

我国极地数值天气预报系统在南极长城站的应用与检验

郭民权¹, 沈辉², 买小平², 丁卓铭², 张林², 干兆江³, 孙启振²

(1. 福建省海洋预报台, 福建 福州 350003; 2. 国家海洋环境预报中心 自然资源部海洋灾害预报技术重点实验室, 北京 100081;
3. 沂源县气象局, 山东 淄博 256100)

摘 要: 选取2018年2月—2019年11月南极长城站气象台观测资料, 对我国极地数值天气预报系统的风速、降水、气温和气压预报进行了检验。统计结果表明: 预报风速误差呈正态分布, 平均误差随预报风速增加有变大的趋势, 短期预报好于长期预报, 6级及以上大风时预报结果偏大的概率逐渐增大。预报降水量约是观测降水量的两倍, 且在时间上和各降水量级上的误差分布特征一致, 降水预报明显偏大。气温和气压的预报能够较好地反映天气形势变化, 但存在明显的系统性偏差, 其中气温的平均值偏小2.1℃, 气压的平均值偏大2.4 hPa。

关键词: 长城站; 数值天气预报系统; 统计检验; 极地

中图分类号: P456.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2021)04-0069-07

1 引言

中国南极长城站所在的乔治王岛地处南极半岛的最北端。该地区气旋活动较为频繁, 大风、降水和海雾天气较多, 这给户外科考、探险、旅游以及飞机起降等活动带来重要影响, 因此对该地区的天气进行分析和预报具有重要意义^[1-5]。我国在1984年建立南极长城站时就建立了气象观测站, 对该地区的气象和气候资料有一定的积累, 为该地区天气预报、统计分析和数值预报系统的验证等提供了数据支撑。卞林根等^[6-8]回顾了该地区南极天气预报业务进展, 并总结了南极长城站地区重要天气现象的特征和预报技术。

数值预报模型是当今开展南极天气预报业务的主要参考工具。孙启振等^[9]评估和对比了南极地区多个数值天气预报系统, 结果表明欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-range Weather Forecasts, ECMWF)的预报系统性能较为领先, 高分辨率南极中尺度预报系统(Antarctic Me-

soscale Prediction System, AMPS)由于分辨率较高, 最具发展前景和应用价值, 而其他模型在某些方面也各有其独特的优势。马永锋^[10]利用高分辨率的区域天气模式(Polar Weather Research and Forecasting, Polar WRF)v3.2.1对2008年南极地区全年的天气过程进行模拟与评估, 开展的敏感性实验和误差的统计分析为Polar WRF在南极的应用奠定了基础。孟上等^[11]归纳了使用数值预报等资料制作南极沿岸科考站短期天气预报的方法和步骤。孙启振等^[12]对我国极地数值天气预报系统(Polar Numerical Weather Forecasting System, PNWFS)的建立和应用进行了详细介绍, 通过检验对比, 认为PNWFS系统能够较好地反映极地短期天气形势的演变特点, 能够基本满足我国极地考察和航运气象保障需求, 同时也对PNWFS系统的改进提出了建议。

国家海洋环境预报中心在2011年基于Polar WRF模型建立了业务化的PNWFS系统, 经过近10 a的业务化运行, 目前PNWFS的预报产品已经成为我国预报员开展极地天气预报的重要参考资料。

收稿日期: 2020-04-29; 修回日期: 2020-07-13。

基金项目: 国家重点研发计划课题(2018YFA0605902); 国家自然科学基金面上项目(41976010)。

作者简介: 郭民权(1982-), 男, 副研究员, 硕士, 主要从事海洋环境预报与应用研究。E-mail: guominquan@163.com

本文主要对长城站日常预报业务中比较关注的降水、风速、气温和气压进行了检验,以期对PNWFS的性能进行评估,同时为模型的改进以及产品的订正与应用提供依据。

2 极地数值天气预报系统简介

PNWFS系统包括南极(PNWFS-S)和北极(PNWFS-N)两个子系统,每个系统分为同化模块和预报模块。同化模块采用WRF三维变分同化系统(Weather Research Forecast-3D VARIational data assimilation system, WRF-3DVAR)方法循环同化全球资料同化系统(Global Data Assimilation System, GDAS)卫星数据。预报模块采用Polar WRF v3.9.1模型。该模型由美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)和俄亥俄州立大学(The Ohio State University)共同研发,以WRF模型为基础,对其部分参数化方案和海冰积雪等描述方式做了优化,更适用于极地气象环境。

