

中国降水测量误差的研究^{*}

任芝花

(国家气象中心, 北京, 100081; 北京大学物理学院, 北京, 100081)

王改利

邹风玲 张洪政

(中国气象科学研究院, 北京, 100081) (国家气象中心, 北京, 100081)

摘 要

20 世纪, 国际上许多国家对降水测量进行了对比试验工作, 以研究降水测量中的误差大小与分布。由于各个国家降水测量仪器的型式、尺寸以及安装高度不同, 试验对比的降水测量误差的大小也就不同。为了弄清中国降水测量误差的大小, 中国气象局选择了 30 个基准基本站, 建立标准雨量站网进行试验对比。本文介绍了中国标准雨量站网的设置以及对比资料的获取情况, 对比分析了中国降水测量的随机误差、沾湿与蒸发误差、风场变形误差。经 30 个标准雨量站 7 a 29000 多次的 1 台坑式雨量器、2 台台站雨量器的对比观测, 给出了中国降水量测量误差的大小、降水测量中的随机误差与系统误差的分布情况。经分析, 对于收集口口径为 20 cm, 安装高度为 70 cm 的台站普通雨量器, 每次测量随机误差累计平均值为 0.0 mm, 沾湿误差为 0.2 mm, 蒸发误差为 0.0 mm, 降雨风场变形误差为 0.19 mm, 降雪为 0.32 mm。降雨测量的平均相对误差约为 4.34%~15.28%, 降雪测量的平均相对误差约为 6.17%~39.99%。

关键词: 标准雨量站, 降水测量, 测量误差。

1 引 言

降水资料是气候变迁研究、天气动力分析、数值天气预报模式、水分平衡计算、水文模型等方面的重要参数, 是雷达与卫星定标、水库管理、工程设计等方面的重要依据。研究降水测量的准确性对国计民生有着重要意义。中国气象台站使用过不同的雨量器及其不同的安装高度, 不过较长时间使用的是口径 20 cm, 安装高度为 70 cm 的台站普通雨量器来收集降水。中国使用降水资料较多的一些科研与业务单位在实际工作中发现降水资料的准确性差, 给工作带来了较大的影响^[1, 2]。20 世纪 80 年代兰州冰川所和中国科学院地理所分别在天山乌鲁木齐河源和北京大屯农业生态站对夏季降水进行了风场变形误差的初步试验研究。1992 年中国气象局决定每个省(市、区)选择一个基准或基本气候站建立标准雨量站, 进行雨量的对比观测, 以弄清中国现行的降

水测量中的误差情况。最后选择了 30 个站点, 建立起中国的标准雨量站网。

人们从 17 世纪开始注意到蒸发和沾湿给降水测量带来的误差, 到 18 世纪中叶, 发现雨量器安装高度不同测得的值是不一样的, 后认识到由于收集口高于地面的雨量器的安装对自然风场的干扰造成了雨量器捕捉率减少, 这一误差称之为风场变形误差。20 世纪, 许多国家进行了一系列的降水测量对比试验工作, 发现雨量器对降水量测量存在着随机误差和系统误差。随机误差包括地形不规则和微气候的影响所造成的误差, 也包括安置雨量器的场点不具备面的代表性所引起的误差, 以及降水在空间分布的不均匀性(或者说雨量测点密度不够)所带来的误差。而系统误差包括: 由于测量仪器对自然风场的干扰而产生的风场变形误差; 沾湿误差和蒸发误差。

^{*} 初稿时间: 2003 年 5 月 26 日; 修改稿时间: 2003 年 7 月 28 日。
资助课题: 中国气象局: “降水测量误差与订正”(98-2W-2/2013)。

2 标准雨量站网的介绍及对比仪器的安装情况

为了确定风场变形误差, 我们在其他不同的气候区域和不同的海拔高度上组建了 30 个试验对比站, 组成了中国标准雨量站网。这些站分布在 $20^{\circ}02' \sim 47^{\circ}26' \text{ N}$, $81^{\circ}20' \sim 126^{\circ}58' \text{ E}$ 的广大区域, 几乎跨越了整个中国大陆领土。各站海拔高度差异很大, 最低的 4.8 m, 最高的 3837.0 m。各站近 30 a 年平均气温 $-0.3 \sim 24.1^{\circ}\text{C}$, 年平均风速 $1.2 \sim 4.3 \text{ m/s}$, 年平均降水量为 $186.3 \sim 1967.8 \text{ mm}$ 。通过对中国历年共 722 个基准基本站近 30 a 年平均气温、年平均风速、年平均降水量的统计结果看, 在上述标准雨量站网气候条件范围内的站占 90.03%。

