投稿时间：2021-02-16

尊敬的编辑部专家：

您好！首先，非常荣幸和感谢您能于百忙之中接收和审阅我的稿件。本着对《大气科学》的敬仰和信任，我非常荣幸能将这篇论文《河北冬奥赛区一次夜间增温过程的数值模拟及诊断》投到贵刊！

在澳大利亚和美国，近地表夜间突然变暖事件已经在以前的研究中得到了检验，但是在中国华北区域，这些具有独特地形和气候的地区观察到的类似事件还没有得到充分调查，导致这些夜间变暖事件的规律与机制因素仍然不清楚。因此，利用高分辨率数值模式开展夜间增温事件的准确模拟非常必要。

北京 2022 年冬奥会张家口赛区（河北）承担冬季两项、越野滑雪、跳台滑雪、单板滑雪、自由式滑雪等大部分雪上项目。2021 年 1 月 27 日至 3 月 21 日间，张家口赛区将举办 9 场北京冬奥会和冬残奥会测试赛。准确的模拟与预报对赛区建设及奥运比赛保障至关重要。根据赛区建设的气象站观测数据进行统计可知，夜间增温是河北冬奥赛区冬季频发的天气现象，如何能较为准确地预报出此类事件是保障冬奥会顺利开展急需解决的问题。

本文选取了河北冬奥赛区 2020 年 2 月 8 日夜间至 9 日凌晨发生的一次典型夜间增温过程，在引入 30m 分辨率地形数据的基础上，利用中尺度区域数值模式 WRF4.1.5，较好地再现了此次夜间增温过程，并根据精细化的数值模拟结果探究了此次过程的气象特征及成因。研究结果表明：此次过程受东北冷涡影响，中高空冷平流显著，高低层风切变较强，有明显的平流差异，同时，近地面气象要素变化特征明显，对夜间增温现象具有一定指示意义，包括相对湿度降低、风速增大、海平面气压降低、地表热通量及长波辐射增强等；增温发生时，强冷平流在范围及强度上均明显增加，导致强烈的下沉运动，使得低层温度升高，并且高低层强风切变以及平流差异容易产生垂直混合，等熵面波动明显，湍流加强，进一步加强湍流垂直混合运动，输送运动热通量，产生夜间温度异常升高现象。

再次感谢您百忙之中阅读我的投稿信并请针对论文提出宝贵意见。

河北冬奥赛区一次夜间增温过程的数值模拟及诊断*

章鸣[1,2]，连志鸾[3]，平凡[1,2]，祝善友[1]

1 南京信息工程大学遥感与测绘工程学院，南京 210044

2 云降水物理与强风暴重点实验室，中国科学院大气物理研究所，北京 100029

3 河北省气象局，石家庄 050021

摘要 夜间增温是河北冬奥赛区冬季频发的天气现象，对其进行准确的模拟与预报对赛区建设及比赛保障至关重要。本文针对河北冬奥赛区 2020 年 2 月 8 日夜间至 9 日凌晨发生的一次夜间增温过程，通过引入高分辨率地形数据，利用中尺度区域数值模式 WRF4.1.5 精细化再现了此次夜间增温过程，并探究了此次过程的气象特征及成因。研究结果表明：此次夜间增温过程受东北冷涡影响，中高空冷平流显著，高低层风切变较强，有明显的平流差异，同时，近地面气象要素变化特征明显，包括相对湿度降低、风速增大、海平面气压降低、地表热通量及长波辐射增强等；增温发生时，强冷平流在范围及强度上均明显增加，导致强烈的下沉运动，使得低层大气温度升高，并且高低层强风切变以及平流差异容易产生垂直混合，等熵面波动明显，湍流加强，进一步加强湍流垂直混合运动，运动热通量输送增强，产生夜间温度异常升高现象。

关键词：夜间增温 冬奥赛区 高分辨率数值模拟 垂直混合

文章编号

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2000.19000

Numerical Simulation and Diagnosis of a Nocturnal Warming Process in Hebei Winter Olympic Games Area

Zhang Ming[1,2], Lian zhiluan[3], Ping Fan[1,2], Zhu Shanyou[1]

[1] School of Remote Sensing and Geometrics Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China

[2] Key Laboratory of Cloud–Precipitation Physics and Severe Storms, Institute of Atmospheric Physics, Beijing 100029, China

[3]Hebei Meteorological Bureau, Shijiazhuang 050021, China

收稿日期 2020-03-15；网络预出版日期

作者简介 章鸣，女，1997年出生，硕士研究生，主要从事特殊天气诊断及机理分析研究。E-mail：19850070361@163.com

通讯作者 祝善友，男，教授，博导，主要从事遥感气象应用、生态环境遥感研究。E-mail：zsyzgx@163.com

资助项目 国家重点研究开发项目（2018YFC1506801, 2018YFF0300102）

Funded by The National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2018YFC1506801, 2018YFF0300102)

Abstract Nocturnal Warming is a frequent weather phenomenon in Hebei Winter Olympic Games area, and its accurate simulation and forecast is very important for the construction of the competition area and the guarantee of the competition. By introducing the higher resolution terrain data, the mesoscale regional numerical model WRFv4.1.5 was used to reproduce the nocturnal warming process, and the meteorological characteristics and causes of the process were explored. The results show that: the process is affected by the northeast cold vortex, the cold advection is significant at the middle and upper levels, the wind shear is strong at the high and low levels, and there are obvious advection differences. At the same time, the variation characteristics of meteorological elements near the surface are obvious, including the decrease of relative humidity, the increase of wind speed, the decrease of sea level pressure, the enhancement of surface heat flux and long wave radiation, etc. In addition, the strong wind shear and advection difference between the upper and lower levels are easy to produce vertical mixing. The isentropic surface fluctuation is obvious, and the turbulence is strengthened, which further strengthens the turbulent vertical mixing movement, enhances the moving heat flux transport, and produces the abnormal increase of night temperature.

Keywords: Nocturnal warming, Winter Olympic Games area, High resolution numerical simulation, Vertical mixing

1 引言

一般来说，夜间近地面大气由于地表辐射冷却作用气温会逐渐降低，在日出前后达到最低值，但国内外很多研究发现部分地面气象站点会观测到夜间增温现象，即日落后的一段时间内，温度以一定的速率下降，但在某一时刻出现温度突然升高的现象（甘茹蕙等，2016）。夜间增温现象的出现常伴随其他气象要素的突发性不连续变化，如露点温度、湿度、风向风速等（White，2009），影响近地面雾和霜冻的形成、冰雪融化、改变能见度（杨晓亮等，2018），强增温加上强风还易导致林火。河北冬奥赛区夜间增温现象频发，夜间晴空条件下小时最大增温幅度在 2-3℃（钱敏伟和李军，1996）。因此，有必要开展夜间增温形成特征、原因及机理的相关研究，以提高其预报准确度，为冬奥比赛提供气象服务保障。

目前有关夜间增温事件的研究主要集中在澳大利亚和美国的部分地区，澳洲中部 HartsRange 曾出现温度突然升高 7℃（Smith et a1.，1995）的极端现象，美国俄克拉荷马州记录最大增温幅度达 10℃（Nallapareddy et al.，2011），密西西比州 Newton 也曾观测到 10 分钟内增温幅度达 3℃的现象（White，2009）。不同地区夜间增温事件增温幅度大小不一，其伴随的气象要素变化和产生的原因也不相同。以往研究学者已经讨论了夜间变暖事件可能发生的几种可能机制（White，2009），包括：锋面过境、湍流混合作用、天气系统驱动的热暴流

（McPherson et al.，2011；Bernstein and Johnson，1994）、辐射平衡变化、近地表热通量的变化、水汽过程的潜热释放、地形作用所致的下坡风（即焚风）等。研究显示冷锋过境造成风速增大可能会将高空中相对较暖的空气和地表附近较冷的空气混合，增加近地表温度，并且冷锋到达前强的逆温更容易引发夜间增温事件（Sanders and Kessler，1999；Doswell III and Haugland，2007；Nallapareddv et al.，2011）。夜间风切变触发的间歇性湍流在近地层增强并向上传播，引起并加强不同高度大气的垂直向下混合，也会造成低层气温异常升高（Ma et al.，2015）。同样，沿逆温表面传播的波也可能混合冷暖空气，造成不同振幅的短暂变暖（Clarke，1981）。此外，在地形复杂区域，地形造成空气压缩或膨胀会引起局地气温改变（黄少妮等，2015），迎风坡水汽凝结导致潜热加热，山顶干暖空气沿山坡干绝热下沉，是地形造成背风坡温度异常升高（焚风效应）的原因（Brinkmann，1971；Elvidgeand Renfrew，2016），其中干暖空气等熵下沉才是产生该现象的最主要原因（赵世林等，1993；盛裴轩等，2003；李万彪，2010）。

