

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2017.05.003

# 风场变形误差对北京降水记录及变化趋势的影响

郑祚芳<sup>1,2</sup>, 任国玉<sup>2,3</sup>

(1. 中国气象局北京城市气象研究所, 北京 100089; 2. 中国地质大学环境学院大气科学系, 湖北 武汉 430074;  
3. 国家气候中心中国气象局气候研究开放实验室, 北京 100081)

**摘要:** 风场变形误差是降水观测误差最主要的来源之一, 其不仅影响观测值的准确性, 也可能导致长期降水变化趋势中隐含虚假成分。结合北京地区 20 个气象站点 1976—2015 年逐日观测资料及前人研究成果, 评估了风场变形误差对降水记录及其长期变化趋势的影响, 结果表明: ① 近 40 年来北京地区平均降水捕获率为 90%~95%, 上升趋势较明显, 但空间分布不均匀。城市化进程导致的风速减小是近 10 年来北京城、乡降水捕获率差异加大的主要原因。② 北京地区风场变形误差存在明显的年际及季节差异。近 40 年来年均降水量订正值 23.1 mm, 观测值较实际降水量年均低估了 4.0%。订正后年均降水强度从实测的 7.9 mm/d 增加到 8.3 mm/d, 年降水量的下降速率从 34.4 mm/10 a 变为 37.0 mm/10 a, 观测值将降水强度低估了约 4.8%, 且将降水量的下降趋势低估了约 7.0%。③ 对于强度越大的降水过程, 风场变形引起的观测误差也越明显。对比发现, 城市站点的风场变形误差年际振幅要大于乡村站点, 弱降水过程中乡村站点的低估比城市站点明显, 对大雨及以上强降水过程则相反, 城市站点的低估比乡村站更显著。

**关键词:** 风速; 捕获; 测量误差; 降水记录; 变化趋势; 北京

**中图分类号:** P49      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-6791(2017)05-0662-09

研究表明<sup>[1]</sup>, 现代地面气候观测资料中的系统偏差, 是导致中国大陆现有降水趋势分析中不确定性的最主要原因。降水观测误差的来源有多种类型, 主要包括系统性误差和非系统性误差。非系统性误差包括台站迁移、系统故障和人为观测误差等, 非系统性误差可以通过对资料的质量控制和均一化订正予以消除<sup>[2]</sup>。系统性误差则主要包括雨量计自身对风场的改变引起动力损失以及降水过程中的沾湿和蒸发损失等。与非系统性误差相比, 系统性误差不能通过数据对比等方法予以消除。系统性误差的存在会导致目前台站观测得到的降水量要小于实际降水量。合理评估降水观测误差, 对于正确认识降水变化趋势和原因具有重要意义<sup>[3-4]</sup>。

降水观测的系统性误差中, 风场变形误差被认为是最主要的来源之一。所谓“风场变形误差”, 指在有风的时候, 由于雨量计器口上方的风速要大于周围环境场风速, 局地风速偏大导致雨滴或者雪花下落时与地面的夹角变小, 雨滴或者雪花呈飘逸状态, 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降水量, 即降水捕获率下降导致的观测误差。这一现象已由风洞实验的动力学测试结果予以证实<sup>[5]</sup>。由于降雪时的雪花截面积大于降雨时雨滴的截面积, 其受风速水平方向的力大于雨滴, 因而降雪时雪花的飘逸状态更为明显, 即风场变形误差对降雪的影响大于降雨。YANG 等<sup>[6]</sup>和 Metcalf 等<sup>[7]</sup>通过对比观测试验分析表明, 风场变形误差对降雨量的影响为 2%~10%, 对降雪量的影响可达 10%~50%。国内针对降水变化及其影响因子的研究已有很多。任芝花等<sup>[5]</sup>、杨大庆等<sup>[8]</sup>较早分析了中国降水观测误差的来源, 并发展了一套基于单站降水量的简易订正方案。一些研究表明<sup>[9-10]</sup>, 中国不同气候区的降水对气候变化均具有较强的敏感性, 一般情况下, 年降水量越大的地方, 对气候变化的敏感性越小。叶柏生等<sup>[11]</sup>的分析还发现, 在长时间

收稿日期: 2016-11-18; 网络出版时间: 2017-10-01

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20171001.1422.006.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41575010; 41505102)

作者简介: 郑祚芳(1972—), 男, 湖北荆州人, 副研究员, 硕士, 主要从事区域气候及精细天气预报研究。

E-mail: zfzheng@163.com

尺度上,风速随时间的改变可能会导致降水变化趋势的改变。近年来,随着对近地面风速观测资料分析的深入进行,20世纪中期以来中国大陆地区国家基准、基本气象站记录的平均风速和大风频率的显著下降趋势已被证实<sup>[12]</sup>。有研究还指出<sup>[13]</sup>,大气环流形势变化导致的区域气温梯度和水平气压梯度不对称改变,是引起中国区域风速减弱的最可能原因。并且这种大范围平均风速下降现象还被认为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,其中城市化及其测站周围环境改变对近地面层风速减小的贡献为20%~30%<sup>[14-15]</sup>。这些研究表明,城市化效应对降水捕获率也有影响。因而,不论是从气候学分析和流域水资源评价角度,还是从气候变化检测、归因研究的角度来看,由近地面平均风速下降引起的降水测量误差变化都是“虚假”现象,正确评价风场变形误差,并采用适当方法对其予以订正,都是非常必要的。

本文应用北京地区20个常规气象站1976—2015年逐日气象观测资料,评价风场变形误差的分布特征及城、郊站点间的观测差异;在此基础上,探讨风场变形误差对降水记录及其长期变化趋势估计的影响。

