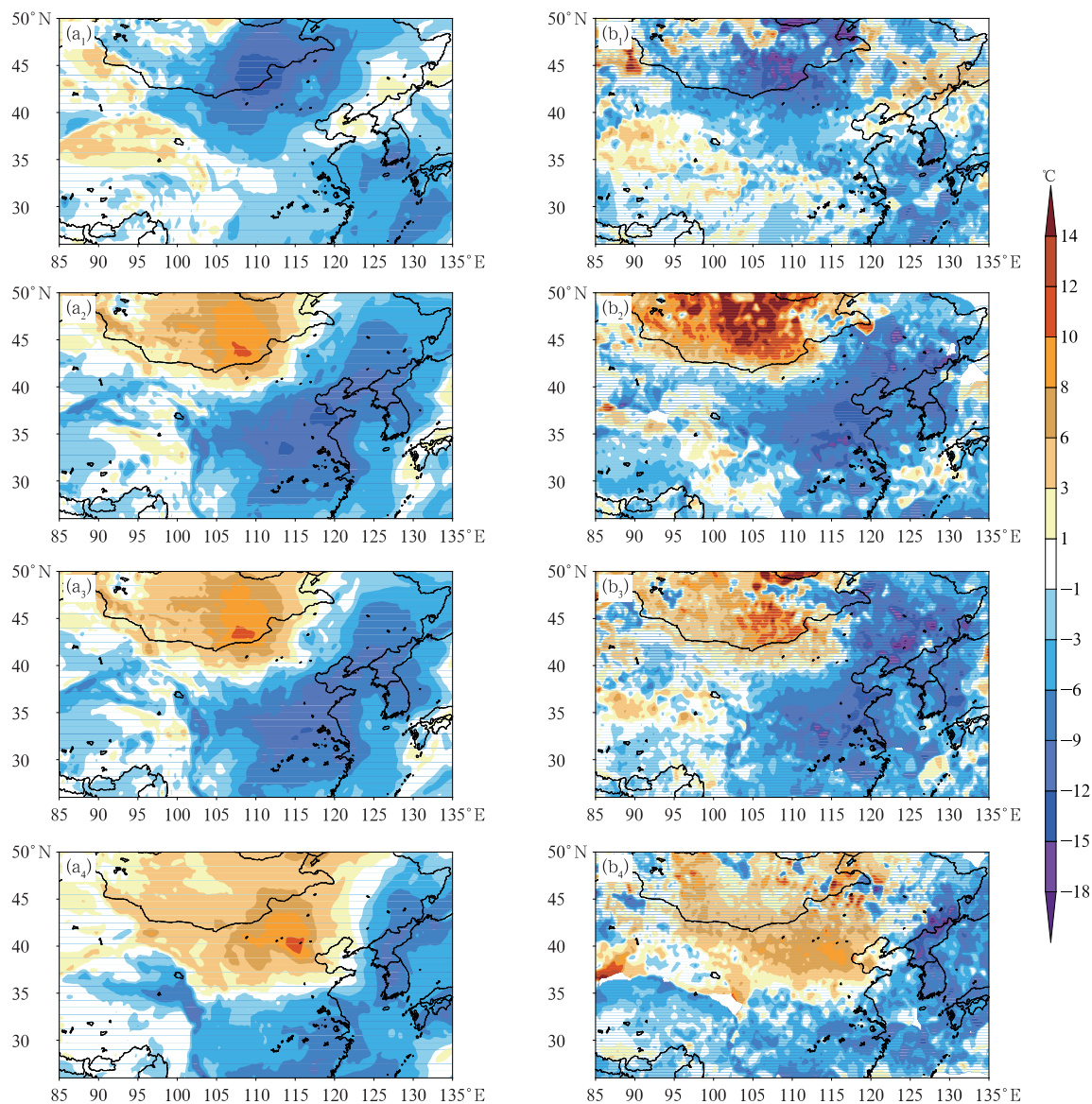


图 4 2021 年 1 月(a₁, b₁)6 日 08:00, (a₂, b₂)7 日 06:00, (a₃, b₃)7 日 08:00, (a₄, b₄)7 日 20:00(a)ERA5 和(b)FY-4A/GIIRS 的 850 hPa 24 h 变温

Fig. 4 24 h temperature change at 850 hPa from (a) ERA5, and (b) FY-4A/GIIRS at (a₁, b₁) 08:00 BT 6, (a₂, b₂) 06:00 BT 7, (a₃, b₃) 08:00 BT 7, (a₄, b₄) 20:00 BT 7 January 2021

两种数据反映的对流层低层冷空气东移南下特征和正负变温区域分布特征基本一致, FY-4A/GIIRS 的 850 hPa 24 h 负变温中心和 0°C 等变温线的位置与 ERA5 数据接近。由于 FY-4A/GIIRS 温度数据空间分辨率较高, 其 850 hPa 24 h 变温中心值强度略大于 ERA5。

基于 FY-4A/GIIRS 温度和 ERA5 数据对比, 应用 FY-4A/GIIRS 温度监测本次寒潮天气过程中对流层低层冷空气发展。从图 4b₁~4b₄ 中可以看出: 本次寒潮天气过程中 850 hPa 的 24 h 负变温中心强度达 -18°C 以下; 6 日 08:00, 850 hPa 的 24 h 负变温中心位于蒙古国和我国内蒙古交界处, -12°C 等变温线开始进入我国, 我国中东部地区开始受到寒潮天气影响。随着低层冷空气不断加强, 850 hPa 24 h 负变温中心和 -12°C 等变温线移至东北中部和华北地区, 中东部地区完全受 850 hPa 的 24 h 负变温区域控制, 7 日 06:00, 上游地区的

850 hPa 正变温区域开始逐渐加强向南发展, 说明低层没有新的冷空气补充, 寒潮天气开始逐渐减弱; 随后 850 hPa 的 24 h 负变温区不断东移并在 7 日 20:00 移出我国境内, 我国北方地区完全处于 850 hPa 正变温区的控制之下, 此次寒潮天气趋于结束。

2021 年 1 月 5 日 20:00 至 6 日 08:00 地面冷高压在短时间内明显增强(图 3b), 寒潮发展显著, 应用 FY-4A/GIIRS 850 hPa 温度监测冷高压增强时段及其前后的低层冷空气移动特征(图 5): 冷空气急剧增强之前(图 5a~5c), 冷中心位于高纬地区, 东北、华北和西北的 850 hPa 温度整体有明显的波动; 5 日 08:00—14:00 出现了升温, 14:00—20:00 温度小幅度下降; 同样高纬地区低温区的位置向南移动不明显。从 5 日 20:00 开始的地面冷高压明显增强时段(图 5c~5f), 高纬低温区的范围向南扩展, 6 日 06:00, -28°C 等温线开始进入我国, 之后一直