迄今为止，对地面气温变化的研究主要都是基于再分析资料或站点观测数据从大气环流形势、气候学及统计学角度进行分析（周国华，2011；周宇，2012），对于夜间增温事件的热力学、动力学特征、时空演变情况及其形成原因的理解仍然是不确定的，特别是在中国北部地区，如华北这些具有独特地形和气候的地区，导致这些夜间变暖事件的因素仍然不清楚。如今，数值模式已经成为气象工作者研究天气、气候的重要手段之一，利用高分辨数值模式模拟重现此类夜间增温过程，有利于详细分析其过程变化特征，探究其主要影响因素。本文拟利用WRF4.1.5 模式对河北冬奥赛区 2020 年 2 月 8 日夜间至 9 日凌晨（北京时，下同）的一次夜间增温过程进行高分辨率模拟，根据高分辨率模拟数据对该过程进行针对性研究，以进一步加深对夜间增温事件的认识，尤其是厘清该区域夜间温度异常升高现象的主要原因，从而为提高赛区夜间增温事件的预报能力提供参考依据。

2 资料和方法

利用河北崇礼冬奥赛区 15 个自动气象观测站逐时地面观测数据开展 2020 年 2 月 8 日夜间至 9 日凌晨异常增温的天气实况分析；作为对比，统计了 2018-2019 年 2 个冬半年（11 月至次年 4 月）自动站观测的夜间增温情况。采用

美国国家气候环境预测中心 NCEP（National Centers of Environmental Research）全球预报系统 GFS 提供的 0.25°×0.25°的再分析资料进行天气形势分析，并以该数据作为初始背景场驱动中尺度天气模式 WRF4.1.5 进行三维模拟，用以研究冬奥赛区夜间增温事件的形成机制及其相关的热力和动力学特征。此外，本次模拟引入了日本 METI 和美国 NASA 基于“现今星载热发射和反辐射计（ASTER）”数据联合研制的第三版 30m 空间分辨率的 ASTER GDEM 地形数据，如图 1 所示，更新后的地形高程数据能够更好地反映冬奥赛区复杂的地形特征，其水平分辨率及垂直精度均高于模式默认数据，能够满足百米级数值模拟需求。

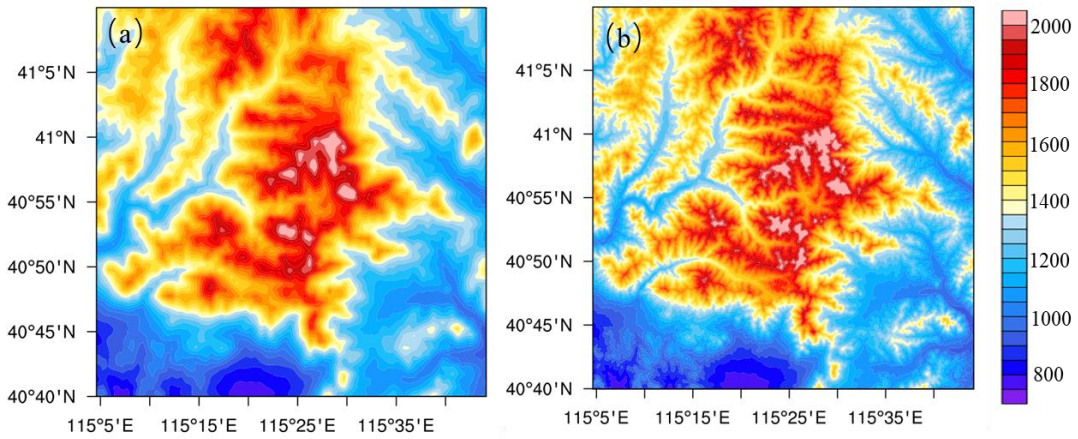

图 1 河北崇礼冬奥赛区地形对比图：（a）模式默认高程数据；（b）ASTER 第三版高程数据，单位：m。

Fig.1 Topographic comparison map of Chongli Winter Olympic Games area in Hebei Province: (a) model default elevation data; (b) aster third edition elevation data, unit: m.

3 过程增温概况

2020 年 2 月 8 日夜间至 9 日凌晨，河北冬奥赛区气温出现异常变化，赛区内地面自动站观测到了大范围的异常增温现象，整个区域 6h 内持续出现了不同程度的增温，其增温情况受地形影响明显，累计温度增幅较大的站点主要分布在山谷，尤其是冬两站点（代表以冬两开头的全部站点，下文云顶站点代表以云顶开头的全部站点），小时增温幅度在 2-3℃，累计增温均超过 5℃，最大累计增温幅度超过 8℃（图 2a）。从时间演变来看，区域内站点逐小时温度变化曲线（图 2b）显示一天气温的最大值出现在 08 日中午 1400 时，随后气温开始下降，云顶站点在 08 日 1900 时左右开始出现小幅度的增温，此后气温开始保持上升趋势，而冬两站点均在 08 日 2100 时后开始出现增温现象，增温幅度较大，特别是在

09 日 0100 时，小时增温幅度超 2℃。结合地理分布及时间演变可以看出，此次增温事件先从赛区的西北部开始，逐渐向东南方向蔓延，且增温幅度呈现加强的趋势。

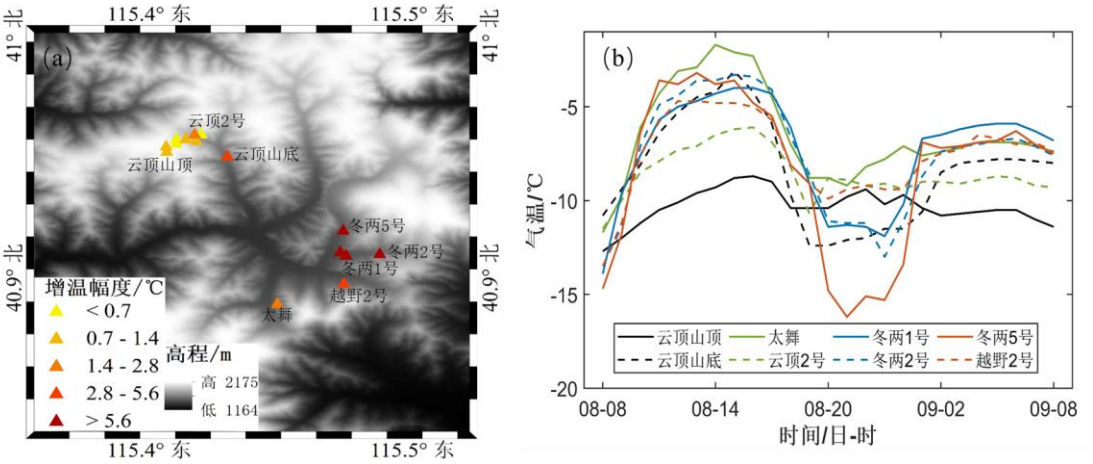

图 2 冬奥赛区 2020 年 2 月 8 日 0800 时至 9 日 0800 时增温地理分布和自动站：（a）实测站点累积增温幅度及其位置分布；（b）实测站点气温逐时变化曲线

Fig.2 Geographical distribution and automatic stations of temperature increase in Winter Olympic Games area from 0800 BT 8 February to 0800 BT 9 February 2020:(a)cumulative temperature increase amplitude and location distribution of measured stations; (b)hourly variation curve of temperature at measured stations

为判断本次夜间增温过程的代表性，统计了 2018-2019 年冬半年冬奥赛区内自动气象站点的逐时气温数据。结果发现，赛区内出现夜间增温是一种常见现象，夜间增温事件在冬半年出现概率达到 78%，增温开始时间主要集中在 0000 时与 0100 时前后，一小时内温度增幅在 1-2℃。2020 年 2 月 8 日夜间至 9 日凌晨的增温过程符合其统计特征，且增温过程较为明显，具有一定代表性，可用来研究该区域增温现象成因。