## 1 资料和方法

本文所用资料主要包括1976—2015年北京地区20个常规气象站逐日降水量、平均风速和天气现象等序列,资料来源于北京市气象信息中心,已经过较严格的入库质量控制处理,但降水资料尚未进行雨量计风场变形误差订正。

降水观测误差的基本方程可表示如下:

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

式中: $P_c$ 为订正后的降水量(或称“真实降水量”),mm; $P_g$ 为台站观测到的降水量,mm; $\Delta P_w$ 、 $\Delta P_e$ 分别为沾湿和蒸发损失,mm; $\Delta P_l$ 为微量降水,mm;这三者所占比例很小。因而,实际降水量 $P_c$ 主要由观测降水量 $P_g$ 及订正系数 $K$ 所决定,订正系数 $K$ 则直接与降水捕获率 $C$ 成倒数关系(即 $K = C^{-1}$ )。可见,降水的观测误差主要由风场变形导致降水捕获率的变化所决定。

为了检验各种雨量计对降水的捕获率及研究修正系统偏差的方法,世界气象组织(WMO)于1960—1993年期间进行了3次国际对比试验。分析结果表明,降水量序列的风场变形误差因观测仪器和地域的不同具有很大差异<sup>[4]</sup>。按照WMO降水对比观测计划要求,国内也进行了相应观测试验,早期的试验主要在天山乌鲁木齐河源和北京大屯农业生态站进行。20世纪90年代中国气象局进一步在全国范围内选择30个基准气候站,建立了更为精确的观测雨量站网,进行了为期7年的对比观测试验。孙秀宝等<sup>[16]</sup>基于这些对比观测试验积累的资料,分别针对中国华北和东北地区的降水(雪)的观测误差订正方法,其中针对华北地区日均风速与普通雨量计捕获率之间的关系方程式为:

$$\begin{aligned} C_{\text{snow}} &= \exp(-0.075W_s) \times 100 \\ C_{\text{mix}} &= \exp(-0.040W_s) \times 100 \\ C_{\text{rain}} &= \exp(-0.017W_s) \times 100 \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $W_s$ 为10m高度的日平均风速,m/s。 $C_{\text{snow}}$ 、 $C_{\text{mix}}$ 和 $C_{\text{rain}}$ 分别为降雪、雨雪混合物及降雨的捕获率。由式(2)可见,雨量计捕获率 $C$ 与风速直接相关,风速越大则降水捕获率越小。其次,不同相态的降水捕获率随风速的变化也有差异。本文据此对北京地区20站的逐日降水资料进行了风场变形误差的订正处理。

气候变化分析中,城市化的影响亦已经成为一个需要重点关注的因素。在讨论城市化影响时,关键在于不同站点类型(如城市站和乡村站)的划分方法,不同方法得到的分类结果往往很不一致,导致气候趋势分析结果也不一致<sup>[17]</sup>。本文参考王君等<sup>[18]</sup>通过聚类分析得到的研究结果,将北京、昌平、丰台、门头沟、通州、海淀和石景山7站划分为城市站点,将怀柔、平谷和密云3站划分为郊区站点,其他站点则分别属于近郊站或山地站。

按照地面气候资料统计整编方法,本文降雨日指24h内累计降水量达到或超过0.1mm的日期,其中小雨和中雨日数分别指日累计降水量在0.1~9.9mm及10~24.9mm的天数。大雨以上日数定义为日降水量达

到或超过 25 mm 的天数。降水强度定义为本级别降水量累计值与降水日数的比值。此外,为比较订正前、后要素的差异,文中统计了年降水量、降水日数及降水强度的绝对误差和相对误差。其中绝对误差指观测值与订正值(真值)的差,相对误差为绝对误差与订正值的百分比值,表征误差值相对真值的偏离程度。

## 2 结果分析

### 2.1 降水捕获率的分布

图 1 为由式(2)计算得到的北京地区降水捕获率的空间分布。从近 40 年来的平均状况来看,各站点间差异明显,大部分站点的降水捕获率为 90%~95%,其中西北部山区降水捕获率较小,如佛爷顶站仅为 87.9%。西南部山区降水捕获率较大,其中霞云岭站达 95.8%。可见,地形及局地下垫面观测环境是影响降水捕获率的主要因子。北京西南部山区气象站多位于沟谷地形中,受局地地形影响,平均风速比较小,导致降水捕获率较大。而西北部山区站点如佛爷顶站不仅海拔更高(为 1 216.9 m),周边地形也较开阔,平均风速更大,降水捕获率也就更小。相对而言,北京几个城区站点间降水捕获率的差异较小,均介于 93%~94% 之间。

