

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, 2018, 36(6): 936-943], DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2018)-06-0936

北京延庆冬季风寒温度分布特征及变化趋势

李林^{1,3}, 乔媛², 孙雪琪³, 范雪波³,
伍永学³, 于丽萍³, 张治国³

(1. 中国气象局北京城市气象研究所, 北京 100089; 2. 北京市气象服务中心, 北京 100089;

3. 北京市气象探测中心, 北京 100089)

摘要: 风寒温度表征不同气温和风速组合对人体的冻伤风险与舒适状况, 直接影响雪上运动安全性和体验感。针对 2022 年冬奥会气象服务需求, 利用延庆地区 21 个气象站的冬季观测数据, 研究分析风寒温度的时空变化特征。结果表明: (1) 风寒温度高值区处于延庆盆地区域, 低值区处于缙云山等高海拔地区, 均存在中度冻伤风险; (2) 佛爷顶站冬季平均风寒温度为 $-15.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, 极端风寒温度达到 $-49.4\text{ }^{\circ}\text{C}$, 冻伤暴露风险等级为中度到严重; (3) 风寒温度的日变化为单峰单谷型分布, 月变化中风寒温度最低值出现在 1 月中下旬, 最高值出现在 2 月下旬; (4) 在 2010 年 1 月 5 日与 2016 年 1 月 23 日 2 次典型寒潮天气过程中, 引起风寒温度极低值的原因存在明显差异, 前者为温度主导, 而后者为风速主导; (5) 1978—2016 年, 延庆站冬季由于增温显著, 导致风寒温度有明显上升趋势, 而佛爷顶站温度增幅较小但由于风速有显著减小趋势, 风寒温度也存在明显上升趋势。

关键词: 风寒温度; 分布特征; 变化趋势; 冬季

文章编号: 1006-7639(2018)06-0936-08 DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2018)-06-0936

中图分类号: P468

文献标志码: A

引言

风寒温度在冬季寒冷的国家和地区具有重要意义, 在加拿大、美国等地受到高度重视。热量的散失主要有传导、对流和辐射 3 种方式, 其中对流散热的速度取决于物体表面和环境的温度差异及相对速度。对于人体来说, 在野外低温、强风的情况下体感会比平常更寒冷, 如果暴露时间过长则会导致冻伤、失去知觉甚至死亡。

SIPLE 等^[1] 提出风寒指数 (wind chill index, WCI), 在 1939—1941 年南极探险活动中将装满水的塑料筒悬挂在屋顶来测量水的冻结时间, 并根据试验期间 89 次观测资料拟合了风寒指数公式。公布后被更多学者广泛应用和改进, 如 MOLNAR^[2] 指出一些缺陷, 但尽管存在一些争议, 但作为一个定性数据用于冻伤预报, 风寒指数得到广泛普及。美国

气象部门^[3] 根据实际温度和风速计算出 WCI, 然后假定风速为零, 此 WCI 对应的温度即为风寒温度。EAGAN^[4] 又指出应将最低风速设为 $1.78\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 以让风寒温度保持在比较合理的范围。STEADMAN^[5] 基于人体生物物理能量平衡模型建立风寒温度公式, 在温度和风速之外考虑了湿度和辐射情况。美国国家气象服务中心和加拿大气象服务中心经过 2 a 的联合研究, 运用最新人体组织散热理论建立了更为合理的人体体表散热模型, 通过风洞和志愿者试验来进行结果验证和改进公式, 最终于 2002 年发布新的风寒温度公式^[6-7], 新公式在盐湖城、温哥华等冬奥会气象服务中得到应用。

目前国内也有一些关于风寒温度的研究, 如冯胜辉等^[8] 采用北美风寒温度公式对近 50 a 来中国冬季风寒温度的变化进行研究, 发现中国冬季风寒温度整体呈上升趋势; 孙广禄等^[9] 使用该公式对京

收稿日期: 2018-04-24; 改回日期: 2018-06-06

基金项目: 北京市自然科学基金(8172050)、中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(IUMKY201732)、北京市气象局科技项目(BM-BKJ201701006)及北京市科技计划(Z161100004516018)共同资助

作者简介: 李林(1979—), 高级工程师, 主要从事综合气象观测技术研究工作. E-mail: lilin@bjmb.gov.cn.

通信作者: 孙雪琪(1988—), 工程师, 主要从事气象计量检定工作. E-mail: 732347159@qq.com.

津冀地区人体舒适度进行了分析。国内气象部门还鲜有开展实时风寒指数预报的业务,北京自2004年以来对外发布风寒指数,根据不同的风力等级和气温建立了风寒指数模型,但尚存在一定的局限性,仅适用于平原地区,对于山区等高海拔地区,气温低且风速大,模型不具有普适性,且现有的更新频次和数据精度均无法适应未来冬奥赛区的实际需求,与国际现在通用的方法也不一致。