高空 500hPa 环流形势可见，8 日 1400 时-2000 时，在北纬 50 ℃N 附近存在高空冷涡，并在缓缓向东移动（图 3a、b），8 日 1400 时，河北冬奥赛区位于槽后，为西北气流（图 3a），8 日 2000 时，高空槽加深加强，高空急流区向东移动，赛区风速增大，等温线与等高线夹角较大，冷平流非常显著（图 3b）。700hPa 环流形势与 500hPa 较为相似，08 日 2000 时冬奥赛区处于槽后低空急流区，有明显的负涡度平流，中高纬急流在其前侧辐合，有利于大气产生强下沉运动（图

3d）。8 日 1400 时-2000 时，800hPa 冬奥赛区位势高度呈东高西低型，受冷涡影响较小，赛区位于槽前较弱的西南气流中（图 3e、f），同时，可以看到 8 日 2000 时赛区在海平面处于高压控制下，风速减小，并且较 8 日 1400 时来看，海平面气温已出现异常升高现象（图 3g、h）。综上可知，受冷涡影响，冬奥赛区高空处于涡后强冷平流中，大气下沉作用强，并且高低层风切变以及温度平流的差异容易造成垂直混合加强（孙永刚等，2014），从而导致近地面气温出现异常升高现象。此外，从张家口站的探空曲线（图 4），可以看出张家口近地面有明显的逆温现象，大气层结稳定，从低层至高层为干-湿-干，风向从东南向西北逆时针变化，750hPa 以上干冷空气较强，且 750hPa 附近逆温层具有湍流逆温特征（罗然，2020）。

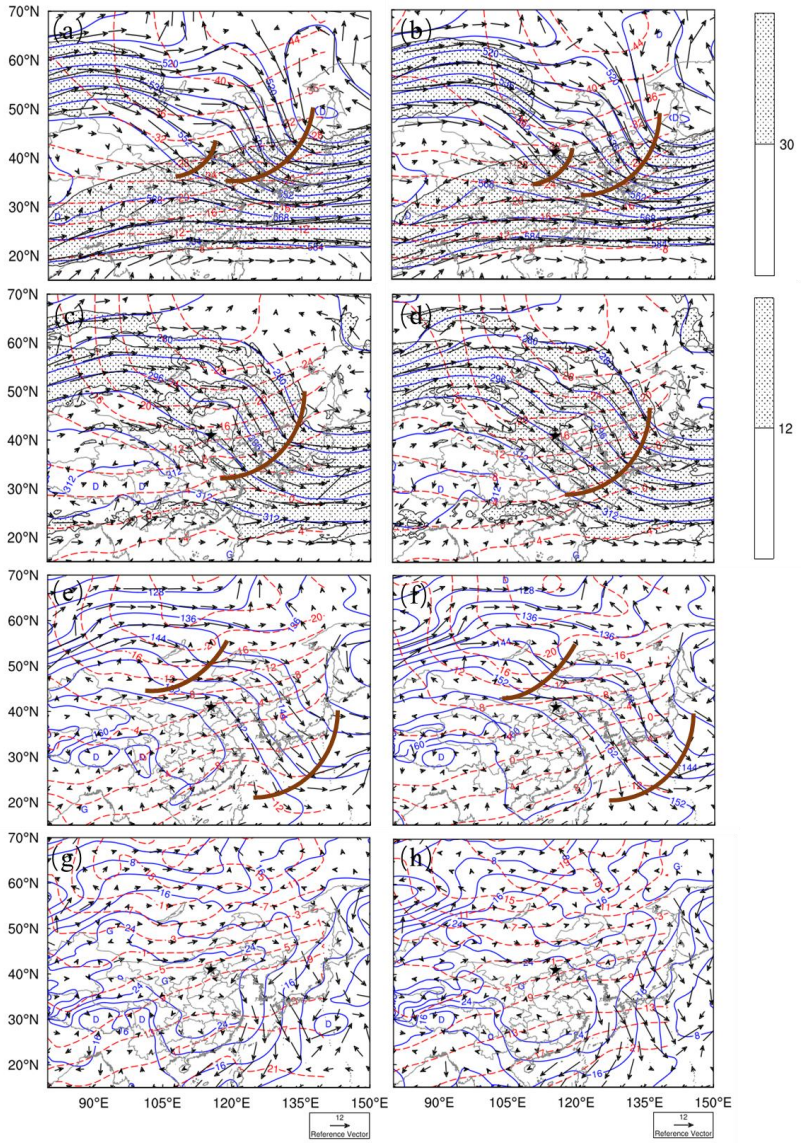

图 3　2020 年 2 月 8 日 1400 时（a）500hPa （c）700 hPa （e）850 hPa （g）1000 hPa 与 2020 年 2 月 8 日 2000 时（b）500hPa （d）700 hPa （f）850 hPa （h）1000 hPa 天气形势图，蓝线为位势高度，单位：10^{-1}gpm；红线为气温，单位：℃；箭头为风场，单位：m/s；橘色粗线为槽线。打点区域为急流区，单位：m/s，（a）、（b）为 200hPa 高空急流，（c）、（d）为 700hPa 低空急流。

Fig.3 (a)500hPa (c)700hPa (e)850 hPa (g)1000 hPa at 1400 BT 8 February 2020 and (b)500hPa (d)700hPa (f)850 hPa (h)1000 hPa at 2000 BT 8 February 2020 weather situation map, the blue line is the geopotential height, unit: 10^{-1} gpm; the red line is the temperature, unit: ℃; the arrow is the wind field, unit: m/s; the orange thick line is the trough line.The dot area is the jet flow area, unit: m/s，(a) and (b) is 200 hPa upper level jet, (c) and (d) is 700 hPa lower level jet.

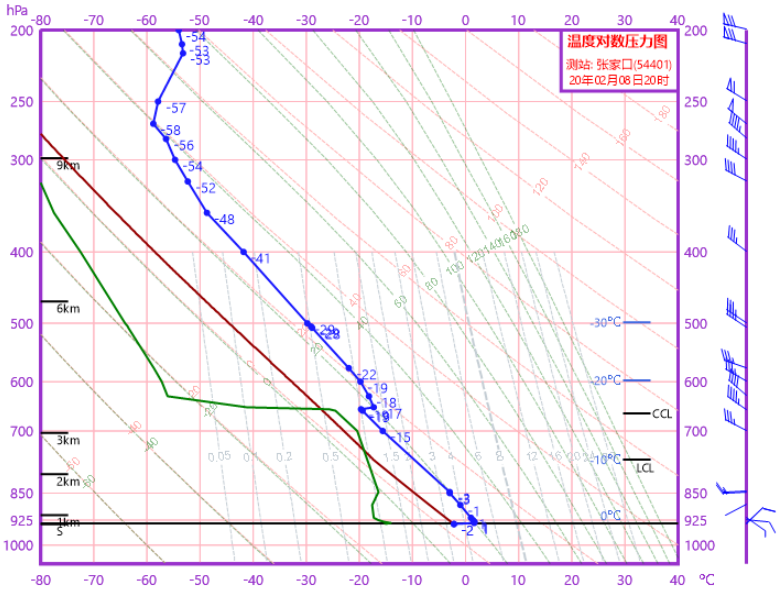

图 4 2020 年 2 月 8 日 2000 时（北京时）张家口站的探空曲线图

Fig.4 Sounding curve of Zhangjiakou station at 2000 BT 8 February 2020

4 模式设置

本次研究采用 WRF-ARW 模式 4.1.5 版本对冬奥赛区夜间增温个例进行模拟，模式采用单向四重嵌套，垂直方向为 120 层，最高层气压为 50hPa，水平分辨率分别为 4.05km、1.35 km、0. 45 km、0.15km，网格数均为 361×361。模拟区域设置如图 5 所示，最内层包含整个冬奥赛区。模式模拟时间为 2021 年 2 月 8 日 0800 时至 2 月 9 日 0800 时，积分时长为 24 h，时间分辨率为 0.5h，能够更好地捕捉温度的变化情况。初始条件和边界条件采用美国国家气候环境预测中心

NCEP（National Centers of Environmental Research）全球预报系统 GFS 提供的 0.25°×0.25°的再分析资料，每 6h 输入一次。已有研究表明夜间增温现象与地形及边界层活动密切相关，因此，本文在引入高精度地形数据的基础上，通过批量的敏感性实验，优选出最优的参数化方案，如表 1 所示，参数化方案配置为 Morrison 2-mom 微物理方案、RRTMG 短波辐射方案、RRTMG 长波辐射方案、thermal diffusion scheme 陆面方案以及适合复杂地形的 YSU 边界层方案。

