

冬奥会延庆赛区降雪与边界层东风的关系

于波¹ 李桑¹ 郝翠¹ 刘郁珏² 杜佳¹

1 北京市气象台, 北京 100089

2 中国气象局北京城市气象研究院, 北京 100089

摘要 受特殊地理环境影响, 北京地区冬季降雪常与边界层东风相伴, 边界层东风所引起的水汽输送和动力辐合效应对降雪发生发展有重要意义。不同于已有边界层东风对平原地区降雪影响的研究, 本文结合 2022 年冬奥会北京延庆赛区的地形特征, 对比相似天气背景下不同温湿特性、不同发展高度的边界层东风对降雪的作用机制, 研究表明: (1) 途经渤海湾的路径较长有利于边界层东风的明显增湿, 反之增湿效果则较弱; (2) “干冷”性质的偏东风可形成冷垫抬升北京平原及低海拔地区的暖湿空气; 当偏东风在垂直方向发展较为深厚(600m 以上)时, 能够翻越延庆东部海拔较低的军都山并在背风坡形成绕流汇合, 同时受西部海拔较高的海陀山阻挡, 形成迎风坡的强迫抬升, 二者共同作用导致延庆区的辐合东强西弱, 进而造成降雪分布呈东多西少的特征; (3) “暖湿”性质的边界层东风因垂直延展高度较低, 无法向西越过军都山, 对延庆赛区降雪基本无影响。(4) 空中 500hPa 为西北气流影响时, 除考虑边界层东风能否越山之外, 若存在与地形高度接近的、700hPa 高度附近饱和区与抬升运动的有利配合, 将导致延庆赛区的高海拔山区出现明显降雪。

关键词 延庆赛区降雪 边界层偏东风 温湿特性 垂直高度 地形作用

文章编号 2021055B **中图分类号** P458 **文献标识码** A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2104.21055

The Relationship between on Snowfall in Yanqing Zone of Winter Olympic Games and Easterly Wind in Boundary Layer

YU Bo¹ LI Sang¹ HAO Cui¹ LIU Yujue² DU Jia¹

1 Beijing Weather Forecast Centre, Beijing 100089

2 Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100089

Abstract Affected by special geographical environment, winter snowfall in Beijing is often accompanied by easterly wind in boundary layer. The water vapor transport and dynamic convergence effect caused by wind in boundary layer easterly are of great significance to the occurrence and development of snowfall. Different from the existing snowfall studies on boundary layer easterly wind in plain areas, based on the topographic characteristics of Yanqing Zone of 2022 Winter Olympic Games, this paper compared the mechanism of easterly wind in boundary layer with different thermal and humidity properties and development heights on snowfall under

收稿日期 2020-04-02; **网络预出版日期:**

作者简介 于波, 女, 1979 年 3 月出生, 博士, 正高工, 主要从事降雪机理和预报技术研究。
E-mail: yubo_0@126.com.

资助项目 北京市自然科学基金 8214058、8192019, 国家重点研发计划 2018YFF0300104

Funded by Beijing Natural Science Foundation (Grants 8214058, 8192019), National Key Research and Development Program (Grant 2018YFF0300104)

similar weather conditions. The results show that: (1) A longer route through the Bohai Bay is beneficial to the obvious humidification of the boundary layer easterly wind, and vice versa. (2) The 'dry and cold' easterly wind can form a cold pad to lift the warm and humid air in Beijing plain area. When the easterly wind develops deep in the vertical direction (over 600m), it can overturn Jundu Mountain with lower altitudes in eastern Yanqing and form a confluence on leeward slopes. At the same time, it is blocked Haituo Mountain with higher altitudes in the west, forming the forced uplift of the windward slope. The combined two effect leads to the convergence of the east is strong and the west is weak, which causes the distribution of snowfall is more east than west. (3) The 'warm and humid' boundary layer easterly wind cannot cross Jundu Mountain westward due to its low vertical extension height, which has little effect on snow in Yanqing. (4) When the air is affected by the northwest airflow of 500hPa, closer to the terrain, the saturation area near the 700 hPa height and the lifting movement will make the high altitude mountain area of Yanqing experience obvious snowfall.

Keywords Snowfall in Yanqing Zone, Easterly wind in boundary layer, Thermal and humidity property, Vertical height, Effect of topography

1 引言

北京地区地形复杂多样, 自西向东海拔高度呈明显阶梯结构下降, 其三面环山和临近渤海的特殊地形和地理位置, 导致冬季降雪常常与边界层东风相伴(王继志, 1978; 孙继松等, 2003; 于波等, 2013; 吴庆梅等, 2014; 李津等, 2017; 于波等, 2019)。分析近年来降雪空报和降雪漏报个例表明, 边界层东风是制约预报准确率的主要原因。边界层东风因水平尺度小、持续时间短、垂直厚度浅薄, 较难捕捉其对降雪影响的具体信号。已有研究指出, 边界层东风能否建立起指向华北地区的水汽输送通道在降雪中非常重要: 当无明显的水汽输送时, 即使中低层上升运动明显, 也很难形成有效降水(郭锐等, 2012; 何娜等, 2014); 即使对流层中低层没有深厚湿层的配合, 边界层东风的增湿作用即可造成明显降雪(赵思雄等, 2002; 孙建华等, 2003; 赵思雄等, 2013)。同时, 冷性东风可形成冷垫强迫暖湿空气的爬升(何群英等, 2011; 赵桂香等, 2011), 边界层东风与低层偏西风或偏南风可形成有利的辐合形势(夏茹娣等, 2013; 赵桂香等, 2013)等。因此, 边界层东风及其温湿特性所引起的水汽输送和动力辐合效应对降雪天气有重要意义, 区分讨论不同特性边界层东风对降雪发生发展的影响十分必要, 但已有边界层与降雪相关的研究多集中在斜压边界层的发展(Xu et al, 2002)、边界层动力锋生(Bove et al, 2009; Meng et al, 2019)、地形锋生(Lee et al, 2013; Li et al, 2021)、边界层内的水汽通量和水汽相变过程(Kristovich et al, 1998)以及大地形抬升(Liu et al, 2021)对降雪发生发展的作用。

延庆区地处北京市西北部, 北东南三面环山, 平均海拔 500 米左右, 山区面积占 70%, 东部为军都山(平均海拔 600m 左右), 西部海陀山为延庆区内最高峰, 最高海拔为 2284m

(图 1)。延庆区作为 2022 年冬奥会三大赛区之一，是高山滑雪、雪车和雪橇项目的举办地。由于海拔较高、地势复杂，其降雪天气特征与北京平原地区存在很大差异。

随着 2022 年冬奥会的临近，基于观测试验及数值模拟等手段对赛区近地层风场(张治国等, 2017; 刘郁珏等, 2018)、降雪的云物理特征(高茜等, 2020; 黄钰等, 2020)和云变化(李炬等, 2020)开展的研究工作，加深了对延庆赛区气象要素规律的认识，同时对积雪变化(钱昊, 2017; 钱昊等, 2019)、雪季长短(徐庆喆等, 2017)和风寒效应(李林等, 2018)等气象条件造成的不同影响进行了分析。