WMO编写的奥运会公共气象服务指南中指出,降水类型、雪深、风寒温度的历史数据是冬奥会气象服务中非常重要的因素。考虑到暴雪、极端风寒等会影响到户外工作人员、观众的安全和健康,风寒预报为2002年盐湖城第19届冬奥会气象服务产品的一项重要^[10]。2010年温哥华第21届冬奥会中,风寒温度是否会低于 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 成为高山滑雪项目能否正常进行的关键决策因子之一^[11]。2022年第24届冬奥会将在北京和张家口举行,其中高山滑雪、雪车、雪橇3大项在北京延庆区举办,延庆由于海拔和地形等因素,是北京平均气温最低的区域,冬季平均气温比城区低 $5.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[12]。2016年1月23日延庆佛爷顶站最低温度为 $-29.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,创30 a来北京地面气象观测站的最低温度记录。2022年冬奥会不但需要有针对赛事的各类气象服务,前往延庆地区旅游、工作等人群同样需要广泛的气象服务。因此,冬季风寒温度预报是冬奥顺利安全进行的重要一环。本文利用延庆区高密度的自动气象站资料,按照最新的风寒温度计算方法,对延庆区风寒温度的时空变化特征进行分析,以期为冬奥会气象服务提供依据。

1 数据与方法

延庆区位于北京西北,其北东南三面环山,西临官厅水库的延庆盆地,盆地平均海拔500 m左右,以山区为主,山区面积占比为70%。采用2006—2016年冬季延庆2个国家地面观测站(延庆、佛爷顶)和19个区域气象站(图1)的逐时气温和风速数据,用来分析延庆区风寒温度分布特征。利用延庆、佛爷顶站1978—2016年冬季逐日02:00、08:00、14:00、20:00(北京时,下同)4个时次的气温和风速数据,用来分析风寒温度变化趋势。延庆站和佛爷顶站作为延庆区的国家级气象站,分别位于盆地和山顶,可以代表延庆盆地和高山的典型观测地貌。冬季定义为当年12月1日至次年2月28日(闰年为29日)。对21个站点观测数据的数据质量进行极值筛查、错误检查等初步质控,对整点偶尔缺测数据利用本站

数据进行时间插值。全部站点的平均海拔为613 m,其中海拔最高站点为佛爷顶站1217 m,位于延庆缙云山,最低站点为野鸭湖站475 m,位于延庆盆地。

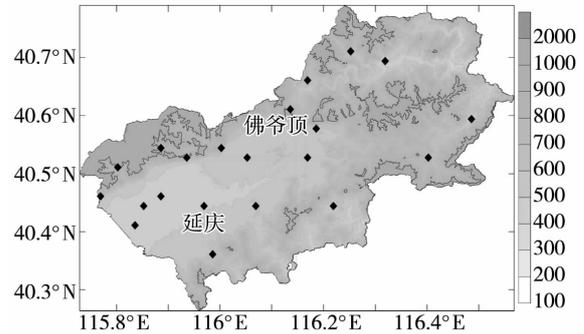


图1 北京延庆区地形(单位:m)和气象站点分布

Fig. 1 Distribution of terrain (Unit:m) and the meteorological stations in Yanqing area of Beijing

当风速大于 $1.34\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,风寒温度计算采用如下公式^[7]:

$$\text{WCT} = 13.12 + 0.6215 \times T - 13.9562 \times V^{0.16} + 0.4867 \times T \times V^{0.16} \quad (1)$$

当风速等于或小于 $1.34\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,风寒温度计算采用如下公式^[13]:

$$\text{WCT} = T - 1.1448 \times V + 0.0968 \times T \times V \quad (2)$$

式(1)和(2)中:WCT($^{\circ}\text{C}$)为风寒温度; T ($^{\circ}\text{C}$)为气温; V ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)为10 m高度处观测风速。风寒温度计算公式要求气温不超过 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$,根据质控后的全体数据统计,气温高于 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的数据仅占总数的2%,且基本集中在 $11\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下,对计算影响较小,因此未对气温高于 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的数据进行剔除。不同风寒温度对人体冻伤风险和舒适状况的作用分级参见表1(<https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/weather-health/wind-chill-cold-weather/wind-chill-index.html>)。

表1 风寒温度分级标准

Tab. 1 The grading standard of wind chill temperature

风寒温度/ $^{\circ}\text{C}$	暴露风险	冻伤
$-9 \leq \text{WCT} < 0$	低度	低冻伤风险
$-10 \leq \text{WCT} < -27$	中度	长时间无保护有冻伤风险
$-28 \leq \text{WCT} < -39$	高度	裸露皮肤10~30 min冻伤
$-40 \leq \text{WCT} < -47$	非常高	裸露皮肤5~10 min冻伤
$-48 \leq \text{WCT} < -54$	严重	裸露皮肤2~5 min冻伤
$\text{WCT} < -55$	极端	裸露皮肤2 min内冻伤

图2为不同气温、风速下的风寒温度,并按照风寒温度分级标准进行分区。可以看出,在同一气温下,风速不同,风寒温度有明显差异;风速在 $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下时,风寒温度随风速变大迅速下降,一旦风速超过 $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,风寒温度随风速增大的下降速度明显变小。气温为 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、平均风速小于 $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,风寒温度不低于 $-27\text{ }^{\circ}\text{C}$,暴露风险为中度,长时间无保护有冻伤风险;而当风速超过 $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,风寒温度低于 $-27\text{ }^{\circ}\text{C}$,则有高度暴露风险,皮肤裸露可能发生冻伤。

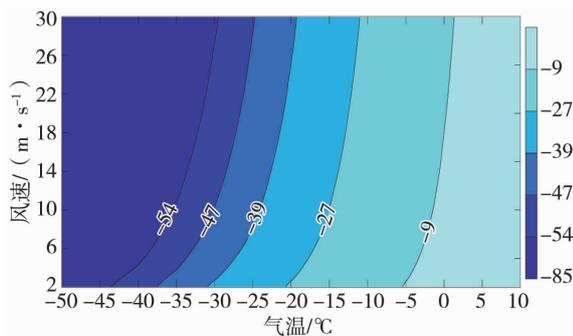


图2 不同气温、风速组合下的风寒温度(阴影,单位: $^{\circ}\text{C}$)
Fig. 2 The change of wind chill temperature (the shaded, Unit: $^{\circ}\text{C}$) with air temperature and wind speed