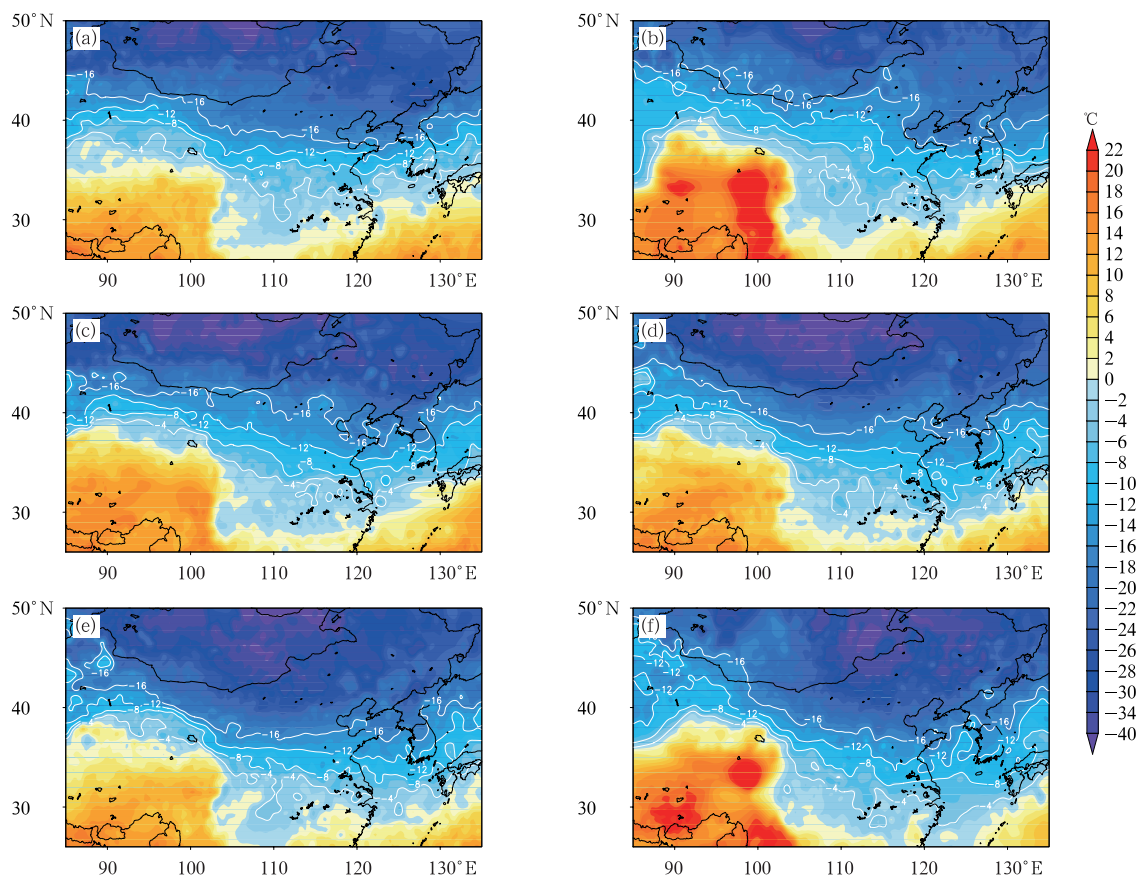


图 5 2021 年 1 月(a)5 日 08:00, (b)5 日 14:00, (c)5 日 20:00, (d)6 日 06:00, (e)6 日 08:00, (f)6 日 14:00

FY-4A/GIIRS 850 hPa 温度(填色和等值线, 单位: $^{\circ}\text{C}$)

Fig. 5 FY-4A/GIIRS temperature (colored and contour, unit: $^{\circ}\text{C}$) at 850 hPa at (a) 08:00 BT 5, (b) 14:00 BT 5, (c) 20:00 BT 5, (d) 06:00 BT 6, (e) 08:00 BT 6, and (f) 14:00 BT 6 January 2021

持续向南移动,并且在我国中东部地区的移动速度要快于西北地区;除了东北地区外,中东部和西北的低层温度持续降低,东部地区低温推进要早于西北地区,850 hPa 的 -16 、 -12 、 -8 、 -4 和 0°C 等温线持续向南移动。至 6 日 14:00,西北和华北以及东北的 850 hPa 温度均小于 -16°C ,江淮地区以及陕西和河南的大部分地区介于 $-12\sim-8^{\circ}\text{C}$, -4°C 等值线位于长江中下游地区上空, 0°C 等值线南移至浙江北部和江西北部以及湖南北部。该时段高纬和中低纬低层强冷空气向南推进明显。

3.2 FY-4A 水汽图像结合位涡分析对流层高层干空气运动

静止气象卫星水汽图像暗区和边界能够定性反映对流层高层气流运动特征,结合水汽图像和高层位涡监测寒潮天气对流层高层干空气运动。图 6 给出了 2021 年 1 月 5 日 08:00 至 9 日 08:00 FY-4A 水汽图像和 200 hPa 位涡的叠加图。从图中可以看

出:初期(5 日 08:00),水汽图像上在新疆北部到内蒙中东部一带有较弱的暗区存在,高层位涡值介于 $5\sim 6$ PVU,中心位于贝加尔湖南侧;随后暗区前边界从我国华北黄河流域一带不断向南推进,伴随暗区面积增大、色调变暗;直至 7 日 08:00 暗区处的高层位涡值显著加大,中心位涡值达到 8 PVU 以上,尤其以我国华北和山东一带最为明显;之后(8 日 08:00 开始),暗区色调亮度变亮,高层位涡值开始降低。暗区增强附近的高层位涡增加激发了高层气旋性环流后侧下沉运动增强,对流层高层干空气下沉造成了地面高压增强,寒潮天气发展。

在此次寒潮天气过程中,我国中东部地区部分站点气温达到了历史极值。为了进一步描述冷空气的垂直运动特征,选择北京站和太原站作为代表性站点,应用 FY-4A/GIIRS 温度产品和 ERA5 温度数据分析单点上空不同高度层的温度随着时间的变化特征,如图 7 所示。在冷空气影响过程中,北京站(图 7a)上空对流层中层温度极值达到 -40°C 以下,

