严家德, 王成刚, 金莲姬, 等. 2015. 百叶箱和通风防辐射罩气温观测系统的数据对比与订正 [J]. 气候与环境研究, 20 (5): 533–543. Yan Jiade, Wang Chenggang, Jin Lianji, et al. 2015. A comparative and modification study of louvred and aspirated shield temperature systems [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 20 (5): 533–543, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2015.14187.

百叶箱和通风防辐射罩气温观测系统的 数据对比与订正

严家德^{1,2,3} 王成刚² 金莲姬² 王巍巍^{2,3}

1 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室,南京210044
 2 南京信息工程大学中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室,南京210044
 3 中国气象局气象综合观测培训实习基地(南京),南京210044

摘 要 气温是常规地面气象观测的基本要素,其观测方法和误差直接关系到对大气过程的理解和预报精度。开 展不同气温观测系统间的对比和分析,保证观测数据的准确性和可比较性,对大气科学以及天气气候的预测、预 报研究具有重要意义。本文利用 2009 年 9 月至 2010 年 8 月的对比实验数据,分析了百叶箱气温观测系统和通风 防辐射罩气温观测系统的数据差异,讨论了系统误差与环境温度以及辐射误差与太阳辐射和环境风速之间的关 系,给出了相应的订正方法,最后对订正效果进行了检验。结果表明:与通风防辐射罩的气温数据相比,百叶箱 的气温数据偏高,其中夜间平均偏高 0.19 ℃,白天平均偏高 0.29 ℃;系统误差是环境温度的一元线性函数,气 温每升高 1 ℃,系统误差就会增加 0.006 ℃ 左右;辐射误差是太阳辐射与环境风速互相耦合作用的结果:太阳辐 射有较强的增温效应,与辐射误差呈现近似的抛物线函数关系;环境风速有较好的冷却效应,与辐射误差呈现出 近似的负指数函数关系;经误差订正后,夜间和白天的数据误差均减小到了 0.0 ℃,一0.2~0.2 ℃的样本比例分 别从订正前的 64.5%和 45.3%提高到了 83.7%和 80.6%,一致率提高到了 92.3%和 96.0%。

 文章编号
 1006-9585(2015)05-0533-11
 中图分类号
 P413
 文献标志码
 A

 doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2015.14187

A Comparative and Modification Study of Louvred and Aspirated Shield Temperature Systems

YAN Jiade^{1, 2, 3}, WANG Chenggang², JIN Lianji², and WANG Weiwei^{2, 3}

1 Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

2 Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

3 Integrated Meteorological Observing Training and Practice Base of China Meteorological Administration (Nanjing), Nanjing 210044

Abstract Air temperature is a basic element of conventional surface meteorological observations, and its method of observation and data errors are directly related to our understanding of atmospheric processes and forecast accuracy. Carrying out comparative analyses of different temperature observing systems and ensuring the accuracy and comparability of the observed data is important for the study of atmospheric science and the forecasting of weather and

收稿日期 2014-09-05; 网络预出版日期 2015-04-20

关键词 百叶箱 通风防辐射罩 气温 对比 订正

资助项目 国家自然科学基金项目 NSFC41505136、NSFC40905004,公益性行业(气象)科研专项 GYHY201106049

作者简介 严家德,男,1981年出生,硕士,实验师,主要从事地面气象资料分析与研究工作。E-mail: yanjd@nuist.edu.cn

通讯作者 王成刚,主要从事城市气象及大气探测方法研究。E-mail: wcg@nuist.edu.cn

climate. Based on a side-by-side field comparison of a natural ventilation Louvred screen Temperature System (LTS) and an Aspirated shield Temperature System (ATS), from September 2009 to August 2010, the differences between the data obtained from them were analyzed. In addition, the relationship between the system biases and temperature, and the relationship between the radiation biases and solar radiation and wind speed, were discussed. Subsequently, a model to modify the system biases and radiation biases was proposed and, finally, the effects examined. The results showed that the LTS possessed warm biases of 0.19° C and 0.29° C at nighttime and during daytime, respectively; and the ambient-temperature-dependent systematic biases were a linear function of temperature, which increased by about 0.006° C when temperature increased by 1°C. The ambient-solar-radiation- and ambient-wind-speed-dependent radiation biases were the result of the mutual coupling effect between solar radiation and environmental wind speed. With the warming effect, solar radiation was a good approximate parabolic function of the radiation biases; and with the cooling effect, the wind speed was a good approximate negative exponential function of the biases. After modification, both the biases at night and during the day dropped to 0.0° C. The consistency rate increased up to 92.3% and 96.0%, and the samples whose biases were between -0.2° C and 0.2° C increased from 64.5% and 45.3% to 83.7% and 80.6% at night and during the day, respectively.

Keywords Louvred screen Temperature System (LTS), Aspirated shield Temperature System(ATS), Temperature, Comparison, Modification

1 引言

城市化进程的推进、台站变迁以及仪器设备的 更新换代等都可能导致气候资料的非均一性(周雅 清和任国玉,2009;赵娜等,2011;段春锋等,2012; 杨萍等,2013),而其中仪器设备的变化是造成气温 (王颖和刘小宁,2002;黄海洪等,2003;陈豫英等, 2006;任芝花等,2006;余君等,2007)、气压(鞠晓 慧等,2010)、相对湿度(余君和牟容,2008)、风速、 风向(苑跃等,2011)等观测资料长时间序列非均 一性的重要原因。因此在大气探测自动化进程中, 需要进行一定时间的平行观测,在统一的气候资料 存档和管理原则下,对观测资料进行质量评估与订 正,以满足气候研究的基本要求(尹嫦姣等,2010; 陈艳等,2012)。