2 风寒温度的时空分布

2.1 风寒温度的空间分布

延庆区冬季风寒温度平均为 $-10.0\text{ }^{\circ}\text{C}$,12月、1月和2月平均值分别为 -9.9 、 -12.4 、 $-7.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。图3

为2006—2016年北京延庆区冬季风寒温度分布。可以看出,延庆盆地是风寒温度高值区,整体差异较小,缙云山等高海拔地区为风寒温度低值区,随海拔产生的梯度差异较大。总体来说,风寒温度的空间分布主要和地形因素相关。佛爷顶站是样本中海拔唯一超过 1000 m 的站点,风寒温度平均值达 $-15.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,1月平均达 $-17.4\text{ }^{\circ}\text{C}$,极端最低达 $-49.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。风寒温度平均值最高的是晏家堡站($-7.9\text{ }^{\circ}\text{C}$),该站位于玉渡山的阳面,由于受地形因素影响,气温较其他测站偏高,同时风速相对较小。12月风寒温度基本在 $-10.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,1月风寒温度最低,全区平均低于 $-12.0\text{ }^{\circ}\text{C}$,2月风寒温度较高,除佛爷顶外没有站点风寒温度低于 $-10.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

对各站点海拔与风寒温度进行相关分析(图4),相关系数 R^2 达到 0.723 ,均通过 $\alpha=0.01$ 显著性检验,说明对于延庆区来说,海拔是风寒温度空间分布的重要因素,可以通过海拔与风寒温度的相关性为延庆海坨山地区风寒温度的预报进行指导。

2.2 风寒温度的时间分布

延庆和佛爷顶两站的风寒温度平均值分别为 $-8.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-15.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,同期平均气温分别为 $-5.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-8.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。可见佛爷顶站的风寒温度平均值较延庆站低 $7\text{ }^{\circ}\text{C}$,叠加了风寒效应后,2站风寒温度的差异为气温差异的近2倍。

图5为2006—2016年冬季延庆与佛爷顶站风寒温度逐时平均值及差值。可以看出,2站风寒温度均值的日变化都是典型的单峰单谷型,均为日出

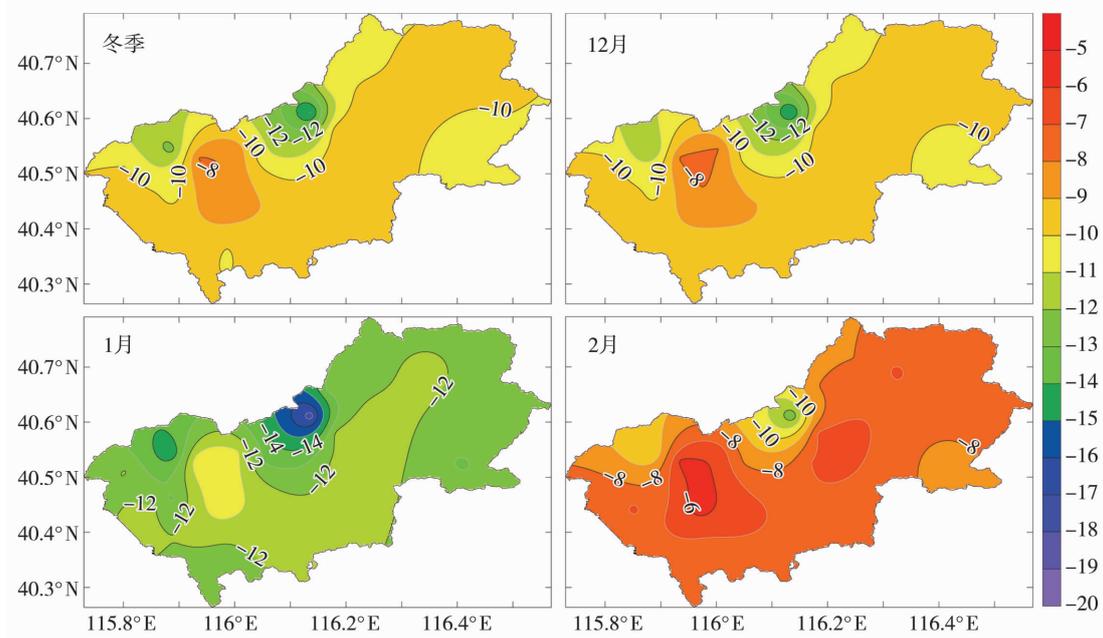


图3 2006—2016年北京延庆区冬季风寒温度分布(单位: $^{\circ}\text{C}$)

Fig. 3 Spatial distribution of wind chill temperature in Yanqing area of Beijing during 2006 - 2016 (Unit: $^{\circ}\text{C}$)