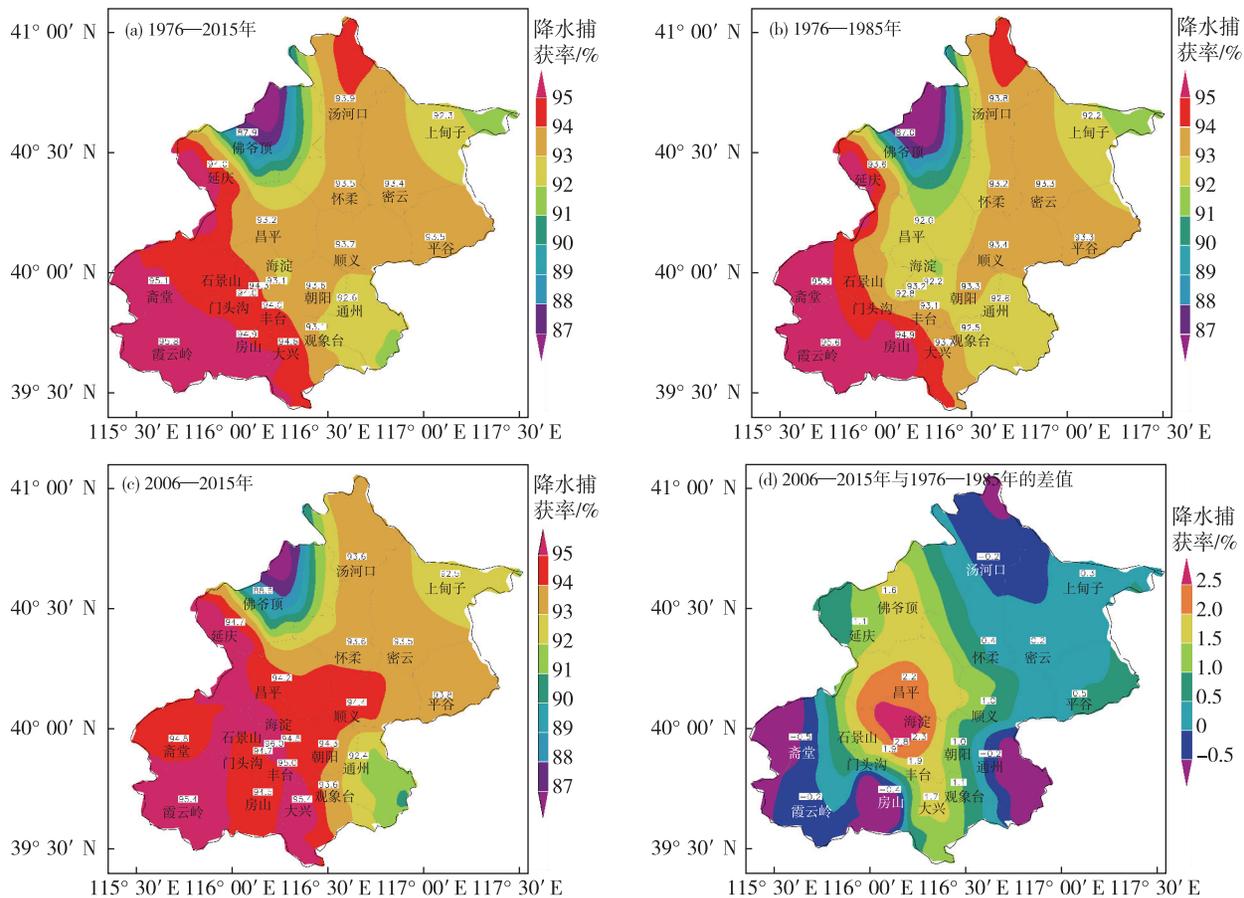


图 1 北京地区年平均降水捕获率空间分布

Fig. 1 Spatial distributions of average precipitation capture rate in Beijing area

比较北京城市化发展不同时期降水捕获率的空间分布可见,近 40 年来平均降水捕获率的分布与前 10 年(1976—1985 年)的形态比较接近,而与最近 10 年(2006—2015 年)差异较大,说明最近 10 年各站点降水捕获率变化较大。最近 10 年的降水捕获率与前 10 年相比,多数站点表现为增加趋势,其中增幅最明显的地方在北京城区及其北侧附近,中心增幅超过 2.5%,而西南部、西北部山区地带的降水捕获率相比前 10 年甚至

减少。统计得知,从前10年到最近10年,3个乡村站点的降水捕获率均值从93.3%上升到93.7%,平均增加0.4%,同期7个城区站点的降水捕获率均值从92.6%上升到94.3%,平均增加1.7%,增幅相比乡村站点要大。

由式(2)可知,站点日均风速越小,对应的降水捕获率就越大。最近10年来北京城区站点降水捕获率的高增幅与其平均风速的快速减弱有关。已有的研究表明<sup>[17]</sup>,城市化等人类活动导致城市站点风速的减弱速率明显要大于郊区站点。因此,城市化效应是导致近10年来北京城区站点降水捕获率快速增加的一个重要原因。这将导致在同样降水条件下,城市站由于风速更小,观测中受到风场变形误差的影响也更小。

从降水量捕获率随时间的变化趋势上来看,近40年来北京地区20站降水捕获率总体呈现上升趋势,平均每10年上升约0.25%(图2(a))。其中,降水捕获率在1990年前后还存在一个明显的“凸”型跃变。由于这一时期测风仪器发生了改变所导致(统一由EL型测风仪更换为EN型测风仪),在一定程度上影响了风速资料的准确性。目前关于风速资料的均一性研究仍处于尝试性阶段<sup>[19]</sup>,今后有必要进一步完善均一化方案,提高资料可信度。