温度传感器具有比空气更强的辐射吸收特性, 会比空气吸收更多来自太阳、云、地面以及其他周 围物体的辐射能,可能导致传感器的温度(即观测 的气温)与真正的气温之间存在不同程度的误差 (Mozny et al., 2012; Holden et al., 2013; Thomas and Smoot, 2013),而在强日照和静风的白天,气温 误差可能达 2.5°C (WMO, 2008)。因此,一般都需 采用百叶箱等防辐射装置来减少外部辐射对温度 传感器的影响,以减少误差。防辐射装置按内、外 大气交换方式的不同,分为自然通风型和强制通风 型,其中强制通风型防辐射装置气温观测系统可有 效地减少温度误差(WMO, 2008)。 20世纪 80 年代以来,美国主要的地面观测系 统 有 CRS (Cotton Region Shelter)、 MMTS (Maximum and Minimum Temperature System)、 ASOS (Automated Surface Observing System)以及 USCRN (U.S. Climate Reference Network)等,其中 CRS 和 MMTS 为自然通风型,ASOS 和 USCRN 为 强制通风型。平行对比研究表明,材质、构造等对 自然通风型防辐射装置的数据影响较大,如 MMTS 和 CRS 间日最低温度差异为 0.3°C,日最高温度差 异为 0.4°C;强制通风型防辐射装置间的数据差异较 小,如 USCRN 和 ASOS 的总体偏差仅为 0.1°C 左右 (Sun et al., 2005);此外,自然通风型防辐射装置和 强制通风型防辐射装置间存在较大的数据差异,如 USCRN 与 MMTS 相比,夜间的差异在 0.2~0.4°C 间,白天的差异则多达 1.0°C (Quayle et al., 1991)。

我国自 2000 年将自动气象站正式投入业务运 行以来,开展了大量与人工站的科研比对实验(王 颖和刘小宁,2002;胡玉峰,2004;连志鸾,2005;陈 豫英等,2006;任芝花等,2006;王立等,2006;王颖 等,2007),结果表明,太阳辐射、系统误差、传感 器灵敏度以及观测时间上的不同步等因素会对自 动站和人工站的观测数据存造成影响。李庆祥等 (李庆祥等,2005)对我国东南部地区 200 余个台站 近 40 年的气温数据进行了分析,提出大气混合是 否充分也是影响不同台站间气温(特别是最高气温 和最低气温)数据差异大小的重要原因。由于我国 地面气象观测站中普遍使用的百叶箱气温观测系 统,均无强制通风装置,属自然通用风型防辐射装 置,可能导致其空气温度的测量值与实际值存在较 大偏差(WMO,2008)。严家德等(2014a,2014b) 以通风防辐射气温观测系统为参考,对百叶箱的气 温数据进行了对比研究,发现百叶箱的气温分钟 值、日均值和日最值等平均偏高 0.2°C 左右,且该 偏差值会随太阳辐射的增强而变大。

新型(第二代)自动气象站是在总结我国近十年自动气象站和自动气候站实践经验的基础上,根据现代气象业务对综合气象观测提出的要求开发研制的,它在保留常规的百叶箱气温观测系统的同时,还可装备参考 USCRN 气温观测系统设计的通风防辐射罩气温观测系统(陈冬冬等,2011)。这两种气温观测系统的数据之间存在什么的差异?这种差异与什么因素有关?可通过什么样的方法进行订正?本文以中国气象局综合观测培训实习基地(南京)新型(第二代)自动气象站的通风防辐射罩气温观测系统为参考,通过对比观测,针对上述问题开展分析与研究。

2 数据与方法

中国气象局综合观测培训实习基地(南京) (32°12'N,118°42'E;海拔32m)位于南京市北郊, 是中国气象局与南京信息工程大学共建的综合性气 象观测培训与实习基地。该基地东西长约115m,南 北宽约60m,总面积近6900m²,其四周的障碍物 分布情况为:东边约130m处有一近2.4万平方米的 池塘;东南面170m处有一东西向长约140m的成 排4层综合实验楼;在离基地四周60m以外的区域 不规则分布了若干不超过6层的宿舍楼。所有这些障 碍物的高度及所处位置均符合《地面气象观测规范》 (中国气象局,2003)中关于观测场环境条件的要求,

从而使得观测数据受局部地形影响较小,能较好地保 证数据的科学性与有效性。自2009年8月建站以来, 该基地便开展了新型自动气象站的常态化地面气象 观测,为基础气象研究积累了大量的数据资料。

对比实验的时间段为 2009 年 9 月 1 日至 2010 年 8 月 31 日,涉及的数据主要有百叶箱气温、通 风防辐射罩气温、环境风速以及太阳总辐射辐照度 等气象要素,其中除风速为 10 分钟滑动均值外, 其他要素均为分钟数据。温度对比差 Δ*T* 为百叶箱 与通风防辐射罩的气温数据之差,即:

$$\Delta T = T_1 - T_a \,, \tag{1}$$

式中, *T*₁和*T*_a分别为百叶箱和通风防辐射罩的气温数据。剔除气温对比差与月平均对比差之差的绝对 值大于 3 倍标准差的数据后,得有效数据 511721 组,约为样本总数的 97.4%。为便于分析系统误差、 环境风速以及太阳辐射等对数据差异的影响,将数 据分为白天(08 时至 17 时,北京时间)和夜间(18 时至次日 07 时,北京时间)两大类。

本文主要从系统误差 $\Delta T_{\rm s}$ 和由太阳辐射引起的 辐射误差 $\Delta T_{\rm R}$ 两个方面对百叶箱和通风防辐射罩气 温观测系统间的数据差异进行分析,首先从对比差 的分布以及与环境风速的关系初步分析两套系统 的差异情况,然后用夜间的数据对引起系统误差 $\Delta T_{\rm s}$ 的原因进行分析,建立其订正方法,接着用经 $\Delta T_{\rm s}$ 订正的白天数据分析环境风速 WS 和太阳辐射 SR 对辐射误差 $\Delta T_{\rm R}$ 的影响,建立 $\Delta T_{\rm R}$ 关于 WS 和 SR 的订正模型,最后对订正前、后的数据进行对 比,并从 ΔT 均值、一致率等指标的变化来评估订 正模型的有效性。

