暴雨灾害
Torrential Rain and Disasters
中国科技核心期刊
中国科技论文统计源期刊

防辐射罩区域自动气象站气温观测偏差分析及其订正方法

王星宇 严婧 刘莹 刘园园 孙越

Analysis and correction method of temperature observation deviation in the radiation shield of regional automatic meteorological stations

WANG Xingyu，YAN Jing，LIU Ying，LIU Yuanyuan，SUN Yue

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2024-061

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

三种插值方法对区域自动气象站日气温缺测数据插补的适用性研究

Applicability of three interpolation methods in estimating daily temperature with missing data from regional automatic weather station

暴雨灾害. 2023, 42(1): 97-104 https://doi.org/10.12406/byzh.2022-183

三峡地基遥感垂直观测系统温湿廓线的误差分析与订正方法探讨

Error analysis and correction method of temperature and humidity profiles in the Three Gorges ground-based remote sensing vertical observation system

暴雨灾害. 2024, 43(5): 587-597 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-199

ECMWF模式强降水预报偏差订正方法研究及应用

Research and application of bias correction method for heavy rainfall forecast of ECMWF model

暴雨灾害. 2021, 40(4): 430-436 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.04.011

基于随机森林算法优选FY-4B AGRI通道订正雨量产品研究

The study on precipitation products corrected by optimal selection FY-4B AGRI channel based on random forest algorithm

暴雨灾害. 2024, 43(5): 598-606 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-194

地基微波辐射计温湿资料的误差分析和订正研究

Research on bias analysis and correction of temperature and humidity data with ground-based microwave radiometer

暴雨灾害. 2023, 42(4): 467-478 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-005

基于机器学习算法的多源月尺度融合降水产品在中国区域的检验评估

Examination and evaluation of multi-source monthly scale fusion precipitation product in China based on machine learning algorithm

暴雨灾害. 2023, 42(5): 595-605 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-006

关注微信公众号，获得更多资讯信息

王星宇,严婧,刘莹,等.2025.防辐射罩区域自动气象站气温观测偏差分析及其订正方法[J].暴雨灾害,44(1):112−122. WANG Xingyu, YAN Jing, LIU Ying, et al. 2025. Analysis and correction method of temperature observation deviation in the radiation shield of regional automatic meteorological stations [J]. Torrential Rain and Disasters,44(1):112−122 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024−061

防辐射罩区域自动气象站气温观测偏差分析及其订正方法

王星宇[1, 2], 严婧[1, 2], 刘莹[1, 2], 刘园园[1, 2], 孙越[1, 2]

(1. 湖北省气象信息与技术保障中心, 武汉 430070; 2. 暴雨监测预警湖北重点实验室, 武汉 430070)

摘　要: 分析防辐射罩区域自动气象站气温值偏差变化特征, 有助于自动站气温资料质量的订正, 进而提高自动站气温资料的可用性。因此, 基于 2019 年 6 月—2022 年 5 月湖北省防辐射罩区域自动气象站及与其邻近的百叶箱站观测的逐小时气温资料, 首先分析两类站点间小时气温偏差 (T_{bs}) 的季节变化和日变化特征, 并探讨降水、相对湿度、日照、风速等气象要素对T_{bs}的影响; 然后, 基于多元线性回归和随机森林方法, 分别建立两种防辐射罩站观测气温订正模型, 评估两种模型对防辐射罩站气温观测偏差的订正效果。结果表明: (1) 总体上, 白天时段防辐射罩站小时观测气温较其邻近百叶箱站加权平均小时观测气温要高, 防辐射罩站年均高温日数较其邻近百叶箱站偏高 20.0 d; (2) T_{bs}存在明显季节变化和日变化特征, 总体呈现夏季高、冬季低且日间高、夜间和清晨低的特点, 平均T_{bs}在晴天 13:00 (北京时, 下同) 最高, 可达到 1.0 ℃ 以上; (3) T_{bs}会随站点气象条件的变化而变化, 在无降水现象时较大, 而有降水时接近 0 ℃; T_{bs}与相对湿度负相关, 而与日照时数正相关, 与风速则是先呈现正相关, 随着风速增大至临界值以后呈现负相关; (4) 多元线性回归和随机森林模型对防辐射罩站气温观测偏差均有较好的订正效果, 使平均T_{bs}由 0.72 ℃ 分别降至 0.17 ℃ 和 0.16 ℃。随机森林模型的订正效果总体优于多元线性回归模型, 且对超过 35 ℃ 的高温订正效果更佳, 订正后防辐射罩站总高温日数下降比例超过 55%。

关键词: 区域自动气象站; 防辐射罩; 气温观测偏差订正; 多元线性回归模型; 随机森林模型

中图法分类号: P423　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2024−061

Analysis and correction method of temperature observation deviation in the radiation shield of regional automatic meteorological stations

WANG Xingyu[1, 2], YAN Jing[1, 2], LIU Ying[1, 2], LIU Yuanyuan[1, 2], SUN Yue[1, 2]

(1. *Hubei Meteorological Information and Technical Support Center*, *Wuhan* 430070; 2. *Hubei Key Laboratory for Heavy Rain Monitoring and Warning Research*, *Wuhan* 430070)

Abstract: Analyzing the variation pattern of temperature observation deviation in the radiation shield of regional automatic meteorological stations can help to correct the quality of temperature data, thereby improving the usability of temperature data. Therefore, based on the hourly temperature data observed by the radiation shield of regional automatic meteorological stations and its neighboring station with thermometer screen at the Hubei Province from June 2019 to May 2022, this study first analyzes the seasonal and daily variation characteristics of the hourly temperature deviation (T_{bs}) between the two types of stations, and explores the influence of meteorological factors such as precipitation, relative humidity, sunlight, and wind speed on T_{bs}. Then, multiple linear regression and random forest methods were used to establish two temperature correction models for radiation shield stations respectively, and the correction effects of the two models on the temperature observation deviation at the radiation shield stations were analyzed. The results are as follows. (1) Overall, the observed temperature at the radiation shield stations during the day is higher than that of its neighboring stations with thermometer screen . The average annual number of high temperature days at the radiation shield station is 20.0 days higher than that of its neighboring stations with thermometer screen. (2) There are obvious seasonal and daily variations in T_{bs} between the two types of stations, with an overall trend of high in summer and low in winter, high during the day, and low at night and early morning. The average T_{bs} is highest at 13:00 BT on a clear day, reaching over 1.0 ℃. (3) T_{bs} will vary with changes in meteorological conditions at the station, with a

收稿日期: 2024−04−12; **定稿日期:** 2024−11−11

资助项目: 湖北省自然科学基金气象创新发展联合基金项目 (2022CFD018, 2022CFD133); 湖北省气象局科技发展基金重点项目 (2021Z06)