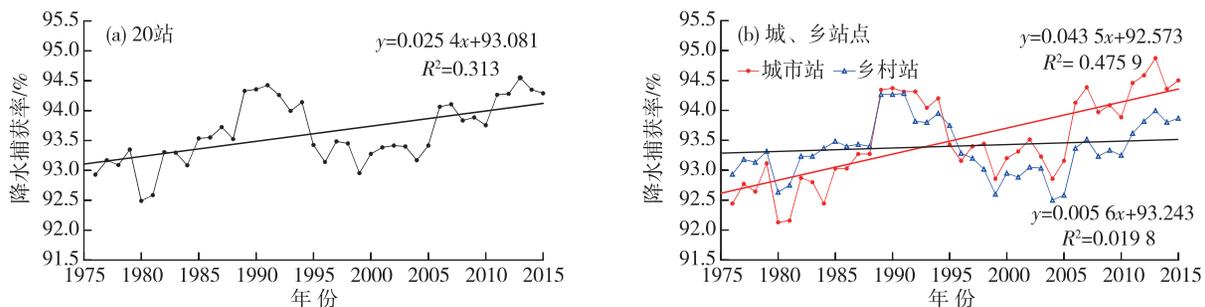


图2 北京地区年平均降水量捕获率

Fig. 2 Interannual variability of precipitation capture rate in Beijing area

统计得知,近40年来北京地区城、乡站点的降水捕获率平均值分别为93.4%和93.3%,二者间的差异并不明显,但城市站点的降水捕获率上升速率要明显大于乡村站点(图2(b)),其平均每10年约上升0.43%,乡村站点每10年仅上升约0.06%。具体来看,2005年之前,城、乡站点的降水捕获率差异并不大,在1990年之前,城市站点的降水捕获率甚至还弱于乡村站点。两者间的差异主要表现在2005年以后,城市站点的降水捕获率的上升幅度明显大于乡村站点。

计算表明,北京市1976—2015年期间城市化率(即城区人口占总人口的比例,数据来自北京统计信息网)与城市站点年平均风速之间的相关系数为0.74,超过0.001显著性水平,亦表明城市化进程导致的风速减小,是城市站点降水捕获率高于乡村站点的主要原因之一。

## 2.2 降水风场变形误差的城乡差异

由前文可知,不同类型的站点(城市站、乡村站)降水捕获率的长期变化趋势存在较大差异,为了进一步探讨风场变形误差对实测降水的影响,本文分别针对城市站点及乡村站点统计了近40年来各等级降水过程的绝对误差和相对误差(表1)。可见,对于总降水(包含所有量级的降水)而言,观测值相对于订正值在降水量及降水强度上都存在一定程度的低估,幅度为3%~4%,城、乡站点间差异不明显。但是,对于不同强度的降水过程,城、乡站点间的观测误差还存在差异。具体来看,对于小雨量级的降水,城市站点和乡村站点的观测误差表现一致,在降水量及降水强度上存在低估,而对于降水频数则存在高估,意味着某些本身为中雨的降水过程由于风场变形误差的存在被弱化为小雨过程。乡村站点的观测误差较城市站点更明显,其降水量和降水强度分别低估了1.41%和2.39%,约为城市站的3倍和2倍。对于中雨量级的降水,城、乡站点观测误差表现正好相反。无论是降水量、降水频数还是降水强度,城市站点都是高估的,高估程度分别约为3.17%、1.98%和1.15%,乡村站点则表现为一致性低估,低估程度分别约为2.72%、1.65%和1.12%。对于大雨及以上量级的强降水过程,城、乡站点观测误差表现一致。在降水量、降水频数及降水强度上,均为

低估。其中,对降水量的低估程度分别达到 9.25% 和 7.69%,对降水频数的低估也分别达到 7.24% 和 5.27%。总体上看,对于强度越大的降水过程,由风场变形引起的观测误差也越明显。

表 1 不同类型站点降水的观测误差

Table 1 Wind-induced error on precipitation in different types of stations

		降水量		降水频数		降水强度	
		绝对误差/mm	相对误差/%	绝对误差/d	相对误差/%	绝对误差/(mm·d <sup>-1</sup> )	相对误差/%
总降水	城市站	-23.11	-3.97	0	0	-0.25	-3.03
	乡村站	-24.92	-3.95	0	0	-0.33	-4.04
小雨	城市站	-0.47	-0.35	0.53	0.94	-0.04	-1.36
	乡村站	-1.41	-1.41	0.56	1.02	-0.06	-2.39
中雨	城市站	1.56	3.17	0.09	1.98	0.17	1.15
	乡村站	-2.74	-2.72	-0.22	-1.65	-0.18	-1.12
大雨以上	城市站	-24.72	-9.25	-0.50	-7.24	-0.92	-2.07
	乡村站	-20.70	-7.69	-0.33	-5.27	-1.02	-2.29

以上只是近 40 年来降水观测误差的平均态,由图 2 可知,降水捕获率还存在明显的年际差异,即观测误差也会有类似的存在,图 3 为城区站点观测误差年际分布。从降水量来看,小雨、中雨量级的年际误差有高估亦有低估,大雨及以上的较强降水过程则全表现为低估。小雨量级的观测误差变化幅度为-5.6%(2001 年)~16.6%(1992 年),中雨量级的观测误差振幅为-18.6%(1992 年)~32.1%(2010 年),而对强降水过程雨量低估幅度最大可达-29.0%(2001 年),不同强度降水误差的极值出现年份也不一致。对于降水频数而言,小雨过程存在一致性的高估,最多的年份可高估 4.8%(1992 年),这一数值约为多年平均值的 5 倍。中雨量级观测误差的年际差异很大,极端年份可低估 25.0%(1981 年),亦可能高估 33.3%(2001 年)。对强降水过程降水频数只存在低估,最大可达 25.0%(1986 年等)。在降水强度的观测误差上,小雨过程的误差振幅为-5.6%~11.2%,其多年平均值以低估为主。中雨过程的观测误差振幅为-11.0%~18.5%,多年平均值以高估为主。大雨以上强降水过程的观测误差振幅为-19.3%~12.2%,多年平均值低估明显。