PNWFS-S系统采用六重网格,最外重网格水平分辨率27 km,长城站区域网格水平分辨率可达3 km,时间分辨率1 h,垂直积分61层。系统的主要物理参数化方案包括:WSM3微物理过程参数化方案、RRTM长波参数化方案、Dudhia短波参数化方案、Revised MM5近地面层参数化方案、thermal diffusion陆面参数化方案、YSU边界层参数化方案和Kain-Fritsch积云参数化方案。初始场和边界条件采用分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 的NCEP资料和全球预报系统(Global Forecast System, GFS)资料,并利用国际共享资源获取南极现场观测全球通信系统(Global Telecommunication System, GTS)气象数据,采用3DVAR进行资料同化^[6]。

PNWFS每天在00时(世界时,下同)和12时各运行一次,发布未来12~96 h的全南极和南极半岛区域的数值预报,包括海平面气压场、地面风、降水量、温度和湿度等数值预报产品。根据极地考察现场需要,可以对长城站、中山站或其他指定站点输出气象要素趋势预报曲线,如海平面气压、地面风、温度、湿度和降水等预报数据时序图和图像产品,这对于开展关注区域的气象预报有

重要作用。

3 预报结果的检验与分析

本文主要对长城站日常预报业务(近3 d)中比较关注的降水和大风两个要素进行较全面的检验,对气温和气压只进行了一般误差统计。检验时间段从2018年2月—2019年11月,共22个月的预报数据。本文选用00时发布的预报产品,对未来3 d(预报时效12~84 h)的预报结果进行检验。

3.1 风速的检验

对于风速的检验,主要从预报误差及分布、误差的累计概率分布和日最大风力等级检验等方面开展统计,并对比了24 h、48 h和72 h的预报准确率。图1分别是预报风速误差的散点分布图、误差概率图、平均绝对误差累计概率图和24 h预报风速出现的频次及误差图。表1列出了预报风速检验相关的统计值,其中Skill值^[9]可以量化模型和实测结果的吻合程度。

$$Skill = 1 - \frac{\sum |X_{model} - X_{obs}|^2}{\sum (|X_{model} - \bar{X}_{obs}| + |X_{obs} - \bar{X}_{obs}|)^2} \quad (1)$$

式中, X_{model} 是模型的预报值; X_{obs} 是观测值; \bar{X}_{obs} 是观测数据的平均值。Skill值越接近1,说明预报和观测的吻合程度越好。

从图1a可以看到观测和预报对应的散点分布在对角线周围,但是离散程度较大,这和表1中的相关系数偏低相一致。图1b是预报误差值取整后的概率分布图,可以看到预报误差分布整体呈正态分布,峰值略偏右侧。从表1的统计来看,预报的平均误差均为正数,24 h预报平均风速比观测平均风速大1.2 m/s,其他的统计指标也显示随着预报时效增加预报偏差有增大的趋势。图1c是风速绝对误差取整后的累计概率图。图中可以看到各风速误差下的置信水平,预报误差在 ± 3.9 m/s时(约1个标准偏差),24 h和72 h的预报准确率为72%和66%,前者比后者高出了6%。