由前所述，目前尚缺乏延庆赛区降雪机制的针对性分析，特别是边界层东风对降雪的影响，而已有边界层偏东风对降雪的研究工作多集中于平原地区，这在预报业务中极大制约了高海拔地区降雪的预报准确率。虽然预报员对边界层东风有着极高的警觉性，但更为重要的是，如何甄别不同高度、不同温湿特性的边界层东风对延庆赛区降雪的具体贡献。

本文利用台站观测资料、ERA5 再分析资料、气象铁塔观测、风廓线雷达观测资料及 HYSPLIT 模型，从降雪成因着手，研究相似天气背景下边界层偏东风的温湿特性，结合地形对比不同性质和不同高度偏东风对降雪的贡献，重点探索边界层偏东风对延庆赛区降雪的作用和影响机制。

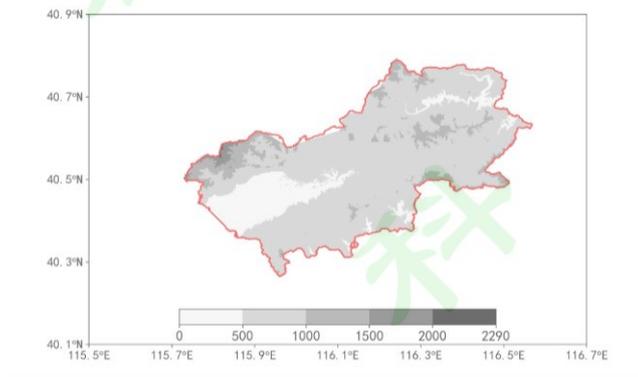


图 1 北京延庆区地形图 (单位: m)

Fig.1 Beijing Topography in Yanqing area of Beijing (unit: m)

2 资料与方法

高度场、风场等资料来自欧洲中期天气预报中心 ECMWF 第五代大气再分析全球数据(简称 ERA5)，空间分辨率 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ ；垂直方向上分为 37 层，数据为逐小时平均。

使用中国科学院大气物理研究所 325m 气象铁塔和延庆风廓线雷达观测数据对边界层偏东风的特征进行研究。其中，气象铁塔 ($39^{\circ}58'N$ 、 $116^{\circ}22'E$) 的观测数据，垂直方向为 15 层，观测高度分别为 8、15、32、47、65、80、102、120、140、160、180、200、240、280、320m，观测要素为水平风向、风速、温度和相对湿度；垂直速度观测数据，垂直方向 7 层，观测高度分别为 8、16、47、80、140、200、280m。延庆风廓线雷达垂直方向为 58 层，150-1950m 为 120m 间隔，1950-12030m 为 249m 间隔，观测要素为水平风向、风速和垂直速度。

利用美国国家海洋和大气管理局 NOAA 的空气资源实验室和澳大利亚气象局联合研发的一种用于计算和分析大气污染物输送、扩散轨迹的专业 HYSPLIT 模型(Draxler et al, 1997)和 NCEP/NCAR 再分析资料对 200m、400m 和 600m 高度的气流进行 96h 后向轨迹追踪。

本文除特殊说明外，所标注时间均为北京时。

3 天气概况

2015 年 11 月 21 日和 2016 年 1 月 21 日，北京延庆区出现降雪。为便于描述，2015 年 11 月 21 日简称降雪过程 I，2016 年 1 月 21 日简称降雪过程 II。

从环流形势来看(图 2)，两次降雪过程中北京上空均受 500hPa 冷涡底部西北气流或西北偏西气流的控制，两次降雪无低槽低涡等明显天气尺度辐合系统的影响；海平面气压场上河套地区存在倒槽，冷高压呈东西走向，北京地区受高压底部偏东风的影响。总体来看，两次降雪过程因对流层中层引导气流为西西北或西北气流，导致其预报难度加大，但对比分析此类天气背景下的降雪天气，能够更加突显边界层东风影响延庆区降雪发生发展的意义所在。

虽然环流背景相似，但两次过程降雪量差别较大：过程 I 中，延庆全区出现降雪，雪量分布呈东多西少的特点，最大降雪量为大庄科站 5.7mm(图 3a)，降雪自 11 月 21 日 05 时开始至 16 时共持续约 11 个小时(图 3b)，但降雪强度较弱，最大小时降雪量为 0.9mm(21 日 11 时)；过程 II 中，延庆区降雪集中在西北部山区，最大降雪出现在小海陀站，为 26.7mm(图 3c)，持续时间相对较短，集中出现在 21 日 12 时至 17 时，但小时降雪量基本都为 3mm 及以上，16 时的降雪量最高达 6.7mm(图 3d)。