第一作者: 王星宇, 主要从事气象数据质量控制和评估研究。E-mail: 401935715@qq.com

通信作者: 严婧, 主要从事气象信息技术研究。E-mail: 232093961@qq.com

© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY−NC−ND 4.0

greater value in the absence of precipitation and approaching 0 ℃ in the presence of precipitation. The T_{bs} has a negative correlation with relative humidity, a positive correlation with sunshine hours, and a positive correlation with wind speed at first, followed by a negative correlation as the wind speed increases to the critical value. (4) Multiple linear regression and random forest models have good correction effects on temperature deviation at radiation shield stations, reducing the average T_{bs} from 0.72 ℃ to 0.17 ℃ and 0.16 ℃, respectively. The correction effect of the random forest model is slightly better than that of the multiple linear regression model, and the random forest model has better correction effect for high temperatures exceeding 35 ℃. After correction, the total number of high temperature days at the radiation shield station has decreased by more than 55%.

Key words: regional automatic meteorological stations; radiation shield; correction of temperature observation deviation; multiple linear regression model; random forest model

引　言

气温是地面气象观测中较为基础和重要的观测要素之一, 准确可靠的气温资料可以提高观测区域气温均一化水平 (张媛, 2014; 张高健等, 2024), 它也是高温、干旱等气象灾害风险区划和等级评估的基础指标之一, 提高气温资料可用性也有助于提高数值模式的初始场精度, 进而改进数值预报水平 (张鑫宇等, 2021; 黄天文等, 2024)。我国国家级气象观测站 (以下简称为国家站) 在气温观测中一直使用木质或新型玻璃钢材质的百叶箱来保护气温传感器 (中国气象局, 2003)。随着现代化气象业务的快速发展, 气象观测站网密度不断增大, 区域自动气象站 (以下简称为区域站) 数量大幅增加。不同于国家站, 部分区域站在建站时对气温传感器的保护并未使用百叶箱, 而是使用了防辐射罩 (王晓蕾等, 2008)。自 2021 年 4 月以来, 湖北省气象部门开始着手气象灾害综合风险普查工作, 在开展灾害风险普查评估的工作中, 孙越等 (2023) 在分析和评估区域站气温资料时空分布序列时发现, 部分使用防辐射罩气温传感器观测气温的区域站 (以下简称为防辐射罩站) 日平均气温轻微偏高, 但其高温日数显著高于其邻近使用百叶箱气温传感器观测气温的国家站和区域站 (以下简称邻近百叶箱站), 此类站点很难通过常规数据质控手段发现, 甚至部分站点年均高温日数高出其邻近百叶箱站 30 d 以上, 这将不利于气象灾害综合风险普查地区气温资料的正常使用。

以往研究表明, 百叶箱可有效避免太阳直接辐射和地面反射辐射产生的热量对气温传感器观测精度的影响, 同时百叶箱内外部通风可使箱体内空气与周围环境进行充分的热量交换, 以此保障气温观测的准确性 (熊安元等, 2006; 严家德等, 2014a; 杨显轲等, 2018); 防辐射罩具有重量轻、体积小、价格低、安装便捷等优点, 但防辐射罩在辐射防护性能和通风性能方面与百叶箱相比还有一定差距 (Holden et al., 2013; 王志成等, 2015)。针对防辐射罩站气温观测偏差问题, 严家德等 (2014b, 2015) 对比了百叶箱站和防辐射罩站气温观测偏差的大小, 并通过分析偏差原因, 利用风速变化对其进行订正; 也有学者利用对比观测、流体力学效应以及神经网络模型方法对防辐射罩站观测气温进行订正 (阳艳红等, 2014; 袁超等, 2015; Yang et al., 2016; 浦玮, 2019; 王帅等, 2022); 还有学者从防辐射罩基本结构和原理出发, 研制新型防辐射罩结构及防辐射罩站观测气温回归订正算法 (孙中琳等, 2021; Sakalis, 2022)。上述研究主要集中在单一影响因子对防辐射罩站气温观测偏差的影响方面, 较少考虑台站观测季节、气温日变化、降水、相对湿度、日照、风速等多因素影响下防辐射罩站气温观测偏差的变化特征。

为降低防辐射罩站气温观测偏差, 本文利用湖北省 2019 年 6 月—2022 年 5 月 22 个防辐射罩站气温序列与其邻近百叶箱站气温序列, 分析防辐射罩站气温观测偏差的季节变化和日变化特征, 同时分析降水、相对湿度、日照、风速等气象要素对其偏差的影响; 在此基础上, 基于多元线性回归和随机森林方法分别建立防辐射罩站观测气温订正模型, 以期降低防辐射罩站气温观测偏差、提高区域站整体气温观测数据的可用性, 为开展气象灾害综合风险普查、长序列气温资料均一化订正及提高数值模式初始场精度提供参考依据。

1　资料与方法

1.1　资料说明

对防辐射罩站观测气温与其邻近百叶箱站观测气温间的差异进行统计分析及对防辐射罩站气温观测偏差进行订正时, 本文采用“天擎”大数据云平台提供的 2019 年 6 月—2022 年 5 月 22 个湖北省数据完整性和可用性较高、观测环境良好、周边存在百叶箱站点 (国家站和区域站) 的防辐射罩站的逐小时气温、降水量、相对湿度、2 min 平均风速、日照时数等地面气象观测数据, 以上资料均经过气象资料业务系统 (MDOS) 质控 (王宏记等, 2008; 王海军等, 2012, 2014)。选取的湖北省防辐射罩站点分布见图 1。

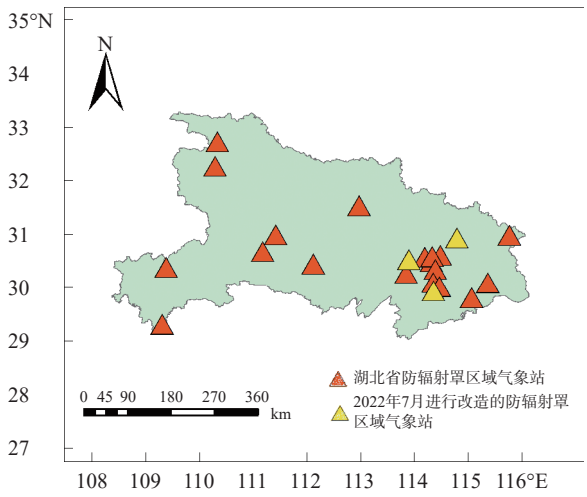


图 1 湖北省防辐射罩区域自动气象站分布

Fig. 1 The distribution of the regional automatic meteorological stations with radiation shield in Hubei Province