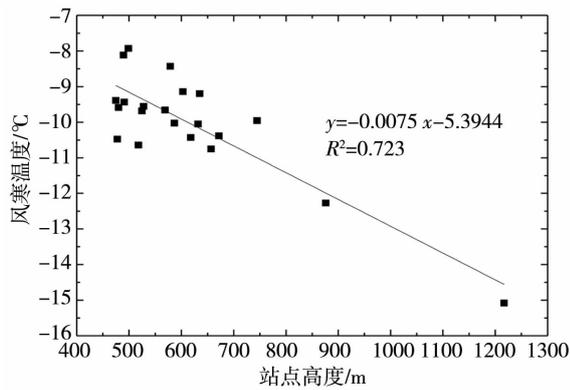


图4 2006—2016年北京延庆区
冬季风寒温度与海拔相关系数
Fig.4 The correlation coefficient between
the wind chill temperature and altitude in
Yanqing area of Beijing during 2006 -2016

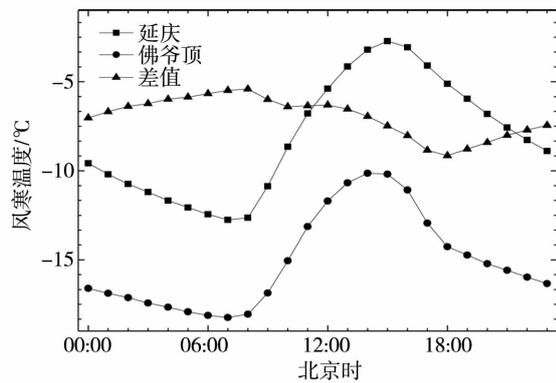


图5 2006—2016年冬季延庆与佛爷顶站
风寒温度逐时平均值及差值
Fig.5 The hourly average of wind chill
temperature at Yanqing and Foyeding stations
and their difference in winter during 2006 -2016

前为谷值,午后为峰值。佛爷顶站风寒温度最低值出现在07:00,为-18.2℃,最高出现在14:00,为-10.1℃,日较差为8.1℃。延庆站风寒温度最低值同样出现在07:00,为-12.8℃,而最高值出现时间较佛爷顶站滞后1h,为-2.7℃,风寒温度的日较差为10.1℃,较佛爷顶站大。2站的风寒温度差值与风寒温度同样是单峰单谷型,但时间特征差异较大,差值最小出现在08:00,佛爷顶较延庆低5.4℃,差值最大出现在18:00,低9.2℃。

图6是2006—2016年冬季延庆站和佛爷顶站风寒温度随时间的变化。可以看出,2009—2012年,延庆站和佛爷顶站风寒温度处于低值期,4a间延庆站冬季平均风寒温度为-9.8℃,佛爷顶站为-17.0℃。另外2015年冬季2站风寒温度也相对较低,延庆和佛爷顶风寒温度分别为-8.0℃和-16.3℃,但高于2009—2012年冬季。延庆和佛爷顶站逐时风寒温度的最高值分别出现在2016年冬季15:00(0.0℃)和2006年冬季14:00(-7.4℃),最低则出现在2012年冬季07:00(-14.6℃)和2010年冬季07:00(-20.4℃)。

图7是2006—2016年冬季延庆站、佛爷顶站风寒温度每旬逐时变化。可以看出,延庆和佛爷顶站的风寒温度均在1月最低,延庆站出现在上旬,为-10.6℃,佛爷顶站出现在下旬,为-17.8℃,2站1月风寒温度平均值变化较小。2站风寒温度均在2月下旬最高,分别为-3.1℃和-9.9℃,2月下旬,延庆站午后的平均风寒温度已经达0℃以上,从13:00持续到17:00,而2月中旬仅在15:00的平均风寒温度略高于0℃。

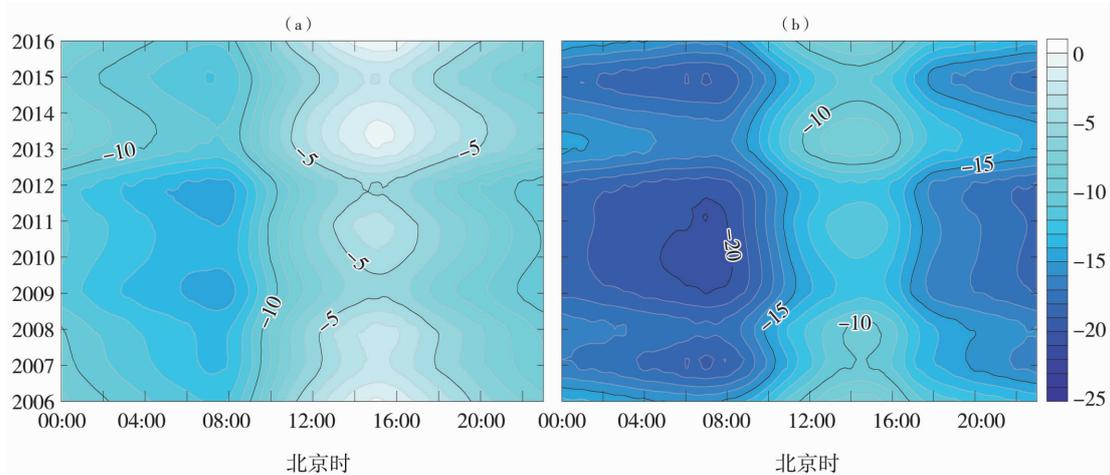


图6 2006—2016年冬季延庆站(a)、佛爷顶站(b)风寒温度逐时变化(单位:℃)
Fig.6 The hourly variation of wind chill temperature at Yanqing (a)
and Foyeding (b) stations in winter during 2006 -2016 (Unit:℃)

