

孙秀宝, 任国玉, 任芝花, 等. 2013. 风场变形误差对冬季降雪测量及其趋势估算的影响 [J]. 气候与环境研究, 18 (2): 178–186, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2012.11133. Sun Xiubao, Ren Guoyu, Ren Zhihua, et al. 2013. Effects of wind-induced errors on winter snowfall and its trends [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 18 (2): 178–186.

# 风场变形误差对冬季降雪测量及其趋势估算的影响

孙秀宝<sup>1,2</sup> 任国玉<sup>2</sup> 任芝花<sup>3</sup> 沈志超<sup>1,2</sup>

1 南京信息工程大学大气科学学院, 南京 210044

2 中国气象局气候研究开放实验室, 国家气候中心, 北京 100081

3 国家气象信息中心, 北京 100081

**摘要** 利用 71 个气象站 1960~2009 年共 50 年的冬季逐日降水、风速和天气现象资料, 以及 3 个站降水对比观测试验数据, 对东北地区降雪测量记录的风场变形误差进行了评价和订正, 并在此基础上分析了风场变形误差对研究区降雪量变化趋势估算结果的影响。结果如下: 1) 东北地区冬季降雪量台站观测记录普遍被低估, 全区观测的冬季平均降雪量为 15.1 mm, 而风场变形误差订正后冬季平均降雪量为 22.5 mm。各站绝对误差介于 1.1~19.4 mm, 平均绝对误差为 7.5 mm, 各站相对误差介于 11.8%~50.8%, 平均相对误差为 34.1%。2) 主要由于受气象台站观测环境改变导致的风速减弱现象影响, 东北地区大部分台站雨量计对降雪的捕获率有所增加, 冬季降水观测中的风场变形误差减小, 引起实测的降雪量变化趋势估算值被高估。风场变形误差订正前, 东北地区近 50 年的冬季降雪量变化趋势为  $0.4 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ , 而风场变形误差订正后, 冬季降雪量变化趋势为  $0.1 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。3) 东北南部地区台站受风场变形误差影响尤其明显, 冬季实测的降雪量变化趋势偏高更大, 订正后和订正前趋势差值为  $-1 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ , 即订正前冬季降雪量变化趋势被高估程度达到了 64.3%。

**关键词** 降雪 降水量 风速 误差 气候变化 中国东北

文章编号 1006-9585 (2013) 02-0178-09

中图分类号 P467

文献标识号 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.11133

## Effects of Wind-Induced Errors on Winter Snowfall and Its Trends

SUN Xiubao<sup>1,2</sup>, REN Guoyu<sup>2</sup>, REN Zhihua<sup>3</sup>, and SHEN Zhichao<sup>1,2</sup>

1 School of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 Laboratory for Climate Studies, China Meteorological Administration, National Climate Center, Beijing 100081

3 National Meteorological Information Center, Beijing 100081

**Abstract** Datasets of daily precipitation, wind speed, and weather phenomena of 71 stations during 1960–2009 and experimental observations of precipitation from three stations are used to estimate wind-induced errors in winter snowfall records over northeastern China, and to analyze the effects of wind-induced under-catch on long-term winter snowfall trends. The results show that winter snowfall is generally undervalued. Although the region's average annual snowfall was measured at 15.1 mm, the corrected snowfall was 22.5 mm, which indicates an average error of 7.5 mm, or relative error of approximately 34.1%. In recent years, the gauge catch rate has increased due to the weakening of surface wind speed resulting from urbanization and micro-environmental change surrounding the stations, which have led to an overestimate of winter snowfall trends in the study region. This analysis shows a 50-year linear trend of winter snowfall of  $0.4 \text{ mm}/10 \text{ a}$  when original precipitation data are included and a long-term trend of winter snowfall at  $0.1 \text{ mm}/10 \text{ a}$  when adjusted data are used. The effect of wind-induced error on the estimates of winter snowfall trends is particularly

收稿日期 2011-08-16 收到, 2012-12-28 收到修定稿

资助项目 国家科技部公益性行业(气象)科研专项 GYHY201206012

作者简介 孙秀宝, 男, 1986 年出生, 硕士, 从事气候变化研究。E-mail: sun\_2005009@126.com

通讯作者 任国玉, E-mail: guoyoo@cma.gov.cn

significant in the southern part of the study region, with an overestimate for long-term trends reaching  $-1$  mm/10 a, or approximately 64.3% in terms of relative bias.

**Keywords** Snowfall, Precipitation, Wind speed, Error, Climate change, Northeast China

## 1 引言

降水是表征一个地区气候特征和气候变化的重要参数。降水观测资料广泛应用于气候变化分析、气候预测和陆地水循环等研究中。因此,气象台站降水观测资料的准确性和代表性问题就是开展相关研究、业务首先需要解决的。

导致降水观测误差的原因是多方面的,其中风场变形误差是降水误差中最主要的原因之一。由于雨量计器口上方风场的改变引起的雨滴(雪花)下落轨迹的偏移,以及雨量计摆放或设计上的缺陷,现有气象观测站测量的降水量普遍比实际降水量偏低。风场变形误差在中高纬度地区冬季降雪情况下更为明显(Yang et al., 1998, 1999)。

降水测量的风场变形误差很早以前就引起了研究者的关注,但由于各国雨量计型号、安装高度和观测规范的差异,这个问题始终没有得到很好的解决。通过对比观测试验,一些研究者获得了针对不同国家和地区的不同型号雨量计在不同风速下的捕获率,并发展了降水风场变形误差的订正方法(Sevruk, 1985; Goodison et al., 1998)。近年来,国内学者也通过对比观测试验,试图了解我国降水观测误差并寻求找到解决我国降水观测误差的方法(杨大庆等, 1988, 1989, 1990; 任芝花等, 2003, 2007; Ren and Li, 2007)。这些先期研究为深入评价全球陆地和中国地区降水观测误差及其对现有降水气候学和气候变化分析结果的影响奠定了良好的基础。