对比试验站均设置 1 台坑式雨量器和 2 台台站普通雨量器。坑式雨量器与其中 1 台台站普通雨量器间的安装距离约为 5 m, 2 台台站普通雨量器间的安装距离约为 10~15 m。雨量器收集口的口径均为 20 cm, 2 台台站雨量器的安装高度均为 70 cm, 坑式雨器收集口与地表面齐平, 其防溅网采用标准设计。在每个标准雨量站中还同时安装了 1 台降水订正仪, 用于订正了风场变形误差的横向雨量器^[3]。

3 对比资料的获取情况

各试验站安装的 3 台雨量器型式相同, 因此可以认为各对比仪器的蒸发、沾湿影响是一致的。由于降水量在空间分布上是随机性较大的气象要素, 这种空间分布的不均匀性, 会使得即使安装在同一观测场但不同地点的雨量器带来采样差, 另外还存在着其他测量随机误差。为了确定随机性的大小、分布, 故安装了 2 台同样型式的台站雨量器, 用 2 台台站雨量器的测量差值来确定降水测量中的随机差。用 2 台台站雨量器测值的平均值作为台站雨量器的测值, 以降低随机误差的影响。用坑式雨量器

作为对比标准(消除了风场变形误差), 其测值与台站雨量器的测值之差, 即为风场变形误差。而蒸发与沾湿误差则通过简单的器测法就可得到。

在有吹雪出现时, 坑式雨量器所收集到的雪量往往很大部分是由吹雪引起的, 这是一个伪误差, 在作统计时, 必须予以剔除。由人工和其他原因所造成的伪误差也应予以剔除。

大多数对比试验从 1992 年开始, 资料统计到 1998 年底, 历时 7 a。标准雨量站的对比观测工作纳入气象测报质量考核范围, 更加有效地保证了对比资料的质量。整个试验期间, 有降水测次 29276 次。其中由于坑内积水排不出造成缺测 284 次, 缺测率为 0.97%。取得完整对比测次 28992 次, 剔除雨的伪误差 81 测次, 雪 54 测次, 雨和雪实际有效对比测次分别为 26625 次和 2232 次, 合计 28857 测次。就降水日而言, 雨和雪的有效对比降水日分别为 16319 和 1665, 合计 17984。

4 降水测量误差的分析研究

4.1 沾湿误差与蒸发误差

1995~1998 年我们分别在龙口、太原、饶阳、塘沽、郑州、铜川、乐山 7 站进行了台站雨量器沾湿误差的测定, 在龙口、太原、郑州 3 站进行了蒸发误差的测定。沾湿误差测定结果见表 1。台站普通雨量器由收集器与储水瓶两部分组成。从表 1 可见, 收集器与储水瓶的沾湿误差均在 0.1 mm 左右, 两者之和也就是台站雨量器的沾湿误差为 0.2 mm。由于储水瓶口径很小, 又是放在收集器下面的雨量桶内, 所以储水瓶内所收集的雨水近于密封状态, 不易蒸发。我们在夏季与秋季对上述 3 站 10~16 时时间段内的室外雨量器进行蒸发误差的测定时, 发现蒸发误差均远远小于台站降水测量的读数精度 0.1 mm, 因此可以认为中国台站雨量器的蒸发误差为 0.0 mm。

表 1 雨量器沾湿误差(mm)的测定结果

站名	龙口	太原	饶阳	塘沽	郑州	铜川	乐山	平均
收集器	0.098	0.143	0.13	0.09	0.098	0.08	0.103	0.106
储水瓶	0.036	0.097	0.11	0.09	0.075	0.075	0.107	0.084
合计	0.134	0.24	0.24	0.18	0.173	0.155	0.210	0.190