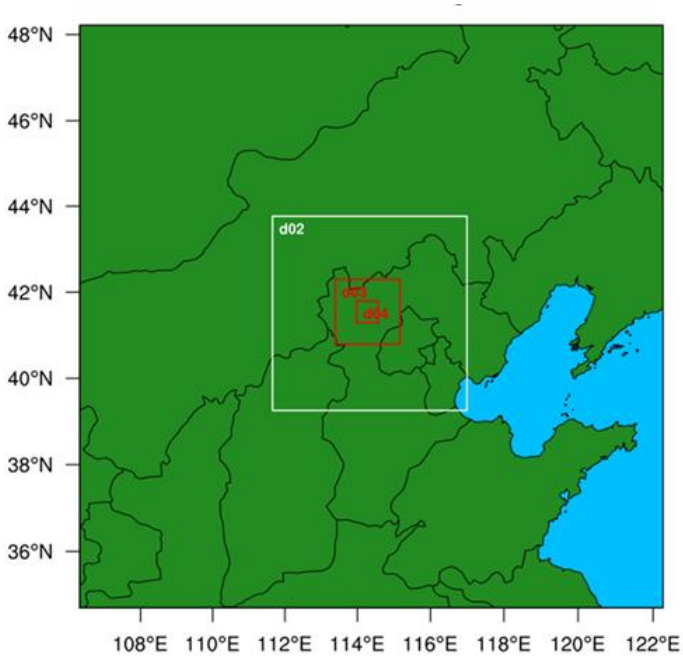

图 5 模拟区域设置

Fig.5 Simulation area setting

表 1 模式参数化方案设置

Table 1 Mode parameterization scheme setting

模式参数	D01	D02	D03	D04
网格分辨率	4.05km	1.35km	0.45km	0.15km
微物理方案	Morrison 2-mom			
边界层方案	YSU			
长波辐射方案	RRTMG			
短波辐射方案	RRTMG			
陆面方案	thermal diffusion scheme			

5 模拟结果分析

5.1 实验结果验证

图 5a 给出了实验方案模拟的冬奥赛区 15 个自动气象站 24 h （8 日 0800 时至 9 日 0800 时）平均气温绝对偏差。可以看出，本文实验方案模拟的 15 个测站的 24h 气温平均绝对偏差均在 1.5℃左右，说明本文实验设置在冬奥赛区内模拟结果较为稳定，无异常情况出现。与此同时，根据云顶山底、冬两 1 号与冬两 2 号 3 站的气温逐时对比可以看出，本次实验方案可以较好的模拟出 08 日夜间至 09 日凌晨的气温异常演变现象（图 6b、c、d），较好地再现了 08 日 2300 时至 09 日 0300 时气温不降反增的变化特征，但模拟值与实测值存在一定偏差，模拟的增温强度弱于实测增温强度。此外，模拟的气温升高时间比观测到的数据落后 1 小时左右，对后期短时增温幅度较高的冬两站点模拟结果较好。总的来说，本次 WRF 模式设置较好的再现了此次夜间异常增温过程，可以用来分析该过程的演变特征以及可能原因。

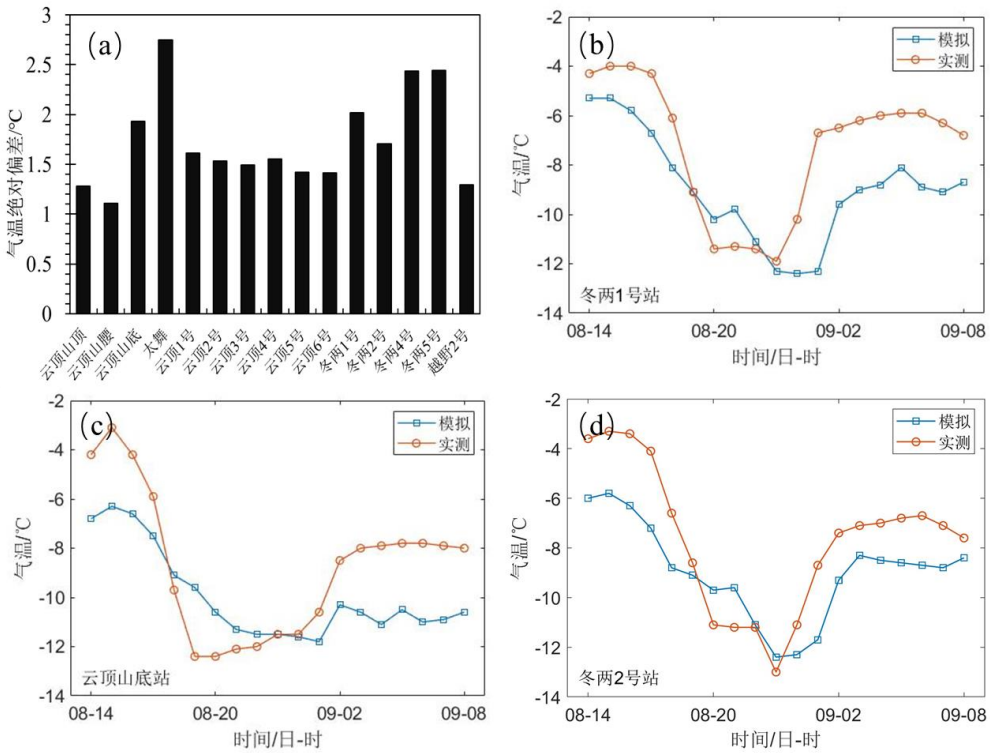

图 6 （a）为赛区内 15 个站点模拟的 24h（2020 年 2 月 8 日 0800 时-9 日 0800 时）平均气温的绝对偏差，（b、c、d）为 2020 年 2 月 8 日 1400 时-9 日 0800 时赛区内冬两 1 号、云顶山底、冬两 2 号 3 站模拟的气温与实测逐时对比图

Fig.6 (a) shows the absolute deviation of simulated 24h average temperature of 15 stations in the competition area (from 0800 BT 8 February to 0800 BT 9 February 2020), and (b, c, d) shows the hourly comparison of simulated and measured temperature of Dongliang NO.1, Yundingshandi

and Dongliang NO.2 stations in the competition area from 1400 BT 8 February to 0800 BT 9 February 2020.

5.2 增温过程中近地面气象要素特征

夜间增温现象的出现常伴随其他气象要素的突发性不连续变化，如露点温度、湿度、风向风速等（White, 2009），通过高分辨率数值模拟的结果可以更好地看出增温事件发生时地面气象要素的变化情况。根据图 7 给出的 9 日 0000 时与 0200 时近地面气象要素的差值场可以看出，9 日 0000-0200 时冬奥赛区温度突然升高，尤其是冬两站点，气温升高超过 2℃，同时，地面 2m 相对湿度降低、海平面气压降低、地面 10m 风速显著增大、风向向西北方向偏转。此次夜间气温出现异常升高的区域与相对湿度降低、风速增大、海平面气压降低区域在位置上有较好的对应，并且在变化强度上也有较好的对应，说明气温异常升高与近地面气象要素变化存在对应关系。此外，9 日 0000 时-0200 时区域内近地面 10m 风向为稳定的西北风，风速增加达到 6m/s 左右，这一快速增强现象与晴朗天空下近地面夜间大气的典型特征相反（White, 2009），风速突然增大有利于增大山区近地面摩擦，引起湍流混合（罗然，2020），导致气温出现异常变化。综上可知，近地面气象要素的变化特征可以在一定程度上反映出此次夜间增温过程。