3 结果与讨论

3.1 数据差异

3.1.1 对比差分布

新型自动气象站两套气温观测系统小时气温 均值对比差 ΔT 的分布情况如图 1 所示。 ΔT 分布在 -0.5~0.9℃之间, 概率最大值出现在 0.2℃处, 夜 间和白天的样本比例分别为 29.5%和 21.3%; 样本 的绝大多数为正偏差,其中夜间为 83.0%, 白天为 90.5%, 零偏差样本为 7.6%和 5.5%, 在-0.2~0.2°C 之间的样本为 64.5%和 45.3%。夜间和白天的对比 差均值分别为 0.19℃ 和 0.29℃, 白天的值偏高约 0.1℃,标准差分别为 0.20°C 和 0.22°C;从样本分 布的特征系数来看, 夜间和白天的峰度系数分别为 4.9 和 3.3, 均呈尖顶峰状, 而夜间的峰度系数更大, 表明相较于白天,夜间的样本更集中,且有更多的 样本集中于峰值附近; 夜间的偏度系数为-0.006, 表明其样本较为均匀地分布峰值两侧,分布形态与 正态分布基本一致; 白天的偏度系数为 0.29, 表明 有较多的样本分布在峰值右侧,与正态分布相比呈 正偏分布。此外,对比夜间和白天的样本分布,可 以发现在峰值左侧, 夜间的样本比例均高于白天的 样本比例,表明夜间呈现更明显的冷却效应;而在 峰值右侧,白天的样本比例均高于的夜间样本比 例,则表明白天具有更明显的增温效应。

3.1.2 环境风速的影响

图 2 给出了不同环境风速 WS 下 ΔT 的分布情况。随着 WS 的增大, ΔT 的分布会逐渐趋于集中, 其中夜间 ΔT 的集中区域基本不变,始终在 0.2°C 附近,而白天 ΔT 在 WS 小于 3 m s⁻¹ 时,数据基本 分布在 0.3°C 附近,然后随着 WS 的增大, ΔT 逐 渐向 0.2℃ 附近集中。WS 较小时,白天的数据呈 现比较明显的单边分布特性,有较多的对比差样本 分布在集中区域的上侧。夜间数据的分布则比较均 匀,即便是风速发生改变,集中区域两侧分布的样 本量都大致相当。这说明百叶箱在白天存在明显的 增温作用,导致数据出现较大的正偏差。WS 的增 大,能使样本分布更加集中,但白天和夜间数据对



图 1 百叶箱和通风防辐射罩气温观测系统的小时平均气温差 ΔT 的频率分布

Fig. 1 Frequency distribution of hourly temperature difference (ΔT) between louvred and aspirated shield temperature systems



5% 10% 15% 20% 25% 30% 35% 40% 45% 50% 55% 60%

图 2 不同环境风速下,气温对比差 ΔT 的概率分布: (a)夜间; (b)白天。图中彩色阴影代表 ΔT 在该气温下出现的频率。

Fig. 2 The probability distribution of ΔT under different environmental wind speed during (a) night and (b) day. The color shading indicate emergence frequency of ΔT



图 3 环境风速对气温对比差平均值 $\overline{\Delta r}$ 和标准差 σ 的影响 Fig. 3 The impact of environmental wind speed on (a) $\overline{\Delta r}$ (mean ΔT) and (b) σ (standard deviation of $\overline{\Delta r}$)

这种聚集效应的响应存在明显的差异: 白天的数据 在风速大于 3.0 m s⁻¹ 时,开始出现明显的聚集效 应,有近 30%样本集中在 0.3°C 附近,当风速大于 5.5 m s⁻¹ 时,有近 45%样本集中在 0.2°C 附近;夜 间的数据在风速达到 1.0 m s⁻¹ 时,聚集效应就已经 显现出来了,而且 WS 只要达到 2.5 m s⁻¹,就有超 过 45%的样本集中在 0.2°C 附近,若 WS 大于 4.0 m s⁻¹,在 0.2°C 附近的样本比例超过了 80%。

图 3a 给出了对比差均值 $\overline{\Delta T}$ 随环境风速 WS 变 化的趋势: 白天, $\overline{\Delta T}$ 从 0.3°C 左右随 WS 增大而 增大,在 WS 在 2.0 m s⁻¹ 左右达到最大值 0.36°C, 然后开始随 WS 的增大而减小,WS 大约在 4.0 m s⁻¹ 的时候 $\overline{\Delta T}$ 降到了 0.20°C,在 6.0 m s⁻¹ 的时候降至 0.13°C 左右;夜间, $\overline{\Delta T}$ 基本上 0.20°C 以下波动, 且无明显的递减趋势,其最小值 0.16°C 出现在 WS 为 1.0 m s⁻¹ 时。

从图 3b 可以看出,夜间数据对比差的标准差σ 基本上都比白天的值小,说明夜间数据的离散程度 较小。在 WS 小于 1.5 m s⁻¹ 时,两者的差异不大, 且随风速改变的趋势也基本一致;WS 大于 1.5 m s⁻¹ 时,白天的σ呈线性方式递减,在 1.6 m s⁻¹ 时,减 小到 0.2℃,其最小值 0.12 出现在 WS 为 5.5 m s⁻¹ 时; 夜间的σ呈负指数形式递减,在2.5 m s⁻¹时, 减小到0.18°C,在3.0 m s⁻¹时,减小到0.1°C,之 后缓慢减少,在WS为6.0 m s⁻¹时得最小值0.08°C。

综合以上分析可得,受太阳辐射的影响,白天 ΔT 的离散程度普遍与夜间要大,且存在更大的正 偏差,但这种差异会随 WS 的增大而减小;而在夜 间,环境因素对 ΔT 的影响较弱,且这种影响会随 WS 的增大而迅速减弱,特别是当 WS>4.0 m s⁻¹ 时, $\overline{\Delta T}$ <0.20°C, σ <0.1°C,且基本稳定。因此, WS>4.0 m s⁻¹时,系统误差 ΔT_{s} 是造成夜间 ΔT 的 主要原因。