为了进一步分析预报风速的偏差特点,以便在预报实践中订正和提高数值预报结果,图1d显示了24 h预报时效下各预报风速的平均误差和平均绝对

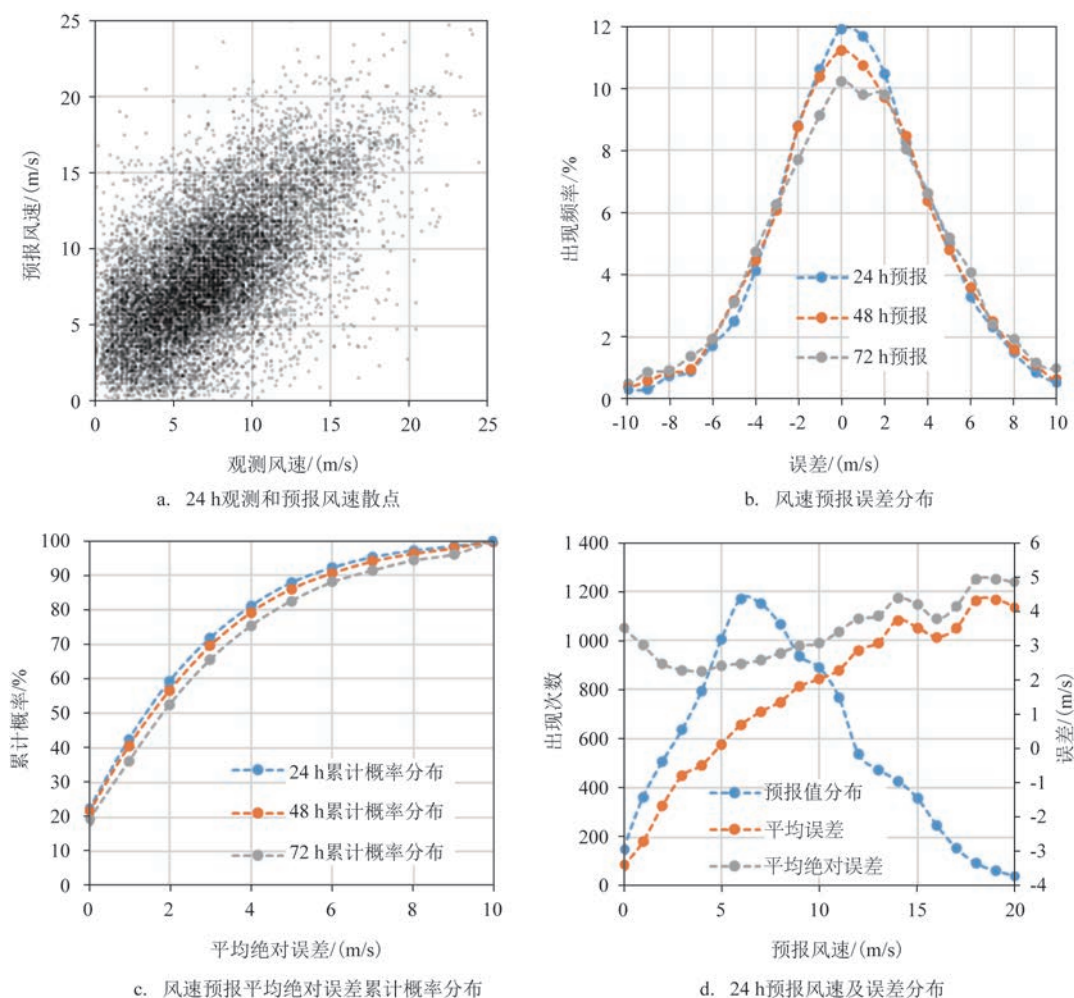


图1 预报风速误差及分布特征

表1 预报风速检验统计值

统计方法	预报时效		
	24 h	48 h	72 h
相关系数	0.62	0.56	0.47
平均绝对误差/(m/s)	2.99	3.16	3.51
均方根误差/(m/s)	2.47	2.60	2.90
误差的标准偏差/(m/s)	3.69	3.96	4.40
平均误差/(m/s)	1.18	1.05	1.18
Skill 值	0.77	0.74	0.68

误差分布情况。从图中可以看到,平均误差随预报风速增加呈单调递增的趋势,平均误差从 -3.4 m/s 增加到 4.3 m/s ,风速每增加 1.0 m/s ,平均误差增大约 0.4 m/s 。在 $5.0\sim 5.9\text{ m/s}$ 时平均误差和平均绝对误差均较小。当预报风速处于 $2.0\sim 11.0\text{ m/s}$ 时,预报的平均绝对误差在 3.0 m/s 以下。当风速大于

20.0 m/s 时,由于样本个数偏少,没有显著的统计意义。

实际预报中一般用风力等级开展预报,且通常关注当日出现的最大风速,尤其关注出现6级及以上($\geq 10.8\text{ m/s}$)的大风天气。表2为24 h预报风力等级偏差统计表,从表中可以看到,预报偏大的概率随着风速等级的提高而增大,出现7级及以上风力时,预报结果偏大1~2级的概率达到了53.1%;出现8级及以上时,偏大1~2级的概率达到了60.3%,这也和图1d中表现出的风速增大时预报值偏大的情况一致。所以当数值预报系统出现6级及以上风力时更需要注意甄别,适当调整风力预报等级可以更好地符合实际情况。

3.2 降水预报的检验

降水检验主要以TS评分结合降水量误差来进

表2 24 h预报风力等级偏差统计表(单位:%)