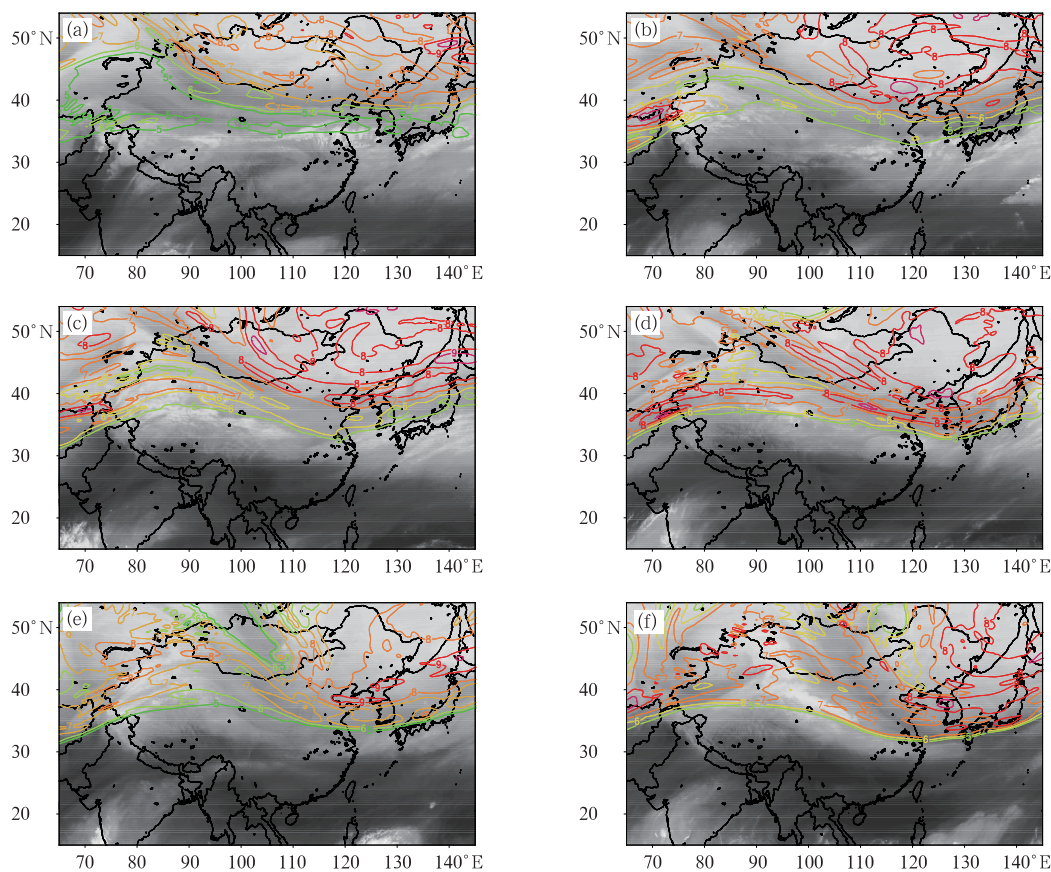


图 6 2021 年 1 月(a)5 日 08:00,(b)6 日 08:00,(c)6 日 20:00,(d)7 日 08:00,
(e)8 日 08:00,(f)9 日 08:00 FY-4A 水汽图像和 200 hPa 位涡(等值线,单位:PVU)

Fig. 6 FY-4A water vapor image and potential vorticity at 200 hPa (contour, unit: PVU) at
(a) 08:00 BT 5, (b) 08:00 BT 6, (c) 20:00 BT 6, (d) 08:00 BT 7,
(e) 08:00 BT 8, and (f) 08:00 BT 9 January 2021

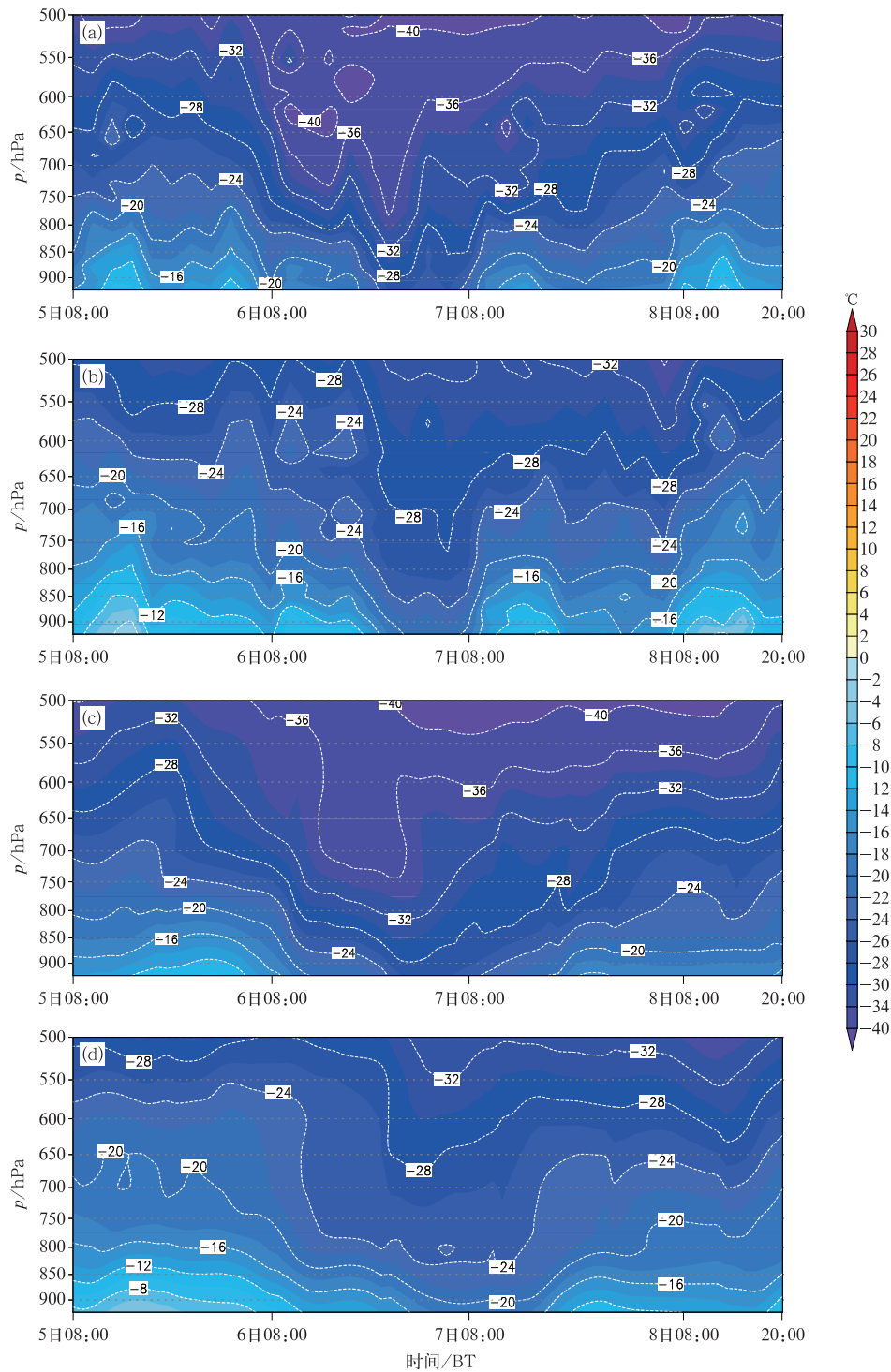


图 7 2021 年 1 月 5 日 08:00 至 8 日 20:00(a,c)北京站和(b,d)太原站上空单点温度
(填色和等值线)随着时间和高度的演变特征
(a,b)FY-4A/GIIRS,(c,d)ERA5