近年来,随着对近地面风速观测资料分析的深入,发现 20 世纪中期以来中国大陆地区国家基准气候站和基本气象站记录的平均风速和大风频率呈显著下降趋势(任国玉等, 2005; Guo et al., 2010; Jiang et al., 2010); 全球陆地平均风速也呈现明显下降趋势(Vautard et al., 2010; 赵宗慈等, 2011)。根据 Ding et al. (2007) 和叶柏生等(2008)前期分析,如果地面风速随时间减小,会导致普通雨量计的捕获率提高,进而引起实际观测的降水量出现一定变化。因此,至少在中国大陆以及全球其他陆地区域,大部分气象台站观测的近地面平均风速普遍下降趋势可能已经引起气象台站雨量计捕获率增加,降

水测量中的风场变形误差减小,并进而影响对降水量特别是冬季降雪量长期趋势变化的估计(Førland and Hanssen-Bauer, 2000; Ding et al., 2007; 叶柏生等, 2008; 任国玉等, 2010)。

近年研究还发现,近地面平均风速的大幅下降在很大程度上与人为因素造成的局地观测环境改变和城市化影响有关(刘学锋等, 2009; 张爱英等, 2009)。因此,风速导致的降水量变化趋势估计偏差,尽管可能与大尺度大气环流演化有一定联系,但更主要的原因还是人为因素引起的一种观测资料系统性偏差。但不论是自然还是人为因素影响,从气候变化研究的角度来看,近地面平均风速下降引起的降水量测量误差变化都是“虚假”现象,需要加以客观评价和订正(任国玉等, 2010)。

现有对我国降水观测误差的评价和订正研究,主要是基于天山乌鲁木齐河源对比观测试验结果(Ye et al., 2004; Ding et al., 2007; 叶柏生等, 2007, 2008)以及全国 30 个标准雨量站对比观测结果(任芝花等, 2003; Ren and Li, 2007)开展的。虽然乌鲁木齐河流域对比观测试验考虑了多种天气现象,对于天山高山区域甚至西北其他山地区域具有较好的代表性,但试验数据不一定完全适合中国其他地区,应用据此获得的订正方法到我国其他地区可能会产生一定误差。20 世纪 90 年代,中国气象局曾在全国 30 个台站开展了普通雨量计与坑式雨量计的对比观测试验,获得了多年连续试验数据。这些工作为今后系统评价和订正我国风速等因素引起的降水观测误差奠定了基础。

本文运用东北地区 1992~1998 年 3 个站的对比观测试验结果,发展了一个新的适应于东北地区的冬季降雪量风场变形误差的订正方法,订正了全区 71 个站冬季日降雪量资料,并在此基础上进一步分析了风场变形误差对冬季区域降雪测量及其变化趋势估计的影响。

## 2 资料和方法

### 2.1 研究区域和资料

本文选取的是中国气象局组织的全国降水对比观测试验数据中的东北地区海伦、长春、宽甸 3 个站降水对比观测资料(对比观测试验站点分布见

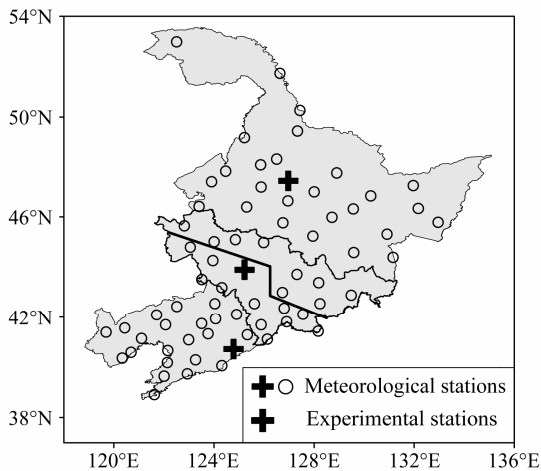


图1 研究区域、对比试验站点和气象站点分布以及分区界限

Fig. 1 Locations of study area, experimental stations, meteorological stations, and the two sub-regions classified based on varimax-rotated empirical orthogonal function (REOF) method

图 1)。资料来自国家气象信息中心保存的《中国降水测量误差及其订正资料集》(黎明琴等, 2000)。降水对比试验站采用 1 台坑式雨量计和 2 台台站用普通雨量计进行平行观测。坑式雨量计与其中 1 台普通雨量计间的安装距离约为 5 m, 2 台普通雨量计间的距离在 10~15 m 之间。坑式雨量计器口与地表面齐平, 周围是标准化设计的防溅网。试验中两台普通雨量计的使用可降低随机误差的影响(任芝花等, 2003; Ren and Li, 2007)。观测试验资料长度为 1992~1998 年共 7 年。试验观测获得的日降雪资料经过质量控制, 包括剔除缺测记录以及剔除吹雪、雨夹雪等天气现象时的记录。

区域常规气象观测资料, 在全国 560 站 1960~2009 年近 50 年逐日降水、风速和天气现象记录资料中, 根据序列长度不少于 50 年, 缺测不超过 5% 的原则, 并根据天气现象资料, 剔除了雨夹雪、降雨和雾凇等非降雪的记录, 最终选取东北地区 71 个台站(分布情况见图 1)。