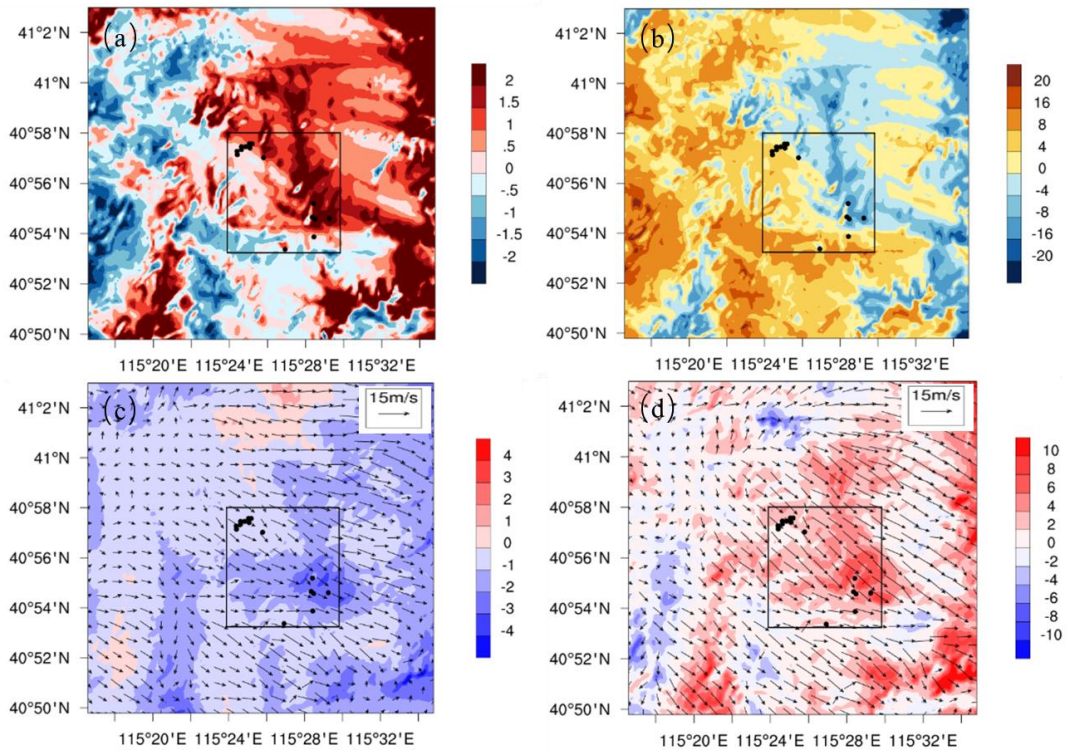

图 7　2020 年 2 月 9 日 0100 时与 0200 时近地面气象要素差值场（a）2m 气温，单位：℃，（b）2m 相对湿度，单位：%，（c）海平面气压（填色），单位：hPa，（d）10m 风速（填色），单位：m/s；地面 10m 风场（c）9 日 0100 时（箭头），（d）9 日 0200 时（箭头）。（其中黑色圆点为自动站，黑色方框为冬奥赛区范围）

Fig.7 The difference field of near surface meteorological elements between 0100 BT and 0200 BT 9 February 2020(a)2m temperature, unit:℃, (b)2m relative humidity, unit: %, (c) sea level pressure(coloring), unit: hPa,(d)10m wind speed (coloring), unit: m/s; surface 10m wind field(c)at 0100 9 February 2020(arrow),(d)at 0200 BT 9 February 2020(arrow). The black dot is the automatic station, and the black box is the scope of Winter Olympic Games area.

5.3 夜间增温可能影响机制

根据大气热力学能量方程可知温度平流、垂直运动、非绝热加热作用以及变压和气压平流是造成大尺度天气系统中局地气温变化的原因，由于变压和气压平流相较于其他几项量级很小，在零级简化方程中被忽略不计（朱乾根，1983；梁新兰，2007），方程如公式 1 所示。此外，赛区复杂地形对气流影响较大，山区夜间边界层湍流垂直混合作用也不可忽视。本文将从以上几个方面分析此次增温过程的可能成因及其影响因素。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\left(u\frac{\partial T}{\partial x} + v\frac{\partial T}{\partial y}\right) - w\left(\gamma_d - \gamma\right) + \frac{1}{c_p}Q \qquad \text{（公式 1）}$$

5.3.1 温度平流及垂直运动的影响

根据 9 日 01 时与 02 时气温差值分布（图 7a）可以看出 9 日 0100 时至 0200 时河北冬奥赛区出现大范围异常增温现象，幅度大于 1℃。通过 WRF 模拟的该区域的水平风场和垂直运动的时间高度剖面可以看出（图 8a），8 日 1700 时前，冬奥赛场上空整个对流层都受西风控制，除近地面及 500-700hPa 为西风（暖平流），其他高度都为西北风（冷平流），存在明显的风切变。8 日 1700 时至 2400 时，受低涡移动影响，600-700hPa 西风逐渐转为西北风，风速从 5m/s 增至 15m/s，与此同时，低层 800hPa 附近风速也增至 15m/s 左右，可见存在明显的动量下传。此外，9 日 0000 时左右，冬奥赛区上空下沉运动范围从 700-800hPa 扩展到 300-800hPa，下沉运动随时间加强，气团上升冷却，下沉增温，因此整层的强下沉运动可能是造成此次温度局地异常变化的一个原因。为了进一步分析温度平流及垂直运动的影响，通过计算上文大气热力学能量方程（公式 1）中的平流项−

（$u\cdot\partial T/\partial x+v\cdot\partial T/\partial y$）和垂直运动项$-w$（$\gamma_d-\gamma$）来定量反映温度平流及垂直运动对此次温度异常过程的作用。根据图 8c、d 计算的冬奥赛区平流项及垂直运动项的时间高度演变可以看出，冬奥赛场高低层存在平流差异（图 8b），低层 850hPa 附近均为暖平流，其增温作用强度高于垂直运动的降温作用（图 8c）。8 日 2300 时，赛区上空 800hPa-700hPa 冷平流增强，而垂直运动的增温作用弱于冷平流，并且此时为下沉运动（图 8a），上层冷平流影响低层温度，造成低层暖平流有一个先减弱再加强的现象（图 8b），这一现象导致其前后暖平流加热作用差距增大，使得其在 9 日 01 时之后气温异常升高现象更加显著。此外，9 日 01 时左右，冬奥赛区上空冷平流及垂直运动强度均出现明显增强，但垂直运动增温效率高于 1×10^{-3}℃/s 的范围高层扩展至 400hPa，高于 2×10^{-3}℃/s 的也扩展至 550hPa 左右，影响范围均大于冷平流，强下沉运动作用强于冷平流，导致低层温度升高，造成夜间温度异常升高。

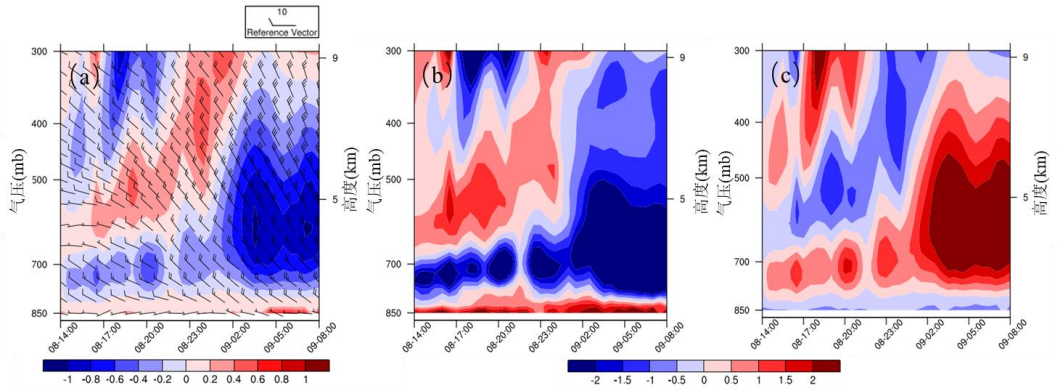

图 8 冬奥赛区（图 7 黑色方框范围）区域平均 （a）水平风场及垂直速度随时间演变（风羽杆：水平风场，单位：m/s，填色：垂直速度，单位：m/s），（b）温度平流项时间高度剖面，单位：10^{-3}℃/s，（c）垂直运动项时间高度剖面，单位：10^{-3}℃/s。

Fig.8 In Winter Olympic Games area (black box in Figure 7), the regional average (a) horizontal wind field and vertical velocity evolution with time (wind plume: horizontal wind field, unit: m/s, color filling: vertical velocity, unit: m/s), (b) temperature advection time height profile, unit: 10^{-3}℃/s, (c) vertical movement time height profile, unit: 10^{-3}℃/s.