4.2 降水测量的随机误差

气象台站的观测场四周环境比较空旷, 场址比较平坦, 相对来说场址的水平性也比较好, 因此安装

在观测场内不同地点的台站雨量器带来的采样差, 即随机误差, 主要是由于降水量空间分布的不均匀性造成的。我们用 2 台台站雨量器(间距 10~15

m) 的测量差值来确定降水测量中的随机差。经 30 站 7 a 的对比观测, 取得降雨的有效对比观测 26625 次, 随机差大于 1.0 mm 的占 2.15%; 降雪观测为 2232 次, 随机差大于 1.0 mm 的占 1.21%。对单次降水量大于 5 mm 的进行相对随机误差统计, 降雨有 7088 次, 降雪 348 次, 其中相对随机误差大于 10% 的, 降雨占 3.58%, 降雪占 7.76%。经统计分析降雨与降雪随机测量的标准差都为 0.08 mm, 降雨与降雪每次观测的平均随机误差均为 0.00 mm。降雨与降雪测量的随机误差分布分别见图 1 与图 2。无论从统计分析角度还是从分布图看, 降水测量的随机误差均很好地服从正态分布规律。这说明, 虽然台站降水测量为点测量, 但就气候统计来说, 该点测量经系统误差订正后, 可真实地代表该点周围一定范围内面上的降水量。对于台站点降水测量的订正, 无需考虑随机误差。

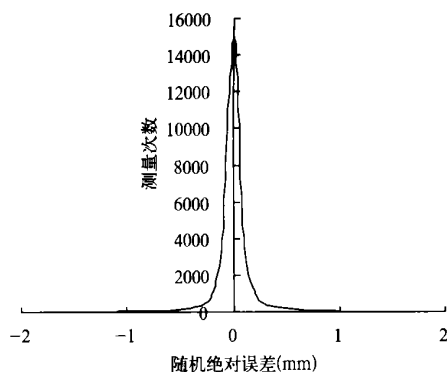


图 1 降雨量测量的随机绝对误差分布

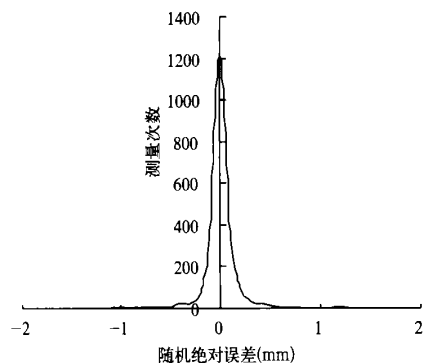


图 2 降雪量测量的随机绝对误差分布

4.3 风场变形误差

4.3.1 风场变形的物理机理

台站雨量器收集口高出地面 70 cm, 由于台站雨量器本身的存在而使收集口周围的自然风场受到干扰, 造成了雨量器捕捉率减少。图 3 为口径面积

127 cm², 高度 40 cm 的 Mk2 雨量器风洞试验^[4], 图中反映了当把 Mk2 雨量器放在风速分别为 2, 3, 7 m/s 风洞中时, 对应不同风洞风速, 雨量器器口上方风场变化情况。其中 H 为雨量器上方距雨量器器口的高度, $H = 0$ cm 即为雨量器器口所在的水平高度处, 图中曲线为等风速线, 曲线中的数字为相对于风洞风速的百分增量, 每个小图底部中的 10 为接近雨量器器口处风速的百分增量。

对于不同口径或不同高度的雨量器, 虽然器口上方风速的增量不同, 但其变形风场的特点相同^[4]。雨量器的风洞实验表明^[4], 雨量器收集口上方处的风速明显高于其他地方的风速。这使收集口上方处的降水粒子所受的水平风压增大, 水粒子与垂直水平面方向的降落角度增大, 则降落方向与水平面的夹角减小, 对于一定面积的水平收集口来说, 必然导致所收集的降水量减少。另外雨量器的风洞实验也表明, 在收集口上方的同一高度上, 收集口上方处的下风方向的风速又比上风方向的风速大, 两者绝对差值随着风速的增大而增大(图 3)。因此对同样大小的水粒子而言, 下风方向的水粒子的降落角度比上风方向的大, 因而在雨量器收集口处, 水粒子的降落迹线形似喇叭口。由于迹线发散, 雨量器器口上方的水粒子密度比其他地方的要稀, 故而高出地面的雨量器所收集到的降水量和与地面齐平的雨量器(坑式雨量器)相比其收集量要少。雨量器收集口上方处的这一不对称的变形风场是造成雨量器收集率偏少的另一主要原因。