2022 年 7 月湖北省气象部门对部分防辐射罩站进行了改造升级，将站点防辐射罩更换为玻璃钢百叶箱进行气温观测，上述 22 个防辐射罩站中有 3 个站点 (三店、索河、横沟) 进行了改造升级，站点位置如图 1 黄色三角形所示，3 站海拔高度分别为 28.0 m、41.3 m、30.0 m，故额外选取上述 3 站及其邻近百叶箱站 2022 年 6—9 月质控后逐小时气温资料 (数据来源同上)，统计站点改造前、后气温观测偏差变化，反映防辐射罩对气温观测偏差的影响。

1.2 研究方法

定义气温差异平均指标来体现防辐射罩站与百叶箱站观测的气温差异，并分析差异变化特征；分析并提取影响温差指标的主要影响因子 (如气温的季节变化和日变化、降水量、相对湿度、日照、风速等)，基于上述影响因子分别使用多元线性回归和随机森林方法建立两种防辐射罩站观测气温订正模型；最后，利用相应统计评价指标对上述两种方法建立的订正模型的订正效果进行检验，从而确定哪种模型更优。

1.2.1 气温差异平均指标

用T_{co}表示防辐射罩站小时观测气温，T_{ne}表示邻近百叶箱站加权平均小时观测气温，T_{bs}表示防辐射罩站与其邻近百叶箱站间的气温观测偏差，则有

$$T_{bs} = T_{co} - T_{ne} \tag{1}$$

距离相近且环境相似的地区，气象要素存在一定的空间一致性。根据气温资料的空间一致性特点 (何志军等，2010；姚莉等，2022)，利用防辐射罩站周边 20 km 内最邻近的 2 个百叶箱国家站和 10 km 内最邻近的 2 个百叶箱区域站的气温资料计算T_{ne}；为保证T_{ne}的代表性，防辐射罩站与其上述 4 个邻近百叶箱站的平均海拔高度差小于 12 m；邻近百叶箱站尽量挑选分布在防辐射罩站周围的四个方位。T_{ne}的计算公式如下：

$$T_{ne} = [(T_{na}^1 + T_{na}^2)\times\alpha + (T_{ar}^1 + T_{ar}^2)\times\beta]/2 \tag{2}$$

其中，T_{na}^1和T_{na}^2分别为两个邻近百叶箱国家站逐小时气温；T_{ar}^1和T_{ar}^2分别为两个邻近百叶箱区域站逐小时气温；α、β为权重系数，采用熵权法进行确定，综合权重为 1，α、β分别取 0.7 和 0.3。

1.2.2 防辐射罩站观测气温的订正方法

利用多元线性回归和随机森林方法对防辐射罩站观测气温进行订正，因变量 (Y) 为T_{ne}，自变量 (X) 为T_{co}、小时降水量 (R_{co})、相对湿度 (U)、2 min 平均风速 (f_{2min})、日照时数 (S_d)、月份 (M) 以及日时刻 (H_h)，建立多元回归模型，公式如 (3) 所示

$$T_{ne} = \varepsilon + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \cdots + \beta_7 X_7 \tag{3}$$

其中，$X_1, X_2, \cdots, X_7$分别为特征变量 (T_{co}、R_{co}、U、f_{2min}、S_d、M、H_h)，$\beta_1, \beta_2, \cdots, \beta_7$为对应特征变量回归系数，$\varepsilon$为常数项。由于$M$和$H_h$资料均为类别变量，为了保证模型训练准确性，在进行数据预处理过程中，对月份和日时刻资料进行了独热编码 (One-Hot) 处理 (Alaya et al., 2017)，使模型在训练中更易从该类资料中提取特征信息。另外，由于选取的 22 个防辐射罩站中，不是全部站点都有 U、f_{2min}和 S_d 观测，如站点没有相应要素，则利用站点邻近国家站对应数据进行替代。上述气象要素种类的选取和数据处理方式也应用到随机森林模型建模中。

选取 2019 年 6 月—2022 年 5 月湖北省 22 个防辐射罩站及其邻近百叶箱站逐小时气象要素资料，筛选出可用于模型建模的总样本条数共计 191 325 条；利用 2019 年 6 月—2021 年 5 月的气象要素资料，建立基于多元线性回归和随机森林两种方法的防辐射罩站观测气温订正模型；并利用 2021 年 6 月—2022 年 5 月的气象要素资料，作为模型测试数据集验证模型效果。模型训练的输入要素如公式 (4) 所示，所有回归系数均通过了置信度 p<0.05 的 F 检验，自变量能够显著影响因变量。由于T_{bs}变化主要受太阳直接辐射和地面反射辐射的影响，所以在建立订正模型时，仅考虑日照强烈的白天时段 (10:00—17:00，北京时，下同) 观测气温，而夜间和清晨的气温受大气稳定度及站点地形环境影响较大，暂不进行该时段数据模型建立和订正。

1.2.3 防辐射罩站观测气温订正效果的检验指标

经多元线性回归和随机森林两种方法建模，订

正后得到的防辐射罩站观测气温订正值用T_s表示, 利用平均绝对误差 (MAE, 记为 E_{MA})、均方根误差 (RMSE, 记为 E_{RMS})、相关系数 (R) 来评估模型订正效果, 计算公式如下

$$E_{MA}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|T_{s(i)}-T_{ne(i)}\right| \tag{4}$$

$$E_{RMS}=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(T_{s(i)}-T_{ne(i)}\right)^2}{n}} \tag{5}$$

$$R=\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(T_{s(i)}-\overline{T_s}\right)\left(T_{ne(i)}-\overline{T_{ne}}\right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(T_{s(i)}-\overline{T_s}\right)^2\sum_{i=1}^{n}\left(T_{ne(i)}-\overline{T_{ne}}\right)^2}} \tag{6}$$

式中 i 和 n 分别表示求和变量和总样本量。

2 结果分析

首先, 分析湖北省 22 个防辐射罩站中代表站点的T_{bs}, 统计防辐射罩站平均T_{bs}和高温日数偏差情况; 同时, 基于湖北省区域站改造工作, 选取防辐射罩改造成为百叶箱观测的站点, 分析站点改造前后T_{bs}的变化情况, 证实防辐射罩站的实际气温本应与T_{ne}接近; 接着, 基于湖北省 22 个防辐射罩站T_{bs}变化情况, 对可能影响T_{bs}的影响因子 (如气温的季节变化和日变化、降水量、相对湿度、日照、风速变化等) 进行分析; 最后, 基于T_{ne}、T_{co}和上述影响因子, 分别利用多元线性回归和随机森林方法建模对防辐射罩站观测气温进行订正, 并利用相应模型效果检验指标对两种订正模型进行效果评价。