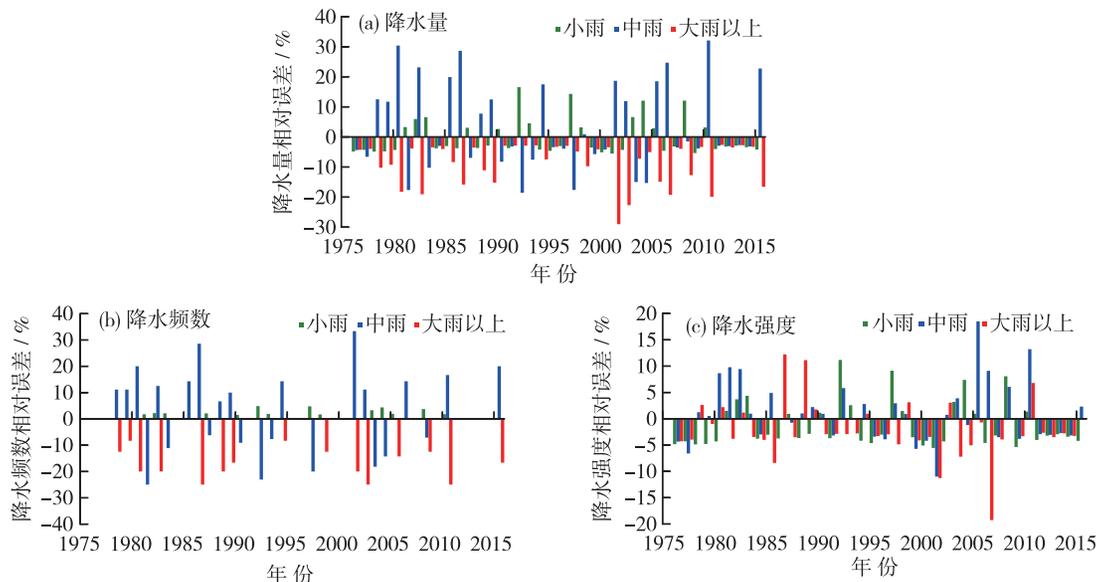


图 3 城市站点降水观测的相对误差分布

Fig. 3 Interannual variability of relative error between the observed and the revised of precipitation frequency and intensity at urban stations

作为对比,图 4 为乡村站点降水观测的相对误差年际变化。从降水量观测误差来看,年际差异依然明显,各量级降水量均以低估为主。其中小雨量级的观测误差变化幅度为-7.9%(1997 年)~8.5%(1996 年),中雨量级的观测误差振幅为-13.0%(1979 年)~24.3%(1980 年),强降水过程雨量低估幅度最大可达 24.9%

(2014 年)。降水频数上, 小雨过程在多数年份存在高估, 最多可高估 3.8% (1979 年)。中雨过程观测误差为 -16.7% (2003 年) ~ 16.7% (1980 年), 对强降水过程的低估亦可达 25.0% (2014 年)。在降水强度上, 小雨过程的误差为 -7.9% ~ 5.2%, 中雨过程的观测误差振幅介于 -8.4% ~ 6.9% 之间, 大雨以上强降水过程的观测误差振幅为 -10.4% ~ 7.5%, 振幅不如城市站点大。

由此可见, 城市站和乡村站降水观测的风场变形误差有较强的一致性, 但也存在差异。相较于乡村站而言, 城市站点降水风场变形误差的年际差异更大。对于小雨过程, 乡村站点的低估比城市站点明显; 对中雨量级的降水, 城市站点以高估为主, 乡村站点则表现相反, 以低估为主; 而对大雨及以上强降水过程, 城市站点的低估比乡村站点更明显。这意味着在城市区域, 更容易出现降水异常现象。

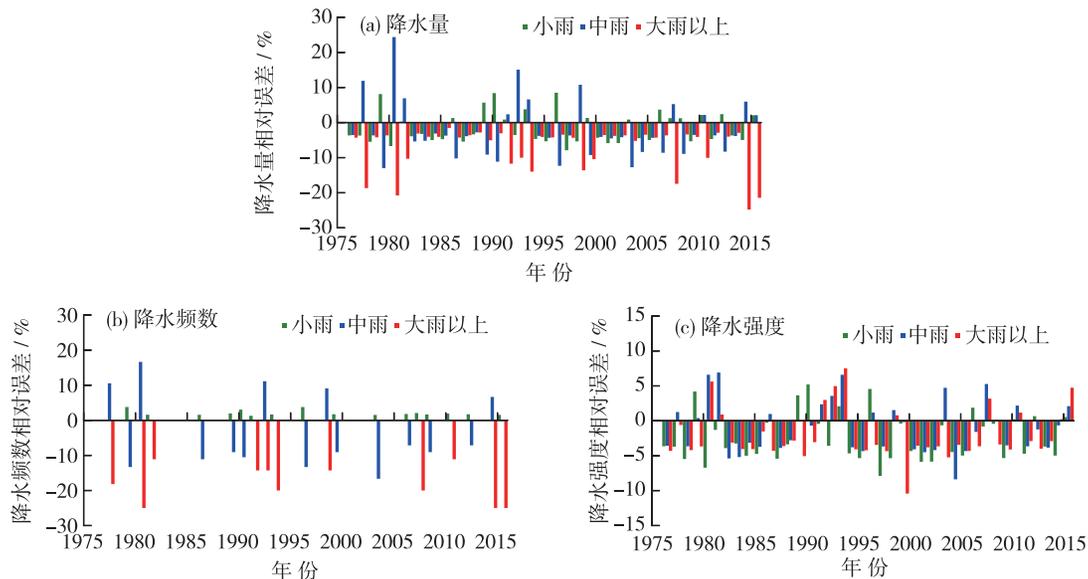


图 4 乡村站点降水观测的相对误差分布

Fig. 4 Interannual variability of relative error between the observed and the revised of precipitation frequency and intensity at rural stations