降水测量风场变形误差的大小与风速和降水类型有关。雨量器的风洞实验还表明, 风速越大, 雨量器收集口上方处的风速改变得越大, 则水粒子的降落角度增加得越大, 对水平收集口来说, 所收集的降水量减少得越多; 另外, 风速越大, 收集口上方处变形风场越不对称, 降水粒子的降落迹线愈发散, 对同一种类型和尺寸的降水粒子而言水粒子的密度则愈稀, 雨量器所收集的降水量就越少, 即由风场变形所引起的误差越大。对于相同风速相同质量的降水粒子而言, 由于雪粒子截面积比雨滴大, 所受的风力就比较大, 在雨量器收集口处其降落角度比雨滴增大得多, 雪粒子的降落迹线比雨滴发散得厉害, 由风场变形所引起的降雪相对误差比降雨大。

4.3.2 风场变形误差的测定结果

对于每次测量, 我们用 2 台台站雨量器收集量的平均值作为台站降水量, 台站降水量减去坑式雨

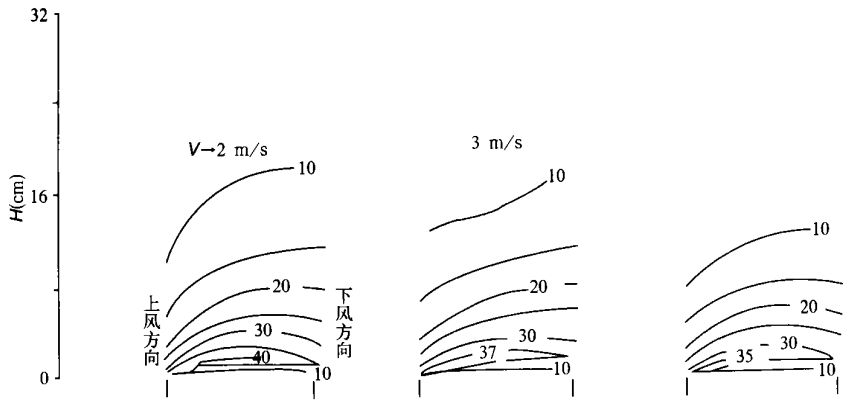


图 3 雨量器风洞试验^[4]

(V 为风洞中的风速, 图中曲线中的数字为风速的百分增量,
 H 为雨量器上方距雨量器器口的高度)

量器所收集降水量的差值作为该次测量的风场变形误差。当然, 由于降水量在空间分布的非均匀性, 作为每次统计而言, 该差值中仍含有随机误差。如上所述, 当多次累加统计后, 该随机误差的累积和应趋于 0.0 mm。从降雨与降雪风场变形误差的分布 (图 4, 5) 可以看出, 误差分布带明显地偏在 0.0 mm 线左侧, 表明台站雨量器的测值比坑式雨量器的小, 与理论推断及风洞试验结果一致。有一小部分区域在 0.0 mm 线右侧, 这是由于单次统计存在无法滤掉的随机误差的缘故。

从 30 站 7 a 的统计看, 对降雨而言, 每次测量的平均风场变形误差为 0.19 mm, 误差的标准差为 0.41 mm; 降雪分别为 0.32 和 0.52 mm。

如上所述, 蒸发误差为 0.0 mm, 沾湿误差为 0.2 mm, 我们用每次测量的坑式降水量加上 0.2 mm, 作为标准降水量。台站普通雨量器降水量的测量, 有的采用量杯量取, 有的采用台秤称重法, 关

于今后沾湿误差的订正应视台站的测量方法而定。各试验站累计风场变形误差与标准降水量之比, 称为风场变形相对误差。有的站降雪相对误差为 0, 那是因为该站全年无降雪现象。从图 6 中可看出, 降雨与降雪误差的一致性比较好, 即降雪误差大的站, 降雨的误差一般也比较大。