风力等级	偏小 二级	偏小 一级	一致	偏大 一级	偏大 二级
5级及以下	4.5	22.9	42.5	22.9	6.1
6级及以上	1.2	12.4	35.0	32.9	15.3
7级及以上	1.1	7.3	33.9	33.9	19.2
8级及以上	1.6	3.2	25.4	36.5	23.8

行统计。根据气象部门应用比较广泛的《中短期天气预报质量检验办法》,降水检验主要分为两种:一种为有无降水即晴雨(雪)预报的检验,另一种为针对某量级降水的统计检验。

对晴雨(雪)检验:

$$\text{预报正确率 } PC = \frac{NA + ND}{NA + NB + NC + ND} \times 100\% \quad (2)$$

式中, NA 为有降水预报正确站(次)数, NB 为空报站(次)数, NC 为漏报站(次)数, ND 为无降水预报正确的站(次)数。

对降水分级检验和累加降水量级检验:

$$\text{TS评分 } TS_k = \frac{NA_k}{NA_k + NB_k + NC_k} \times 100\% \quad (3)$$

$$\text{漏报率 } PO_k = \frac{NC_k}{NA_k + NC_k} \times 100\% \quad (4)$$

$$\text{空报率 } FAR_k = \frac{NB_k}{NA_k + NB_k} \times 100\% \quad (5)$$

式中, NA_k 为预报正确站(次)数, NB_k 为空报站(次)数, NC_k 为漏报站(次)数。表3和表4分别是降水TS评分和晴雨(雪)检验分类统计结果,其中降水强度用24 h降雪量标准来划分。

表3 中国南极长城站降水TS评分

24 h降水 强度/mm	预报时效		
	24 h	48 h	72 h
晴雨/雪(<0.1)	87.7	86.3	86.5
小雨/雪(0.1~2.4)	55.4	54.5	54.8
中雨/雪(2.5~4.9)	18.3	22.4	14.8
大雨/雪(5.0~9.9)	23.5	16.2	19.1
暴雨/雪(≥10.0)	12.5	13.9	16.3

根据表3统计,该模型对未来3 d晴雨(雪)天的预报平均TS评分达到86.5%。但随着降水强度的增大,模型的TS评分逐渐降低,根据后文分析,主要

表4 长城站24 h预报晴雨(雪)检验分类统计

实况	预报有降水天数	预报无降水天数
0.0 mm	$NA=50$	$ND=39$
≥0.1 mm	$NA=346$	$NC=29$
无降水	$NB=35$	$ND=20$

是由于预报降水量偏大导致。根据表4统计,模型对晴雨(雪)24 h预报的正确率为87.7%(同24 h的TS评分),其中24 h降水预报的空报率和漏报率分别为8.1%和14.7%。

对于降水量的检验,以24 h预报为例,统计时段内预报降水量是实测降水量的1.9倍,预报比观测偏大的天数占66.3%,偏小的天数占21.0%,一致的天数占12.7%,这说明模型降水整体偏大且偏多。图2是降水量逐月的日平均统计结果。图中可以看到,除了2019年1月的日平均降雨量预报值较观测值略偏小以外,其他时间段均较观测值偏大。

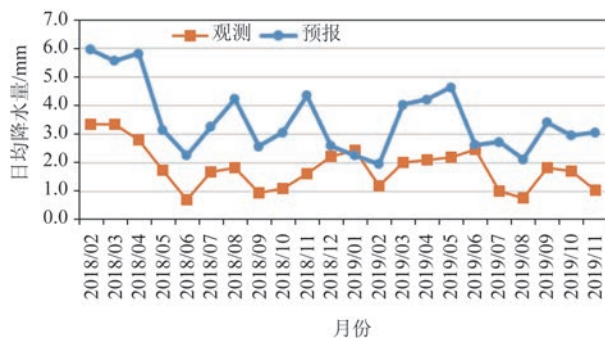


图2 预报和观测各月的日均降水量对比

图3是对各降水量级进行误差统计,可以看到在各量级降水上,平均误差随预报降水量呈较好的线性增加,误差达到预报值的52%左右。

以上统计表明,该预报系统对降水模拟存在明显的系统性偏差,约为实际降水量的2倍,在预报中可以考虑预报降水量减半处理,或调整模型相关参数予以校正。表5是模型预报降水量减半后的TS评分,从中可以看到,TS评分明显提升。