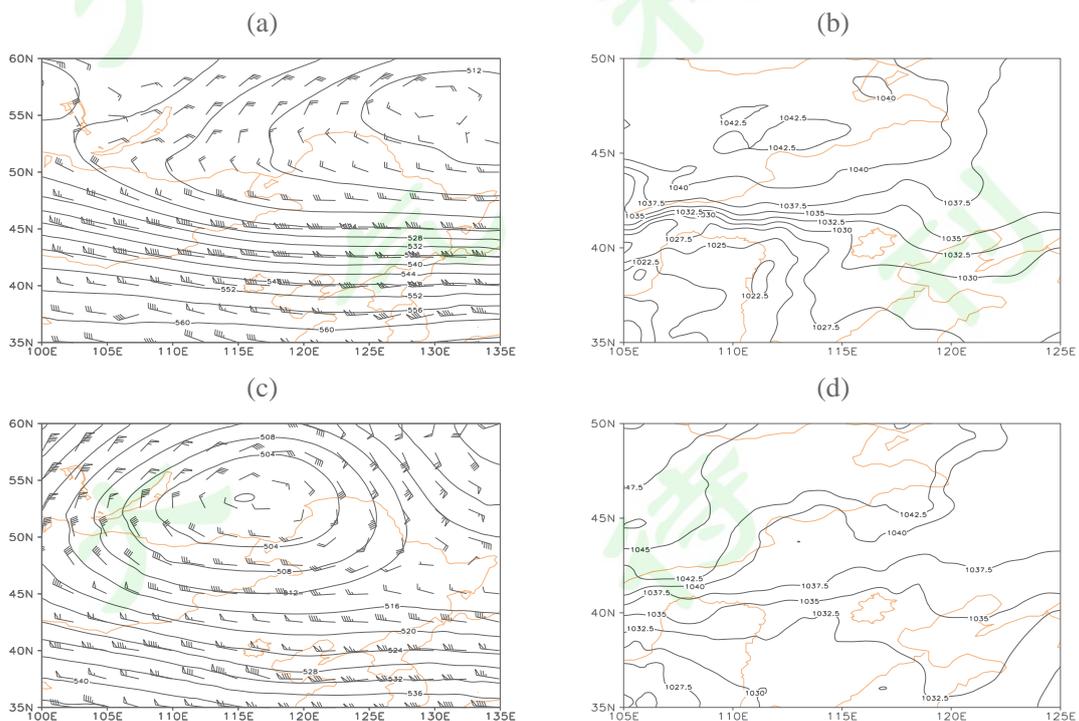


图 2 500hPa 环流形势（等值线为位势高度场，单位：dagpm 和风羽图，单位：m s⁻¹），(a) 2015 年 11 月 21 日 08:00，(c) 2016 年 1 月 21 日 08:00；海平面气压场（单位：hPa），(b) 2015 年 11 月 21 日 08:00，(d) 2016 年 1 月 21 日 08:00

Fig.2 The 500hPa synoptic situation (contour for geopotential, unit: dagpm; barb for wind, unit: m s⁻¹), (a) 08:00 on 21 Nov 2015, (c) 08:00 on 21 Jan 2016; sea level pressure (contour, unit: hPa), (b) 08:00 on 21 Nov 2015, (d) 08:00 on 21 Jan 2016

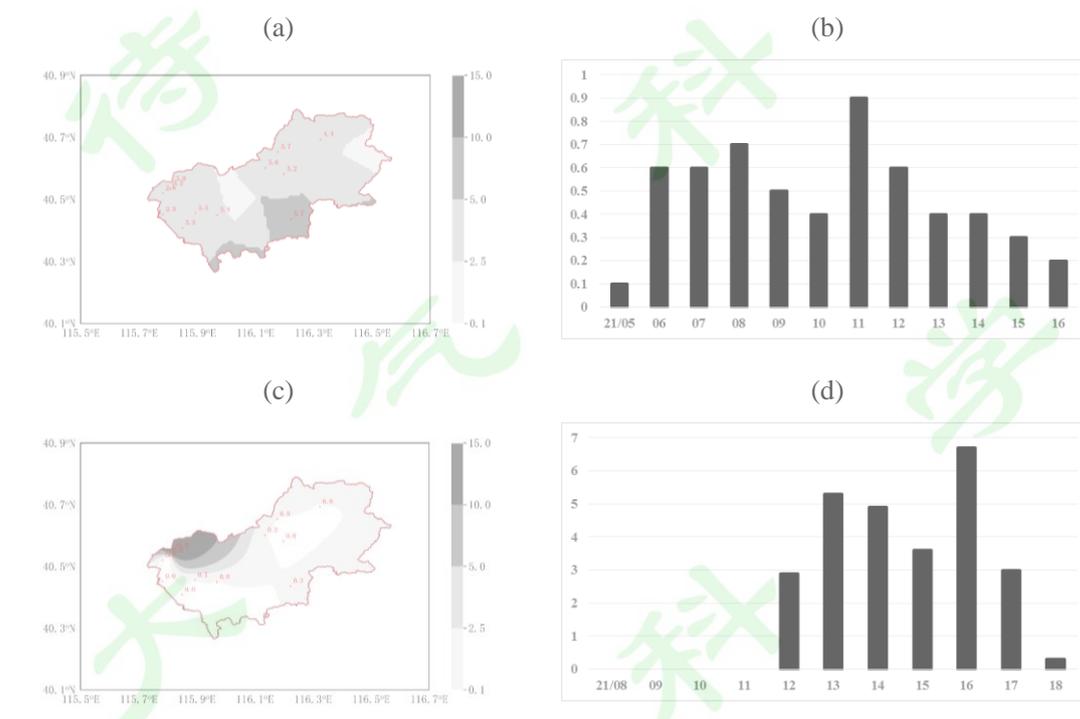


图 3 降雪量（单位：mm），(a) 2015 年 11 月 21 日 05: 00-16: 00，(c) 2016 年 1 月 21 日 08: 00-18: 00，(b)、(d)逐小时降雪量

Fig.3 Snowfall amount (unit: mm), (a) the total amount from 05:00 to 16:00 on Nov 21 2015, (c) the total amount from 08:00 to 18:00 on Jan 21 2015, (b) and (d) hourly snowfall

4 降雪成因

4.1 边界层东风的温湿特性差异

由于延庆赛区整体海拔较高、区域较小，一方面需考虑边界层东风是否能影响到延庆赛区，另一方面边界层东风的温湿特征在北京平原地区表现更为清晰。因此，本文对偏东风特性的定性诊断主要依据其在平原地区的要素分析。

4.1.1 降雪过程 I

气象铁塔分析表明（图 4a）：随着偏东风的发展，近地层温度持续下降，特别是 2015

年 11 月 21 日 07:00-13:00 期间，边界层偏东风明显增强，10:00 前后东南风风速达 6m/s，此期间温度快速下降，至 21 日 14:00 15m 高度温度已降至 1℃左右。由此可见，这支边界层偏东风为冷性的，由于前一日北京全区已出现降水，近地层均为大于 90%的大湿度区，相对湿度的分布不能说明东风的干湿特性。

结合 ERA5 再分析资料，11 月 21 日 08:00 1000hPa 的温度平流、比湿及风场显示（图 4b），偏东风在西进过程中，携带高纬度地区的冷空气向西推进，带来了明显的冷平流；纬向分布的比湿显示，包括延庆在内的北京地区比湿约为 3g/kg，但渤海北部及天津北部地区的比湿为 2-2.5 g kg⁻¹，对北京及延庆区而言，沿气流方向是一支水汽含量相对低的偏东风。

进行气流 96h 的后向轨迹追踪表明（图 5a），降雪过程 I 的边界层东风与华北回流天气密切相关，主要为来自东北平原途径渤海入侵华北的冷空气（张迎新等，2006；张迎新等，2007；张守保，2009）。受地面倒槽的影响，偏东气流途经渤海湾后，再依次经由山东北部、河北南部和天津东部向西进入北京地区。这支干冷气流于 11 月 18 日进入渤海湾，途经渤海湾时相对湿度明显增加，由 20%增加至 80%以上（图 5b），但与北京地区相比，绝对水汽含量偏低，因此仍旧为“干冷”性质（图 4b）。