4.4 中国降水测量综合误差以及与国际比对结果的比较

4.4.1 中国降水测量综合误差

以上分析了中国降水测量的随机误差、蒸发与沾湿误差、风场变形误差。每次测量蒸发误差为 0.0 mm, 对于多次测量的累计量来说, 随机误差和也趋向于 0.0 mm, 所以对于多次降水测量的收集量, 其误差主要是由风场变形误差和沾湿误差组成。无论是地理分布还是气候特征, 30 个标准雨量站降水测量误差的统计基本上可以代表中国的降水测量误差的特征。据每个站 7 a 降水测量误差统计可见

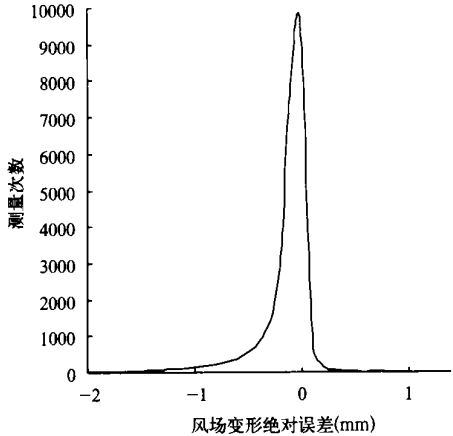


图 4 降雨量测量风场变形绝对误差分布

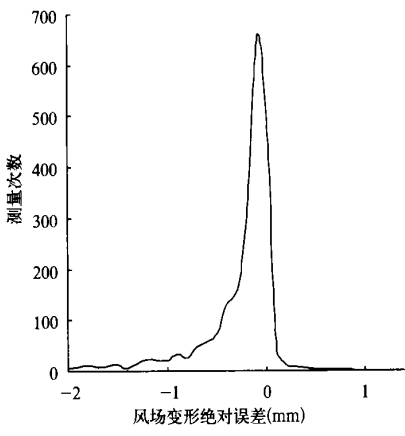


图 5 降雪量测量风场变形绝对误差分布

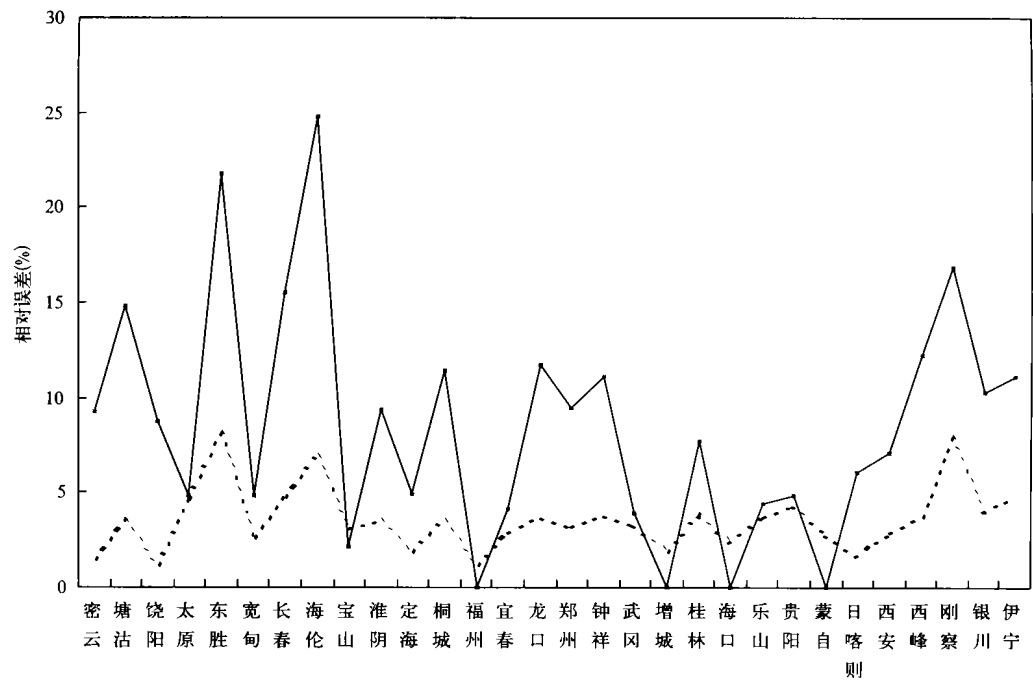


图6 各站降水测量的风场变形误差
(实线为降雪, 虚线为降雨)