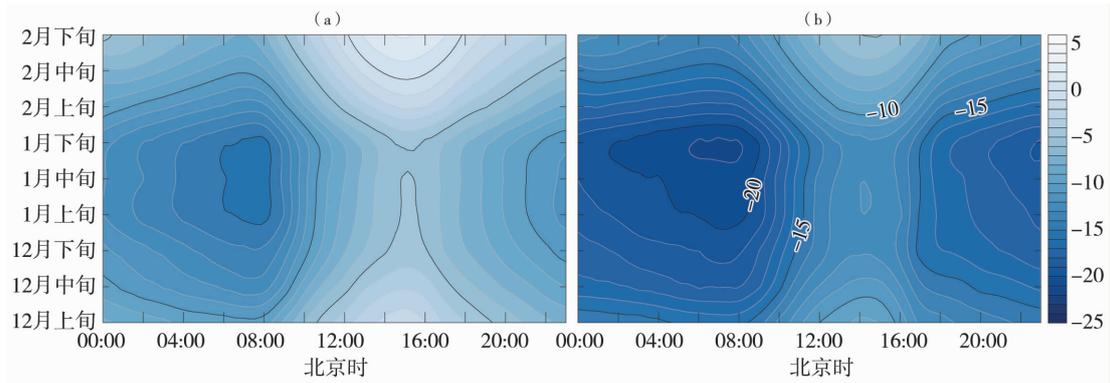


图7 2006—2016年冬季延庆站(a)、佛爷顶站(b)风寒温度每旬逐时变化(单位:℃)

Fig.7 The hourly variation of wind chill temperature at Yanqing (a) and Foyeding (b) stations in each ten-day in winter during 2006-2016 (Unit:℃)

2.3 2次寒潮过程风寒温度分析

统计2006—2016年延庆区冬季各站风寒温度极端低值,21个站均出现过低于-30℃的风寒温度,极端低值主要出现在2010年1月5日和2016年1月23日2次寒潮过程中,2次过程中全部台站的平均风寒温度分别为-26.1℃和-29.8℃,是

2006—2016年冬季平均风寒温度最低的2d。表2是2010年和2016年2次寒潮过程中延庆区各站风寒温度最低值及对应时刻风速和气温。可以看出,有8个站的风寒温度最低值出现2010年1月5日寒潮过程中,其他13个站出现在2016年1月23日寒潮过程中。

表2 2010和2016年寒潮过程中延庆区各站风寒温度最低值及对应时刻风速和气温

Tab.2 The minimum wind chill temperature and the corresponding moment wind speed and air temperature of each stations in Yanqing area of Beijing during the cold-wave processes in 2010 and 2016

站名	2010年			2016年				
	出现时间	风速/ (m·s ⁻¹)	气温/ ℃	风寒温 度/℃	出现时间	风速/ (m·s ⁻¹)	气温/ ℃	风寒温 度/℃
延庆	1月5日07:50	1.5	-25.4	-30.5	1月24日05:05	7.4	-19.5	-31.3
佛爷顶	1月5日00:20	11.9	-24.1	-40.0	1月23日08:45	14.3	-30.1	-49.4
延庆农场	1月5日02:31	2.4	-33.8	-42.9	1月23日20:00	10.8	-19.6	-33.4
四海	1月7日08:10	0.9	-32.3	-36.1	1月23日07:53	4.3	-23.6	-33.7
龙庆峡	1月6日08:32	4.6	-20.0	-29.6	1月23日07:53	6.2	-22.1	-33.7
大庄科	1月5日05:14	4.9	-19.7	-29.5	1月23日08:08	10.4	-22.8	-37.5
小川	1月5日00:55	2.1	-26.9	-34.1	1月23日07:38	6.2	-22.1	-33.7
白河堡	1月5日07:43	2.2	-25.6	-32.8	1月23日07:11	9.1	-23.9	-38.2
野鸭湖	1月5日04:32	2.0	-29.2	-36.5	1月23日21:37	10.8	-19.1	-32.8
菊花基地	1月5日00:52	4.8	-21.3	-31.4	1月23日05:57	6.5	-22.8	-34.9
永宁	1月5日07:05	3.1	-25.7	-34.6	1月23日07:44	7.3	-22.6	-35.2
玉渡山	1月5日02:58	1.9	-30.8	-38.1	1月23日09:27	5.8	-23.6	-35.3
千家店	1月5日08:02	1.1	-25.9	-29.9	1月23日09:59	11.4	-22.0	-37.0
刘斌堡	1月5日04:47	5.7	-21.7	-32.8	1月23日07:55	11.3	-24.0	-39.6
东门营	1月5日07:44	2.4	-28.8	-37.0	1月24日05:24	11.4	-19.4	-33.5
红旗甸	1月5日07:36	2.1	-26.0	-33.0	1月23日08:12	7.7	-23.7	-36.9
旧县	1月5日03:40	1.2	-32.7	-37.9	1月23日07:02	8.9	-21.8	-35.3
八达岭	1月5日08:05	7.3	-21.3	-33.5	1月24日03:59	16.9	-20.8	-37.7
松山	1月5日05:17	3.3	-24.3	-33.2	1月23日09:12	7.4	-23.7	-36.7
野鸭湖湿地	1月6日06:32	1.9	-27.9	-34.7	1月24日02:13	6.4	-19.9	-31.1
晏家堡	1月5日02:16	1.7	-25.8	-31.8	1月23日08:59	7.7	-20.2	-32.4