3.3 气温和气压的检验

气温和气压是判断天气形势及其发展变化的重要指标,表6和表7分别是气温和气压预报检验

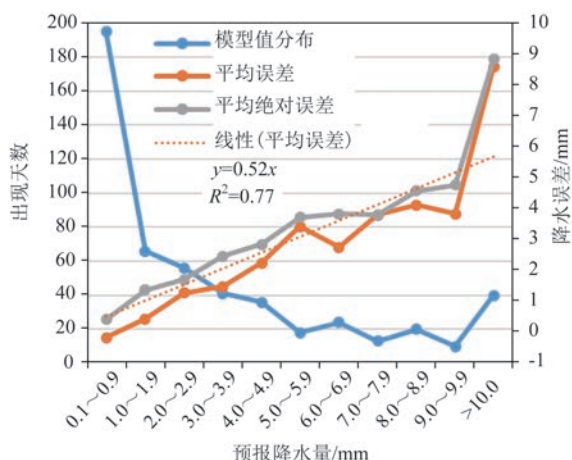


图3 预报降水在各量级出现的天数和对应的误差

表5 数值预报降水减半后TS评分

降水强度/mm	原TS评分	降水减半后的TS评分	提高百分比/%
小雨/雪 (0.1~2.4)	55.4	59.2	6.7
中雨/雪 (2.5~4.9)	18.3	26.7	46.4
大雨/雪 (5.0~9.9)	23.5	38.5	63.5
暴雨/雪 (≥10.0)	12.5	40.0	220.0

表6 气温预报检验统计表

统计方法	预报时效		
	24 h	48 h	72 h
相关系数	0.93	0.93	0.88
平均绝对误差/℃	2.18	2.32	2.35
均方根误差/℃	2.64	2.79	2.85
误差的标准偏差/℃	1.60	1.72	1.92
平均误差/℃	-2.10	-2.20	-2.11
Skill 值	0.77	0.74	0.68

表7 气压预报检验统计表

统计方法	预报时效		
	24 h	48 h	72 h
相关系数	0.99	0.98	0.94
平均绝对误差/hPa	2.54	3.18	3.79
均方根误差/hPa	3.08	3.95	4.93
误差的标准偏差/hPa	1.92	2.85	4.18
平均误差/hPa	2.42	2.73	2.62
Skill 值	0.98	0.97	0.96

的统计结果。从相关系数上看,气温和气压的预报相关性比较高,平均达到了0.9以上,说明系统能够较好地体现气温和气压的变化趋势;从平均误差上看,气温预报和气压预报均存在明显的系统性偏差,其中气温平均偏小2.10℃,气压偏大2.42 hPa;从误差的标准差来看,各预报时效下气温变化较小,气压则变化较大。

图4a和4b是气温预报误差取整后的分布图。图中可以看到,误差呈正态分布,但峰值在-2℃附近,误差大于0℃的概率较低,预报存在明显的系统偏差。图4c是各预报温度下的误差分布。图中可以看到,平均误差和平均绝对误差线基本关于0℃误差线对称,说明误差正负相抵的情况较少,且预报值越小,偏低的程度越大,当预报气温大于0℃时,平