3.2 系统误差与订正

系统误差是由测量过程中某些固定的原因引起的一类误差,是定量分析中误差的主要来源之 一,具有重复性、单向性和可测性,会使测量结果存在系统偏差。如果能找出产生误差的原因,并设法测定其大小,那么系统误差便可以得到减小甚至 消除。研究 (Hubbard and Lin, 2002; Hubbard et al., 2004)表明,测温系统的系统误差Δ*T*_s是由传感器特性决定的,且与温度有关,其值一般是温度的函数。

用环境风速 WS>4.0 m s⁻¹时的夜间数据,对 空气温度 T 以及相应的 ΔT 做统计,得两者之间的



Fig. 4 The impact of air temperature on ΔT during night

关系,如图 4 所示。可以看出, ΔT 大致是 T的一次函数。因此,可用公式

$$\Delta T_{\rm s} = \alpha T + \beta \tag{2}$$

对两套系统夜间的数据差异进行订正,式中 α 和 β 为待定参数。经拟合, α 和 β 的值分别为 0.00603 和 0.11104,相关系数 R^2 为 0.87312,如图 4 中的虚 线所示。由公式(2)可知, ΔT_s 是关于T的递增函 数,会随T的增大而增大;受温度T的影响,系统 误差 ΔT_s 白天比夜间高,夏天比冬天高;当环境温 度T在-10°C 至 30°C 范围变化时,可使 ΔT_s 产生超 过 0.20°C 的变化。

用公式(2)对全夜间数据进行系统误差订正, 并对不同风速范围的样本做统计分析,其结果如表 1 所示。订正后,平均值 ΔT 很大的改善,平均减小 了 0.1°C 左右,使其减小到了 0.10°C 以内,同时标 准差σ未发生明显改变。因此,虽然公式(2)无 法完全消除数据 ΔT 的误差,但订正后,不同风速 下夜间的数据误差均未超过 0.10°C,已经在传感器 的测量精度范围之内(中国气象局,2003)。因此可 以用公式(2)对两套系统的对比数据做系统误差 的订正,而无需考虑风速等其它因素对系统误差的 影响。

3.3 辐射误差与订正

观测系统防辐射效果不一致是造成不同气温 观测系统间存在数据差异的主要原因(Lin et al., 2001; Hubbard et al., 2004; 熊安元等, 2006),这种 差异会随太阳辐射 SR 的增强而更加明显,但环境 风速 WS 的增大又能在一定程度上削减 SR 对数据 差异的影响,本文将这种由 SR 和 WS 相互耦合作 用而引起的误差称为辐射误差 $\Delta T_{\rm R}$ 。下文将对 $\Delta T_{\rm R}$ 和 SR 与 WS 的关系以及 $\Delta T_{\rm R}$ 的订正方法进行讨论 与分析。

表 1 夜间气温数据订正前后系统误差 $\Delta T_{
m s}$ 的平均值和标准 差的统计对比

Table 1 Comparison of $\Delta T_{\rm S}$ (mean system error) and σ (standard deviation of $\Delta T_{\rm S}$) before and after temperature modification during night

	$\overline{\Delta T_{\rm s}}$ /°C		σ /°C	
环境风速/m s ⁻¹	原始值	订正后	原始值	订正后
0~1	0.19	0.08	0.28	0.27
1~2	0.18	0.08	0.19	0.19
2~3	0.20	0.10	0.12	0.12
3~4	0.20	0.10	0.10	0.10
4~5	0.18	0.08	0.10	0.09
5~6	0.18	0.08	0.09	0.09

3.3.1 太阳辐射的影响

尽管有文献(Fritschen and Gay, 1979)指 出,由太阳辐射作用于传感器而引起的辐射误差 $\Delta T_{\rm R}$ 与太阳辐射的强度 SR 成线性关系,但由于百 叶箱内、外太阳辐射非线性关系的存在(Hubbard et al., 2001; Lin et al., 2001)以及百叶箱箱体接收太阳 辐射的有效面积随时间的非线性变化(Mauder et al., 2008),使得 $\Delta T_{\rm R}$ 与 SR 之间呈现抛物线的关系, 特别是风速较小时,这种关系更为显著。

对比实验中,不同环境风速 WS 下,辐射误差 $\Delta T_{\rm R}$ 与太阳辐射 SR 的关系如图 5 所示。随着 SR 的 增强, ΔT_R基本上呈先增大后减小的趋势变化,且 在 WS 较小时,这种趋势更为明显:如 WS 为 1.5 m s⁻¹时, $\Delta T_{\rm R}$ 从 0.1°C 左右随 SR 的增强而逐渐变 大,在SR为850Wm⁻²时,达到最大值0.4℃,之 后在 1000 W m⁻² 时减小到 0.3°C 左右。在 SR 在 50 W m⁻² 以内时,不同 WS 下 $\Delta T_{\rm R}$ 基本都小于 0.1°C, 彼此的差异较小;在 SR 较大时, WS 的改变对 $\Delta T_{\rm R}$ 有较大影响,如在 SR 为 850 W m⁻²时,当 WS 为 1.0 m s⁻¹时, ΔT_R 可达 0.45°C, 而 WS 增强到 5.0 $m s^{-1}$ 时, ΔT_{R} 仅为 0.05°C 左右。在 WS < 2.0 m s^{-1} 时,SR>200 W m⁻² 就可造成 0.2°C 以上的 $\Delta T_{\rm R}$,但 只要 WS>3.0 m s⁻¹, 即可使 ΔT_{R} 较小到 0.2°C 以 内,若WS能超过4.0 m s⁻¹, $\Delta T_{\rm R}$ 则能进一步减小 到 0.1℃以下。总体来看,环境风速越小,太阳辐 射对 $\Delta T_{\rm R}$ 的影响越大,特别是风速小于 1.5 m s⁻¹ 时; 环境风速越大,太阳辐射对 $\Delta T_{\rm B}$ 的影响越小,特别 是风速大于 4.0 m s^{-1} 时。