5.3.2 非绝热因子的影响

非绝热加热（diabatic heating）是系统和外界之间的热量交换过程。非绝热加热过程主要包括辐射、感热输送、潜热释放这三项（吕健，2016）。因此，计算冬奥赛场异常增温区域感热通量、潜热通量以及到达地面的长短波辐射随时间

变化的曲线，可用以研究非绝热加热过程对赛区内温度异常变化的影响。一般来说，白天地表吸收太阳短波辐射，能量升高，地面给大气输送热量造成近地面温度升高，夜间地表释放长波辐射，能量减少，造成近地面气温降低。根据冬奥赛区区域平均的感热通量、潜热通量（图 9a）可知感热通量影响较大，夜间地表感热通量为负，大气向地表输送热量，气温降低，在 9 日 0100 时至 0300 时（夜间温度升高时段），赛区内向下的感热通量减少、向上的潜热通量增加，说明大气向地表输送热量减少，起到缓解气温下降作用，并且赛区内多植被等自然地表，夜间潜热释放增加，给大气传输热量。同时，到达地表的长波辐射变化曲线（图 9b）显示，从 8 日 2300 时开始，由于 850hPa 附近暖平流的暖湿输送和弱上升运动的影响（图 8a、b），低云增多，大气反向辐射增强，到达地表的长波辐射明显增强，在 0200 时达到最高值，与增温幅度最大现象出现时间一致，说明其对此次夜间增温过程有一定正贡献。进一步观察非绝热因子在增温过程中变化分布情况（图 9b1、b2、b3）发现，区域内站点增温幅度与感热通量、潜热通量以及到达地表的长波辐射增强量级对应情况较好，但在增温幅度较大的冬两 5 号站点其感热通量减少，对增温存在负贡献，说明非绝热因子在此次过程中具有一定作用，但并不是造成大幅增温的主要原因，并且冬奥赛区内不同位置的增温幅度变大的原因也不完全相同。

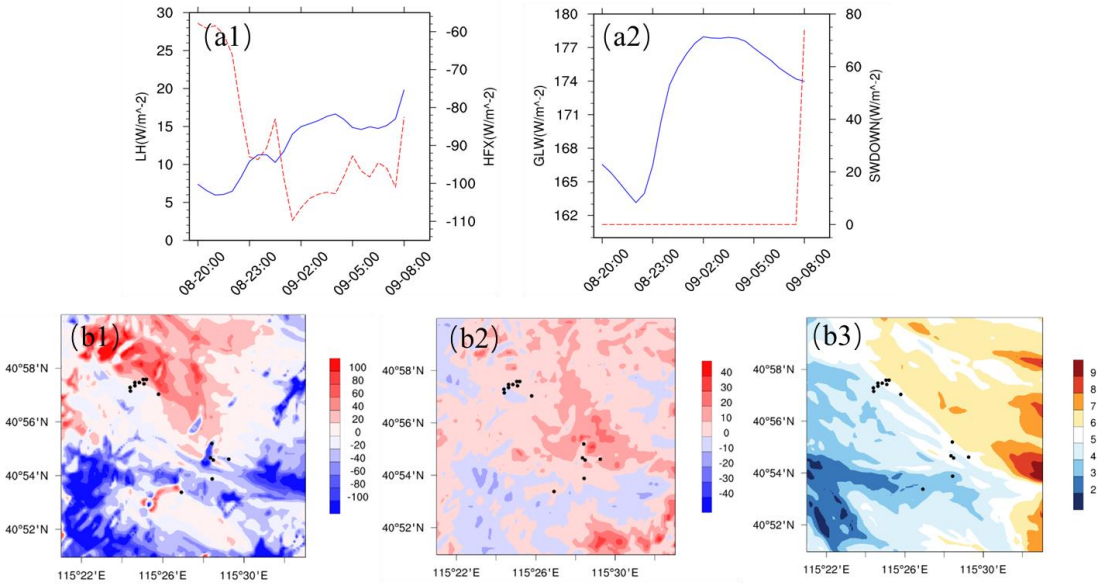

图 9 冬奥赛场异常增温区域地表能量及辐射随时间变化的曲线：（a1）蓝线为潜热通量、红线为感热通量，单位：w/m^2；（a2）蓝线为到达地面的长波辐射、红线为到达地面的短

波辐射，单位 w/m^2。冬奥赛区 2020 年 2 月 9 日 0000 时与 0200 时（b1）感热通量，单位 w/m^2、（b2）潜热通量，单位：w/m^2、（b3）到达地表长波辐射差值场，单位：w/m^2。

Fig.9 The curve of surface energy and radiation with time in the abnormal warming area of Winter Olympic Games area:(a1) the blue line is the latent heat flux; the red line is the sensible heat flux;(a2) the blue line is the long wave radiation to the ground; the red line is the short wave radiation to the ground, unit: w/m^2. And (b1) the sensible heat flux, (b2)the latent heat flux and (b3)the long wave radiation difference between 0100 BT and 0200 BT 9 February 2020 in Winter Olympic Games area, w/m^2.

5.3.3 逆温与湍流垂直混合的影响

逆温层与大气运动密切相关，如图 10a 所示，在气温出现异常升高的 9 日 0100 时，气温垂直廓线开始出现明显的逆温现象，逆温从地表开始出现，在逆温层附近，温度廓线与露点温度廓线（图 10a、b 中的紫线）形成一“V”型结构，说明近地面辐射冷却、高空下沉运动及湍流垂直混合均可能是造成此次逆温出现的原因（盛裴轩等，2003；李万彪，2010）。夜间出现逆温情况，表现出强烈的热力学稳定和稳定边界层环境的存在。此外，在 1750-1850m 范围内有一个大致中性层。同时，9 日 0100 时空气中的水汽含量高于 0030 时（图 10d 中的紫线和红线），表明水汽在边界层中积累。随着不同高度处温度的升高，1800m 以上的气温梯度减小，近似中性层由于垂直混合而消失（图 10a 中的紫线和红线）。与增温前相比，位温的垂直结构也发生了变化，可以清楚地看到 0030 时与 0100 时（增温前）近地面位温相差较小高空相差较大，但在温度异常升高的时间段（0100 时至 0130 时）表现为近地面位温相差较大高空位温梯度明显减小（图 10c）。同时，比湿的梯度变化更明显，0130 时后，高空水汽含量明显减少（图 10d），在没有增温现象的情况下，比湿的垂直分布应该与 0030 时相似，空气的含水量应该更高。夜间边界层内变得干燥，气温中性层消失，高层位温梯度减少，气温、位温和比湿的垂直廓线变化表明边界层内有明显的垂直混合作用，高空较暖、较干的空气与近地表空气混合，造成了温度异常升高现象。

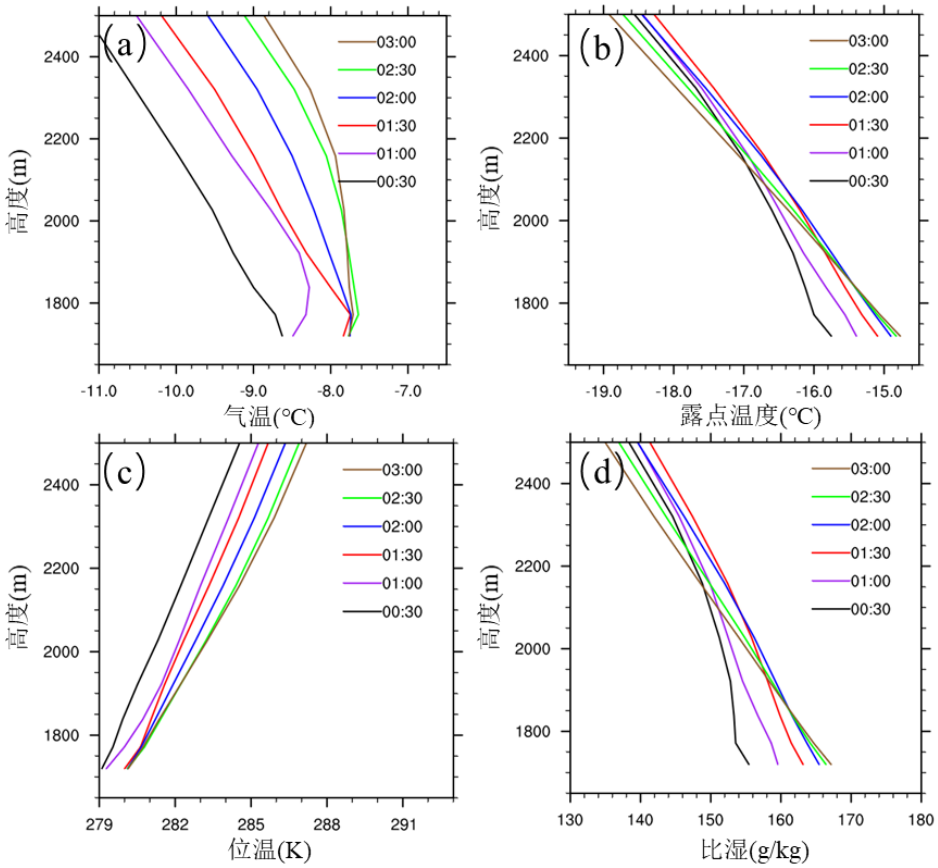

图 10 冬两 1 号站点不同气象要素垂直廓线：（a）气温，单位:℃；（b）露点温度，单位:℃；（c）位温，单位：K；（d）比湿，单位：g/kg。

Fig.10 Vertical profiles of different meteorological elements at Dongliang No.1 station: (a) air temperature, unit: ℃; (b)dew point temperature, unit: ℃;(c) potential temperature, unit: K; (d) specific humidity, unit: g / kg.