(表 2), 中国的降雨测量误差约 4.34% ~ 15.28%, 平均为 6.52%, 其中风场变形误差 3.17%, 沾湿误差 3.35%; 降雪测量误差为 6.17% ~ 36.99%, 平均为 17.76%, 其中风场变形误差 10.97%, 沾湿误差 6.79%。

4.4.2 国际对比结果

为了把各国的降水资料统一到某一个确定的精度上, CIMO 曾组织过 3 次大规模的国际对比, 并在第 8, 9, 10 次会议上建议以坑式雨量器作为对比标准, 决议各成员国对降水测量进行系统误差订正。由国际对比结果^[5]可见风场变形误差降雨为 2% ~ 10%, 降雪为 10% ~ 50%, 它与仪器的形状、收集口大小、安装高度、风速、降水粒子大小以及降水类型有关; 沾湿误差为 2% ~ 10%, 它与雨量器形状、大小、材料、降水量多少以及测量次数等有关^[5]。一般认为, 用雨量器测雨, 其系统误差可达 5% ~ 15%; 测雪, 其系统误差可达 20% ~ 50%。

4.4.3 中国降水测量误差与国际对比结果的比较分析

由表 2 可见, 中国的降水测量误差无论是单站统计, 还是 30 站综合统计, 其结果与国际对比结果基本一致。在 30 站中, 平均每次降雪量最小的站分别为日喀则(1.34 mm/次)、东胜(1.64 mm/次)、海拉森(1.60 mm/次), 由于这 3 站的次降雪量较小, 因

而导致这 3 站的降雪沾湿相对误差较大。从国内与国际的测量结果都可看出, 用雨量器测量降雪, 其误差远远大于降雨测量误差, 尤其风场变形误差更加明显。从表 2 可知, 降水测量误差是一个较大的量级, 因此建议: (1) 在用台站观测的降水原始资料作气候分析时, 要考虑资料的系统误差^[6, 7]; (2) 及早对降水测量的系统误差进行订正, 并对不同时期使用的不同型式或不同安装高度的雨量器测量资料进行时间系列的订正。

5 结 论

经中国 30 个标准雨量站 7 a 29000 多次的坑式雨量器、台站普通雨量器的对比观测, 研究分析了中国降水量测量的随机误差、风场变形误差、蒸发误差与沾湿误差。其中随机误差经多次测量, 其平均误差为 0.0 mm, 每次测量蒸发误差也为 0.0 mm, 沾湿误差为 0.2 mm。对降雨而言, 每次测量的平均风场变形误差为 0.19 mm, 误差的标准差为 0.41 mm; 降雪分别为 0.32 mm 和 0.52 mm。从 30 站综合统计来看, 中国降雨测量的平均相对误差为 4.34% ~ 15.28%, 降雪测量的平均相对误差为 6.17% ~ 39.99%。