考虑到东北区域内不同地区的降雪量变化趋势可能存在差异。为了更好地了解风场变形误差对各地区降雪量变化趋势的影响, 参考孙秀忠等(2010)对东北地区降雪的区划方法, 对全国冬季原始降雪观测资料做旋转经验正交函数(EOF)分析, 根据各站与载荷高值中心站相关程度并结合地理因素, 将东北地区分为北区和南区 2 个子区域(分区界限见图 1)。

## 2.2 风场变形误差形成原理和误差订正方法

降水观测误差包括微量损失、蒸发误差、沾湿误差以及风场变形误差。风场变形误差又称动力损失, 是造成降水观测误差的最重要原因之一。

目前, 对于降水测量中的风场变形误差的形成原理已经有较深入研究。在国内, 任芝花等(2003)根据 Mk2 雨量计风洞实验结果(Sevruk and Klemm, 1989), 分析风场变形误差形成原理主要为: 雨量计器口上方的风速显著大于周围环境场风速, 并且随着风速的增加风速的增量也加大。风速偏大导致了雨滴或者雪花下落时与地面的夹角变小, 雨滴或雪花呈飘逸状态, 或呈发散状下落, 从而引起雨量计收集到的降水量低于周围环境中的降水量。由于坑式雨量计器口与地面高度一致, 在最大程度上避免了仪器本身引起的风场结构变化, 可以认为其不受风场变形误差影响, 能够准确测量到各种风速条件下的降水量。

降水观测误差的基本订正方程为(Sevruk, 1985; Yang et al., 1999, 2001):

$$P_c = K(P_g + \Delta P_w + \Delta P_e + \Delta P_t), \quad (1)$$

其中,  $P_c$  为订正后的降水,  $P_g$  为雨量计观测到的降水量,  $\Delta P_w$  和  $\Delta P_e$  分别代表沾湿和蒸发损失,  $K$  为订正系数,  $\Delta P_t$  为微量降水。

由于本文只研究动力损失项即风场变形误差对降水的影响, 则订正方程可简化为:

$$P_c = K P_g, \quad (2)$$

其中订正系数  $K=1/CR$ , 此处  $CR$  是指普通雨量计降水捕获率, 降水捕获率是指气象台站现用雨量计测得降水量与对比观测期间坑式雨量计测得的“真实”降水量的比值。由于普通雨量计收集到的降水量较“真实”值偏低, 所以降水捕获率  $CR \leq 100%$ ,  $K$  则大于或等于 1。当风速为 0 时  $K=1$ , 当风速大于 0 时  $K > 1$ 。近几十年来, 由于风速存在明显趋势变化(任国玉等, 2005),  $K$  也将随时间改变。如果风速随时间变弱, 则  $K$  随时间变小, 反之则  $K$  随时间变大。 $K$  随时间的变化必然会影响到  $P_c$  的趋势。

获得风场变形误差的订正方法只需确定降水捕获率  $CR$  与风速的关系。降水捕获率与观测场附近风速和降水类型、雨量计类型等相关(Yang et al., 1995; 叶柏生等, 2007), 可以直接利用对比观测试验数据, 获得普通雨量计降水捕获率与风速之间的关系。

Yang et al. (1999) 指出, 通常情况下通过试验结果获得风速与捕获率之间的关系时, 降雪量较小

的降雪事件会对结果产生虚假影响。所以本文在确定东北地区风速和降雪捕获率的关系时，采用试验中 78 次降雪量大于或等于 1.0 mm 的降雪事件记录，剔除了降雪量小于 1.0 mm 的降雪记录。图 2 表示 3 个对比观测站 1992~1998 年降雪量所对应的 10 m 高度日平均风速与普通雨量计降雪捕获率的关系。

根据试验数据拟合，得到冬季普通雨量计降雪捕获率与降雪日平均风速的关系式为

$$CR_{\text{snow}} = \exp(-0.12W_s) \times 100, P_s \geq 1.0 \text{ mm}, W_s < 6.5 \text{ m/s}, n=78, R^2=0.50 \quad (3)$$

其中， $CR_{\text{snow}}$  为普通雨量计相对于坑式雨量计的降雪捕获率； $P_s$  为普通雨量计观测到的降雪量； $W_s$  为 10 m 高度日平均风速； $n$  为统计样本数， $R$  为相关系数。

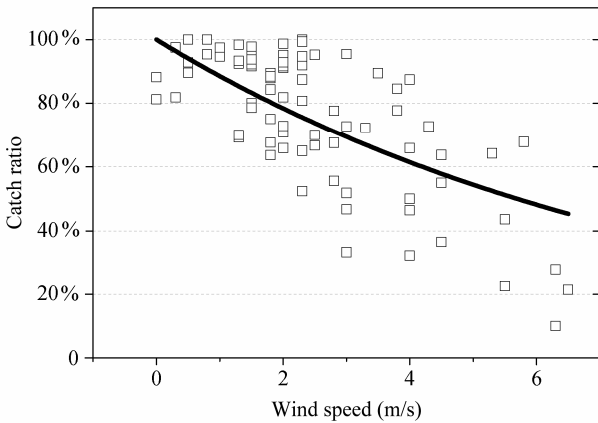


图 2 日平均风速与普通雨量计捕获率之间的关系(降雪量大于 1.0 mm)  
Fig. 2 The relationship between daily wind speed and the gauge catch rates of snow (snowfall more than 1.0 mm)

### 2.3 统计分析方法

本文在降雪量测量误差订正的基础上，进一步对比分析了东北地区全区和分区情况下订正后与订正前冬季平均降雪量的长期趋势变化。东北地区降雪量及其误差的区域平均值是 71 个站的简单算术平均，其线性趋势则根据各自时间序列的一元线性回归方程斜率获得。线性趋势的显著性采用的是  $t$  检验 (魏凤英, 2009)。