Fig. 7 Time series of vertical distribution of (a, b) FY-4A/GIIRS and (c, d) ERA5 temperature
(colored and contour) above (a, c) Beijing Station, and (b, d) Taiyuan Station
from 08:00 BT 5 to 20:00 BT 8 January 2021

850 hPa 最低温度在 -32°C 左右,925 hPa 冷空气最强时段达到 -28°C 。北京站上空在此时段内受到两次有波动的冷空气影响,一次是 7 日 00:00,另一次

是 7 日 06:00;太原站(图 7b)地理位置偏南、偏西,对流层中层温度极值在 8 日 08:00 达到 -40°C ,850 hPa 冷空气最低温度达到 -24°C 左右,近地面温度在冷空气

气最强时段接近 -20°C ,太原站上空在7日00:00受到冷空气的影响。北京站上空对流层中层和850 hPa的冷空气强度要大于太原站,受冷空气的影响时次和持续时间比较接近。

对比同时段 ERA5 温度数据分析结果(图 7c, 7d)可知:两种数据对寒潮冷空气垂直分布和变化特征的分析基本一致,但是同一高度层 FY-4A/GIIRS 温度产品分析出来的冷空气温度比 ERA5 温度数据的分析结果普遍偏低。由于 FY-4A/GIIRS 数据的空间分辨率较高,对冷中心分布特征给出了更细节化的结果,例如 6 日 10:00—18:00(图 7a, 7b)两个站在 650 hPa 和 600 hPa 之间分别存在两个冷中心,而 ERA5 温度数据的分析结果并没有展现这一特征。

4 寒潮过程冷空气增强原因分析

基于上述寒潮过程中地面和高空冷空气移动特征分析,进一步讨论引起此次寒潮天气冷空气加强的原因。

将位涡守恒理论应用到此次寒潮天气过程分析,考虑 500 hPa 冷涡中心附近绝对涡度变化对寒潮天气高空冷空气加强的影响。图 8 给出 2021 年 1 月 5 日 20:00 至 8 日 08:00 500 hPa 冷涡中心位置和绝对涡度变化。从图中可以看出:初期(图 8a),冷涡中心位于(48.5°N 、 110.5°E)位置,6 日 08:00 之后(图 8b~8d)冷涡中心东移并发展加强,绝对涡度持续增大,直至 7 日 20:00(图 8e)绝对涡度中心达到极大值;8 日 08:00(图 8f)冷涡中心附近的绝对涡度开始减小。基于位涡守恒原理,从此次寒潮天气冷涡中心附近的绝对涡度变化可知:500 hPa 绝对涡度增加时,冷涡中心附近的空气厚度增加,空气柱的拉伸使寒潮冷涡中心附近的冷空气更加深厚,高空冷空气增强,引起寒潮天气发展。

由图 3 和图 5 分析可知:2021 年 1 月 5 日 20:00 至 6 日 08:00 寒潮冷空气急剧发展加强。图 8 讨论了整个寒潮过程中引起高空冷空气增强的原因,下面结合 FY-4A/GIIRS 24 h 变温和位涡进一步分析寒潮急剧发展时段低层冷空气发展特征和位涡变化及其对地面冷空气加强的影响。图 9 给出了此时段

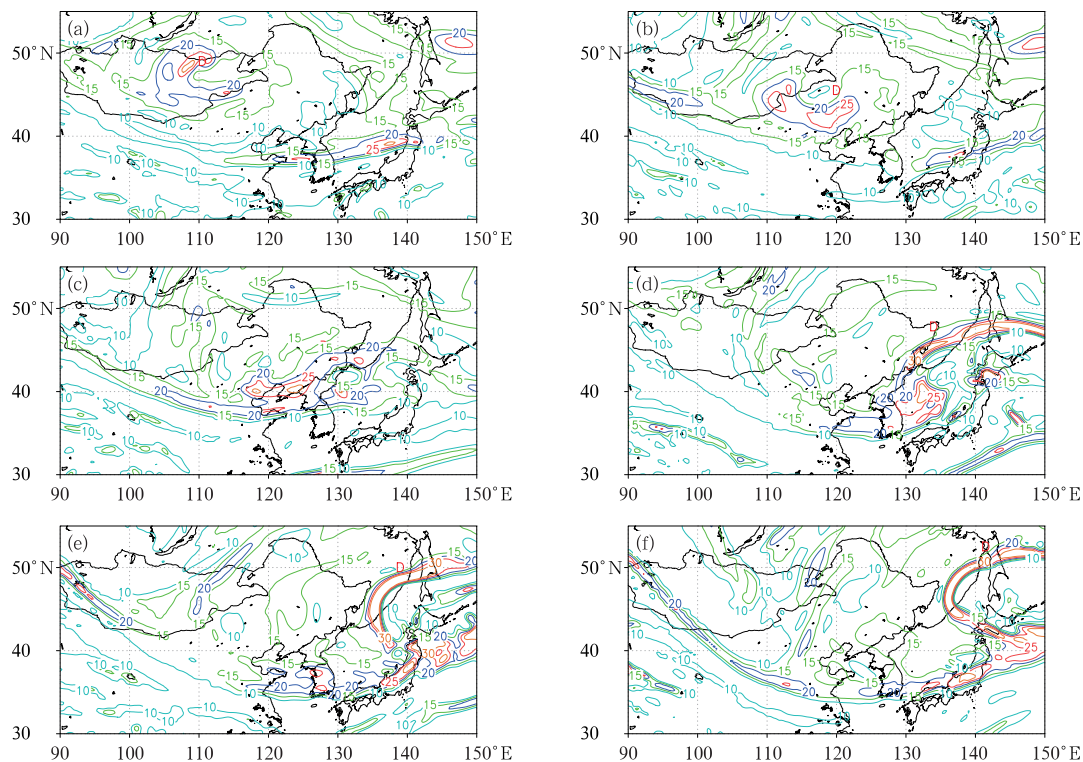


图 8 2021 年 1 月(a)5 日 20:00,(b)6 日 08:00,(c)6 日 20:00,(d)7 日 08:00,(e)7 日 20:00,(f)8 日 08:00 500 hPa 绝对涡度(等值线,单位: 10^{-5} s^{-1})和低值中心

Fig. 8 Absolute vorticity (contour, unit: 10^{-5} s^{-1}) and low center at 500 hPa at