表 2 30 站降水测量误差以及国际对比

站名	各站 7 a 降雨测量的平均相对误差(%)			各站 7 a 降雪测量的平均相对误差(%)		
	风场变形误差	沾湿误差	系统误差	风场变形误差	沾湿误差	系统误差
密云	1.46	2.97	4.43	9.29	7.37	16.66
塘沽	3.51	2.92	6.43	14.78	8.93	23.71
饶阳	1.08	3.30	4.38	8.78	5.50	14.28
太原	4.61	2.54	7.15	4.80	5.76	10.56
东胜	8.16	4.04	12.20	21.82	12.48	34.30
宽甸	2.54	2.99	5.53	4.84	5.62	10.46
长春	4.74	3.59	8.33	15.54	9.68	25.22
海伦	6.92	4.35	11.27	24.76	12.23	36.99
宝山	3.04	2.60	5.64	2.18	3.99	6.17
淮阴	3.54	2.71	6.25	9.40	4.25	13.65
定海	1.88	2.46	4.34	4.90	4.17	9.07
桐城	3.48	2.91	6.39	11.44	3.44	14.88
福州	1.18	3.24	4.42	/	/	/
宜春	2.92	3.38	6.30	4.11	3.53	7.64
龙口	3.67	3.07	6.74	11.71	7.81	19.52
郑州	3.17	2.80	5.97	9.49	5.17	14.66
钟祥	3.76	2.71	6.47	11.09	3.73	14.82
武冈	3.34	3.32	6.66	3.94	3.48	7.42
增城	1.85	3.03	4.88	/	/	/
桂林	3.84	2.66	6.50	7.70	3.12	10.82
海口	2.37	3.20	5.57	/	/	/
乐山	3.65	3.82	7.47	4.37	6.80	11.17
贵阳	4.31	3.13	7.44	4.81	5.50	10.31
蒙自	2.82	4.68	7.50	/	/	/
日喀则	1.68	5.63	7.31	6.02	14.91	20.93
西安	2.91	4.48	7.39	7.07	6.70	13.77
西峰	3.72	3.18	6.90	12.18	5.41	17.59
刚察	7.91	7.37	15.28	16.83	10.80	27.63
银川	4.02	4.91	8.93	10.25	10.39	20.64
伊宁	4.85	7.42	12.27	11.14	6.38	17.52
30 站综合	3.17	3.35	6.52	10.97	6.79	17.76
国际对比 ^[4]	2.00~ 10.00	2.00~ 10.00	5.00~ 15.00	10.00~ 50.00	2.00~ 10.00	20.00~ 50.00

注:“/”表示该站无降雪

致谢: 黎明琴、邹耀芳、时建华、曾书儿以及广大的台站观测员为中国降水测量误差的试验与研究作了大量工作, 在此对他们谨表敬意与感谢。

参考文献

1 王绍武, 蔡静宁, 朱锦红等. 19 世纪 80 年代到 20 世纪 90 年代中国年降水量的年代际变化. 气象学报, 2002, 60(5): 637~ 639

2 陈隆勋, 朱文琴. 中国近 45 年来气候变化的研究. 气象学报, 1998, 56(3): 257~ 271

3 黎明琴, 邹耀芳, 任芝花. 横向雨量器. 中国专利, ZL 96 2 22904. Q, 1997- 10

4 Sevruk B, Klemm S. Instruments and observing methods report NO. 39. WMO/TD, 1989, 313: 16~ 18

5 Sevruk B. Correction of precipitation measurements. WMO/TD, 1985, 104: 13~ 23

6 朱宗申. 影响统计插值分析误差的若干因素分析. 气象学报, 1992, 50(2): 167~ 180

7 翟盘茂. 中国历史探空资料中的一些过失误差与偏差问题. 气象学报, 1997, 55(5): 563~ 572

THE RESEARCH OF PRECIPITATION MEASUREMENT ERRORS IN CHINA

Ren Zhihua

(*National Meteorology Center, Beijing 100081; Physics School, Peking University, Beijing 100871*)

Wang Gaili

Zou Fengling Zhang Hongzheng

(*Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081*) (*National Meteorology Center, Beijing 100081*)

Abstract

In order to understand precipitation measurement errors clearly, comparative tests about precipitation were carried out in many countries in the 20th century. Because the raingauges to measure precipitation amount are varied in type, dimensions and installation height in different countries, the size of precipitation measurement error is not the same among various countries. To understand precipitation measurement errors in China, 30 standard rainfall stations for precipitation comparative observation were set up all over the country before 1993. The stations are all of reference or principal climatological stations in China. The installation of standard rainfall stations and the collection about comparative data from those stations are introduced. The random error, the wetted error, the evaporation error and the wind-induced error in precipitation measurements are studied. Comparative observations have been conducted between pit gauge, 2 operational gauges for seven years at 30 stations about 29000 events, the sizes of the above these errors are given. The distribution of random errors and systematic errors in precipitation measurements are studied. For the operational gauge whose diameter of receiving orifice is 20 cm and installing height is 70 cm, the wetted error is 0.2 cm and the evaporation error is 0.0 mm for each event, the random error is 0.0 mm for even measurement and the wind-induced average error is 0.19 mm and 0.32 mm respectively for rain and snow measurement. The relative error in rain measurements varies from 4.34% to 15.28%, 6.17% to 39.99% in snow observations.

Key words: Standard rainfall stations, Precipitation measurement, Measuring errors.