### 2.3 风场变形误差对区域平均降水变化趋势的影响

通过对比订正前、后的降水分布差异, 可进一步讨论风场变形误差对降水变化趋势的影响。图 5 为订正前、后北京地区 20 站平均降水量及其差值的年际分布。可见, 近 40 年来订正前、后降水量均表现为下降趋势, 线性速率分别为  $-34.4 \text{ mm}/10 \text{ a}$  和  $-37.0 \text{ mm}/10 \text{ a}$ , 趋势差值为  $2.6 \text{ mm}/10 \text{ a}$ 。进行风场变形误差订正后, 年均降水量的下降趋势更明显, 现有的观测值将这种下降趋势低估了约 7.0%。主要原因在于, 降水捕获率总体上随时间上升 (图 2), 意味着观测值与真值的差在逐渐缩小 (图 5(b)), 从而导致了观测值较实际降水量的下降趋势存在低估。

统计得知, 北京地区近 40 年来进行风场变形误差订正前、后年均降水量分别为 552.2 mm、575.3 mm, 年均订正量为 23.1 mm, 相对误差为 4.0%。考虑到观测降水量值还受到其他一些来源的误差 (如沾湿误差、蒸发等) 影响, 意味着现有的观测降水量值比实际降水量至少低估了 4.0%。进一步统计各季节的降水量分布可知, 春、夏、秋和冬季的观测值较实际值分别低估了约 4.4%、3.4%、3.7% 和 14.0%。其中冬季低估最明显, 其后依次为春季、秋季和夏季, 这种现象与平均风速在季节分布上差异一致。此外, 订正后年平均降水强度从  $7.9 \text{ mm}/\text{d}$  增加到  $8.3 \text{ mm}/\text{d}$ , 意味着目前观测得到的平均降水强度比实际值低估了约 4.8%。

图 6 为订正后北京地区不同量级降水量、降水频数及降水强度的年际分布。可见, 近 40 年来北京地区年均小雨、中雨和大雨以上过程雨量的线性趋势分别约为  $1.0 \text{ mm}/10 \text{ a}$ 、 $7.5 \text{ mm}/10 \text{ a}$  和  $-45.3 \text{ mm}/10 \text{ a}$ , 中雨及以下降水过程雨量有增加趋势, 年均总雨量的减少主要由大雨以上强降水过程所决定。对照订正前各量级雨量的分布可知, 目前的观测值将小雨过程雨量演变趋势高估了约 33%, 而将中雨、大雨以上降水过程雨量变化趋势低估了 22% 和 6.9%。

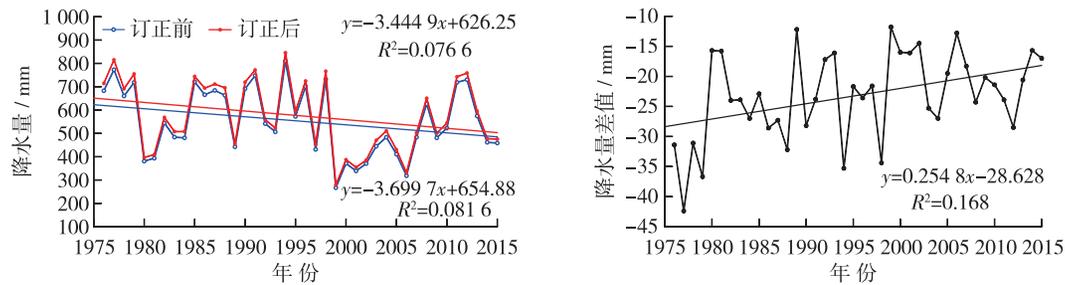


图5 北京地区订正前、后降水量的年际分布及其差值

Fig. 5 Interannual variability of precipitation of the observed and the revised in Beijing area

降水频数上,近40年来北京地区年均小雨、中雨和大雨以上降水日数分别为53.4 d、9.2 d和6.8 d。和订正前相比,小雨日数略有减少,平均每年减少0.5 d,中雨日数基本不变,大雨以上降水日数平均每年增加约0.5 d。变化趋势上,现有观测值将小雨、中雨和大雨及以上降水过程的变化趋势分别低估了2.6%、15.4%和5.5%。

降水强度上,近40年来小雨、中雨和大雨以上降水的平均降水强度分别为2.4 mm/d、16.2 mm/d和44.6 mm/d。与订正前相比,小雨、中雨过程雨强基本不变,大雨以上降水强度平均增加约1.0 mm/d。从变化趋势上看,现有观测值将小雨过程雨强的上升趋势高估约3.9%,同时也将中雨、大雨以上过程雨强的下降趋势高估了32.5%、15.6%。