(a) 20:00 BT 5, (b) 08:00 BT 6, (c) 20:00 BT 6, (d) 08:00 BT 7,

(e) 20:00 BT 7, and (f) 08:00 BT 8 January 2021

内冷空气向南移动过程中不同高度的 24 h 变温和位涡随时间的变化, 如图所示: 对流层中下层冷空气强度比中高层冷空气强度大, 对流层低层 24 h 负变温中心随时间移向低纬地区, 冷空气向南移动。沿着冷空气移动的方向, 负变温中心附近低层的位涡值变大。5 日 18:00 对流层低层位涡值小于 1 PVU (图 9a), 6 日 08:00 位涡值大于 1 PVU (图 9e), 至

6 日 20:00 增大到 2 PVU 左右 (图 9f)。此时段内低层位涡的加大引起了地面冷高压发展, 冷空气堆积, 对应地面冷高压增强; 此时段冷空气东移发展以及位涡变化也有类似特征, 对流层中下层冷空气较强, 低层负变温中心随着时间朝东移动, 冷空气东移。低层负变温中心附近的位涡值逐渐增大, 这与冷空气向南移动过程中低层位涡增大的特征一致。

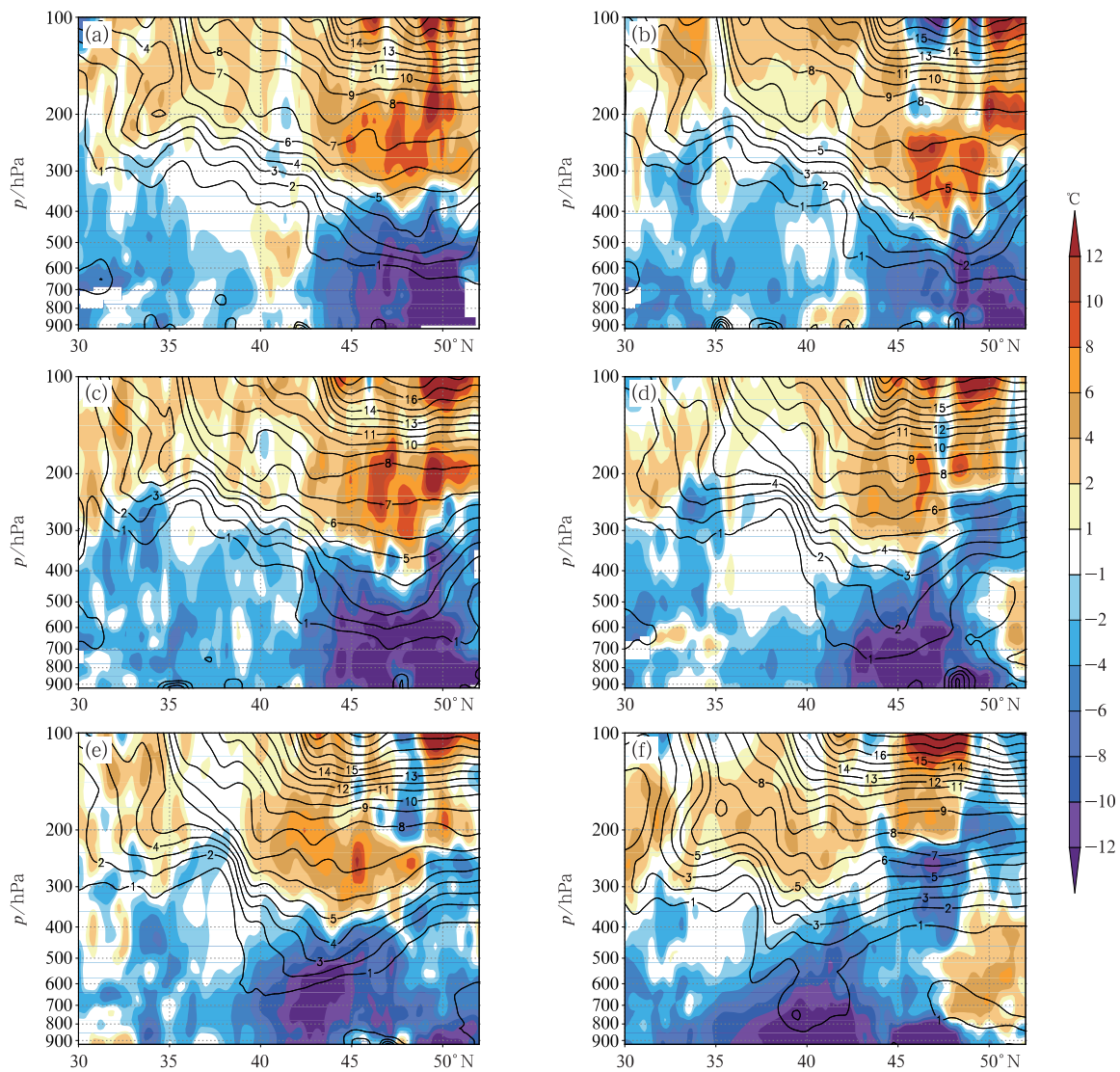


图 9 2021 年 1 月 (a) 5 日 18:00, (b) 5 日 20:00, (c) 5 日 22:00, (d) 6 日 06:00, (e) 6 日 08:00, (f) 6 日 20:00 FY-4A/GIIRS 24 h 变温 (填色) 和位涡 (等值线, 单位: PVU) 沿 FY-4A/GIIRS 850 hPa 低温中心经度垂直剖面 (a) 107°E, (b) 109°E, (c) 108°E, (d) 109°E, (e) 114°E, (f) 116°E

Fig. 9 Vertical profile of FY-4A/GIIRS 24 h temperature change (colored) and potential vorticity (contour, unit: PVU) along the longitude of the 850 hPa low temperature center of FY-4A/GIIRS at (a) 18:00 BT 5, (b) 20:00 BT 5, (c) 22:00 BT 5, (d) 06:00 BT 6, (e) 08:00 BT 6, and (f) 20:00 BT 6 January 2021 (a) 107°E, (b) 109°E, (c) 108°E, (d) 109°E, (e) 114°E, (f) 116°E

因此,此次寒潮天气过程地面冷空气急剧增强的时段,冷空气主要集中在对流层中下层,冷空气向东、向南移动过程中,低层负变温附近的位涡逐渐增大,低层位涡的加大引起低涡后侧下沉运动增强,地面冷空气堆积(何立富等,2022),寒潮发展。

如上分析可知:FY-4A/GIIRS 温度产品监测寒潮冷空气移动发展的特征与位涡理论对寒潮地面冷空气增强原因的分析一致,说明应用 FY-4A/GIIRS 温度产品能够有效监测寒潮冷空气发展。

5 结论与讨论

FY-4A 卫星作为我国新一代静止气象卫星,产品具有较高的时空分辨率,并且数据的获取具有较好的实时性和便捷性。本文结合 FY-4A 和 ERA5 数据对 2021 年 1 月 6—8 日我国中东部的寒潮天气过程进行分析,得到如下结论:

(1)对比分析 ERA5 和 FY-4A/GIIRS 850 hPa 24 h 变温资料可知:两种数据反映的对流层低层冷空气东移南下特征和正负变温区域分布特征基本一致,FY-4A/GIIRS 850 hPa 24 h 负变温中心和 0℃ 等变温线的位置与 ERA5 数据接近。由于 FY-4A/GIIRS 温度数据空间分辨率较高,其 850 hPa 24 h 变温中心值强度略大于 ERA5。

(2)从 FY-4A 水汽图像分析可知,暗区变暗附近的高层位涡增加对应高层气旋性环流后侧下沉运动增强,高层干空气下沉造成了地面高压增强,寒潮天气发展。

(3)应用 FY-4A/GIIRS 温度产品监测分析对流层低层冷空气移动特征,并应用位涡理论和位涡守恒原理讨论高空和地面冷空气加强的原因。此次寒潮发展过程中 500 hPa 冷涡中心附近绝对涡度增加,空气厚度增加,冷空气更加深厚,寒潮发展;在冷空气急剧增强时段,冷空气主要集中在对流层中下层,在向东、向南移动过程中,低层负变温中心附近的位涡加大,引起地面冷空气堆积。FY-4A/GIIRS 温度产品监测寒潮冷空气移动特征与位涡理论对寒潮冷空气加强原因的分析一致,说明应用 FY-4A/GIIRS 温度产品能够有效监测分析寒潮冷空气的演变。

本文结合 FY-4A 水汽图像、GIIRS 产品和位涡对寒潮冷空气水平推进和垂直下沉特征进行分析,但是并没有应用水汽图像定量地刻画干冷气流的下沉移动过程,未来研究可以聚焦这个问题并将相关

结论应用于寒潮天气的监测预报业务中。

参考文献

- 布和朝鲁,彭京备,谢作威,等,2018. 冬季大范围持续性极端低温事件与欧亚大陆大型斜脊斜槽系统研究进展[J]. 大气科学,42(3):656-676. Bueh C, Peng J B, Xie Z W, et al, 2018. Recent progresses on the studies of wintertime extensive and persistent extreme cold events in China and large-scale tilted ridges and troughs over the Eurasian Continent[J]. Chin J Atmos Sci, 42(3):656-676(in Chinese).
- 陈仁,高聪,吴晓唯,等,2019. 风云四号大气垂直探测仪在气象预报中应用[J]. 红外与毫米波学报,38(3):285-289. Chen R, Gao C, Wu X W, et al, 2019. Application of FY-4 atmospheric vertical sounder in weather forecast[J]. J Infrared Millim Waves, 38(3):285-289(in Chinese).
- 范润龙,孙立东,杨晨,2022. 黄海海域 FY4A 卫星温湿廓线适用性分析[J]. 舰船电子工程,42(3):129-134. Fan R L, Sun L D, Yang C, 2022. Applicability analysis of FY4A satellite temperature and humidity profiles in the Yellow Sea[J]. Ship Electron Eng, 42(3):129-134(in Chinese).
- 冯绡,李利兵,陈博洋,等,2019. 风云四号 A 星干涉式大气垂直探测仪在轨定标及性能评价[J]. 红外与毫米波学报,38(5):648-654. Feng X, Li L B, Chen B Y, et al, 2019. Post-launch calibration and validation of the geostationary interferometric infrared sounder (GIIRS) on FY-4A[J]. J Infrared Millim Waves, 38(5):648-654(in Chinese).
- 高守亨,陶诗言,丁一汇,1992. 寒潮期间高空波动与东亚急流的相互作用[J]. 大气科学,16(6):718-724. Gao S T, Tao S Y, Ding Y H, 1992. Interaction between high-altitude wave and East Asian jet during cold wave[J]. Sci Atmos Sin, 16(6):718-724(in Chinese).
- 高松影,赵婷婷,宋丽丽,等,2020. 影响东北的两个罕见气旋发展机制对比[J]. 应用气象学报,31(5):556-569. Gao S Y, Zhao T T, Song L L, et al, 2020. Comparison of development mechanisms of two cyclones affecting Northeast China[J]. J Appl Meteor Sci, 31(5):556-569(in Chinese).
- 韩荣青,石柳,袁媛,2021. 2020/2021 年冬季中国气候冷暖转折成因分析[J]. 气象,47(7):880-892. Han R Q, Shi L, Yuan Y, 2021. Analysis on the causes of cold and warm transition in China during the winter of 2020/2021[J]. Meteor Mon, 47(7):880-892(in Chinese).
- 何立富,齐道日娜,余文,2022. 引发东北极端暴雪的黄渤海气旋爆发性发展机制[J]. 应用气象学报,33(4):385-399. He L F, Chyi D, Yu W, 2022. Development mechanisms of the Yellow Sea and Bohai Sea cyclone causing extreme snowstorm in Northeast China[J]. J Appl Meteor Sci, 33(4):385-399(in Chinese).
- 黄丹,耿焕同,谢佩妍,2021. 欧亚遥相关型位相变化对我国寒潮路径的影响[J]. 大气科学学报,44(6):888-897. Huang D, Geng H T, Xie P Y, 2021. The effects of phase changes in Eurasian teleconnections on the tracks of the cold wave in China[J]. Trans Atmos Sci, 44(6):888-897(in Chinese).
- 黄雯菁,王蕾,2023. 北半球中高纬度阻塞对东亚寒潮影响过程中平流层和对流层的相互作用[J]. 气象学报,81(2):218-234.