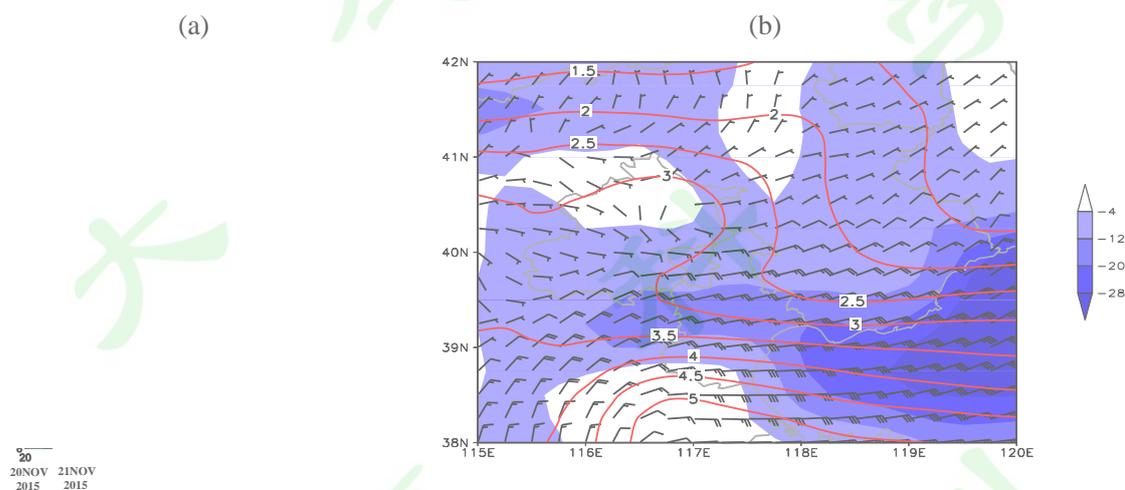


图 4 (a) 2015 年 11 月 20 日 20:00-21 日 20:00 的温度（等值线，单位：℃）、相对湿度（阴影，单位：%）和风场（箭头，单位：m s⁻¹），(b) 2015 年 11 月 21 日 08:00 1000hPa 比湿（等值线，单位：g kg⁻¹）、风场（风向杆，单位：m s⁻¹）及冷平流（阴影，单位：10⁻⁵K s⁻¹）
 Fig.4 (a) The temperature (contour, unit: °C), relative humidity (shade, unit: %), and wind (barb, unit: m s⁻¹) from 20:00 20Nov to 20:00 21Nov 2015, (b) specific humidity (contour, unit: g kg⁻¹), wind (barb, unit: m s⁻¹) and cold advection (shade, unit: 10⁻⁵K s⁻¹) of 1000 hPa on 08:00 21Nov 2015

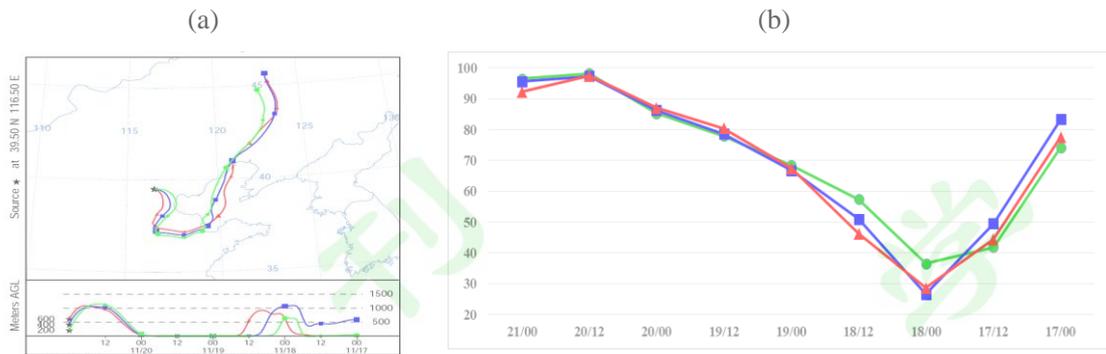


图5 (a) 2015年11月21日00时(世界时)沿39.5°N、116.5°E的96h后向轨迹(绿色线为200m,蓝色线为400m,红色线为600m), (b)同(a),但为气流后向轨迹的相对湿度(单位:%)

Fig.5 (a)Backward trajectories of 96h for 200m (green line), 400m (blue line) and 600m (red line) at 00:00 21NOV 2015 (UTC) along 39.5°N、116.5°E, (b) same as (a), but relative humidity of backward trajectory(unit:%)

4.1.2 降雪过程II

铁塔分析表明(图6a),2016年1月20日23:00前后北京平原地区随着偏东风的建立,近地层湿度开始增加,至21日04:00 100m以下相对湿度达80%,12:00后虽然相对湿度减小至70%,但21日白天地面至325m高度始终维持70%的相对湿度。由此可知,此次降雪过程中的偏东风对北京平原地区具有一定的增湿作用。

在偏东风发展的时段内(图6a),空中偏北气流带来的冷空气渗透导致21日04:00-08:00温度明显下降(08时15m温度降至-6°C)。21日08:00之后温度回升,16:00在47m处的温度升至-3°C。进一步结合ERA5再分析资料的诊断发现(图6b),边界层偏东风配合弱暖平流影响北京的平原地区,同时将渤海湾至天津一带的水汽向北京平原地区输送。

结合气流的96h的后向轨迹(图7a)表明,边界层内来自贝加尔湖地区的冷空气沿西北路径南下,经渤海湾路途较短,与偏东风相伴随的相对湿度一直呈下降趋势(图7b),1月20日夜间在山东北部转向为东南风后,相对湿度增至60~70%,因此气流偏南分量的增强导致其变性,具有了“暖湿”性质。同时,600m高度处有来自新疆的冷空气沿偏西路径影响北京。