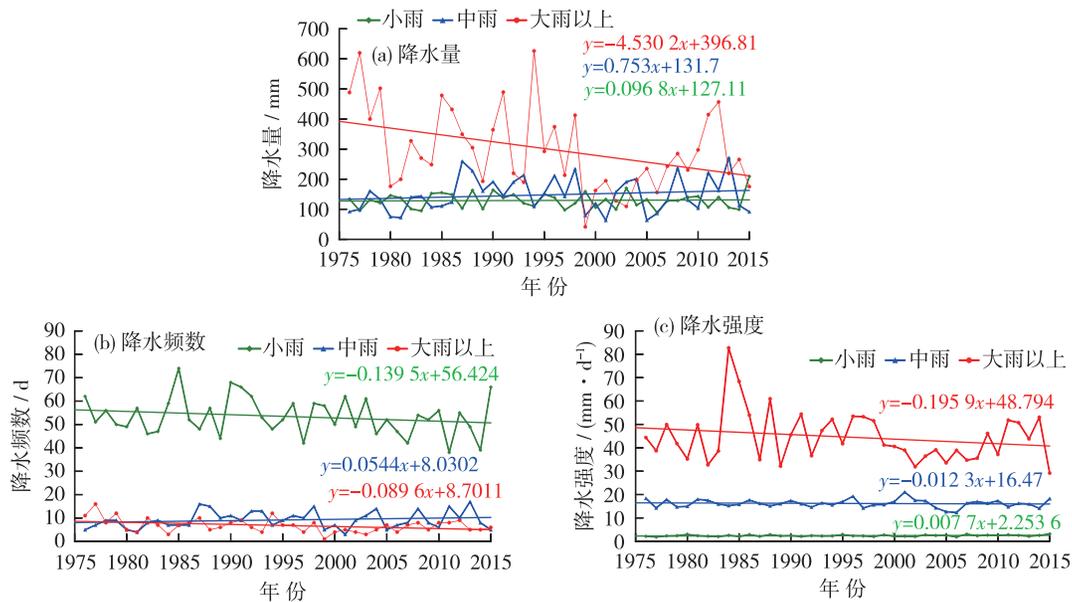


图6 订正后北京地区不同量级降水量、降水频数和降水强度分布

Fig. 6 Interannual variability of precipitation frequency and intensity of the revised

### 3 结 论

(1) 近40年来北京地区平均降水捕获率为90%~95%,降水捕获率空间分布不均匀。

(2) 北京地区降水捕获率总体呈现上升趋势,平均每10年上升约0.25%。城市站点捕获率上升速率要大于郊区站点,城市化进程导致的城区风速减小是近10年来北京城、乡降水捕获率差异加大的主要原因。

(3) 对于强度越大的降水过程,风场变形引起的观测误差也越明显。统计表明,弱降水过程中乡村站点的低估比城市站点明显,对大雨及以上强降水过程则相反,城市站点的低估比乡村站更明显。

(4) 近40年来,因风场变形误差导致观测值将北京地区年均降水量和降水强度分别低估了约4.0%和4.8%,且将降水量的长期下降趋势低估了约7.0%。且对不同季节、不同量级降水过程的雨量、雨频、雨强及其长期变化趋势,风场变形误差的影响也各有不同,部分甚至可高估30%以上。

#### 参考文献:

- [1] 任国玉,任玉玉,战云健,等. 中国大陆降水时空变异规律: II: 现代变化趋势[J]. 水科学进展, 2015, 26(4): 451-465. (REN G Y, REN Y Y, ZHAN Y J, et al. Spatial and temporal patterns of precipitation variability over mainland China: II: recent trends [J]. *Advances in Water Science*, 2015, 26(4): 451-465. (in Chinese))
- [2] 李庆祥. 我国气候资料均一性研究现状与展望[J]. 气象科技进展, 2016, 6(3): 67-74. (LI Q X. Climate data homogeneity studies in China: progresses and prospects[J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2016, 6(3): 67-74. (in Chinese))
- [3] LEGATES D R, WILLMOTT C J. Mean seasonal and spatial variability in gauge corrected, global precipitation[J]. *Int J Climatol*, 1990, 10: 111-127.
- [4] 任国玉,战云健,任玉玉,等. 中国大陆降水时空变异规律: I: 气候学特征[J]. 水科学进展, 2015, 26(3): 299-310. (REN G Y, ZHAN Y J, REN Y Y, et al. Spatial and temporal patterns of precipitation variability over mainland China: I: climatology [J]. *Advances in Water Science*, 2015, 26(3): 299-310. (in Chinese))
- [5] 任芝花,王改利,邹风玲,等. 中国降水测量误差的研究[J]. 气象学报, 2003, 61(5): 621-627. (REN Z H, WANG G L, ZOU F L, et al. The research of precipitation measurement errors in China [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2003, 61(5): 621-627. (in Chinese))
- [6] YANG D, ISHIDA S, GOODISON B E, et al. Bias correction of daily precipitation measurements for Greenland [J]. *J Geophys Res*, 1999, 105(6): 6171-6182.
- [7] METCALF J R, ISHIDA S, GOODISON B E. A corrected precipitation archive for the Northwest territories [C]//COHEN S. Proceedings of Sixth Biennial AES/DIAND Meeting on Northern Climate. Yellowknife: Environment Canada, 1994: 110-117.
- [8] 杨大庆,施雅风,康尔泗,等. 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, 1990, 35(22): 1734-1736. (YANG D Q, SHI Y F, KANG E S, et al. Results of solid precipitation measurement intercomparison in the alpine area of Urumqi River basin[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1990, 35(22): 1734-1736. (in Chinese))
- [9] 贺瑞敏,张建云,鲍振鑫,等. 海河流域河川径流对气候变化的响应机理[J]. 水科学进展, 2015, 26(1): 1-9. (HE R M, ZHANG J Y, BAO Z X, et al. Response of runoff to climate change in the Haihe River basin[J]. *Advances in Water Science*, 2015, 26(1): 1-9. (in Chinese))
- [10] 王国庆,张建云,刘九夫,等. 中国不同气候区河川径流对气候变化的敏感性研究[J]. 水科学进展, 2011, 22(3): 307-314. (WANG G Q, ZHANG J Y, LIU J F, et al. The sensitivity of runoff to climate change in different climatic regions in China [J]. *Advances in Water Science*, 2011, 22(3): 307-314. (in Chinese))
- [11] 叶柏生,成鹏,杨大庆,等. 降水观测误差对降水量变化趋势的影响[J]. 冰川冻土, 2008, 30(5): 717-725. (YE B S, CHEN P, YANG D Q, et al. Effects of the bias-correction on changing tendency of precipitation over China[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2008, 30(5): 717-725. (in Chinese))
- [12] JIANG Y, LUO Y, ZHAO Z, et al. Changes in wind speed over China during 1956—2004[J]. *Theor Appl Climatol*, 2010, 99: 421-430.
- [13] YOU Q, KANG S, FLUGEL W A, et al. Decreasing wind speed and weakening latitudinal surface pressure gradients in the Tibetan Plateau[J]. *Climate Research*, 2010, 42: 57-64.
- [14] 刘学锋,江莹,任国玉,等. 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, 2009, 28(2): 433-439. (LIU X F, JIANG Y, REN G Y, et al. Effect of urbanization and observation environment change on wind speed trend in Hebei province, China[J]. *Plateau Meteorology*, 2009, 28(2): 433-439. (in Chinese))
- [15] 张爱英,任国玉,郭军,等. 1980—2006年我国高空风速的变化趋势分析[J]. 高原气象, 2009, 28(3): 680-687. (ZHANG A Y, REN G Y, GUO J, et al. Change trend analyses on upper-air wind speed over China in past 30 years[J]. *Plateau Meteorology*, 2009, 28(3): 680-687. (in Chinese))
- [16] 孙秀宝,任国玉,任芝花,等. 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, 2013, 18(2):