- Huang W J, Wang L, 2023. The stratosphere-troposphere interaction during cold air outbreaks in East Asia associated with the blocking events in the extratropical Northern Hemisphere[J]. *Acta Meteor Sin*, 81(2): 218-234 (in Chinese).
- 康志明, 金荣花, 鲍媛媛, 2010. 1951—2006 年期间我国寒潮活动特征分析[J]. *高原气象*, 29(2): 420-428. Kang Z M, Jin R H, Bao Y Y, 2010. Characteristic analysis of cold wave in China during the period of 1951—2006[J]. *Plateau Meteor*, 29(2): 420-428 (in Chinese).
- 李大山, 石定朴, 郑新江, 等, 1998. 静止气象卫星水汽图像的分析和应用(一)[J]. *应用气象学报*, 9(2): 186-196. Li D S, Shi D P, Zheng X J, et al, 1998. Analysis and application of CMS-5 water vapor images (I)[J]. *Quart J Appl Meteor*, 9(2): 186-196 (in Chinese).
- 李俊, 方宗义, 2012. 卫星气象的发展——机遇与挑战[J]. *气象*, 38(2): 129-146. Li J, Fang Z Y, 2012. The development of satellite meteorology—challenges and opportunities[J]. *Meteor Mon*, 38(2): 129-146 (in Chinese).
- 李牧原, 罗德海, 2019. 冬季北极变暖与中纬度环流和极寒天气之间的联系: 经向位涡梯度的关键作用[J]. *中国科学(地球科学)*, 49(9): 1335-1345. Li M Y, Luo D H, 2019. Winter Arctic warming and its linkage with midlatitude atmospheric circulation and associated cold extremes: the key role of meridional potential vorticity gradient[J]. *Sci China Earth Sci*, 49(9): 1335-1345 (in Chinese).
- 李琦, 蔡森, 周毓荃, 等, 2021. 基于探空云识别方法的云垂直结构分布特征[J]. *大气科学*, 45(6): 1161-1172. Li Q, Cai M, Zhou Y Q, et al, 2021. Characteristics of cloud vertical distribution based on cloud identification by radiosonde[J]. *Chin J Atmos Sci*, 45(6): 1161-1172 (in Chinese).
- 陆风, 张晓虎, 陈博洋, 等, 2017. 风云四号气象卫星成像特性及其应用前景[J]. *海洋气象学报*, 37(2): 1-12. Lu F, Zhang X H, Chen B Y, et al, 2017. FY-4 geostationary meteorological satellite imaging characteristics and its application prospects[J]. *J Marine Meteor*, 37(2): 1-12 (in Chinese).
- 陆光明, 姚竞生, 陶祖钰, 1983. 寒潮冷堆增强的动力原因[J]. *气象学报*, 41(4): 393-403. Lu G M, Yao J S, Tao Z Y, 1983. The dynamical cause of the cold dome's intensification in the cold outbreak process[J]. *Acta Meteor Sin*, 41(4): 393-403 (in Chinese).
- 聂羽, 孙冷, 王东阡, 等, 2016. 2015/2016 年前冬至隆冬北半球中高纬度暖冷急转及环流特征初析[J]. *气象*, 42(10): 1223-1229. Nie Y, Sun L, Wang D Q, et al, 2016. Possible causes for the sudden drop of air temperature in the Northern Hemisphere from early- to mid-winter[J]. *Meteor Mon*, 42(10): 1223-1229 (in Chinese).
- 帕特里克·桑特里特, 克里斯托 G·乔治夫, 2008. 卫星水汽图像和位势涡度场在天气分析和预报中的应用[M]. 方翔, 译. 北京: 科学出版社: 23. Santurette P, Georgiev C G, 2008. Weather Analysis and Forecasting: Applying Satellite Water Vapor Imagery and Potential Vorticity Analysis[M]. Fang X, trans. Beijing: Science Press: 23 (in Chinese).
- 彭京备, 孙淑清, 陈伯民, 2023. 乌拉尔阻塞高压的维持发展及其与 2020/2021 年冬季强寒潮活动的关系[J]. *大气科学*, 47(5): 1421-1433. Peng J B, Sun S Q, Chen B M, 2023. Maintenance and development of Ural blocking high and its relationship with severe cold wave activities in 2020/2021 winter[J]. *Chin J Atmos Sci* (in Chinese), 47(5): 1421-1433 (in Chinese).
- 齐道日娜, 何立富, 王秀明, 等, 2022. “7·20”河南极端暴雨精细观测及热动力成因[J]. *应用气象学报*, 33(1): 1-15. Chyi D, He L F, Wang X M, et al, 2022. Fine observation characteristics and thermodynamic mechanisms of extreme heavy rainfall in Henan on 20 July 2021[J]. *J Appl Meteor Sci*, 33(1): 1-15 (in Chinese).
- 齐道日娜, 何立富, 张乐英, 2024. “21·11”极端暴雪过程多系统结构演变及热动力机制[J]. *气象*, 50(1): 18-32. Chyi D, He L F, Zhang L Y, 2024. Multi-system structure evolution and thermodynamic mechanism of the extreme snowstorm during 6—8 November 2021[J]. *Meteor Mon*, 50(1): 18-32 (in Chinese).
- 寿绍文, 2010. 位涡理论及其应用[J]. *气象*, 36(3): 9-18. Shou S W, 2010. Theory and application of potential vorticity[J]. *Meteor Mon*, 36(3): 9-18 (in Chinese).
- 司东, 马丽娟, 王朋岭, 等, 2016. 2015/2016 年冬季北极涛动异常活动及其对我国气温的影响[J]. *气象*, 42(7): 892-897. Si D, Ma L J, Wang P L, et al, 2016. Anomalous activity of arctic oscillation in winter 2015/2016 and its impact on temperature in China[J]. *Meteor Mon*, 42(7): 892-897 (in Chinese).
- 宋慈, 尹球, 2021. FY-4A GIIRS 数据探测大气水汽和臭氧的垂直空间特性评估[J]. *红外与毫米波学报*, 40(4): 539-546. Song C, Yin Q, 2021. Evaluation on vertical space characteristics of atmospheric water vapor and ozone for FY-4A GIIRS data sounding[J]. *J Infrared Millim Waves*, 40(4): 539-546 (in Chinese).
- 陶亦为, 代刊, 董全, 2017. 2016 年 1 月寒潮天气过程极端性分析及集合预报检验[J]. *气象*, 43(10): 1176-1185. Tao Y W, Dai K, Dong Q, 2017. Extreme analysis and ensemble prediction verification on cold wave process in January 2016[J]. *Meteor Mon*, 43(10): 1176-1185 (in Chinese).
- 万晓敏, 龚建东, 韩威, 等, 2019. FY-4A 云导风在 GRAPES_RAFS 中的同化应用评估[J]. *气象*, 45(4): 458-468. Wan X M, Gong J D, Han W, et al, 2019. The evaluation of FY-4A AMVs in GRAPES_RAFS[J]. *Meteor Mon*, 45(4): 458-468 (in Chinese).
- 王清平, 朱雯娜, 王勇, 等, 2021. FY-4A 资料在乌鲁木齐机场浓雾天气监测中的初步应用[J]. *气象*, 47(5): 627-637. Wang Q P, Zhu W N, Wang Y, et al, 2021. Preliminary application of FY-4A satellite data in dense fog weather events at Urumqi International Airport[J]. *Meteor Mon*, 47(5): 627-637 (in Chinese).
- 王遵娅, 丁一汇, 2006. 近 53 年中国寒潮的变化特征及其可能原因[J]. *大气科学*, 30(6): 1068-1076. Wang Z Y, Ding Y H, 2006. Climate change of the cold wave frequency of China in the last 53 years and the possible reasons[J]. *Chin J Atmos Sci*, 30(6): 1068-1076 (in Chinese).
- 吴志彦, 李宏江, 赵海军, 等, 2017. 等熵位涡揭示的一次强寒潮过程中高层扰动特征[J]. *海洋气象学报*, 37(1): 84-91. Wu Z Y, Li H J, Zhao H J, et al, 2017. Disturbance features of mid-upper troposphere during a strong cold wave event revealed by isentropic potential vorticity analysis[J]. *J Marine Meteor*, 37(1):