2次寒潮形成的风寒温度较为接近,但天气背景差异较大。2010年1月3—4日京津冀地区出现暴雪天气,北京降雪量破历史极值,气温较低,但风速较小,基本保持在 $2.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下。2016年1月23日北极涡旋南下形成寒潮,当日南郊观象台气温达到了常年1月的历史极值,虽然延庆各站点气温并没有达到极值,但风速较大,延庆和佛爷顶站分别观测到 $8.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $17.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的最大风速。

图8为2010年1月5日和2016年1月23日延庆和佛爷顶站的风速、气温、风寒温度逐时变化。可以看出,延庆站2016年1月23日平均气温较2010

年1月5日高 $0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$,气温差异较小,但由于大风天气的出现,造成2016年1月23日的风寒温度平均值比2010年1月5日低 $2.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。佛爷顶站在两日00:00的气温较为接近,风寒温度差异也较小,但是佛爷顶2010年1月5日和2016年1月23日平均风速分别为 $5.6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $9.1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,其中2016年1月23日23:00瞬时风速达到 $14.6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,极大风速达到 $30.4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,佛爷顶2016年1月23日的平均气温和风寒温度分别比2010年1月5日低 $6.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $11.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。风速一方面本身就加剧了风寒效应,另外一方面风速较大会影响地面气温的升高。

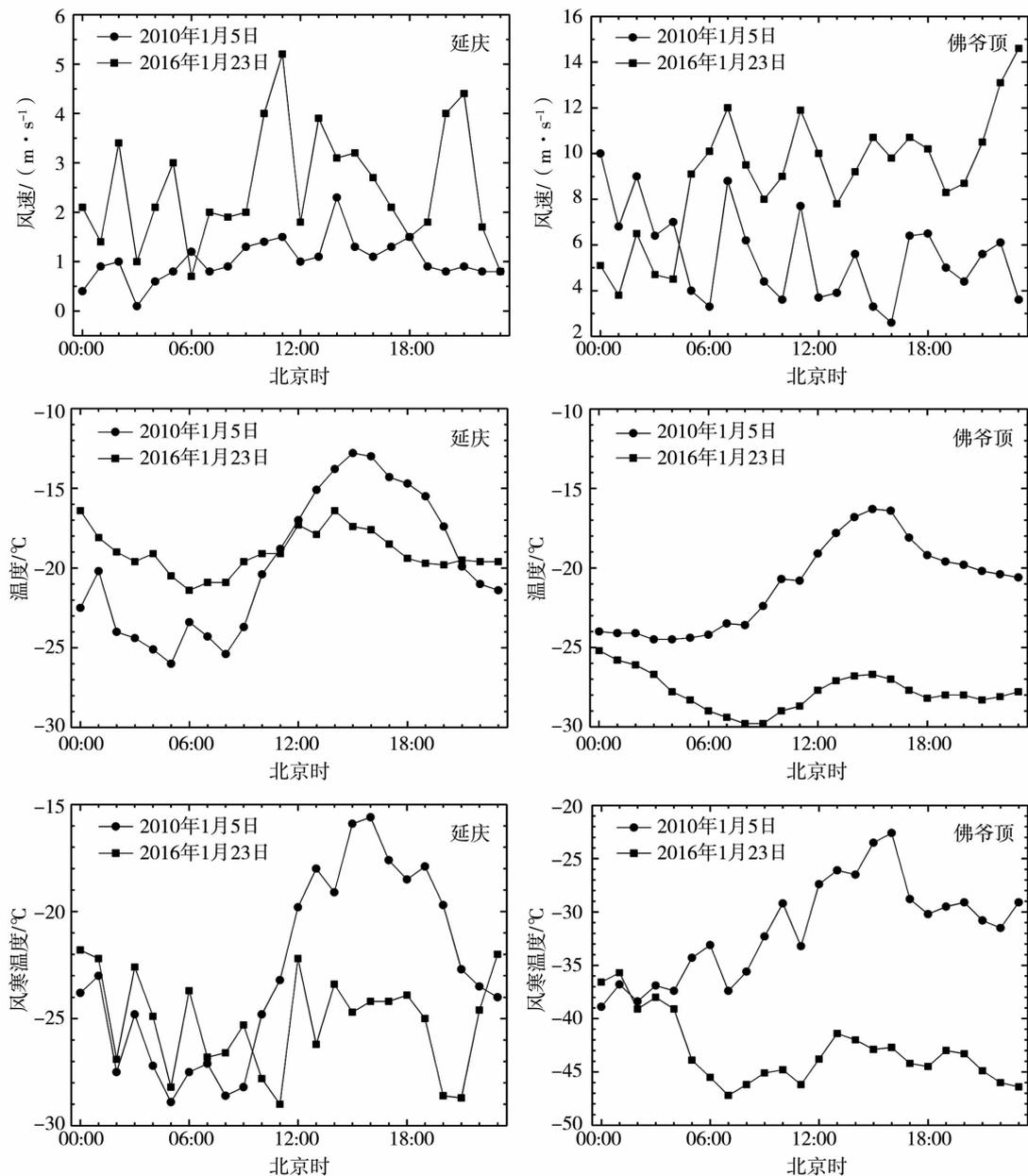


图8 2010年1月5日和2016年1月23日延庆和佛爷顶站的风速、温度及风寒温度的逐时变化
 Fig.8 The hourly variation of wind speed, temperature, and wind chill temperature at Yanqing and Foyeding stations on 5 January 2010 and 23 January 2016