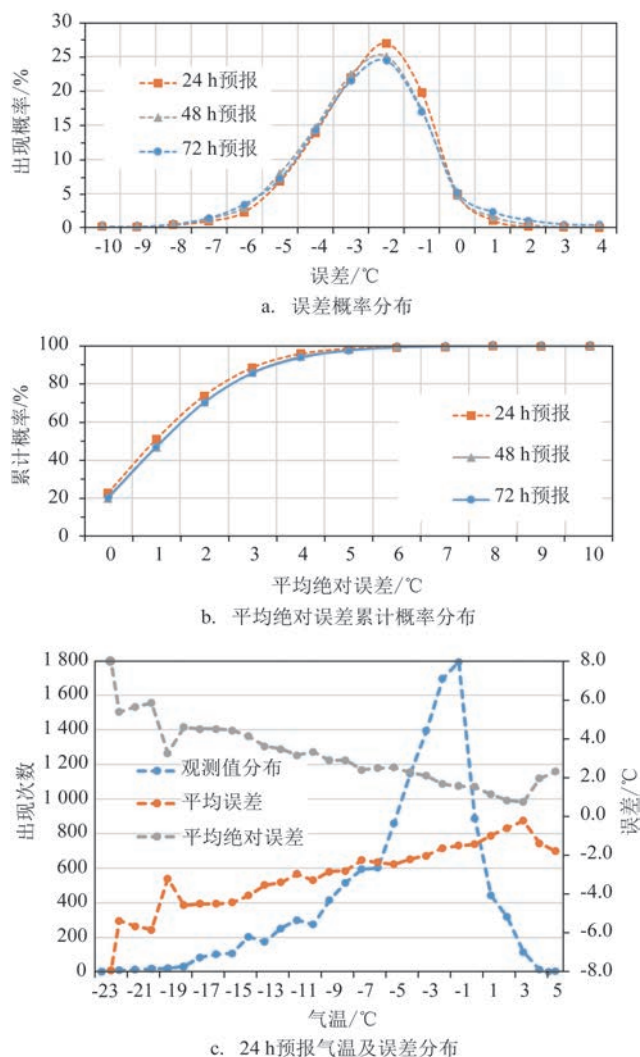


图4 气温预报误差分布

均误差和平均绝对误差最小,与观测最为接近。

图5a和5b是气压预报的误差取整后的分布情况。图中可以看到,气压误差呈正态分布,误差的峰值均偏右侧,偏小的频率较低。随着预报时效的增加,误差离散程度越大,表7中误差的标准偏差变化也显示了这一趋势。图5c显示,24 h预报气压在出现频次较高的976~1 006 hPa之间时,平均误差在2.5 hPa附近。

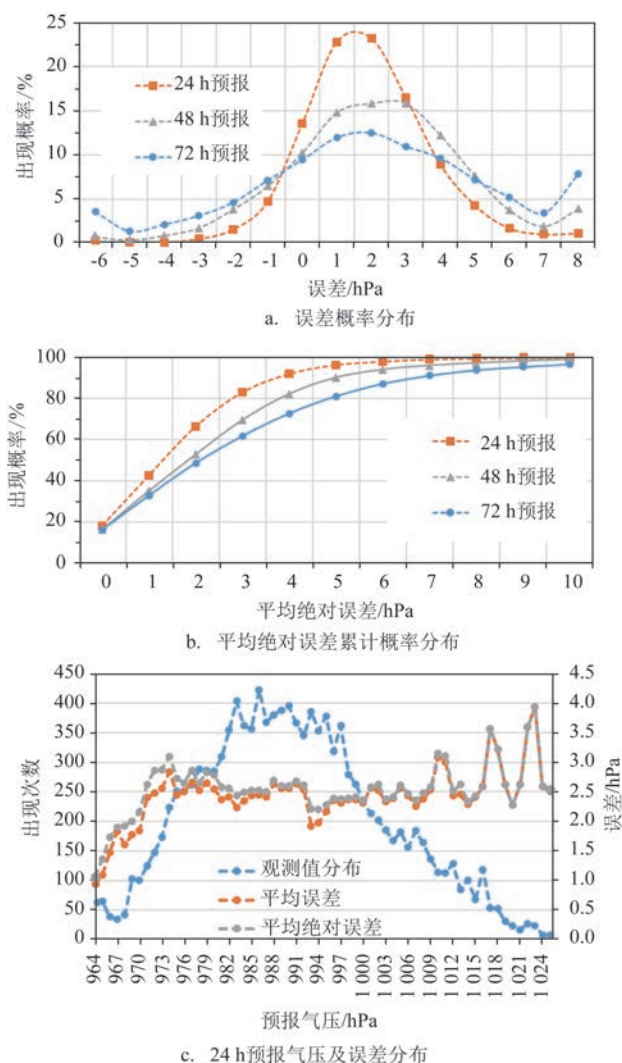


图5 气压预报误差分布

4 总结与讨论

数值预报作为当前气象海洋预报业务的重要工具,对模型的检验、订正和释用十分重要。本文对PNWFS的风速、降水、气温和气压进行了较为全

面的误差统计分析,并对预报结果的使用提出一些建议,能够为该系统在南极长城站的释用提供一定的参考。主要结论如下:

(1)风速预报方面,各统计指标显示,预报的准确度随预报时效的增加而降低,其中风速预报的Skill值从0.77降低到0.68。此外,风速平均误差随预报风速的增加从-3.4 m/s单调增加到4.3 m/s,即风速每增加1.0 m/s,风速平均误差增大约0.4 m/s。出现6级以上大风时,预报风力偏大1~2级的概率达到48%以上,随着预报风力等级的增大,预报偏大的概率愈大。