- 84-91(in Chinese).
- 谢韶青,卢楚翰,2018.近16a来冬季欧亚大陆中纬度地区低温事件频发及其成因[J].大气科学学报,41(3):423-432. Xie S Q, Lu C H, 2018. Intensification of winter cold events over the past 16 years in the mid-latitudes of Eurasia and their causes[J]. Trans Atmos Sci, 41(3):423-432(in Chinese).
- 许健民,方宗义,2008.《卫星水汽图像和位势涡度场在天气分析和预报中的应用》导读[J].气象,34(5):3-8. Xu J M, Fang Z Y, 2008. Book comment and introduction to "Weather Analysis and Forecasting, Applying Satellite Water Vapor Imagery and Potential Vorticity Analysis"[J]. Meteor Mon, 34(5):3-8(in Chinese).
- 许健民,杨军,张志清,等,2010.我国气象卫星的发展与应用[J].气象,36(7):94-100. Xu J M, Yang J, Zhang Z Q, et al, 2010. Chinese meteorological satellite, achievements and applications[J]. Meteor Mon, 36(7):94-100(in Chinese).
- 徐冉,江琪,桂海林,等,2021.2021年1月大气环流和天气分析[J].气象,47(4):510-516. Xu R, Jiang Q, Gui H L, et al, 2021. Analysis of the January 2021 atmospheric circulation and weather[J]. Meteor Mon, 47(4):510-516(in Chinese).
- 杨军,咸迪,唐世浩,2018.风云系列气象卫星最新进展及应用[J].卫星应用, (11):8-14. Yang J, Xian D, Tang S H, 2018. The development and application of Fengyun series meteorological satellites[J]. Satell Appl, (11):8-14(in Chinese).
- 于波,李桑,黄富祥,等,2019.2016年1月京津冀地区连续性寒潮事件对比分析[J].干旱气象,37(6):954-963. Yu B, Li S, Huang F X, et al, 2019. Comparative analysis of continuous cold wave events in Beijing-Tianjin-Hebei Region in January 2016[J]. J Arid Meteor, 37(6):954-963(in Chinese).
- 张弛,沈新勇,张玲,等,2021.一次寒潮过程中冷堆增强的动力原因分析[J].高原气象,40(2):394-402. Zhang C, Shen X Y, Zhang L, et al, 2021. The dynamical cause of cold dome's intensification in a cold wave process[J]. Plateau Meteor, 40(2):394-402(in Chinese).
- 张琳,吕俊梅,丁明虎,2020.2015年初北极极端气旋对中国寒潮的影响[J].应用气象学报,31(3):315-327. Zhang L, Lü J M, Ding M H, 2020. Impact of arctic extreme cyclones on cold spells in China during early 2015[J]. J Appl Meteor Sci, 31(3):315-327(in Chinese).
- 张培忠,丁一汇,郭春生,等,1994.东亚寒潮高压的位涡诊断研究[J].应用气象学报,5(1):49-56. Zhang P Z, Ding Y H, Guo C S, et al, 1994. A diagnostic study of budget of potential vorticity for cold wave-related anticyclone in East Asia[J]. J Appl Meteor Sci, 5(1):49-56(in Chinese).
- 张述文,王式功,2001.位涡及位涡反演[J].高原气象,20(4):468-473. Zhang S W, Wang S G, 2001. Potential vorticity and potential vorticity inversion[J]. Plateau Meteor, 20(4):468-473(in Chinese).
- 支蓉,高辉,2019.2018/2019年冬季北半球大气环流特征及对我国冬季气温异常的影响[J].气象,45(7):1019-1027. Zhi R, Gao H, 2019. Northern Hemisphere atmospheric circulation characteristics in winter 2018/2019 and its impact on temperature anomalies in China[J]. Meteor Mon, 45(7):1019-1027(in Chinese).
- 朱万林,李清泉,王遵娅,等,2022.近60年中国冷空气过程的气候变率分析[J].气象,48(1):1-13. Zhu W L, Li Q Q, Wang Z Y, et al, 2022. Climatological variability of cold air processes over China in recent 60 years[J]. Meteor Mon, 48(1):1-13(in Chinese).
- Demirta S M, 2017. The large-scale environment of the European 2012 high-impact cold wave: prolonged upstream and downstream atmospheric blocking[J]. Weather, 72(10):297-301.
- Ding Y H, 1990. Build-up, air mass transformation and propagation of Siberian high and its relations to cold surge in East Asia[J]. Meteor Atmos Phys, 44(1):281-292.
- Ertel H, 1942. Ein neuer hydrodynamischer wirbelsatz[J]. Meteor Zeitschrift, 59:271-281.
- Gao Y, Mao D Y, Wang X, et al, 2022. Evaluation of FY-4A temperature profile products and application to winter precipitation type diagnosis in Southern China[J]. Remote Sens, 14(10):2363.
- Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al, 2020. The ERA5 global reanalysis[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 146(730):1999-2049.
- Li M Y, Luo D H, 2019. Winter Arctic warming and its linkage with midlatitude atmospheric circulation and associated cold extremes: the key role of meridional potential vorticity gradient[J]. Sci China Earth Sci, 62(9):1329-1339.
- Maier J, Knuteson R, 2022. Data fusion of GEO FY-4A GIIRS and LEO hyperspectral infrared sounders with surface observations: a Hong Kong case study[J]. J Atmos Ocean Technol, 2022, 39(2):259-270.
- Ren S L, Fang X, Niu N, et al, 2023a. The application of FY-3D/E meteorological satellite products in South China Sea summer monsoon monitoring[J]. J Meteor Soc Japan, 101(4):347-365.
- Ren S L, Qin D Y, Niu N, et al, 2023b. South Asian high identification and rainstorm monitoring using Fengyun-4-derived atmospheric motion vectors[J]. Atmosphere, 14(11):1606.
- Ren S L, Jiang J Y, Fang X, et al, 2022. FY-4A/GIIRS temperature validation in winter and application to cold wave monitoring[J]. J Meteor Res, 36(4):658-676.
- Rossby C G, 1940. Planetary flow patterns in the atmosphere[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 66(S1):68-87.
- Xian D, Zhang P, Gao L, et al, 2021. Fengyun meteorological satellite products for earth system science applications[J]. Adv Atmos Sci, 38(8):1267-1284.
- Yang D S, Krishnamurti T N, 1981. Potential vorticity of monsoonal low-level flows[J]. J Atmos Sci, 38(12):2676-2695.
- Zhu T T, Mao J Y, 2019. Synoptic-scale potential vorticity intrusion over Northeastern China during winter and its influence on surface air temperature[J]. Atmos Ocean Sci Lett, 12(4):286-293.

(本文责编:俞卫平)