2.1 防辐射罩站观测气温及高温日数观测偏差分析

以武汉市蔡甸区索河站、宜昌市夷陵区桥边站、武汉市新洲区三店站 3 站作为代表站, 对气温观测中防辐射罩站存在的观测偏差进行分析。图 2 给出了 2019 年 6 月—2022 年 5 月湖北省防辐射罩站索河站、桥边站及三店站T_{bs}的变化情况, 可见索河站最大正偏差 5.20 ℃, 最大负偏差 2.43 ℃; 白天时段正偏差时次占比 70%; 夏季 (6—8 月) 白天平均T_{bs}为 0.89 ℃, 冬季 (12—2 月) 白天平均T_{bs}为 0.10 ℃。桥边站最大正偏差 7.10 ℃, 最大负偏差 4.80 ℃; 白天时段正偏差时次占比 72%; 夏季白天平均T_{bs}为 0.96 ℃, 冬季白天平均T_{bs}为 0.15 ℃。三店站最大正偏差 5.55 ℃, 最大负偏差 3.20 ℃, 白天时段正偏差时次占比 82%; 夏季白天平均T_{bs}为 1.25 ℃, 冬季白天平均T_{bs}为 0.19 ℃。

综上, 3 个防辐射罩站在研究时段内T_{bs}呈现正偏差的趋势更为明显, 正偏差极值也更大; 在夏季高温时段, T_{co}较T_{ne}要更高; 冬季低温条件下, T_{co}偏高的幅度要小于夏季; 从 3 站的T_{bs}在夏季和冬季的变化情况可以看出T_{bs}变化呈现一定季节节律性变化。

通过统计研究时段内湖北省 22 个防辐射罩站与

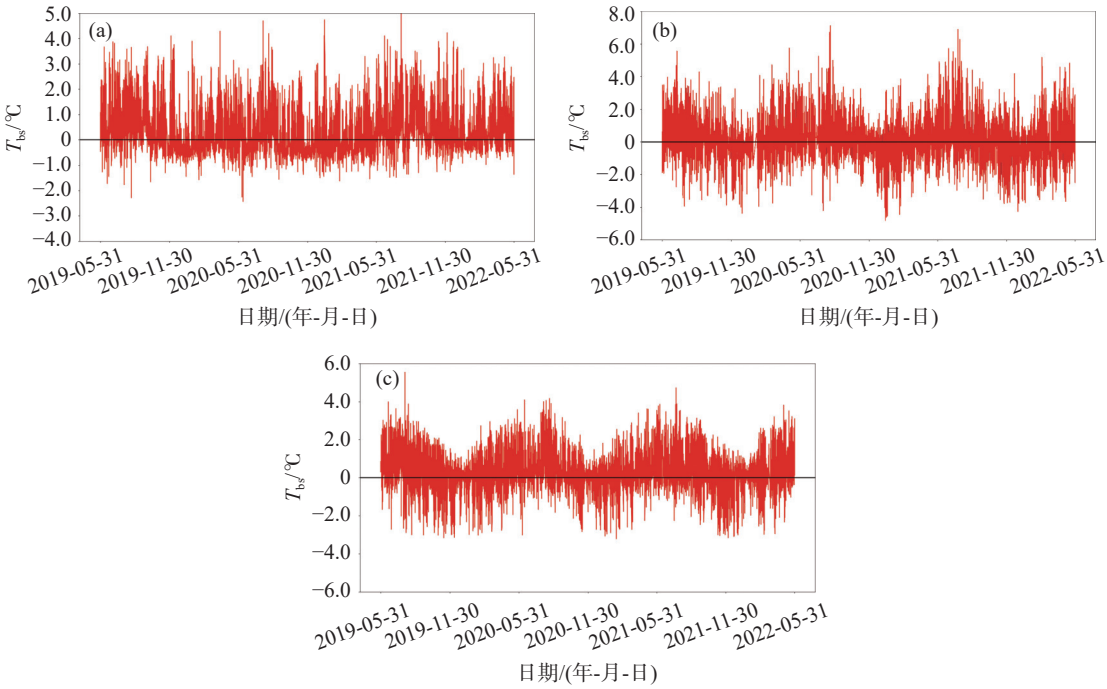


图 2 2019 年 6 月—2022 年 5 月湖北省防辐射罩站索河站 (a)、桥边站 (b) 及三店站 (c) 气温偏差 (T_{bs}) 逐时变化

Fig. 2 The hourly changes of T_{bs} at (a) Suohe, (b) Qiaobian and (c) Sandian stations of radiation shield stations in Hubei Province from June 2019 to May 2022

其邻近百叶箱站的整体气温状况，发现太阳辐射较强的白天时段，平均T_{co}、平均T_{ne}及平均T_{bs}分别为21.30 ℃、20.58 ℃、0.72 ℃ (表 1)。从整体来看，T_{co}较T_{ne}偏高；对两类站点气温序列进行 T 检验，p 值均小于 0.05，T_{co}与T_{ne}间存在显著差异。

地面气象要素观测规范中规定，当日最高气温$T_{max}\geqslant$35 ℃记为一个高温日。通过对湖北省 22 个防辐射罩站观测的高温日数及其周边四个邻近百叶箱站的加权平均高温日数 (权重分配与公式 (1) 相同) 的统计，发现在研究时段内，所有防辐射罩站高温日数均高于其邻近百叶箱站的加权平均高温日数 (表 1)。防辐射罩站高温日数年平均偏差达到 20.0 d；年平均最大偏差 33.4 d，出现在十堰市竹山县布袋营站；年均最小偏差 7.2 d，出现在黄石市阳新县军垦站。

表 1 2019 年 6 月—2022 年 5 月湖北省防辐射罩站小时观测气温 (T_{co})、邻近百叶箱站加权平均小时观测气温 (T_{ne})、气温偏差 (T_{bs}) 及站点高温日数偏差的年平均值对比

Table 1 Comparison of annual average values of hourly observed temperature at radiation shield stations (T_{co}), weighted average hourly observed temperature at neighboring thermometer screen stations (T_{ne}), temperature deviation (T_{bs}), and deviation of high temperature days at radiation shield stations in Hubei Province from June 2019 to May 2022