3 变化趋势

图9是1978—2016年冬季延庆和佛爷顶站风速、气温及风寒温度的年际变化。可以看出,1980年冬季佛爷顶站的平均风寒温度达到 $-19.9\text{ }^{\circ}\text{C}$,同期延庆的风寒温度为 $-12.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,延庆站的冬季平均风寒温度最低为 $-12.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (1984年)。1978—2016年冬季,延庆站和佛爷顶站平均气温均呈上升趋势,其中延庆站变化速率为 $0.642\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$,与初子莹等^[14]、王文等^[15]研究结果较为接近,佛爷顶站

变化速率为 $0.214\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ 。同时2站风速呈明显下降趋势,延庆和佛爷顶站分别为 -0.096 和 $-0.713\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ 。1978年以来2站冬季风寒温度均呈上升趋势,其中延庆和佛爷顶站变化率分别为 0.883 、 $0.693\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$,即风寒温度的增速均比气温快。由于城市化进程的加快,延庆站增温显著,导致风寒温度有明显增加趋势。而佛爷顶站位于高山山顶,受城市化影响较小,增温趋势不如延庆站明显,但是风速有显著减小趋势,导致其风寒温度明显增加,但是变化幅度小于延庆站。

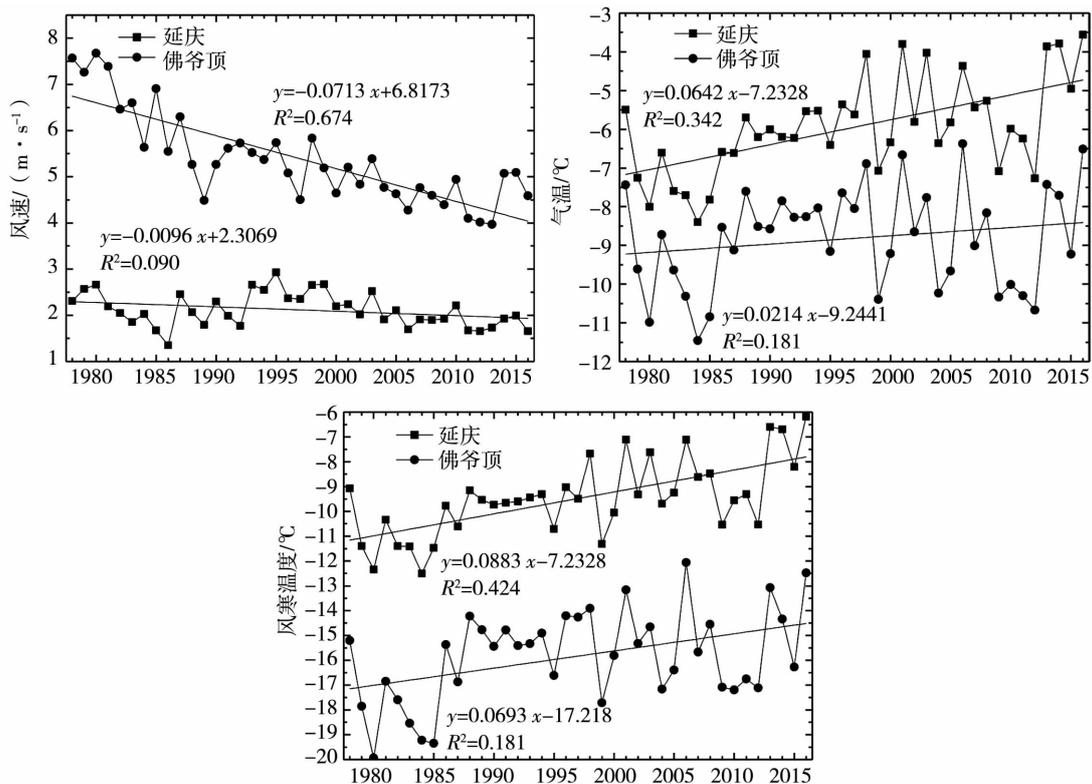


图9 1978—2016年延庆站和佛爷顶站风速、气温及风寒温度年际变化
Fig. 9 The annual variation of average wind speed, temperature and wind chill temperature at Yanqing and Foyeding stations in winter during 1978–2016

4 结论

(1) 风寒温度高值区处于延庆盆地区域,低值区处于缙云山等高海拔地区,风寒温度与站点高度存在显著相关性;延庆区冬季风寒温度平均为 $-10.0\text{ }^{\circ}\text{C}$,1月最低($-12.4\text{ }^{\circ}\text{C}$),2月最高($-7.7\text{ }^{\circ}\text{C}$)。

(2) 延庆和佛爷顶站风寒温度平均值分别为 $-8.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-15.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,2站风寒温度的差异为气温差异的近2倍;风寒温度的日变化为单峰单谷型,日出前为低点,午后为高点;佛爷顶站风寒温度日较差为 $8.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,延庆站为 $10.1\text{ }^{\circ}\text{C}$;2站均1月中下旬出现风寒温度最低值,2月下旬出现高值,其中延庆站

午后平均风寒温度可以达到 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

(3) 延庆区所有站均出现过低于 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的极低风寒温度,主要在2010年1月5日和2016年1月23日2次寒潮过程中;前者为温度主导,后者为风速主导。