## 3 结果分析

### 3.1 风场变形误差对降雪测量的影响

利用 2.2 节中所述订正方法对近 50 年东北地区 71 站冬季逐日降雪资料进行了订正。根据订正前后的资料比较，分析了东北地区台站观测降雪量的风场变形误差。降雪绝对误差是指订正前 (实测) 降雪量与订正后降雪量差值的绝对值，相对误差是指绝对误差与订正后降雪量的百分比值。

从图 3a 中可以看出，绝对误差的大值区主要位于黑龙江东部和辽宁的东南部地区，对应冬季降雪量较大区域。图 3b 显示的是相对误差的空间分布，相对误差较大的区域集中在黑龙江省东北部和辽东半岛南部，从整个区域来看多数台站相对误差均大于 20%，说明东北地区冬季降雪量观测记录受风场变形影响产生的相对误差非常明显。

对东北地区冬季以及逐月降雪量误差大小的统计结果见表 1。整个区域订正后和实测的冬季平均降雪量分别为 22.5 mm 和 15.1 mm。但各站降雪绝对

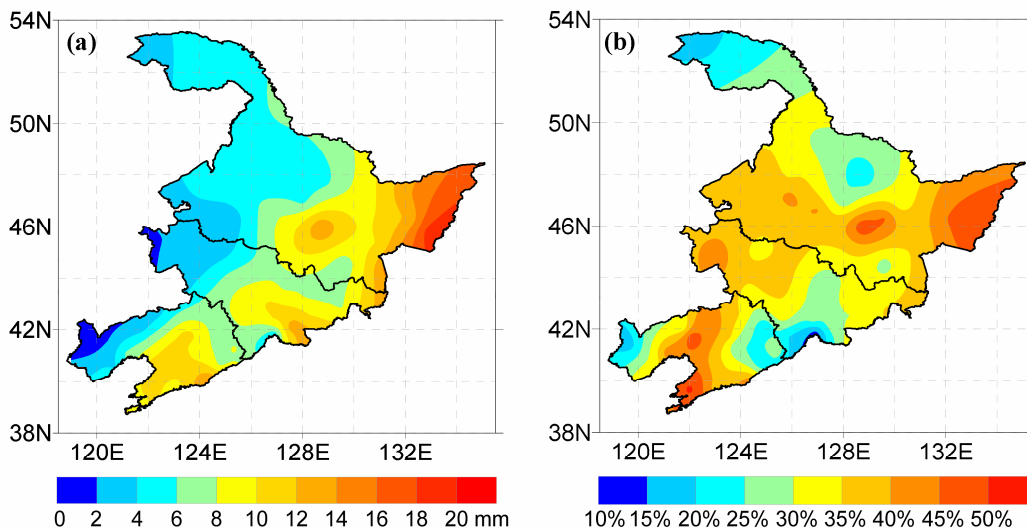


图 3 东北地区冬季实测降雪量 (a) 绝对误差和 (b) 相对误差的空间分布

Fig. 3 Spatial distributions of the absolute errors and relative errors of winter snowfall measurements in Northeast China

误差差异较大，冬季平均误差从 1.1~19.4 mm 不等，平均值为 7.5 mm；相对误差各站也不尽相同，最大的可达 50.8%，均值达到了 34.1%。从各月平均的绝对和相对误差来看，各月比较一致，月份之间差异较小。

表 1 东北地区近 50 年订正前后降雪量以及风场变形误差  
Table 1 Snowfall amount and wind induced error in recent 50 years in Northeast China

	实测平均降雪量		订后平均降雪量		绝对误差		相对误差		平均绝对误差	
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(%)	(%)	(mm)	(%)
12月	5.8	8.5	0.2~6.5	9.7%~49.4%	2.7	32.7%				
1月	4.7	7.0	0.8~11.0	10.3%~53.8%	2.3	33.2%				
2月	4.6	7.0	0.6~7.1	14.1%~52.1%	2.5	36.4%				
冬季	15.1	22.5	1.1~19.4	11.8%~50.8%	7.5	34.1%				

### 3.2 风场变形误差对降雪量变化趋势的影响

根据订正前后的降雪资料，进一步分析评价了风场变形误差对东北地区冬季降雪量变化趋势估计值的影响。方法是：分别计算风场变形误差订正前后 1960~2009 年冬季降雪量序列的线性趋势值，获得订正后减订正前降雪量线性趋势的差值，分析订正前（即实际测量）降雪量变化趋势被高估或低估的程度。趋势偏差是指订正后与订正前趋势差值的绝对值与订正后趋势绝对值的百分比值。

图 4 是订正前后冬季降雪量线性变化趋势差值（订正后减订正前）的空间分布情况。趋势差值大于 0 表示该区域实际观测的降雪量变化趋势被低估了，反之则被高估。从图 4 中可以看出趋势差值大

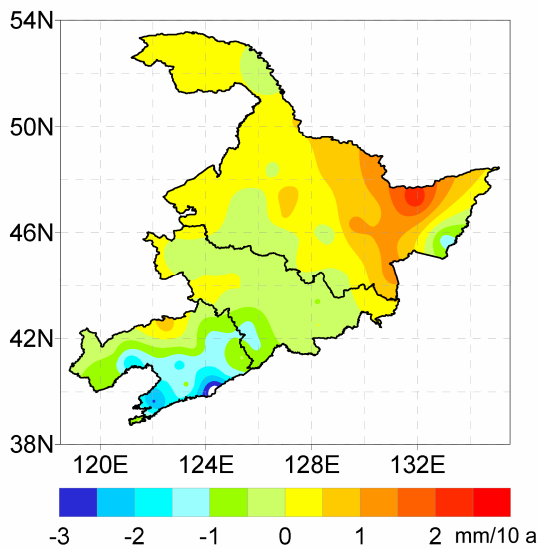


图 4 东北地区降雪量趋势差值的空间分布  
Fig. 4 Spatial distribution of snowfall trend differences in Northeast China