3.3.2 环境风速的影响

研究指出,百叶箱内、外的风速大小呈明显的 线性关系(Lin et al., 2001),而温度误差传感器表 面的气流速度的关系呈指数关系(Fritschen and Gay, 1979; Lin et al., 2001a)。图 6 给出了不同太阳辐射 SR 作用下,环境风速 WS 改变对辐射误差 $\Delta T_{\rm R}$ 的影 响。 $\Delta T_{\rm R}$ 基本上随 WS 的增大而减小,且这种趋势 随 SR 的增强而愈加明显:SR 为 50 W m⁻²时,随 WS 的增大, $\Delta T_{\rm R}$ 从 0.2°C 左右减小到 0.05°C 左右, 改变量在 0.1°C 左右;SR 为 850 W m⁻²时,随 WS 的增大, $\Delta T_{\rm R}$ 从 0.5°C 左右减小到 0.1°C 以下,改 变量超过了 0.4°C。WS 的增大,可减小不同 SR 引 起的 $\Delta T_{\rm R}$ 差异:WS 为 1.0 m s⁻¹时,SR 为 50 W m⁻² 和 850 W m⁻²时, $\Delta T_{\rm R}$ 约为 0.2°C 和 0.5°C,两者相 差在 0.3°C 左右;WS 为 3.0 m s⁻¹时, $\Delta T_{\rm R}$ 分别减小





Fig. 5 The impact of solar radiation on ΔT under different environmental wind speeds



图 6 不同太阳辐射作用下环境风速对 ΔT 的影响

Fig. 6 The impact of environmental wind speed on ΔT under different solar radiation

到 0.2°C 以下和 0.1°C 以下,差值约为 0.1°C; WS> 5.0 m s⁻¹ 时, ΔT_R 均在 0.1°C 以下,差值不超过 0.05°C。SR<100 W m⁻² 时, ΔT_R 基本都小于 0.2°C; SR 超过 300 W m⁻² 时,需 3.0 m s⁻¹ 甚至更强的 WS 才能保证 ΔT_R 在 0.2°C 以下;但若 WS>5 m s⁻¹,由 SR 引起的误差 ΔT_R 可减小到 0.1°C 以下。

3.3.3 订正模型设计

较小 WS 的观测数据可反映 $\Delta T_{\rm R}$ 和 SR 内在关系,而较强 SR 下的观测数据可反映 WS 对 $\Delta T_{\rm R}$ 的 作用机制。结合前人的研究结果(Hubbard et al., 2001, 2004; Lin et al., 2001; Lopardo et al., 2014),较 小 WS 下 $\Delta T_{\rm R}$ 和 SR 的关系以及较强 SR 下 $\Delta T_{\rm R}$ 和 WS 的关系可分别表示为

$$\Delta T_{\rm R}\Big|_{\rm weak \ wind \ speed} = \alpha_1 SR^2 + \beta_1 SR + \gamma_1, \qquad (3)$$
$$\Delta T_{\rm R}\Big|_{\rm strong \ solar \ radiation} = \alpha_2 e^{\beta_2 WS} + \gamma_2. \qquad (4)$$

即较小 WS 下, ΔT_{R} 和 SR 呈抛物线关系, 较强 SR 下, ΔT_{R} 和 WS 呈负指数关系。式(3)和式(4) 中 α_{1} 、 β_{1} 、 γ_{1} 和 α_{2} 、 β_{2} 、 γ_{2} 为待定常数。

综合上述分析可知,太阳辐射 SR 是引起 $\Delta T_{\rm R}$ 的 关键因素,而环境风速 WS 的存在,可不同程度地 减小这种误差,即 $\Delta T_{\rm R}$ 是 SR 和 WS 耦合的结果。 假设 $\Delta T_{\rm R}|_{\rm weak wind speed}$ 为仅受 SR 作用下的太阳辐射误 差,实际的太阳辐射误差 $\Delta T_{\rm R}$ 和 $\Delta T_{\rm R}|_{\rm weak wind speed}$ 的关 系如 $R = \Delta T_{\rm R}|_{\rm weak wind speed} / \Delta T_{\rm R}$ 所示,其中 R 为关于 $\Delta T_{\rm R}|_{\rm strong solar radiation}$ 的线性函数,即:

$$R = \alpha_3 \Delta T_{\rm R} \Big|_{\rm strong \ solar \ radiation} + \beta_3$$
,

其中, α_3 、 β_3 为待定常数。结合式(3)和式(4) 可得 ΔT_R 关于 SR 与 WS 的关系:

$$\Delta T_{\rm R} = \alpha \exp\left\{\beta WS + \gamma \ln\left[\left(\mu SR + \nu\right)^2\right]\right\} + \omega,$$

式中, α 、 β 、 γ 、 μ 、 ν 和 ω 为待定参数。

当 α 、 β 、 γ 、 μ 、v和 ω 分别取 0.5727、 -0.28351、-3.80347、4.68078×10⁻⁴、0.62942 和 -0.05952 时,可得如图 7 中曲线所示的 $\Delta T_{\rm R}$ 与 SR、 WS 拟合关系,图中的方点是以 0.5 m s⁻¹×100 W m⁻² 为区间统计的 $\Delta T_{\rm R}$ 平均值,其与拟合结果的相关系 数 r^2 为 0.91。

从图 7 的拟合曲面可以看出:在环境风速 WS 较大或太阳辐射 SR 较小时,辐射误差 $\Delta T_{\rm R}$ 都相对 较小; $\Delta T_{\rm R}$ 和 SR 之间呈现近似的抛物线函数关 系, 随着 SR 的增强, $\Delta T_{\rm R}$ 开始变大,但在 800~900 W m⁻²之间出现约为 0.45°C 的最大值后便开始逐渐减



图 7 ΔT 、太阳辐射以及环境风速三者之间的拟合关系 Fig. 7 The fitting relationship among ΔT , solar radiation, and wind speed