站点	平均T_{co}/℃	平均T_{ne}/℃	平均T_{bs}/℃	防辐射罩站年均高温日数/d	邻近百叶箱站年均高温日数/d	年均高温日数偏差/d
三店	21.64	20.92	0.72	56.3	27.1	29.2
省农科院	21.83	21.26	0.57	44.7	24.8	19.9
财校	21.50	20.84	0.66	48.3	27.1	21.2
银莲湖	21.52	20.75	0.77	42.7	23.0	19.7
武钢二职	21.23	20.60	0.63	41.0	24.1	16.9
湖大	21.29	20.44	0.85	39.0	28.0	11.0
五里界	21.24	20.11	1.13	48.0	23.3	24.7
山坡	21.46	20.56	0.90	41.3	30.8	10.5
湖泗	21.91	21.14	0.77	48.0	30.5	17.5
索河	21.35	20.87	0.48	51.7	24.5	27.2
鲍峡	21.12	19.97	1.15	53.3	24.3	29.0
布袋营	19.77	18.79	0.98	53.0	19.6	33.4
长岗	20.48	20.07	0.41	30.7	18.6	12.1
桥边	21.29	20.74	0.55	50.0	31.2	18.8
长岭岗	21.53	20.95	0.58	39.3	21.3	18.0
屯堡	20.90	20.40	0.50	30.7	22.1	8.6
社里坝	20.53	19.81	0.72	49.0	15.7	33.3
纪南	20.79	20.16	0.63	45.7	20.2	25.5
横沟	22.40	21.48	0.92	49.0	30.9	18.1
军垦	21.68	21.09	0.59	36.7	29.5	7.2
石头咀	21.62	20.99	0.63	44.3	24.9	19.4
土台	21.64	21.01	0.63	46.0	25.4	20.6
平均值	21.30	20.58	0.72	44.9	24.9	20.0

2.2 站点改造后气温观测偏差变化

2022 年 7 月湖北省气象部门对部分防辐射罩站进行了改造升级，其中表 1 中三店站、索河站、横沟站防辐射罩改造为玻璃钢百叶箱。3 站改造前后T_{bs}变化情况如图 3 所示，3 站均在 2022 年 7 月完成改造升级工作，可见 3 站T_{bs}在 7 月初均出现明显下降，改造后T_{co}与T_{ne}间的偏差明显减小。

统计白天时段防辐射罩站改造前 (2019—2021 年逐年 7—9 月)、后 (2022 年 7—9 月) 的平均T_{bs}，由表 2 可见，改造前，三店、索河、横沟 3 个防辐射罩站在 7—9 月平均T_{bs}分别为 1.22 ℃、0.96 ℃、1.17 ℃，改造后分别降至 0.18 ℃、0.16 ℃、0.25 ℃，改造后

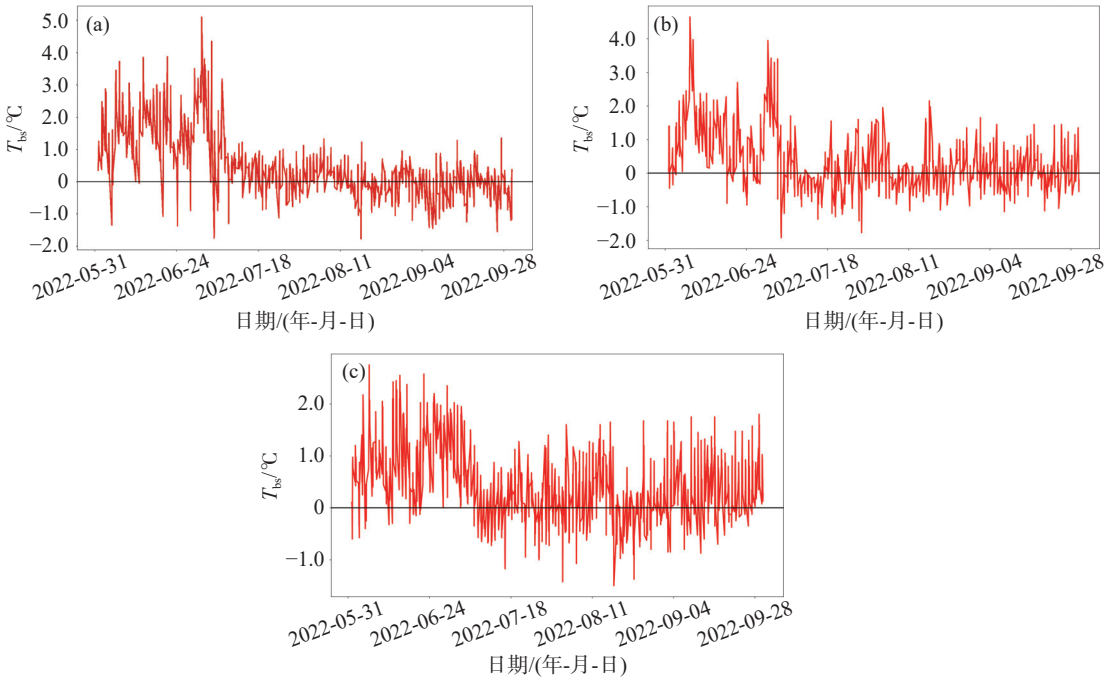


图 3 2022 年防辐射罩站改造前后 (7 月初改造完成) 三店站 (a)、索河站 (b)、横沟站 (c) 气温偏差 (T_{bs}) 逐时变化

Fig. 3 The hourly changes of T_{bs} at (a) Sandian, (b) Suohe and (c) Henggou stations before and after the radiation shield stations renovation (completed in early July) in 2022

表 2 改造前 (2019—2021 年 7—9 月)、后 (2022 年 7—9 月) 防辐射罩站平均气温偏差 (T_{bs}) 及其序列 MK 检验结果

Table 2 The average T_{bs} of the radiation shield stations before (July to September from 2019 to 2021) and after (July to September 2022) the renovation, and the MK test results of T_{bs} sequence of the renovation stations

站名	改造前平均T_{bs}/℃	改造后平均T_{bs}/℃	MK趋势检验	MK突变检验
三店	1.22	0.18	下降	2022年8月
索河	0.96	0.16	下降	2022年7月
横沟	1.17	0.25	下降	2022年7月

T_{co}与T_{ne}相近。对上述 3 个防辐射罩站 2019 年 6 月—2022 年 9 月的逐小时T_{bs}序列进行 MK 趋势检验, 对月平均T_{bs}序列进行 MK 突变检验, 检验结果表明 3 站T_{bs}均呈现显著下降趋势, T_{bs}突变点位置显著, 突变均发生在 2022 年 7—8 月, 与防辐射罩站改造升级工作完成时间相符合, MK 检验结果均显著 (p<0.05), 说明T_{bs}在改造前、后呈现非均一性, 且具有下降趋势。

从改造后结果来看, 一方面, T_{co}在未改造前存在一定程度偏高; 另一方面也说明, 防辐射罩站的实际气温本应与T_{ne}接近, 证明T_{ne}可以在一定程度上反映防辐射罩站点地区的实际气温。