于 0 的台站主要位于黑龙江北部地区，其中黑龙江东北部较大，达到了  $1 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$  以上；另一方面，辽宁、吉林和黑龙江中部等地区实测的降雪量变化趋势被高估，订正后变化趋势有所减小，其中辽宁的大部分地区和吉林东南部订正前的降雪趋势被高估程度较大，绝对值一般也可达  $1 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$  以上。

从图 5a-c 可以看出，所有区域订正后的冬季降雪量都高于订正前降雪量，即订正后的气候均值增大了；近 50 年来北区的实测降雪量变化趋势被低估，但低估程度不明显；南区和整个区域冬季实测降雪量的变化趋势被高估，即整个区域的上升趋势被高估，南区的下降趋势绝对值被低估，其中南区下降趋势绝对值被低估程度较大；从整个区域来看实测降雪量有上升趋势，而订正后降雪量变化趋势趋于平缓，接近于 0。

从图 5 d-f 中可以看出 12 月订正前后趋势基本保持一致；1 月实测降雪量变化趋势在一定程度上被低估，但低估程度不明显；2 月订正后降雪量下降趋势明显大于实测的降雪量下降趋势，实测的降雪量下降趋势被高估程度较明显。

表 2 给出了东北各区域以及各月订正前后降雪量变化趋势以及趋势差值和偏差的大小。整个分析时期北区冬季实测降雪量变化趋势为  $1.2 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ，但订正后降雪量变化趋势为  $1.4 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ，订正后趋势值略有增加，相对增加量为 14.3%；南区冬季实测降雪量变化趋势为  $-0.6 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ，订正后降雪量变化趋势为  $-1.6 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ，比实测趋势下降  $1 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ，相对减少量为 64.3%；从整个区域来看，冬季实测降雪量变化趋势为  $0.4 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ，订正后的趋势为  $0.1 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ，

表 2 各区域以及各月降雪量变化趋势以及趋势差值和趋势偏差

Table 2 The linear trends of snowfall amounts for regions and months and the trend differences between aft-corrected and original data and relative bias

	实测趋势 [mm·(10 a) <sup>-1</sup> ]	订正后趋势 [mm·(10 a) <sup>-1</sup> ]	订正后与订正前趋势差值	
			[mm·(10 a) <sup>-1</sup> ]	趋势偏差
冬季全区	0.36	0.07	-0.29	414.3%
冬季北区	1.2**	1.4*	0.2	14.3%
冬季南区	-0.56	-1.57	-1.01	64.3%
全区 12 月	0.20	0.16	-0.04	25.0%
全区 1 月	0.45	0.57	0.12	21.1%
全区 2 月	-0.29	-0.66	-0.37	56.1%