(4) 1978—2016年冬季延庆和佛爷顶站气温呈缓慢上升而风速呈逐渐下降趋势,导致风寒温度上升较为明显,其中延庆和佛爷顶站的风寒温度变化率分别为 0.883 、 $0.693\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ 。

(5) 延庆地区现有石京龙和八达岭2家规模较大的滑雪场,分别位于晏家堡站和八达岭站附近。

晏家堡站由于地形原因地处风寒温度高值区,冬季平均风寒温度为 $-7.9\text{ }^{\circ}\text{C}$,冻伤风险较低,相比较而言八达岭冬季平均风寒温度为 $-10.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,存在中度冻伤风险,若长时间在该处滑雪并缺少防护措施,则可能发生冻伤。2次寒潮天气中,晏家堡站和八达岭站的极端风寒温度均低于 $-30.0\text{ }^{\circ}\text{C}$,日平均风寒温度低于 $-24.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,可见在强寒潮天气中2个滑雪场均存在高度冻伤风险,需要提醒相关人员做好全面防护。

参考文献:

- [1] SIPLE P A, PASSEL C F. Measurements of dry atmospheric cooling in subfreezing temperatures[J]. Proceedings of the American Philosophical Society, 1945,89(1):177-199.
- [2] MOLNAR G. An evaluation of wind chill[C]// Trans of the Sixth Conf. on Cold Injury, New York, NY, Josiah Macy Foundation, 1960:175-221.
- [3] KESSLER E. Wind chill errors[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1993,74(9):1743-1744.
- [4] EAGAN C J. The effect of air movement on atmospheric cooling power[C]// In review of research on military problems in cold regions. Kolb C, Holstrom F, Eds. Arctic Aeromedical Laboratory Tech. Rep. TDR-64-28;1964:147-156.
- [5] STEADMAN R G. Indices of wind chill of clothed persons[J]. Journal of Applied Meteorology, 1971,10(4):674-683.
- [6] BLUESTEIN M, ZECHER J. A new approach to an accurate wind chill factor[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1999,80(9):1893-1899.
- [7] OSCZEWSKI R, BLUESTEIN M. The new wind chill equivalent temperature chart[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2005,86(10):1453-1458.
- [8] 冯胜辉,龚道溢,张自银,等. 近50年来中国冬季风寒温度的变化[J]. 地理学报,2009,64(9):1071-1082.
- [9] 孙广禄,王晓云,章新平,等. 京津冀地区人体舒适度的时空特征[J]. 气象与环境学报,2011,27(3):18-23.
- [10] HOREL J, POTTER T, DUNN L, et al. Weather support for the 2002 Winter Olympic and Paralympic Games[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2002,83(2):227-240.
- [11] MAILHOT J, BÉLAIR S, CHARRON M, et al. Environment Canada's experimental numerical weather prediction systems for the Vancouver 2010 Winter Olympic and Paralympic games[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2010,91(8):1073-1085.
- [12] 王佳丽,张人禾,王迎春. 北京不同区域表面气温的变化特征以及北京市观象台气温的代表性[J]. 气候与环境研究,2012,17(5):563-573.
- [13] MEKIS É, VINCENT L A, SHEPARD M W, et al. Observed trends in severe weather conditions based on humidex, wind chill, and heavy rainfall events in Canada for 1953-2012[J]. Atmosphere-ocean, 2015,53(4):383-397.
- [14] 初子莹,任国玉. 北京地区城市热岛强度变化对区域温度序列的影响[J]. 气象学报,2005,63(4):534-540.
- [15] 王文,张薇,蔡晓军. 近50年来北京市气温和降水的变化[J]. 干旱气象,2009,27(4):350-353.

Spatial-temporal Characteristics and Change Trend of Wind Chill Temperature in Winter in Yanqing of Beijing

LI Lin^{1,3}, QIAO Yuan², SUN Xueqi³, FAN Xuebo³,
WU Yongxue³, YU Liping³, ZHANG Zhiguo³

(1. Institute of Urban Meteorology, CMA, Beijing 100089, China; 2. Beijing Municipal Meteorological Service Center, Beijing 100089, China; 3. Beijing Municipal Meteorological Observation Center, Beijing 100089, China)

Abstract: The wind-chill temperature (WCT) indicates comfort and the risk of frostbite from different combinations of temperature and wind speed, which directly affects the safety and experience of snow sports. According to the meteorological service demand of the 2022 Winter Olympic Games, the winter observation data of 21 meteorological stations in Yanqing area were used to study the temporal and spatial change trend of the WCT. The results are as follows: (1) The high WCT zone was in the Yanqing basin area, and the low value zone was in the high altitude area such as Jinyun Hill, both with a risk of moderate frostbite. (2) The average temperature of Foyeding station in winter was $-15.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, the extreme WCT reached $-49.4\text{ }^{\circ}\text{C}$, and the risk level of frostbite exposure was from the moderate to severe. (3) The daily change of WCT presented a single-peak and a single-valley distribution, and the lowest value of that appeared in middle and late January in the monthly change while the highest occurred in late February. (4) During the typical cold wave weather of January 5, 2010 and January 23, 2016, there were significant differences in the causes of the extremely low value of WCT. The former was dominated by temperature, while the latter by wind speed. (5) During the period from 1978 to 2016, due to the significant increase in temperature in Yanqing station, WCT had a significant upward trend. The temperature increase of Foyeding station was small, but due to the significant decrease of wind speed, the WCT also had a significant upward trend.

Key words: wind chill temperature; spatial-temporal characteristics; change trend; winter