根据增温前后位温及风场的垂直剖面（图 11）可以看出赛区 9 日 0200 时低层的位温较 8 日 2330 时显著升高，等熵面的波动特征从地面至 750 hPa 均表现得较为明显，但此波动并非完全是受地形影响，这种波动也能造成对流层湍流（李子良和黄仪方，2006），在夜间晴空条件下，湍流活动与温度变化密切相关，增强的湍流触发垂直混合（钱敏伟和李军，1996；马媛媛等，2015），从而反映在温度的变化中。摩擦速度表征了湍流运动中水平动量的垂直通量，根据冬奥赛区站点摩擦速度的时间变化曲线（图 12a）可以看出，在增温出现前 1 小时左右（9 日 0000 时），摩擦速度突然开始升高，表明地表附近湍流运动增强，其与增温过程相对应。进一步地，利用湍流动能来评价增温过程中湍流是否加强（Sun et al.，2012），由图 12b 可以看出从 9 日 0100 时至 0230 时，近地面至 2300m 湍

流动能随时间变化明显升高，峰值出现在 2000m 高度处，这些升高的数值说明增温期间湍流活动增强。此外，根据梯度输送理论（Hong，2006；吴志鹏，2021），计算湍流运动热通量在垂直方向上的输送。由上文已知此次过程存在明显的逆温现象，冷空气上方具有暖空气，为稳定的夜间边界层环境，由图 12c 可知站点运动热通量为负，说明湍流使暖空气沿梯度向冷空气移动，模拟的运动热通量从 0130 时开始突然增大，说明湍流加强热量输送，造成近地面温度升高。综上可知，湍流增强触发垂直混合造成高层高位温空气与低层低位温空气混合，同时湍流加强热量输送，使得近地面温度升高。

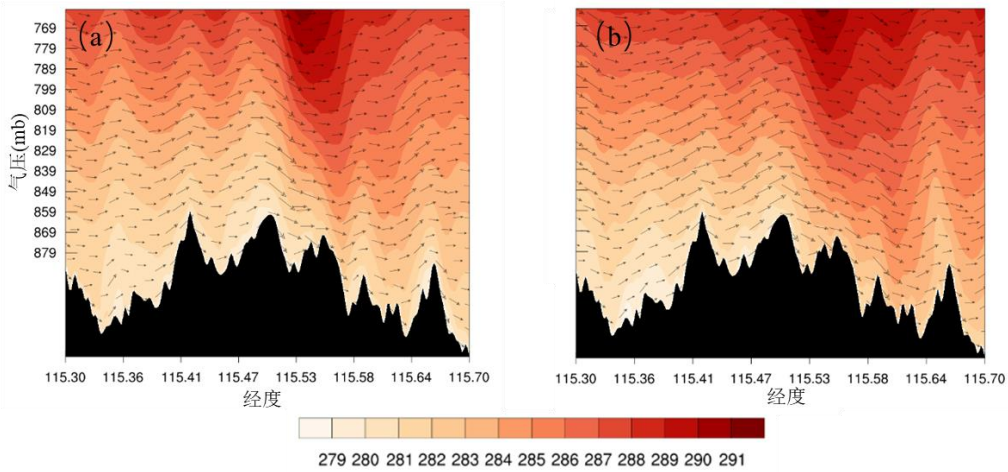

图 11 2020 年 2 月 8 日 2330 时（a）与 2 月 9 日 0200 时（b）位温沿 40.91 °N 剖面分布，单位：K。图中黑色区域为地形。

Fig.11 Potential temperature distribution along 40.91 °N profile at 2330 BT (a) and 0200 BT (b) 8 February 2020, unit: K. The black area is the terrain.

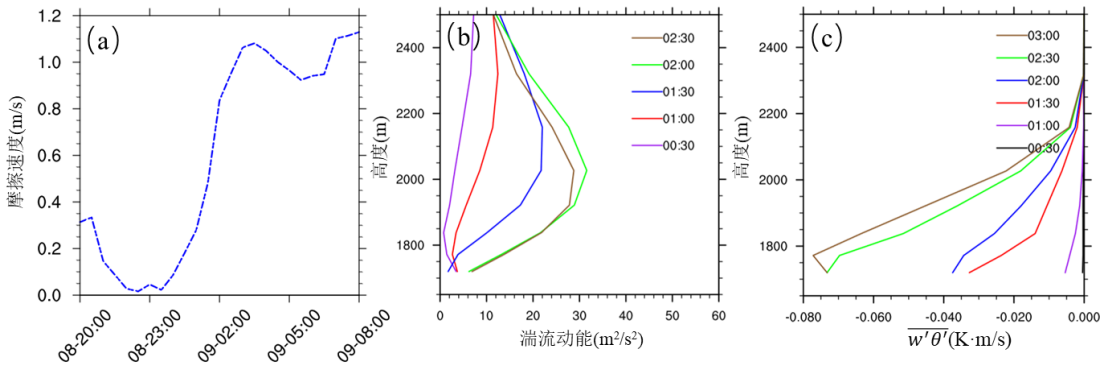

图 12 河北冬奥赛区冬两 1 号站点（a）摩擦速度 UST，单位：m/s、（b）湍流动能，单位：m^2/s^2、（c）运动热通量，单位：K m/s 随时间演变曲线。

Fig.12 Time evolution curve of (a) friction velocity, unit:m/s,(b)turbulent kinetic energy, unit: m^2/s^2, (c)kinetic heat flux, unit: K·m/s at Dongliang No. 1 station in Hebei Winter Olympic Games area.

6 总结与讨论

河北冬奥赛区冬半年多次发生大范围的夜间增温事件，为研究该区域此类事件主要气象特征及成因，本文利用 WRF 中尺度数值模式，引入高精度地形资料，对 2020 年 2 月 8 日夜间至 9 日凌晨冬奥赛区一次典型的夜间强增温过程进行模拟，详细分析了此次过程中气象要素的水平及垂直变化特征，探究了其可能成因。主要结论如下：

（1）河北冬奥赛区冬半年夜间异常增温事件频发，此次增温现象在凌晨最为明显，小时增温幅度在 2-3℃，具有该区域夜间温度异常升高的典型特征。此次过程受高空冷涡的影响，大气中高层为西北气流，冷平流显著，大气低层为西风和西南风，带来一定暖空气，中高层强冷平流有利于强下沉运动，高低层风切变及温度平流差异容易造成垂直混合作用，这是导致气温出现异常升高的大环流背景。

（2）此次夜间增温事件覆盖范围较广，从赛区的西北部开始，逐渐向东南方向蔓延，且增温幅度呈现加强的趋势，近地面气象要素对此次过程有很好的指示意义，夜间气温出现异常升高的区域与相对湿度降低、风速增大、海平面气压降低区域在位置上有较好的对应，并且在变化强度上也有较好的对应。

（3）赛区夜间到达地表的长波辐射升高，减缓了地表对大气的降温效果；高空下沉增温作用强于冷平流；近地面暖空气输送；高低空存在风切变，湍流运动加强触发垂直混合，湍流垂直输送热通量，以上共同作用造成了此次夜间温度异常升高现象。此外，根据文中分析可知，此次过程中强下沉运动以及边界层内的湍流增强占主导地位，冷平流作用弱于下沉运动带来的增温效果，而非绝热因子仅起到减缓降温作用，并非主要原因。

本文虽然对河北冬奥赛区 2020 年 2 月 8 日夜间至 9 日凌晨的温度异常升高过程进行了较为详细的分析，但本文数值模拟结果时间分辨率仍不能完全反映此次夜间异常升温过程的变化情况，其中地形、非绝热因子及湍流运动对于地面增温的贡献大小等问题，仍需要精细可靠的数值模拟资料来进行定量分析。此外，

结合区域地理及气候特征对此类过程进行分型分析也有利于提高对此类事件的预报能力。

参考文献(References)

Bernstein B C, Johnson R II, 1994. A dual-Doppler radar study of an OK PRE-STORM heat burst event [J].Mon. Wea. Rev., 122(2): 259-273.