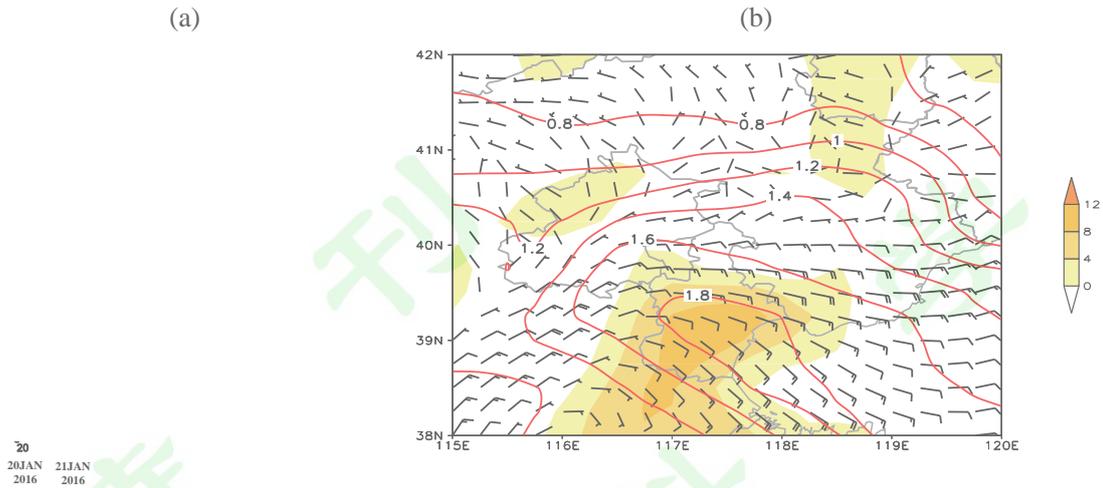


图6 (a) 2016年1月20日20:00-21日20:00的温度(等值线, 单位: $^{\circ}\text{C}$)、相对湿度(阴影, 单位: $\%$)和风场(箭头, 单位: m s^{-1}), (b) 2016年1月21日08:00 1000hPa比湿(等值线, 单位: g kg^{-1})、风场(风向杆, 单位: m s^{-1})及暖平流(阴影, 单位: 10^{-5}K s^{-1})

Fig.6 (a) The temperature (contour, unit: $^{\circ}\text{C}$), relative humidity (shade, unit: $\%$) and wind (barb, unit: m s^{-1}) from 20:00 20Jan to 20:00 21Jan 2016, (b) specific humidity (contour, unit: g kg^{-1}), wind (barb, unit: m s^{-1}) and warm advection (shade, unit: 10^{-5}K s^{-1}) of 1000 hPa on 08:00 21 Jan 2016

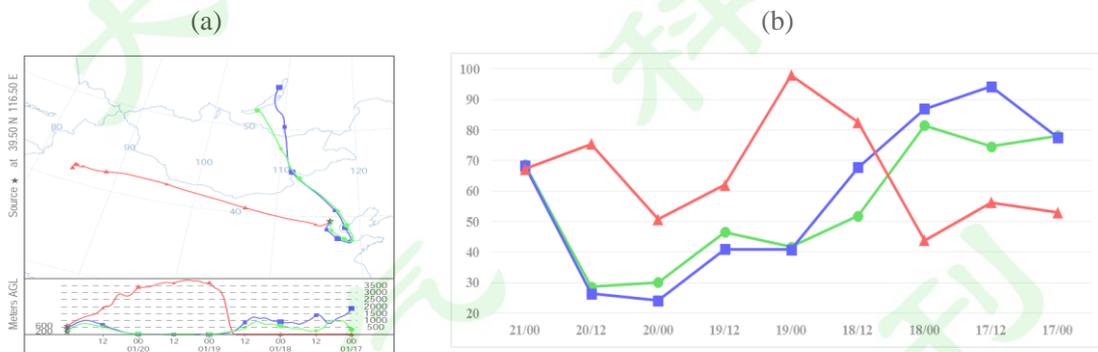


图7 (a) 2016年1月21日00时(世界时)沿39.5°N、116.5°E的96h后向轨迹(绿色线为200m, 蓝色线为400m, 红色线为600m), (b) 同图(a), 但为气流后向轨迹的相对湿度(单位: $\%$)

Fig.7 (a) Backward trajectories of 96h for 200m (green line), 400m (blue line) and 600m (red line) at 00:00 21Jan 2016 (UTC) along 39.5°N、116.5°E, (b) same as (a), but relative humidity of backward trajectory (unit: $\%$)

4.2 边界层东风对降雪的贡献

4.2.1 降雪过程 I

由于地面倒槽不断向东北方向加深发展（图略），形成深厚的偏东风。延庆站风廓线显示（图 8a），偏东风在垂直方向延伸的高度超过 1000m，最高达 1200m 左右（21 日 07:00-08:00），因此偏东风能够越过延庆区与昌平区交界的军都山影响延庆。

地形作为气流运动的主要障碍，能够显著改变边界层的气流（李国平，2016；Finnigan et al, 2020）。沿 40.3°N 的剖面显示（图 8b），冷性的边界层东风在未越过军都山时（118° E 以东的区域）形成明显的系统性的冷垫抬升，将暖湿空气抬升至 950-800hPa，造成了平原及低海拔地区明显的降雪天气。偏东风翻越军都山之后，热力性质发生变化，下沉增温作用使温度升高，由冷性转为暖性。偏东风除越山作用之外，还有绕流作用的存在，因此在军都山背风坡形成辐合；同时东风在西进过程中，随着西部海陀山地形高度的显著增加，转向为东南风形成上坡风的辐合抬升，绕流辐合与地形强迫共同作用造成 116.5-117° E 区域明显的辐合抬升，但辐合程度由东向西减弱，是延庆区降雪东多西少的主要原因。

延庆风廓线表明（图 8a），2015 年 11 月 21 日 06:00-12:00 近地面层的偏东风转为东南风且风速加大，对应着降雪的最强时段；13 时之后随着风速减小，降雪逐渐减弱结束。

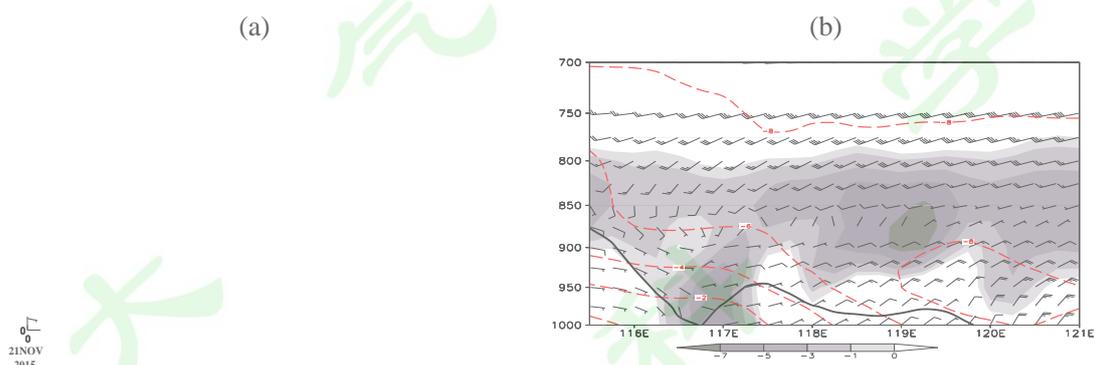


图 8 (a) 2015 年 11 月 21 日 00:00-18:00 延庆站风廓线（风向杆，单位： m s^{-1} ），(b) 2015 年 11 月 21 日 09:00 沿 40.3°N 的剖面（黑色粗实线为地形高度；红色虚线为温度，单位： $^{\circ}\text{C}$ ；阴影为辐合区，单位： 10^{-5} s^{-1} ；风向杆为水平流场，单位： m s^{-1} ）