(2)模型对24 h晴雨(雪)的预报准确率达到87.7%,TS评分随降水量级的增大而减小。据统计,预报降水量约为观测值的2倍,且在时间分布以及各降水量等级上降水误差的表现均较为一致,在实际预报中对降水量减半处理可以提高预报准确性。

(3)气温和气压预报方面,观测值和预报值的相关性比较好,能够较好地反映出天气形势的变化趋势,但存在明显的系统性偏差,气温预报偏低,气压偏大,需要在预报系统中调整相应的参数。

本文只使用了长城站单站有限的资料对预报风速、降水、气温和气压进行统计分析,其中的误差有可能是局地地形导致的观测误差引起,也可能是预报系统本身造成的。为进一步验证预报系统的可靠性,需要验证周边其他站点,并通过对比不同的数值预报系统,如ECMWF和AMPS等,分析各模型的优势和不足,在预报中参考多个数值预报系统,择优选择适合本地区的预报系统,提供更加可靠的预报保障服务。

致谢:感谢中国气象科学研究院提供的长城站气象台气象观测资料。

参考文献:

- [1] 张林. 南极天气预报[J]. 海洋预报, 1996, 13(2): 69-76.
- [2] 陆龙骅, 卞林根, 贾朋群, 等. 中国南极考察的业务天气预报[J]. 气象科技, 1998(3): 32-40.
- [3] 王自磐. 中国南极旅游开发探讨[J]. 旅游学刊, 2003, 18(6): 95-100.
- [4] 薛美云. 悄然兴起的南极旅游业[J]. 中学地理教学参考, 2004(6): 16.
- [5] 黄耀荣. 西南极沿海雪暴研究[J]. 海洋学报, 2000, 22(6): 124-

- 130.
- [6] 卞林根, 张雅斌. 南极天气预报业务的进展[J]. 极地研究, 2000, 12(3): 219-232.
- [7] 陆龙骅, 卞林根, 逯昌贵, 等. 近20年中国南极科学考察的气象业务进展[J]. 气象, 2005, 31(1): 3-8.
- [8] 杨清华, 张林, 薛振和, 等. 南极乔治王岛的天气预报业务[J]. 海洋预报, 2007, 24(3): 16-25.
- [9] 孙启振, 杨清华, 张林. 南极数值天气预报应用与研究进展[J]. 极地研究, 2011, 23(2): 128-137.
- [10] 马永锋. Polar WRF对南极地区天气过程的模拟试验研究[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2012.
- [11] 孟上, 孙启振, 张训途, 等. 南极中山站短期天气预报制作及典型个例分析[J]. 海洋预报, 2015, 32(5): 69-79.
- [12] 孙启振, 丁卓铭, 沈辉, 等. 我国极地数值天气预报系统的初步建立与应用[J]. 海洋预报, 2017, 34(4): 1-10.

Application and evaluation of Chinese polar numerical weather forecasting system for the Great Wall Station in Antarctica

GUO Min-quan¹, SHEN Hui², MAI Xiao-ping², DING Zhuo-ming², ZHANG Lin²,
GAN Zhao-jiang³, SUN Qi-zhen²

(1. Fujian Marine Forecasts, Fuzhou 350003 China; 2. Key Laboratory of Marine Hazards Forecasting, National Marine Environmental Forecasting Center, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081 China; 3. Yiyuan Meteorological Bureau, Zibo 256100 China)

Abstract: The wind speed, precipitation, air temperature and pressure forecasts of the Chinese polar numerical weather forecasting system is evaluated using the observation data from the Great Wall Station in the Antarctica from February 2018 to November 2019. The results show that the forecast wind speed error is in normal distribution and the mean error tends to become larger as the forecast wind speed increases. The results of short-term forecast is better than that of the long-term forecast. There is a growing probability that the forecast wind speed is larger when it is greater than level 6. The predicted precipitation is about twice that of the observed precipitation, and the characteristics of error distribution are consistent in terms of time and each precipitation level. The prediction of air temperature and air pressure can reflect the observed weather system. However, there is an obvious mean value deviation with a lower temperature of 2.1 °C and a high air pressure of 2.4 hPa.

Key words: Great Wall Station; numerical weather forecasting system; statistical verification; polar region