2.3 影响防辐射罩站气温观测偏差的要素分析

2.3.1 太阳辐射季节变化对T_{bs}的影响

由图 2 可以看出, T_{bs}会随季节变化呈现节律性变化, 为研究T_{bs}随季节变化的特征, 将研究时段划分为春 (3—5 月)、夏 (6—8 月)、秋 (9—11 月)、冬 (12—次年 2 月) 四个季节, 分别对四个季节段内白天时段的T_{bs}变化规律特征进行分析, 结果如图 4 所示。其中, 夏季T_{bs}均值最高为 0.81 ℃, 中位数为 0.76 ℃, 而冬季T_{bs}均值最低为 0.27 ℃, 中位数为 0.23 ℃。总体来说, 湖北省 22 个防辐射罩站T_{bs}平均值在四季均呈现正偏差, 平均T_{bs}在夏季要高于另外三季, 春季和秋季区别不大, 冬季较小。由此可见, 夏季较冬季太阳辐射直射更强, 地表接收的辐射能量更大, 对T_{bs}影响更大, 在进行气温订正时, 需要充分考虑季节变化对其造成的影响。

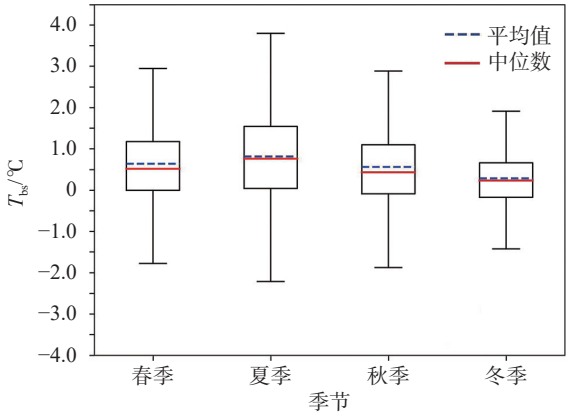


图 4 2019 年 6 月—2022 年 5 月白天时段湖北省防辐射罩站气温偏差 (T_{bs}) 在不同季节的箱线图

Fig. 4 The box plot of T_{bs} at radiation shield stations in Hubei Province during the daytime period from June 2019 to May 2022 in different seasons

2.3.2 太阳辐射日变化对T_{bs}的影响

太阳辐射强度是影响T_{bs}的主要因素，不同天气状况及日变化影响下，太阳辐射强度也不同。定义晴天 (日降水量为 0 mm，日日照时数>0 h)、阴天 (日降水量为 0 mm，日日照时数为 0 h)、雨天 (日降水量>0 mm，日日照时数为 0 h) 三种天气状况代表不同太阳辐射强度，将研究时段内 22 个防辐射罩站T_{bs}按日变化时次和天气状况进行统计，得到晴天、阴天、雨天各时刻平均T_{bs}分布 (图 5)，代表了T_{bs}在不同天气状况下的日变化特征。

可见三类天气状况下，平均T_{bs}日变化规律呈现典型白天高，夜间低的特征。晴天时，该特征表现更加明显，平均T_{bs}最大值出现在下午 13:00，数值超过 1.0 ℃。阴、雨天太阳辐射相对较弱，平均T_{bs}日变化幅度相对较小，平均T_{bs}最大值分别为 0.4 ℃ 和 0.2 ℃。太阳辐射强度随太阳高度角的变大而变强，防辐射罩相较于百叶箱而言，其对太阳直接辐射和地面反射辐射产生的热量阻隔有限，在通风散热的性能上也相对较弱，导致平均T_{bs}也随太阳起落产生明显日变化规律。

2.3.3 气象要素变化对T_{bs}的影响

由上文分析可知，除太阳辐射的季节变化和日变化外，不同天气状况也会对T_{bs}变化特征造成影响。本节选取太阳辐射较强的白天时段站点小时R_{co}、U、S_d以及f_{2min}来分析不同气象要素变化对湖北省 22 个防辐射罩站平均T_{bs}变化的影响，其结果如图 6 所示。

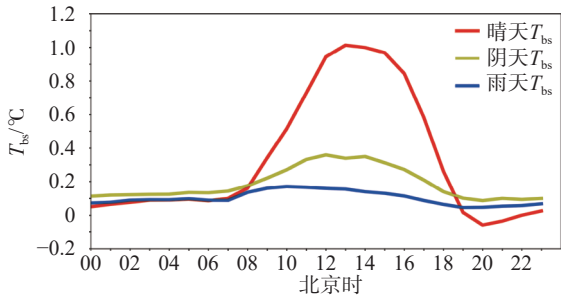


图 5 2019 年 6 月—2022 年 5 月不同天气状况下湖北省防辐射罩站各时刻平均气温偏差 (T_{bs}) 日变化

Fig. 5 The daily variation of average T_{bs} at radiation shield stations in Hubei Province under different weather conditions from June 2019 to May 2022

T_{bs}随降水变化时 (图 6a)，当小时R_{co}=0 mm，即站点无降水，平均T_{bs}较大，为 0.7 ℃ 左右；当小时R_{co}>0 mm，平均T_{bs}为 0.01 ℃，此时防辐射罩站与百叶箱站观测气温接近。T_{bs}随 U 变化时 (图 6b)，平均T_{bs}与 U 之间呈现负相关关系，随着 U 不断增大，平均T_{bs}逐渐由 1.0 ℃ 降低至 0.1 ℃。T_{bs}随 S_d 变化时 (图 6c)，当 S_d 低于 0.1 h 时，平均T_{bs}为 0.1 ℃，说明在无日照