Fig.8 (a) The wind profile from 00:00 to 18:00 on 21 Nov 2015 of Yanqing station (barb, unit: m s^{-1}), (b) the cross-section along 40.4°N on 09:00 21Nov 2015 (black solid line for terrain height; red contour for temperature, unit: $^{\circ}\text{C}$; shaded for convergence, unit: 10^{-5} s^{-1} ; barb for horizontal wind, unit: m s^{-1})

4.2.2 降雪过程 II

风廓线显示（图 9a），降雪之前及降雪过程中，延庆本地未出现明显的偏东风。沿 40.0°N 的剖面显示（图 9b），边界层内的偏东风由于发展高度较低（950hPa 以下），不能够越过军都山脉影响延庆区，仅在 900hPa 以下高度有辐合作用，表明抬升作用较弱，主要影响平原地区。

由以上对比分析，边界层东风对延庆赛区的降雪过程 I 有直接影响，而对降雪过程 II 则无影响。值得注意的是，降雪过程 II 中小海陀站（海拔 1805m）出现了 26.7mm 的降雪，明显降雪时段出现在 2016 年 11 月 21 日 12:00-16:00（图 3d）。沿该站的时序剖面表明（图 9c），虽然受西北气流的影响，但 21 日 12:00 开始 800-700hPa（2000-3000m）相对湿度达 100% 饱和区所对应的上升运动不断发展增强。空中饱和区与上升运动的有利配合，并具有一定的持续时间（11 月 21 日 12:00 至 16:00），是小海陀站出现明显降雪的重要原因。

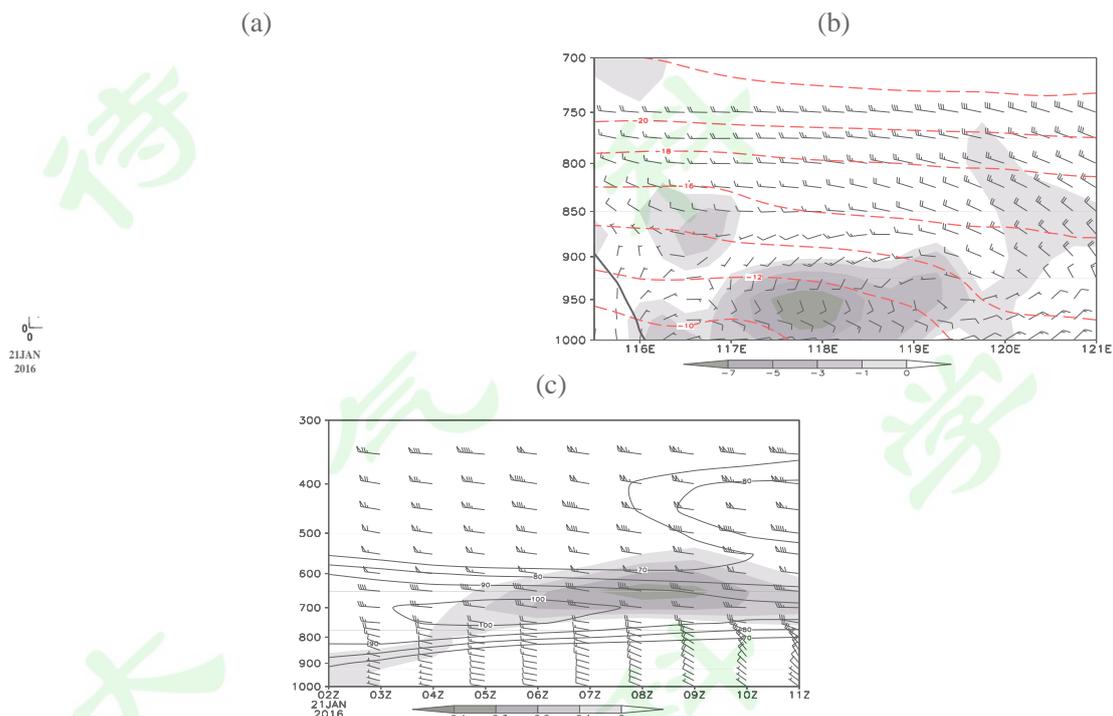


图 9 (a) 2016 年 1 月 21 日 00:00-18:00 延庆站风廓线（风向杆，单位： m s^{-1} ），(b) 2016 年 1 月 21 日 09:00 沿 40.0°N 的剖面（黑色粗实线为地形高度；红色虚线为温度，单位： $^\circ\text{C}$ ；阴影为辐合区，单位： 10^{-5} s^{-1} ；风向杆为水平流场，单位： m s^{-1} ），(c) 2016 年 1 月 21 日 10:00 至 19:00 沿 115.82°E 、 40.56°N 的风场（风向杆，单位： $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ）、相对湿度（等值线，单位：%）和上升运动（阴影，单位： $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ ）时序剖面

Fig.9 (a) The wind profile from 00:00 to 18:00 on 21 Jan 2016 of Yanqing station (barb, unit: m s^{-1}), (b) the cross-section along 40.0°N on 09:00 21 Nov 2015 (black solid line for terrain height; red contour for temperature, unit: $^\circ\text{C}$; shaded for convergence, unit: 10^{-5} s^{-1} ; barb for horizontal wind, unit: m s^{-1}), (c) the cross-section of relative humidity (contour, unit: %), wind (barb for wind, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) and ascending motion (shade, unit: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$) along 115.82°E and 40.56°N from 10:00 to 19:00 on 21 Jan 2016

5 结论与讨论

本文对比相似天气背景下不同温湿特性、不同发展高度的边界层东风对冬奥会延庆赛区

降雪的贡献，并进一步讨论了边界层东风与地形的相互作用，研究表明：

(1) 当途经渤海湾的路径较长时，有利于边界层东风的明显增湿，反之增湿效果则较弱。

(2) “干冷”性质且在垂直方向发展较为深厚的边界层东风，可形成冷垫抬升平原地区的暖湿空气；当东风在垂直方向发展较为深厚（超过军都山的平均高度 600m）时，能够翻越延庆区东部海拔较低的军都山并在背风坡形成绕流汇合，同时受西部海拔较高的海陀山阻挡形成迎风坡的强迫抬升，二者共同作用导致延庆区辐合程度东强西弱，进而造成降雪分布呈东多西少的特征。“暖湿”性质的边界层偏东风在垂直方向上较为浅薄，无法越过军都山，对延庆赛区的降雪基本无影响。

(4) 对于延庆赛区高海拔的山区降雪，一方面需考虑边界层东风是否有翻越军都山的可能；一方面需关注受空中 500hPa 西北气流影响时，与地形高度较接近的、700hPa 高度附近的饱和区与抬升运动的配合情况。

本文的研究成果能够在一定程度上促进冬奥会延庆赛区精准降雪预报准确率的提升，特别是在赛区降雪有无及降雪空间分布的预报方面，为积极备战 2022 年冬奥会提供技术支撑。为明确不同特征边界层东风对冬奥会延庆赛区降雪的作用机制，尽可能排除天气尺度系统所造成的影响，本文选取相似天气背景下的降雪天气过程进行对比研究，但正如前文所提及的，北京地区冬季降雪通常伴有边界层东风，因此，如何定量判别不同天气背景下边界层东风对延庆赛区降雪发生发展的具体贡献，还有待于今后做进一步的深入研究。

参考文献

Draxler R R, Hess G D. 1997. Description of the HYSPLIT_4 modeling system[C]. NOAA Technical Memorandum ERL ARL-224 on Silver Spring, Maryland, American.