小; $\Delta T_{\rm R}$ 和 WS 之间则呈现出近似的负指数函数关 系,显示了 WS 对 $\Delta T_{\rm R}$ 有较强的抑制作用,特别是 SR 大于 400 W m⁻² 时, WS 的这种作用更加明显, 且当 WS 大于 3.0 m s⁻¹ 时,无论太阳辐射多大, $\Delta T_{\rm R}$ 都可缩减至 0.2°C 以内。拟合曲面所反映的 $\Delta T_{\rm R}$ 、 WS 和 SR 三者之间的关系和文中观测数据反映的 事实基本一致,得到了较好的拟合效果。

3.4 订正效果

对于夜间的数据,本文仅考虑系统误差,用式 (2)进行订正;对于白天的数据,本文考虑系统 误差和辐射误差,分别用式(2)和式(5)先后对 其进行订正。从图 8 可以看出,对系统误差 ΔT_s 进 行订正后,夜间和白天 ΔT 的分布大致左移了 0.2°C,且其众数样本(统计分析中出现频次最多的 数据)也有所提高,如夜间从 29.5%提高到 33.4%, 白天从 21.3%提高到 23.7%;白天的数据经辐射误 差 ΔT_R 订正后, ΔT 的分布进一步左移,即 $\Delta T < 0$ °C 的样本均有所增多,同时 $\Delta T \ge 0$ °C 的样本均有所 减少,使 0.0°C 两侧的数据更趋均匀。

从表 2 的统计结果看出,订正后数据的各项统 计特征量都得到了改善:夜间数据经 $\Delta T_{\rm s}$ 订正后, -0.2~0.2°C 的 ΔT 样本数提高到 83.7%, -0.1~ 0.1°C 的 ΔT 样本数提高到了 70.3%, $\Delta T = 0$ °C 的样 本数从 7.6%提高到 33.4%,对比差均值从 0.19°C 降到了 0.0°C;白天数据经 $\Delta T_{\rm s}$ 、 $\Delta T_{\rm R}$ 订正后, $-0.2 \sim 0.2$ °C 的 ΔT 样本数提高到 80.6%, $-0.1 \sim 0.1$ °C 的 ΔT 样本数提高到了 60.4%, $\Delta T = 0$ °C 的样本数从 5.5%提高到 23.2%,对比差均值从 0.29°C 降到了 0.0°C,数据一致率提升到了 96.0%;此外,表征样本离散度的标准差,在夜间数据的订正中无明显变 化,而在白天的数据中,减小 0.02°C。

表 2 订正前后 ΔT 的统计特征量对比

Table 2Comparison of the statistical characteristicsbefore and after modification

	夜间			白天		
					去除 ΔT_{s} 和	
	原始值	去除 $\Delta T_{\rm s}$ 后	原始值	去除 $\Delta T_{\rm s}$ 后	$\Delta T_{\rm R}$ 后	
P_1	7.6%	33.4%	5.5%	23.7%	23.2%	
P_2	32.6%	70.3%	23.0%	57.4%	60.4%	
P_3	64.5%	83.7%	45.3%	75.9%	80.6%	
众数/⁰C	0.2	0.0	0.2	0.0	0.0	
$\Delta T / ^{\circ}\mathrm{C}$	0.19	0.00	0.29	0.08	0.00	
$\sigma^{ m { m \circ C}}$	0.20	0.20	0.22	0.21	0.20	
一致率	91.6%	92.3%	77.8%	93.6%	96.0%	

注: P_1 、 P_2 和 P_3 分别为 $\Delta T = 0$ °C、 $\Delta T \in [-0.1, 0.1]$ °C 和 $\Delta T \in [-0.2, 0.2]$ °C 的样本比例。

综上所述,系统误差和辐射误差的订正较好地 改善了百叶箱和通风防辐射罩气温观测系统间数



图 8 订正前后 ΔT 分布的对比: (a) 夜间(黑色矩形表示 ΔT 值, 灰色矩形表示对系统误差 ΔT_s 进行订正之后的值); (b) 白天(黑色矩形表示 ΔT 值, 灰色矩形表示对系统误差 ΔT_s 进行订正之后的值, 灰色带格子矩形表示对辐射误差 ΔT_R 进行订正之后的值) Fig. 8 Comparison of the distribution of ΔT before and after modification: (a) Nighttime (black rectangles represent ΔT , gray rectangles represent ΔT after ΔT_s (system-error) modification); (b) daytime (black rectangles represent ΔT , gray rectangles represent ΔT after ΔT_s (system-error) modification); (b) daytime (black rectangles represent ΔT , gray rectangles represent ΔT

grids are ΔT after $\Delta T_{\rm R}$ (solar radiation error) modification)

据对比差的分布情况,减少了的数据差异,提高了 数据一致率,可以取得较好的订正效果。

4 结论与展望

本文用新型自动站百叶箱和通风防辐射罩气 温观测系统的对比观测数据,分析了两套系统的数 据差异,讨论了系统误差与环境温度以及辐射误差 与太阳辐射和环境风速之间的关系,提出了相应的 订正方法,并对其订正效果进行了分析,得出以下 主要结论:

(1)受太阳辐射的影响,百叶箱和通风防辐射 罩气温观测系统的对比数据存在明显的昼夜差 异:夜间的平均偏差为0.19°C,一致率为91.6%;白 天的平均偏差为0.29°C,而一致率仅为77.8%。

(2)百叶箱和通风防辐射罩两套气温观测系统 间的系统误差 ΔT_s 是气温的一元线性函数,气温每 升高 1°C, ΔT_s 会增加 0.006°C 左右;太阳辐射误 差 ΔT_R 是太阳辐射与环境风速互相耦合作用的结 果:在环境风速较小的时候, ΔT_R 和太阳辐射之间 呈现近似的抛物线函数关系, ΔT_R 最大值出现在 800~900 W m⁻²之间;太阳辐射较大时, ΔT_R 和环 境风速之间呈现出近似的负指数函数关系,环境风 速对ΔT_R有较好的冷却效应。