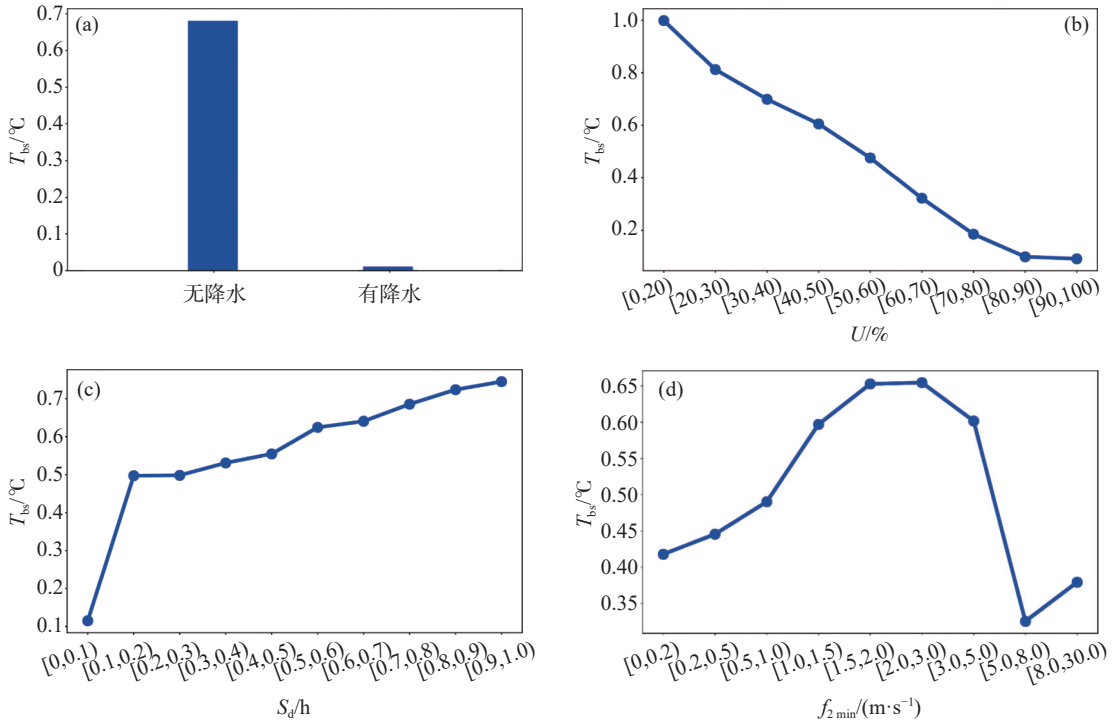


图 6 2019 年 6 月—2022 年 5 月白天时段湖北省防辐射罩站平均气温偏差 (T_{bs}) 随降水 (a)、相对湿度 (U) (b)、日照时数 (S_d) (c) 以及 2 min 平均风速 ($f_{2\,min}$) (d) 变化

Fig. 6 The variation of average T_{bs} changing with (a) precipitation, (b) relative humidity, (c) sunlight hours, and (d) 2-minute average wind speed at radiation shield stations in Hubei Province during the daytime period from June 2019 to May 2022

的情况下, 防辐射罩站与百叶箱站之间观测气温相差不大; 当 S_d 为 0.1~0.2 h 时, 平均 T_{bs} 急剧上升, 达到 0.5 ℃ 以上, 而后随着日照时数不断增大, 平均 T_{bs} 也随之继续缓慢上升。在 f_{2min} 方面 (图 6d), 当站点处于静风状态时, 平均 T_{bs} 为 0.4 ℃ 左右, 随着风速逐渐增大至 3.0 m·s^{-1} 时, 由于防辐射罩通风散热能力的限制, 百叶箱站观测气温降幅要大于防辐射罩站, 导致平均 T_{bs} 逐渐升高; 当风速超过 5.0 m·s^{-1} 后, 平均 T_{bs} 迅速下降, 此后风速越大, 防辐射罩站与百叶箱站间的观测气温越接近。

从气象要素的影响来看, T_{bs} 符合以下变化规律: 阴、雨天时, 地面相对湿度上升, 高空云量增多, 观测到的日照时数减小, 表明太阳直接辐射强度减弱, 平均 T_{bs} 随太阳直接辐射强度减弱而下降; 晴天时, 地面相对湿度较低, 云量较少, 此时观测到的日照时数增大, 表明太阳直接辐射强度较强, 平均 T_{bs} 随太阳直接辐射强度增强而上升。风速较小或静风状态时, 平均 T_{bs} 存在一定的正偏差, 但当风速逐渐增大时, 百叶箱通风性能优于防辐射罩, 导致百叶箱内热量交换更快, 百叶箱站观测气温降幅更大, 故表现为平均 T_{bs} 正偏差逐渐增大, 而当风速增大到临界值后, 防辐射罩和百叶箱间的通风性能差异相对于风速变化来说影响降低, 平均 T_{bs} 也随之减小。由此可知, 太阳直接辐射和通风条件是影响 T_{bs} 的两大主要因子。

2.4 防辐射罩站观测气温订正方法研究

上文结果表明, 防辐射罩站更换百叶箱进行气温观测后, T_{bs} 呈现下降的趋势, 说明 T_{ne} 可以在一定程度上代表防辐射罩站点区域的真实气温。本节利用 T_{ne} 以及影响 T_{bs} 变化的各类因素, 分别建立多元线性回归和随机森林订正模型, 对 T_{co} 进行订正, 并检验订正效果。

2.4.1 基于多元线性回归和随机森林方法的气温订正

利用经过训练后的多元线性回归和随机森林订正模型, 对 2021 年 6 月—2022 年 5 月白天时段 T_{co} 进行订正, 得到防辐射罩站订正前、后平均 T_{bs}, 如图 7 所示。上述两类模型针对 T_{co} 在白天时段异常偏高的问题, 均有不错的订正效果, 气温正偏差现象得到明显改善, 原始最大平均 T_{bs} 超过 2.0 ℃, 经过模型订正后, 基本降低至 1.0 ℃ 左右。

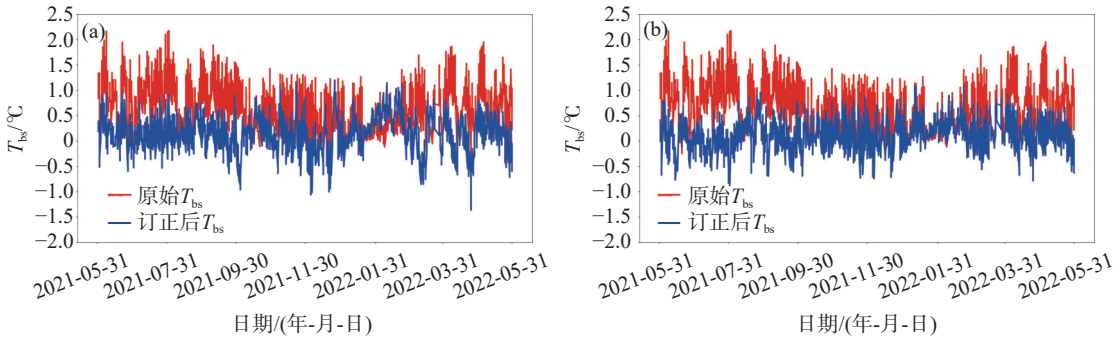


图 7 2021 年 6 月—2022 年 5 月白天时段湖北省防辐射罩站基于多元线性回归 (a) 和随机森林 (b) 模型订正前后的平均气温偏差 (T_{bs}) 对比

Fig. 7 The comparison of the average T_{bs} before and after the revision of the (a) multiple linear regression and (b) random forest models at the radiation shield stations in Hubei Province during the daytime period from June 2021 to May 2022