\*为通过 0.1 的显著性检验，\*\*为通过了 0.05 的显著性检验。

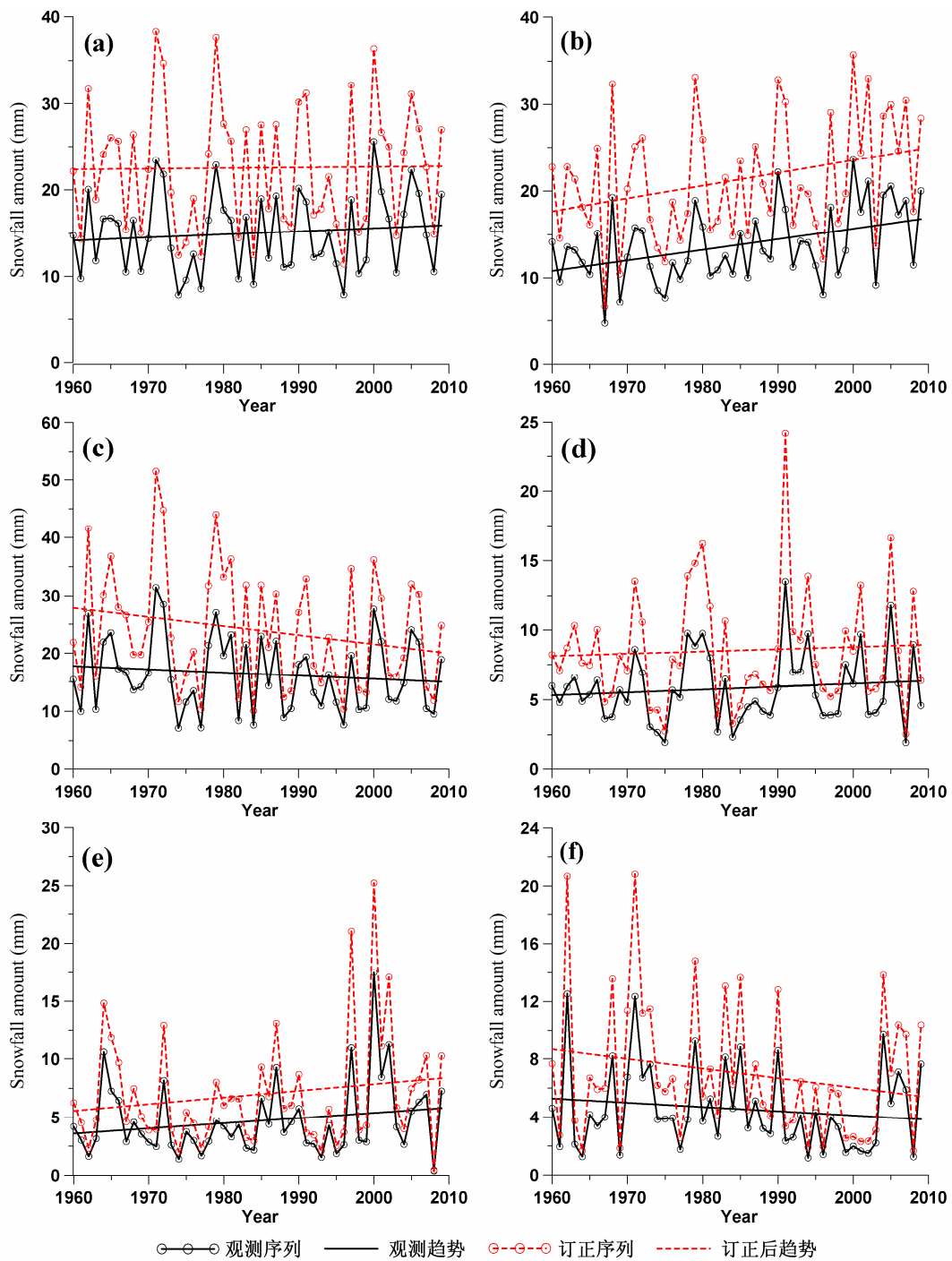


图5 东北地区订正前后降雪量时间序列及其线性趋势：(a) 全区；(b) 北区；(c) 南区；(d) 12月；(e) 1月；(f) 2月

Fig. 5 Winter snowfall amount and the linear trends of the aft-corrected data (red) and original data (black): (a) All regions; (b) northern part; (c) southern part; (d) Dec; (e) Jan; (f) Feb

趋势估计值减少了  $0.3 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ，订正后降雪量的长期上升趋势变得更微弱。

表 2 也给出了风场变形误差对东北逐月降雪量变化趋势估计的影响。从逐月的统计来看，各月存在一定的差异。对于整个区域，12 月和 2 月实测的降雪量变化趋势被高估，而 1 月的实测趋势被低

估，其中 2 月的实测趋势被高估程度最为明显，趋势的偏差达到了 56.1%。

## 4 讨论

我国现有的降水资料风场变形误差订正方法

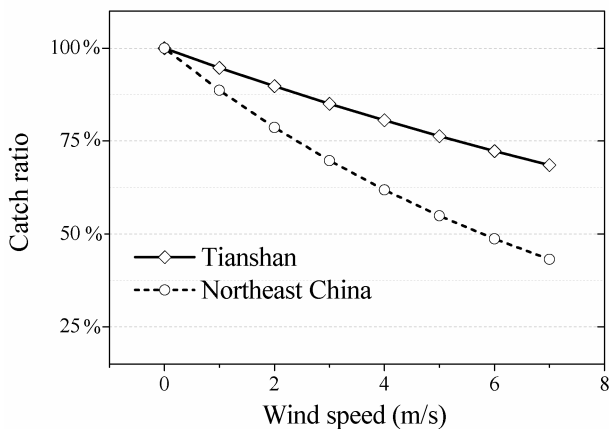


图 6 天山乌鲁木齐河源对比观测试验与东北地区对比观测试验结果中风速与普通雨量计捕获率关系曲线

Fig. 6 Relationships of the gauge catch rates and daily wind speeds for Northeast China and Tianshan Urumqi River

是在天山乌鲁木齐河源对比观测试验基础上发展的(杨大庆等, 1989, 1990)。本文通过分析东北地区 3 个地点对比观测试验结果, 得到了日平均风速与普通雨量计捕获率的统计关系。对于降雪量较大的降雪事件, 本文获得的日平均风速与普通雨量计降雪量捕获率的关系与杨大庆等(1990)得到的结果相近, 但在数值上有一定差别。

通过两处对比观测试验发展的风速与普通雨量计捕获率关系曲线比较发现: 东北地区试验得到的结果随日平均风速增加, 冬季普通雨量计降雪捕获率下降更快; 在同样风速情况下, 本文得到的降雪捕获率一般更低(图 6)。造成这一差异的主要原因, 除了样本数量和试验区域的差异以外, 用于得到风速与捕获率关系的降雪量数据最小值取值不同, 以及观测仪器的差异可能也是重要的。

本文所用的 3 个对比观测站资料相比于天山乌鲁木齐河源对比观测试验资料, 站点数和试验时间长度都有所增加。东北地区 3 个对比观测站分别位于黑龙江、吉林和辽宁省, 其中 2 个处在平原地区, 1 个在东部山地, 对全区地形和气候特征具有较好的代表性。对比试验观测资料长达 7 年, 基本满足了针对整个区域的研究需要。因此, 本文获得的分析结果是有一定说服力的。但是, 由于对比观测试验站点数仍然偏少, 对比试验观测长度也还有限, 目前无法逐站开展针对当地特点的风场变形误差订正。今后还需要开展更多、更长时间的对比观测试验和深入的科学研究。