(3)用基于 ΔT_s 和 ΔT_R 订正的温度订正模型对 两套观测系统的数据进行订正后,各项统计特征量 都有不同程度的改善,其中温度差异的均值都降到 了 0.0°C,夜间和白天的数据一致率分别提高到了 92.3%和 96.0%。

受不同气温观测系统防辐射性能差异的影响, 太阳辐射是引起气温数据差异的主要原因。由于太 阳辐射的强度与太阳高度高有关,所以当季节变 化、或者台站间的纬度差异较大时,需对本订正方 案中的相关参数做进一步优化,方可得到较好的订 正效果。此外,本文未考虑防辐射装置的材质、结 构以及地面反射辐射等对观测数据以及订正模型 的影响,当防辐射装置的内壁温度与气温存在较大 差异、或下垫面状况发生改变(如冬天下垫面有积 雪覆盖等)而致地面向上辐射发生较大改变时,观 测数据的统计特征有可能会发生重大变化,进而有 可能会影响到订正模型的适用性。因此,今后需进 一步开展相关的对比实验与研究,以进一步完善不 同测温系统间数据差异的订正方法。

参考文献 (References)

陈冬冬,杨志彪,施丽娟,等. 2011. 新型自动气象站结构特点及其优越

性 [J]. 气象水文海洋仪器, 28 (4): 93–99. Chen Dongdong, Yang Zhibiao, Shi Lijuan, et al. 2011. Features and advantages of new automatic weather station [J]. Meteorological, Hydrological and Marine Instruments (in Chinese), 28 (4): 93–99.

- 陈艳, 段旭, 董文杰, 等. 2012. 昆明地区城市热岛效应的再分析 [J]. 高原气象, 31 (6): 1753–1760. Chen Yan, Duan Xu, Dong Wenjie, et al. 2012. Reanalysis on the urban heat island effect in Kunming [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 31 (6): 1753–1760.
- 陈豫英, 陈晓光, 张智, 等. 2006. 宁夏自动站与人工观测气温的差异对 比分析 [J]. 应用气象学报, 17 (S1): 118–124. Chen Yuying, Chen Xiaoguang, Zhang Zhi, et al. 2006. Comparative analysis on temperature difference of AWS and man-observed station in Ningxia [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 17 (S1): 118–124.
- 段春锋, 缪启龙, 曹雯, 等. 2012. 以高山站为背景研究城市化对气温变 化趋势的影响 [J]. 大气科学, 36 (4): 811–822. Duan Chunfeng, Miao Qilong, Cao Wen, et al. 2012. Effect of urbanization on variation trends of air temperatures based on mountain stations [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (4): 811–822.
- Fritschen L J, Gay L W. 1979. Environmental Instrumentation [M]. New York: Springer-Verlag, 216pp.
- Holden Z A, Klene A E, Keefe R F, et al. 2013. Design and evaluation of an inexpensive radiation shield for monitoring surface air temperatures [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 180: 281–286.
- 胡玉峰. 2004. 自动与人工观测数据的差异 [J]. 应用气象学报, 15 (6): 719–726. Hu Yufeng. 2004. Differences between data of automatic and manual observation [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 15 (6): 719–726.
- 黄海洪, 凌颖, 董蕙青. 2003. 百叶箱内外气温特征分析 [J]. 气象, 29 (12): 25-28. Huang Haihong, Ling Ying, Dong Huiqing. 2003. Analysis of inside and outside thermometer shelter air temperature characteristics in Nanning [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 29 (12): 25-28.
- Hubbard K G, Lin X. 2002. Realtime data filtering models for air temperature measurements [J]. Geophys. Res. Lett., 29 (10): 671–674.
- Hubbard K G, Lin X, Walter-Shea E A. 2001. The effectiveness of the ASOS, MMTS, gill, and CRS air temperature radiation shields [J]. J. Atmos. Oceanic Technol., 18 (6): 851–864.
- Hubbard K G, Lin X, Baker C B, et al. 2004. Air temperature comparison between the MMTS and the USCRN temperature systems [J]. J. Atmos. Oceanic Technol., 21 (10): 1590–1597.
- 鞠晓慧, 任芝花, 曹丽娟, 等. 2010. 自动与人工观测气压的差异及原因 分析 [J]. 气象, 36 (1): 104–110. Ju Xiaohui, Ren Zhihua, Cao Lijuan, et al. 2010. Difference analysis between automatic and manual atmospheric pressure measurements [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 36 (1): 104–110.
- 李庆祥, Menne M J, Williams C N Jr, 等. 2005. 利用多模式对中国气温 序列中不连续点的检测 [J]. 气候与环境研究, 10 (4): 736–742. Li Qingxiang, Menne M J, Williams C N Jr, et al. 2005. Detection of discontinuities in Chinese temperature series using a multiple test approach [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 10 (4): 736–742.
- 连志鸾. 2005. 自动站与人工站观测记录的差异分析 [J]. 气象, 31 (3): 48-52, 60. Lian Zhiluan. 2005. Analysis and correction of observation

difference between two kinds of AWS and man-observed station in Shijiazhuang [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 31 (3): 48–52, 60.