David A.R. Kristovich, Roscoe R. Braham. 1998. Mean profiles of moisture fluxes in snow-filled boundary layers[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 87(2): 195-215.

高茜, 郭学良, 刘香娥, 等. 2020. 北京北部山区两次降雪过程微物理形成机制的观测—模拟研究[J]. *大气科学*, 44(2): 407-420. GAQ Qian, GUO Xueliang, LIU Xiang'e, et al. 2020. Numerical simulation and observation study on microphysical formation processes of two different snowfall cases in northern mountain area of Beijing [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 44(2): 407-420.

郭锐, 张琳娜, 李靖, 等. 2012. 2010 年冬季北京初雪预报难点分析[J]. *气象*, 38(7): 858-867. Guo Rui, Zhang Linna, Li Jing, et al. 2012. Analysis of forecast difficulties for the first snow of Beijing area in 2010 winter[J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 38(7):858-867.

何娜, 孙继松, 王国荣, 等. 2014. 北京地区预报失误的两次降雪过程分析[J]. *气象科技*, 42(3): 488-495. He Na, Sun Jisong, Wang Guorong, et al. 2014. Analysis of unsuccessful forecasting for two snowfall processes in Beijing[J]. *Meteorological Science and Technology (in*

Chinese), 42(3): 488-495.

何群英, 孙一昕, 于莉莉. 2011. 渤海西海岸边界层东风与暴雪天气的机理分析[J]. 环境学报, 27(4): 66-71. He Qunying, Sun Yixin, Yu Lili. 2011. Analysis of the mechanisms of boundary layer easterly wind and snow storm over the western coast of the Bohai Sea[J]. Journal of Meteorology and Environment (in Chinese), 27(4): 66-71.

黄钰, 郭学良, 毕凯, 等. 2020. 北京延庆山区降雪云物理特征的垂直观测和数值模拟研究[J]. 大气科学, 44(2): 356-370. Huang Yu, Guo Xueliang, Bi Kai, et al. 2020. Vertical Observation and numerical simulation of the clouds physical characteristics of snow-producing over Yanqing Mountain area in Beijing[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 44(2): 356-370.

蒋建莹, 史历, 倪允琪. 2005. 一次“高影响天气”的弱降雪过程的数值研究[J]. 应用气象学报, 16 (2): 231-237. Jiang Jianying, Shi Li, Ni Yunqi. 2005. A simulation of high impact weather event[J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 16 (2): 231-237.

John Finnigan, Keith Ayotte, Ian Harman, et al. 2020. Boundary-layer flow over complex topography[J]. Boundary-Layer Meteorology, 177:247-313.

Lee J G., and M. Xue, 2013. A study on a snowband associated with a coastal front and cold-air damming event of 3-4 February 1998 along the eastern coast of the Korean Peninsula. Advances in Atmospheric Sciences, 30(2), 263-279.

Li N, B F Jiao, L K Ran, et al. 2021. On the mechanism of a terrain-influenced snow burst event during midwinter in Northeast China[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 38(5), 800-816.

李国平. 2016. 近 25 年来中国山地气象研究进展[J]. 气象科技进展, 6(3), 115-122. Li Guoping, 2016. Progress and prospects in research of mountain meteorology in China during the past 25 years[J]. Advances in Meteorological Science and Technology (in Chinese), 6(3), 115-122.

李津, 赵思雄, 孙建华. 2017. 一次华北破纪录暴雪成因的分析研究[J]. 气候与环境研究, 22 (6): 683-698. Li Jin, Zhao Sixiong, Sun Jianhua. Analysis of a record heavy snowfall event in North China[J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 22 (6): 683-698.

李炬, 程志刚, 张京江, 等. 2020. 小海坨山冬奥赛场气象观测试验及初步结果分析[J]. 气象, 46(9): 1178-1188. Li Ju, Cheng Zhigang, Zhang Jjingjiang, et al. 2020. Meteorological field experiment and preliminary analysis result in the Winter Olympic Venue in Xiao-haituo Mountain[J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 46(9): 1178-1188.

李林, 乔媛, 孙雪琪, 等. 北京延庆冬季风寒温度分布特征及变化趋势[J]. 干旱气象, 2018, 36(6):936-943. Li Lin, Qiao Yuan, Sun Xueqi, et al. Spatial-temporal characteristics and change trend of wind chill temperature in winter in Yanqing of Beijing[J]. Journal of Arid Meteorology (in

Chinese), 2018, 36(6):936-943.

Liu L, Ma Y M, Yao N, et al. 2021. Diagnostic analysis of a regional heavy snowfall event over the Tibetan Plateau using NCEP reanalysis data and WRF[J]. *Climate Dynamics*, 56:2451-2467.

刘郁珏, 苗世光, 胡非, 等. 2018. 冬奥会小海坨山赛区边界层风场大涡模拟研究[J]. *高原气象*, 37(5): 1388-1401. Liu Yujue, Miao Shiguang, Hu Fei, et al. 2018. Large eddy simulation of flow field over the Xiaohaituo mountain division for the 24th Winter Olympic Games[J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 37(5): 1388-1401.

刘玉莲, 任国玉, 于宏敏. 2012. 中国降雪气候学特征[J]. *地理科学*, 32(10): 1176-1185. Liu Yulian, Ren Guoyu, Yu Hongmin. 2012. Climatology of Snow in China[J]. *Scientia Geographica Sinica (in Chinese)*, 32(10): 1176-1185.

Meng Z Y, Zhang F Q, Luo D H, et al. 2019. Review of Chinese atmospheric science research over the past 70 years: Synoptic meteorology[J]. *Science China Earth Sciences*, 62(12):1946-1991.

钱昊. 2017. 京-张地区积雪时空变化及其对 2022 年冬奥会的潜在影响[D]. 南京大学. Qian Hao. 2017. Spatial and temporal variation of snow cover in Beijing and Zhangjiakou region and its potential impacts on the 2022 Beijing-Zhangjiakou Olympic Winter Games[D]. Nanjing University (in Chinese).