本文对降水测量记录的订正只考虑了风场变

形误差, 并未考虑沾湿损失、蒸发损失和微量损失对降雪测量的影响。已有的基于对比观测试验的误差分析表明, 我国全国平均的降水量蒸发误差可认定为 0, 风场变形误差则达到 10.97%, 沾湿误差为 6.79% (任芝花等, 2003; Ren and Li, 2007)。尽管风场变形误差是最大的观测误差, 但沾湿误差也不容忽视。特别是对于水资源评价, 降雪或降水观测的沾湿误差应该得到进一步重视。但本文的主要目的不是单纯确定冬季降雪测量的误差, 而是分析评价降雪观测误差对冬季降雪量长期变化趋势估计的系统影响。虽然沾湿误差的影响也较大, 但其随时间的变化较小, 不像风场变形误差那样随时间出现显著系统变化, 因而也不会对降雪量变化趋势估计值造成明显影响。

本文关于风场变形误差对降雪量变化趋势估算影响分析结果表明, 东北地区特别是东北南部区域, 由于过去 50 年内多数台站近地面平均风速明显减小(任国玉等, 2005; Jiang et al., 2010), 风速引起的冬季降雪观测误差持续降低, 导致台站实际观测记录的降雪量变化趋势被高估了, 即观测的长期正趋势偏大, 负趋势绝对值偏小。这一现象在 Ding et al. (2007) 的研究中已经被指出。但东北北部区域风场变形误差订正前后降雪量变化趋势的差异并不明显, 虽然订正前实测降雪量变化趋势有被低估的问题, 但低估程度却并不明显。因此, 进行风场变形误差订正后, 东北地区冬季降雪量变化趋势比原来有较明显的降低。过去利用未订正资料研究东北地区冬季降雪量变化, 其获得的趋势估算值普遍有偏高现象。

## 5 结论

本文利用降雪对比观测试验结果, 得到了针对东北地区降雪资料风场变形误差的订正方法, 并在此基础上分析风场变形误差对降雪量气候均值和长期气候变化趋势估计值的影响, 得到以下结论:

(1) 东北地区冬季降雪量台站实测观测记录普遍被低估, 全区目前实测的冬季平均降雪量为 15.1 mm, 而风场变形误差订正后冬季平均降雪量为 22.5 mm。各站绝对误差介于 1.1~19.4 mm, 平均绝对误差为 7.5 mm; 各站相对误差介于 11.8%~50.8%, 平均相对误差为 34.1%。冬季各月的绝对和相对误差比较平均, 月份之间差异较小。

(2) 对实测和订正后降雪量长期变化趋势对比分析表明, 主要由于受气象台站附近观测环境改变导致的地面风速减弱趋势影响, 东北地区大部分台站雨量计对降雪的捕获率有所增加, 冬季降水量观测中的风场变形误差减小, 引起降雪量的长期变化趋势估算值偏高。东北地区近 50 年实测的冬季降雪量变化趋势为  $0.4 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ , 而风场变形误差订正后全区平均冬季降雪量变化趋势为  $0.1 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。

(3) 东北南部地区台站平均地面风速减小尤其明显, 冬季降雪量变化趋势估算值偏高更大, 订正后和订正前趋势差值达到了  $-1 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ , 实测的变化趋势被高估程度达到 64.3%。而北部地区变化趋势则被低估, 由于订正前后趋势差异并不明显, 因而被低估程度较小。

(4) 从逐月的分析结果来看, 冬季各月风场变形误差对实测降雪变化趋势估计的影响有一定差异。从整个区域来看, 12 月和 2 月实测降雪量变化趋势被高估, 1 月被低估, 其中 2 月的实测趋势被高估程度最为明显。

因此, 在开展降水特别是中高纬度地区冬季降雪气候变化分析时, 需要十分重视风场变形误差随时间变化对分析结果的影响, 要应用风场变形误差订正后的资料开展研究。

### 参考文献 (References)

Ding Y J, Yang D Q, Ye B S, et al. 2007. Effects of bias correction on precipitation trend over China [J]. *J. Geophys. Res.*, 112, D13116, doi:10.1029/2006JD007938.

Førland E J, Hanssen-Bauer I. 2000. Increased precipitation in the Norwegian Arctic: True or false? [J]. *Climate Change*, 46: 485–509.

Goodison B E, Louie, Yang D. 1998. WMO solid precipitation measurement intercomparison, final report? [R]. WMO/TD-NO.872, 212pp.

Guo H, Xu M, Qi H. 2010. Changes in near-surface wind speed in China: 1969–2005 [J]. *Int. J. Climatol.*, 31 (3): 349–358.

Jiang Y, Luo Y, Zhao Z C, et al. 2010. Changes in wind speed over China during 1956–2004 [J]. *Theor. Appl. Climatol.*, 99: 421–430.

黎明琴, 任芝花, 邹耀芳, 等. 2000. 中国降水测量误差及其订正资料集, 1~7 册 [M]. 北京: 中国气象局. Li Mingqin, Ren Zhihua, Zou Yaofang, et al. 2000. Dataset of Precipitation Measurement Error and Its Adjustment, Vol. 1–7 (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Administration.

刘学锋, 江滢, 任国玉, 等. 2009. 河北城市化和观测环境改变对地面风速观测资料序列的影响 [J]. *高原气象*, 28 (2): 433–439. Liu Xuefeng, Jiang Ying, Ren Guoyu, et al. 2009. Effect of urbanization and observation environment change on wind speed trend in Hebei Province,

China [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 28 (2): 433–439.

任国玉, 郭军, 徐铭志, 等. 2005. 近 50 年中国地面气候变化基本特征 [J]. *气象学报*, 63 (6): 942–956. Ren Guoyu, Guo Jun, Xu Mingzhi, et al. 2005. Climate changes of China's mainland over the past half century [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 63 (6): 942–956.

Ren Z H, Li M Q. 2007. Errors and correction of precipitation measurements in China [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 24 (3): 449–458.