- Lin X, Hubbard K G, Meyer G E. 2001. Airflow characteristics of commonly used temperature radiation shields [J]. J. Atmos. Oceanic Technol., 18 (3): 329–339.
- Lopardo G, Bertiglia F, Curci S, et al. 2014. Comparative analysis of the influence of solar radiation screen ageing on temperature measurements by means of weather stations[J]. International Journal of Climatology, 34 (4): 1297–1310.
- Mauder M, Desjardins R L, Gao Z L, et al. 2008. Errors of naturally ventilated air temperature measurements in a spatial observation network [J]. J. Atmos. Oceanic Technol., 25 (11): 2145–2151.
- Mozny M, Trnka M, Stepanek P, et al. 2012. Long-term comparison of temperature measurements by the multi-plate shield and Czech-Slovak thermometer screen [J]. Meteor. Z., 21 (2): 125–133.
- Quayle R G, Easterling D R, Karl T R, et al. 1991. Effects of recent thermometer changes in the cooperative station network [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 72 (11): 1718–1723.
- 任芝花, 涂满红, 陈永清, 等. 2006. 玻璃钢百叶箱与木制百叶箱内温湿 度测量的对比分析 [J]. 气象, 32 (5): 35-40. Ren Zhihua, Tu Manhong, Chen Yongqing, et al. 2006. An comparison of air temperature and relative humidity measured inside thermometer screen of glass fiber reinforced plastic and timber [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 32 (5): 35-40.
- Sun B M, Baker C B, Karl T R, et al. 2005. A comparative study of ASOS and USCRN temperature measurements [J]. J. Atmos. Oceanic Technol., 22 (6): 679–686.
- Thomas C K, Smoot A R. 2013. An effective, economic, aspirated radiation shield for air temperature observations and its spatial gradients [J]. J. Atmos. Oceanic Technol., 30 (3): 526–537.
- 王立, 冯海霞, 胡宪林, 等. 2006. 自动气象站与人工观测数据差异的原因分析 [J]. 成都信息工程学院学报, 21 (4): 567–570. Wang Li, Feng Haixia, Hu Xianlin, et al. 2006. Automatic weather station and difference analysis of observed data [J]. Journal of Chengdu University of Information Technology (in Chinese), 21 (4): 567–570.
- 王颖, 刘小宁. 2002. 自动站与人工观测气温的对比分析 [J]. 应用气象 学报, 13 (6): 741–748. Wang Ying, Liu Xiaoning. 2002. Comparative analysis of AWS- and man-observed temperatures [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 13 (6): 741–748.
- 王颖, 刘小宁, 鞠晓慧. 2007. 自动观测与人工观测差异的初步分析 [J].
 应用气象学报, 18 (6): 849–855. Wang Ying, Liu Xiaoning, Ju Xiaohui.
 2007. Differences between automatic and manual observation [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 18 (6): 849–855.
- WMO. 2008. Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation[M]. 7th ed. Switzerland: World Meteorological Organization, 716pp.
- 熊安元,朱燕君,任芝花,等. 2006. 观测仪器和百叶箱的变化对地面气 温观测值的影响及其原因分析 [J]. 气象学报, 64 (3): 377-384. Xiong Anyuan, Zhu Yanjun, Ren Zhihua, et al. 2006. Differences of surface temperature observations recorded by different sensors in different screens and its causes [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 64 (3): 377-384.

严家德,金莲姬,王巍巍,等. 2014a. 百叶箱与通风辐射罩的气温日最

值差异 [J]. 应用气象学报, 25 (2): 185–192. Yan Jiade, Jin Lianji, Wang Weiwei, et al. 2014a. Comparative analysis of maximum and minimum temperatures of LTS and ASPTS [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 25 (2): 185–192.

- 严家德,金莲姬,王巍巍,等. 2014b. 第二代自动气象站不同气温观测 系统数据对比分析 [J]. 气象科学, 34 (1): 60-65. Yan Jiade, Jin Lianji, Wang Weiwei, et al. 2014b. Comparisons of the different temperature observing systems of second generation AWS [J]. Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese), 34 (1): 60-65.
- 杨萍,肖子牛,刘伟东. 2013. 北京气温日变化特征的城郊差异及其季 节变化分析 [J]. 大气科学, 37 (1): 101–112. Yang Ping, Xiao Ziniu, Liu Weidong. 2013. Comparison of diurnal temperature variation in urban and rural areas in Beijing and its seasonal change [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (1): 101–112.
- 尹嫦姣, 江志红, 吴息, 等. 2010. 空间差值检验方法在地面气象资料质 量控制中的应用 [J]. 气候与环境研究, 15 (3): 229–236. Yin Changjiao, Jiang Zhihong, Wu Xi, et al. 2010. A research on the application of spatial difference method in quality control of surface meteorological data [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 15 (3): 229– 236.
- 余君,胡玉峰,刘均. 2007. 我国中部地区自动站与人工站气温的差异 及原因分析 [J]. 气象, 33 (5): 94–99. Yu Jun, Hu Yufeng, Liu Jun. 2007. Causality of temperature differences between AWS- and manual-observations in central part of China [J]. Meteorological Monthly

(in Chinese), 33 (5): 94-99.

- 余君, 牟容. 2008. 自动站与人工站相对湿度观测结果的差异及原因分析 [J]. 气象, 34 (12): 96–102. Yu Jun, Mu Rong. 2008. Research on the cause of difference between AWS- and man-relative humidity observations [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 34 (12): 96–102.
- 苑跃, 赵晓莉, 王英, 等. 2011. 自动与人工观测风速和风向的差异分析 [J]. 气象, 37 (4): 490–496. Yuan Yue, Zhao Xiaoli, Wang Ying, et al. 2011. Comparative analysis on wind direction and wind speed difference of AWS- and man-observed station [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 37 (4): 490–496.
- 赵娜, 刘树华, 虞海燕. 2011. 近 48 年城市化发展对北京区域气候的影响分析 [J]. 大气科学, 35 (2): 373–385. Zhao Na, Liu Shuhua, Yu Haiyan. 2011. Urbanization effects on local climate in Beijing in recent 48 years [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35 (2): 373–385.
- 中国气象局. 2003. 地面气象观测规范 [M]. 北京:气象出版社, 151. China Meteorological Administration. 2003. Specification for Ground Meteorological Observation [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 151pp.
- 周雅清, 任国玉. 2009. 城市化对华北地区最高、最低气温和日较差变化 趋势的影响 [J]. 高原气象, 28 (5): 1158–1166. Zhou Yaqing, Ren Guoyu. 2009. The effect of urbanization on maximum, minimum temperatures and daily temperature range in North China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 28 (5): 1158–1166.