- 178-186. (SUN X B, REN G Y, REN Z H, et al. Effects of wind-induced errors on winter snowfall and its trends [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2013, 18(2): 178-186. (in Chinese))
- [17] 储鹏, 江志红, 李庆祥, 等. 城市分类对中国城市化影响评估的不确定性分析[J]. *大气科学学报*, 2016, 39(5): 661-671. (CHU P, JIANG Z H, LI Q X, et al. Analysis of the effect of uncertainty in urban and rural classification on urbanization impact assessment[J]. *Trans Atmos Sci*, 2016, 39(5): 661-671. (in Chinese))
- [18] 王君, 严中伟, 李珍, 等. 近 30 年城市化对北京极端温度的影响[J]. *科学通报*, 2013, 58(33): 3464-3470. (WANG J, YAN Z W, LI Z, et al. Impact of urbanization on changes in temperature extremes in Beijing during 1978—2008 [J]. *China Sci Bull*, 2013, 58(33): 3464-3470. (in Chinese))
- [19] 曹丽娟, 鞠晓慧, 刘小宁. PMTF 方法对我国年平均风速的均一性检验[J]. *气象*, 2010, 36(10): 52-56. (CAO L J, JU X H, LIU X N. Penalized maximal F test for the homogeneity study of the annual mean wind speed over China [J]. *Meteorological Monthly*, 2010, 36(10): 52-56. (in Chinese))

## Effects of gauge under-catch on precipitation observation and long-term trend estimates in Beijing area \*

ZHENG Zuofang<sup>1,2</sup>, REN Guoyu<sup>2,3</sup>

(1. *Institute of Urban Meteorology, CMA, Beijing 100089, China*; 2. *Department of Atmospheric Science, School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China*; 3. *Laboratory for Climate Studies, National Climate Centre, CMA, Beijing 100081, China*)

**Abstract:** Among all of the uncertainties of precipitation records, the gauge under catch effect is one of the most important error sources. It not only affects the accuracy of the observational value and area-averaged precipitation calculation, but also leads to a false estimate of the long-term trends of the precipitation for any sites and regions. An accurate evaluation of the gauge under-catch effect is thus of great significance for understanding long-term change of precipitation and its possible causes and impacts. Based on observational data of daily precipitation and daily mean wind speed from 20 meteorological stations in Beijing area during the period 1976—2015, the effects of gauge under-catch on precipitation records and the estimates of the long-term precipitation trends were evaluated, and the urbanization effect on near-surface mean wind speed change was also discussed. The results showed that the mean values of precipitation catch rate ranged from 90% to 95% over last 40 years, but they had a significant upward trend and a heterogeneous spatial distribution with larger catch rates in urban area than in rural area. The urbanization process, which led to a lower wind speed in urban area, was the main reason for the observed difference of the under catch rates between the urban and rural stations especially after 2006. The effects of under catch differed among years and seasons significantly. In the past 40 years, the measured area-averaged annual precipitation was 552.2 mm, while the under catch adjusted area-averaged annual precipitation was 575.3 mm, with an average absolute error of 23.1 mm and an average relative error of 4.0%. The area-averaged precipitation intensity before and after the under catch adjustment were 7.9 mm/d and 8.3 mm/d respectively. The downward trends of the area-averaged annual precipitation for the past 40 years changed from  $-34.4 \text{ mm}/10 \text{ a}$  for the pre-adjusted data to  $-37.0 \text{ mm}/10 \text{ a}$  for the aft-adjusted data. Therefore, the original observed values underestimated the daily precipitation intensity by about 4.8% and the decreasing trend by 7.0%. Larger under catch errors occurred for the more intense precipitation processes, and the inter-annual variations of the under catch effects were generally greater at urban stations than those at rural stations. There existed a clear underestimate of precipitation record for the weak precipitation process at rural sites, but the underestimate was more significant for the intense precipitation process at urban sites.

**Key words:** wind speed; under catch; error; precipitation record; change trend; Beijing city

\* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41575010; No. 41505102).