任国玉, 封国林, 严中伟. 2010. 中国极端气候变化观测研究回顾与展望 [J]. *气候与环境研究*, 15 (4): 337–353. Ren Guoyu, Feng Guolin, Yan Zhongwei. 2010. Progresses in observation studies of climate extremes and changes in mainland China [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 15 (4): 337–353.

任芝花, 王改利, 邹凤玲, 等. 2003. 中国降水测量误差的研究 [J]. *气象学报*, 61 (5): 621–627. Ren Zhihua, Wang Gaili, Zou Fengling, et al. 2003. The research of precipitation measurement errors in China [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 61 (5): 621–627.

任芝花, 李伟, 雷勇, 等. 2007. 降水测量对比试验及其主要结果 [J]. *气象*, 33 (10): 96–101. Ren Zhihua, Li Wei, Lei Yong, et al. 2007. A comparison experiment of solid precipitation measurement and its primary results [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 33 (10): 96–101.

孙秀忠, 罗勇, 张霞, 等. 2010. 近 46 年来我国降雪变化特征分析 [J]. *高原气象*, 29 (6): 1594–1601. Sun Xiuzhong, Luo Yong, Zhang Xia, et al. 2010. Analysis on snowfall change characteristic of China in recent 46 years [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 29 (6): 1594–1601.

Sevruk B. 1985. Correction of precipitation measurements [R]. WMO/TD-NO.104, 13–23.

Sevruk B, Klemm S. 1989. Instruments and observing methods report, No. 39 [R]. WMO/TD-NO.313, 16–18.

Vautard R, Cattiaux J, Yiou P, et al. 2010. Northern Hemisphere atmospheric stilling partly attributed to an increase in surface roughness [J]. *Nature Geoscience*, 3: 756–761.

魏凤英. 2009. 现代气候统计诊断与预测技术 [M]. 北京: 气象出版社, 296pp. Wei Fengying. 2009. Diagnosis and Forecasting Methods of Modern Climatic Statistics [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 296pp.

Yang D Q, Goodison B E, et al. 1995. Accuracy of Tretyakov precipitation gauge: Results of WMO intercomparison [J]. *Hydrol. Processes*, 9 (8): 877–895.

Yang D Q, Goodison B E, Benson C, et al. 1998. Adjustment of daily precipitation at 10 climate stations in Alaska: Application of WMO intercomparison results [J]. *Water Resour. Res.*, 34 (2): 241–256.

杨大庆, 姜彤, 张寅生, 等. 1988. 天山乌鲁木齐河源降水观测误差分析及其改正 [J]. *冰川冻土*, 10 (4): 384–400. Yang Daqing, Jiang Tong, Zhang Yinsheng, et al. 1988. Analysis and correction of errors in precipitation measurement at the head of Urumqi River, Tianshan [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology (in Chinese)*, 10 (4): 384–400.

杨大庆, 康利泗, 张寅生, 等. 1989. 天山乌鲁木齐河源夏季降水观测中的动力损失及其修正 [J]. *气象*, 15 (1): 22–27. Yang Daqing, Kang Ersi, Zhang Yingsheng, et al. 1989. Analysis and correction of wind effects on precipitation measurements at the head of Urumqi River during summer



- [J]. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 15 (1): 22–27.
- 杨大庆, 施雅风, 康尔泗, 等. 1990. 天山乌鲁木齐河源高山区固态降水对比测量的主要结果 [J]. *科学通报*, 35 (22): 1734–1736. Yang Daqing, Shi Yafeng, Kang Ersi, et al. 1990. Results of solid precipitation measurement intercomparison in the alpine area of Urumqi River basin [J]. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 35 (22): 1734–1736.
- Yang D Q, Ishida S, Goodison B E, et al. 1999. Bias correction of daily precipitation measurements for Greenland [J]. *J. Geophys. Res.*, 105 (D6): 6171–6182.
- Yang D Q, Goodison B E, Metcalfe J, et al. 2001. Compatibility evaluation of national precipitation gage measurements [J]. *J. Geophys. Res.*, 106 (D2): 1481–1492.
- Ye B S, Yang D Q, Ding Y J, et al. 2004. A bias-corrected precipitation climatology for China [J]. *J. Hydrometeor.*, 5 (6): 1147–1160.
- 叶柏生, 杨大庆, 丁永健, 等. 2007. 中国降水观测误差分析及其修正 [J]. *地理学报*, 62 (1): 1–13. Ye Baisheng, Yang Daqing, Ding Yongjian, et al. 2007. A Bias-corrected precipitation climatology for China [J]. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 62 (1): 1–13.
- 叶柏生, 成鹏, 杨大庆, 等. 2008. 降水观测误差修正对降水变化趋势的影响 [J]. *冰川冻土*, 30 (5): 717–725. Ye Baisheng, Cheng Peng, Yang Daqing, et al. 2008. Effects of the bias-correction on changing tendency of precipitation over China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology* (in Chinese), 30 (5): 717–725.
- 张爱英, 任国玉, 郭军, 等. 2009. 1980~2006 年我国高空风速变化趋势分析 [J]. *高原气象*, 28 (3): 680–687. Zhang Aiyang, Ren Guoyu, Guo Jun, et al. 2009. Analyses of change trend of upper air wind speed over China during 1980–2006 [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 28 (3): 680–687.
- 赵宗慈, 罗勇, 江莹. 2011. 全球大风在减少吗? [J]. *气候变化研究进展*, 7 (2): 149–151. Zhao Zongci, Luo Yong, Jiang Ying. 2011. Is global strong wind declining? [J]. *Advances in Climate Change Research* (in Chinese), 7 (2): 149–151.