Brinkmann W A, 1971. What is a foehn? [J]. Weather, 26(6): 230-240.

Clarke R H, Smith R K, and Reid D G, 1981. The morning glory of the Gulf of Carpentaria: An atmospheric undular bore [J]. Mon. Wea. Rev., 109, 1726-1750.

Doswell III C A, IIaugland M J, 2007. A comparison of two cold fronts-effects of the planetary boundary layer on the mesoscale [J]. Electronic J Severe Storms Meteor, 2(4): 1-12.

Elvidge A D, RenIrew I A. 2016. The causes of foehn warming in the lee of mountains [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 97(3): 455-466.

甘茹蕙，马媛媛，杨毅，等. 2016. 兰州地区突发性夜间增温的统计特征[J]. 兰州大学学报:自然科学版,52(5):652-659. Gan Huiru, Ma Yuanyuan, Yang Yi, et al., 2016. Statistical characteristics of sudden nocturnal warming events in Lanzhou Region [J]. Journal of Lanzhou University: Natural Science Edition (in Chinese), 52(5): 652-659.

Hong S Y, Noh Y, Dudhia J. 2006. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes [J].Mon. Wea. Rev., 134(9): 2318-2341.

黄少妮，王建鹏，王丹，等. 2015. 西安一次夜间异常增温过程的数值模拟及诊断田[J].干旱气象,2015,33(2):270-277. Huang shaoni, Wang Jianpeng, Wang Dan, et al., 2015. Simulation and Diagnosis of a Temperature Anomaly Increase Event at night in Xi'an Region [J]. Journal of Arid Meteorology(in Chinese), 33(2): 270-277.

李万彪. 2010. 大气物理[M]. 北京:北京大学出版社, 84-86. Li Wangbiao, 2010. Atmospheric Physics [M]. Beijing: Peking University Press (in Chinese), 84-86.

梁新兰，孟妙志. 2007. 2006 年春季宝鸡高温天气分析田.陕西气象, (4): 24-25. Liang Xinlan, Meng Miaozhi. 2007. Analysis of high temperature weather in Baoji in spring of 2006. Journal of Shanxi Meteorology (in Chinese), (4): 24-25.

吕健. 2016. 2015 年 4 月初浙江省一次高温天气过程分析. 浙江气象, 38(3). Lu Jian. 2016. Analysis of a high temperature weather process in Zhejiang Province in early April 2015. Journal of Zhejiang Meteorology (in Chinese), 38(3).

李子良，黄仪方. 2006. 地形影响的飞机颠簸及其数值仿真实验[J]. 气象, 32(11): 32-35. Li Ziliang, Huang Yifang, 2006. Simulations of aircraft bump caused by topography [J]. Meteorology Monthly (in Chinese), 32(11): 32-35.

罗然,郑永光,陈敏. 2020. 北京一次罕见夜间突发性强增温事件成因分析[J]. 气象, 2020, 46(04):478-489. Luo ran, Zheng Yongguang, Chen Min. 2020. Cause analysis of a rare sudden strong warming event at night in Beijing [J]. Meteorology (in Chinese), 46(04): 478-489.

McPherson R A, Lane J D, Crawlord K C, et al., 2011. A climatological analysis of heatbursts in Oklahoma (1994-2009) [J]. International Journal of Climatology, 31(4): 531-544.

Ma Y Y, Yang Y, Hu X M, Gan H R. 2015. Characteristics and Mechanisms of the Sudden Warming Events in the Nocturnal Atmospheric Boundary Layer: A Case Study Using WRF [J]. Journal of Meteorological Research, 29(05): 747-763.

Nallapareddy A, Shapiro A, and Gourley J J, 2011: A climatology of nocturnal warming events associated with cold-frontal passages in Oklahoma [J]. J. Appl. Meteor. Climatol., 50, 2042-2061.

钱敏伟, 李军. 1996.夜间近地面稳定边界层湍流间歇与增温[J]. 大气科学, 20(2): 250-254. Qian Minwei, Li Jun, 1996. Intermittent turbulence and temperature burst in the nocturnal surface layer [J]. Chinese Journal Atmospheric Science (in Chinese), 20(2): 250-254.

Sanders F, Kessler F, 1999. Frontal analysis in the light of abrupt temperature changes in a shallow valley [J]. Mon. Wea. Rev., 127(6): 1125-1133.

孙永刚, 孟雪峰, 荀学义, 袁慧敏, 仲夏. 2014. 温度平流在沙尘暴和大风天气预报中的差异分析[J].气象, 40(11): 1302-1307. Sun Yonggang, Meng Xuefeng, Xun Xueyi, Yuan Huimin, Zhong Xia. 2014. Difference analysis of temperature advection in Sandstorm and gale weather forecast [J]. Meteorology Monthly (in Chinese), 40 (11): 1302-1307.

Smith R K, Redder M J, Tapper N J, et a1., 1995. Central Australian cold fronts [J]. Mon. Wea. Rev., l23 (1):16-38.

Sun J L, Mahrt L, Banta R, et al., 2012. Turbulence regimes and turbulence intermittency in the stable boundary layer during CASES-99. J. Atmos. Sci., 69, 338-351.

盛裴轩, 毛节泰, 李建国, 等. 2003. 大气物理学[M].北京:北京大学出版社:132-165. Sheng Peixuan, Mao Jietai, Li Jianguo, et al., 2003. Atmospheric Physics [M]. Beijing: Peking University Press (in Chinese): 132-165.

White L D, 2009. Sudden nocturnal warming events in Mississippi [J]. Journal of Applied Meteorology, 48(4):758-775.

吴志鹏, 李跃清, 李晓岚, 胡小明, 周国兵, 邓承之. 2021. WRF 模式边界层参数化方案对川渝盆地西南涡降水模拟的影响[J]. 大气科学, 45(01): 58-72. Wu Zhipeng, Li Yueqing, Li Xiaolan, Hu Xiaoming, Zhou Guobing, Deng Chengzhi. 2021. Influence of boundary layer parameterization scheme of WRF model on Southwest Vortex precipitation simulation in

Sichuan Chongqing Basin [J]. Chinese Journal Atmospheric Science (in Chinese), 45(01): 58-72.

杨晓亮，杨敏，李江波，等．2018. 一次太行山焚风对霾强度的影响分析[J]. 气象，44(2): 313-319. Yang Xiaoliang, Yangmin, Li Jiangbo, et al., 2018. Impact analysis of a Taihang Mountain foehn on haze intensity [J]. Meteorology Monthly (in Chinese), 44(2): 313-319.

赵世林，王荣科，郭彦波，等．1993. 太行山中段的焚风[J]. 气象，19(2): 3-6. Zhao Shilin, Wang Rongke, Guo Yanbo, et al., 1993. The foehn in the middle range of Taihang Mountain [J]. Meteorology Monthly (in Chinese), 19(2): 3-6.

周国华，王盘兴，罗小莉，等．2011. 基于 160 站资料的我国表面气温异常特征[J]. 应用气象学报, 2(3): 283-291. Zhou Guohua, Wang Panxing, Luo Xiaoli, et al., 2011. Characteristics of surface temperature anomalies in China based on data from 160 weather stations [J]. Journal of Applied Meteorology, 2(3): 283-291.

周宇，史军，孙国武，等．2012. 1873-2009 年上海气温日较差变化及其影响因素[J].气象与环境学报，28 (1):24 -30.Zhou Yu, Shi Jun, Sun Guowu, et al., 2012. Diurnal variation of temperature range and its influencing factors in Shanghai from 1873 to 2009[J]. Journal of Meteorology and Environment (in Chinese), 28(1): 24-30.

朱乾根，林锦瑞，寿绍文．1983. 天气学原理和方法[M]. 北京:气象出版社，401-405. Zhu Qiangen, Lin Jinrui, Shou Shaowen. 1983. Principles and methods of Meteorology [M]. Beijing: Meteorological publishing house (in Chinese), 401-405.