钱昊, 赵家锐, 范宇宾, 等. 2019. 积雪变化及其对北京冬奥会的潜在影响[J]. *高技术通讯*, 29(10): 1042-1052. Qian Hao, Zhao Jiarui, Fan Yubin, et al. 2019. The potential impacts of spatiotemporal variation of snow cover on the Winter Olympic Games held in Beijing in 2022[J]. *Chinese High Technology Letters (in Chinese)*, 29(10): 1042-1052.

R Bove, G Paolo. 2009. Convective snowfalls linked to the interaction of a boundary-layer front with a mesoscale cyclone near Terra Nova Bay, Antarctica[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 131:465-478.

孙建华, 赵思雄. 2003. 华北地区“12.7”降雪过程的数值模拟研究[J]. *气候与环境研究*, 8 (4): 387-401. Sun Jinahua, Zhao Sixiong. 2003. A numerical simulation of snowfall in North China on 7 December 2001[J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 8 (4): 387-401.

孙继松, 梁丰, 陈敏, 等. 2003. 北京地区一次小雪天气过程造成路面交通严重受阻的成因分析[J]. *大气科学*, 27 (6): 1057-1066. Sun Jisong, Liang Feng, Chen Min, et al. 2003. An analysis on serious city traffic trouble caused by light snow[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 27 (6): 1057-1066.

王继志. 1978. 1974年2月华北大雪的初步分析[J]. *大气科学*, 2(4): 307-313. Wang Jizhi. 1978. Preliminary analysis of snow in North China on December 2nd 1974[J]. *Chinese Journal of*

Atmospheric Sciences (in Chinese), 2(4): 307-313.

吴庆梅, 杨波, 王国荣. 2014. 北京地区一次回流暴雪过程的锋区特征分析[J]. 高原气象, 33(2): 539-547. Wu Qingmei, Yang Bo, Wang Guorong. 2014. Analysis of the frontal characteristics of the backflow snowstorm process in Beijing Area[J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 33(2): 539-547.

夏茹娣, 王东海, 张立生. 2013. 2009 年冬季华北初雪对流层低层风场及大气层结特征[J]. 气候与环境研究, 18 (1): 87-100. Xia Rudi, Wang Donghai, Zhang Lisheng. 2013. Wind field characteristics in the lower troposphere and atmospheric stratification of the first snowfall over North China in winter 2009[J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 18 (1): 87-100.

徐庆喆, 郑景云, 张学珍, 等. 2017. 张家口市崇礼的雪季与冬奥会赛期的降雪特征分析[J]. 气候变化研究进展, 13 (3): 223-230. Xu Qingzhe, Zheng Jingyun, Zhang Xuezen, et al. 2017. Characteristics of snow season and snowfall during the Winter Olympic Games in Chongli of Zhangjiakou City, China[J]. Climate Change Research (in Chinese), 13 (3): 223-230.

Xu Y L, Qian F L, Chen Z, et al. 2002. Observational analyses of baroclinic boundary layer characteristics during one frontal winter snowstorm[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 19(1):153-168.

于波, 杜佳, 张琳娜. 2016. 1960-2013 年北京地区冻雨天气过程特征分析[J]. 气象与环境学报, 32(4): 113-118. Yu Bo, Du Jia, Zhang Linna. 2016. Characteristics of freezing rain in Beijing from 1960 to 2013[J]. Journal of Meteorology and Environment (in Chinese), 32(4): 113-118.

于波, 蒲维维, 冯立成, 等. 2013. 影响北京地区降雪 pH 值的天气成因分析[J]. 高原气象, 32(2): 575-580. Yu Bo, Pu Weiwei, Feng Licheng, et al. 2013. Synoptic analysis on pH value in snowfall process in Beijing[J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 32(2): 575-580.

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 Bo, Li Sang, Huang Fuxiang, et al. 2019. Comparative analysis of continuous cold wave events in Beijing-Tian-Hebei region in January 2016[J]. Journal of Arid Meteorology (in Chinese), 37(6): 954-963.

张治国, 崔炜, 白雪涛, 等. 2017. 第 24 届冬奥会海坨山赛区近两年冬季地面风场特征[J]. 干旱气象, 35(3): 433-438. Zhang Zhiguo, Cui Wei, Bai Xuetao, et al. 2017. Winter ground wind field characteristic in the Haituo Mountain Division for the 24th Winter Olympic Games[J]. Journal of Arid Meteorology (in Chinese), 35(3): 433-438.

张守保. 2009. 华北回流天气的多尺度结构特征[D].南京信息工程大学. Zhang Shoubao. 2009. Multi-scale characteristics of return-flow events over North China[D]. Nanjing Institute of Information Science & Technology (in Chinese).

- 张迎新, 张守保. 2006. 华北平原回流天气的结构特征[J]. 南京气象学院学报, 29(1): 107-113.
- Zhang Yingxin, Zhang Shoubao. 2006. Structural feature of the backflow precipitation over North China[J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 29(1): 107-113.
- 张迎新, 侯瑞钦, 张守保. 2007. 回流暴雪过程的诊断分析和数值试验[J]. 气象, 33(9): 25-32.
- Zhang Yingxin, Hou Ruiqin, Zhang Shoubao. 2007. Numerical experiments and diagnosis on a heavy snow of return flow events[J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 33(9): 25-32.
- 赵桂香, 杜莉, 范卫东, 等. 2011. 一次冷锋倒槽暴风雪过程特征及其成因分析[J]. 高原气象, 30(6): 1516-1525. Zhao Guixiang, Du Li, Fan Weidong, et al. 2011. Characteristics of a snowstorm process with strong cold front and inverted trough and its formation analysis[J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 30(6): 1516-1525.
- 赵桂香, 杜莉, 郝智孝, 等. 2013. 3次回流倒槽作用下山西大(暴)雪天气比较分析[J]. 中国农学通报, 29(32): 337-349. Zhao Guixiang, Du Li, Hao Zhixiao, et al. 2013. Comparative Analysis of three heavy snow in Shanxi Province caused by reflow and inverted trough[J]. 2013. Chinese Agricultural Science Bulletin (in Chinese), 29(32): 337-349.
- 赵思雄, 孙建华, 陈红, 等. 2002. 北京“12.7”降雪过程的分析研究[J]. 气候与环境研究, 7(1): 7-21. Zhao Sixiong, Sun Jianhua, Chen Hong, et al. 2002. A study on snowfall in Beijing on 7 December 2001[J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 7(1): 7-21.
- 赵思雄, 孙建华. 2013. 近年来灾害天气机理和预测研究的进展 [J]. 大气科学, 37(2): 297-312. Zhao Sixiong, Sun Jianhua. 2013. Study on the mechanism and prediction of disastrous weathers during recent years[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37(2): 297-312.