2.4.2 订正效果对比分析

将 T_{co}、T_{ne}、多元线性回归模型订正气温、随机森林模型订正气温进行对比分析, 结果如表 3 所示。从研究时段平均 T_{bs} 可见, 在经过两种模型进行订正后, 平均 T_{bs} 大幅度降低, 由 0.72 ℃ 分别降至 0.17 ℃ (多元线性回归) 和 0.16 ℃ (随机森林), 两类模型订正效果均较好, T_{co} 偏高情况得到有效缓解。

从高温影响方面进行分析, 当 T_{co} 高于 35 ℃ 时即为高温时段, 此时 T_{co}、多元线性回归模型订正气温、随机森林模型订正气温与 T_{ne} 的平均偏差 ($T_{bs_mean_O35}$) 分别为 2.08 ℃、0.79 ℃、0.39 ℃, 模型对高温影响下防辐射罩站气温观测偏差均做出了有效订正, 随机森林模型订正效果更佳。从 MAE、RMSE 以及 R 来看, 在经过模型订正后, 防辐射罩站各项偏差数值均出现明显减小, 相关系数上升, 随机森林模型的订正效果略优于多元线性回归模型, 其 MAE、RMSE 和 R 分别为 0.75 ℃、0.99 ℃ 及 0.994。

由研究站点总高温日数 (D_H) 可以看出, 2021 年 6 月—2022 年 5 月湖北省 22 个防辐射罩站总高温日数达到 1 084 d, 而其邻近百叶箱站总高温日数仅为 383 d, 经过多元线性回归和随机森林模型订正后, 防辐射罩站总高温日数出现了明显下降, 分别为 637 d 和 484 d 随机森林, 降幅分别达到 41% 和 55%; 在高温日数方面, 随机森林模型订正效果要明显优于多元线性回归模型。

表 3 2021 年 6 月—2022 年 5 月白天时段模型订正后站点平均气温 (T_{mean})、平均气温偏差 (T_{bs_mean})、气温超过 35℃ 时平均气温偏差($T_{bs_mean_O35}$)、总高温日数 (D_H) 变化情况及模型效果检验指标情况

Table 3 The changes in the average temperature (T_{mean}), average temperature deviation(T_{bs_mean}), average temperature deviation when the temperature exceeds 35 ℃($T_{bs_mean_O35}$), and total number of high temperature days (D_H) of the stations during the daytime period from June 2021 to May 2022 after model correction, as well as the indicators for model effectiveness testing

指标	邻近百叶箱站	防辐射罩站	多元线性回归模型	随机森林模型
T_{mean}/℃	20.58	21.30	20.74	20.73
T_{bs_mean}/℃	-	0.72	0.17	0.16
$T_{bs_mean_O35}$/℃	-	2.08	0.79	0.39
E_{MA}/℃	-	1.02	0.78	0.75
E_{RMS}/℃	-	1.41	1.08	0.99
R	-	0.986	0.993	0.994
D_H/d	383	1 084	637	484

注: “-”表示此处无数据

3 结论与讨论

本文利用 2019 年 6 月—2022 年 5 月湖北省 22 个防辐射罩区域自动气象站观测的逐小时气温 (T_{co}) 与其邻近百叶箱站加权平均小时观测气温 (T_{ne}) 进行对比分析, 采用偏差计算的方法得到两类站点间小时气温观测偏差 (T_{bs}); 并从气温的季节变化和日变化、降水量、相对湿度、日照、风速变化等方面, 对 T_{bs} 的变化特征开展了分析; 随后采用多元线性回归和随机森林的方法分别建立了白天时段 (10:00—17:00, 北京时) 防辐射罩站观测气温订正模型, 并对模型的订正效果进行了对比分析, 主要得到以下结论:

(1) 白天时段 T_{co} 较 T_{ne} 要高, 在挑选的 3 个代表站 (索河站、桥边站、三店站) 中, 最大 T_{bs} 分别达到 5.20 ℃、7.10 ℃、5.55 ℃, T_{bs} 正偏差时次占比分别为 70%、72%、82%; 湖北省 22 个防辐射罩站年均高温日数均高于其周边邻近百叶箱站, 站点年均高温日数偏差 20.0 d。

(2) T_{bs} 存在明显的季节变化和日变化特征。季节变化方面, 在太阳辐射较强烈的白天, 夏季平均 T_{bs} 最大, 达到 0.81 ℃, 春、秋两季平均 T_{bs} 接近, 均呈正偏差, 冬季平均 T_{bs} 最小, 为 0.27 ℃。日变化方面, T_{bs} 总体呈现典型白天高, 夜间和清晨低的特征; 晴天平均 T_{bs} 最大值出现在 13:00, 超过 1.0 ℃, 阴、雨天太阳辐射相对较弱, 平均 T_{bs} 最大值分别为 0.4 ℃ 和 0.2 ℃; 在夜间和清晨, 平均 T_{bs} 与天气状况影响关系不大, 在 0.0~0.1 ℃ 之间, 维持在较低水平。

(3) T_{bs} 随站点当地气象条件的变化而变化。当站点无降水时, 平均 T_{bs} 较大 (0.7 ℃), 而出现降水过程时, 平均 T_{bs} 较小 (0.01 ℃); T_{bs} 随着相对湿度增大而减小, 当相对湿度小于 20% 时, 平均 T_{bs} 最大 (1.0 ℃); T_{bs} 随 2 min 平均风速的增加呈现先增大后减小的变化规律, 当风速在 1.0~5.0 m·s^{-1} 范围内, 平均 T_{bs} 较高, 当风速超过 5.0 m·s^{-1} 时, 平均 T_{bs} 出现下降; T_{bs} 随日照时数的增加呈现先迅速增大后缓慢增大的变化规律, 当日照时数为 0.0 h 时, 平均 T_{bs} 较小, 日照时数超过 0.1 h 后, 平均 T_{bs} 先迅速增大, 后缓慢增大。

(4) 多元线性回归和随机森林订正模型对 T_{co} 均有较好的订正效果, 订正后平均 T_{bs} 由 0.72 ℃ 分别降至 0.17 ℃ 和 0.16 ℃; 随机森林模型的订正效果要略优于多元线性回归模型, 其 MAE、RMSE 和 R 分别为 0.75 ℃、0.99 ℃ 及 0.994, 且随机森林模型对站点气温超过 35 ℃ 高温的订正效果要明显优于多元线性回归模型, 订正后站点高温日数降幅也更大, 更加符合实际情况。

本文主要从湖北省气象灾害综合风险普查工作中发现的 T_{co} 和站点高温日数偏高现象入手, 对湖北省 22 个防辐射罩区域自动气象站 T_{bs} 变化规律进行了研究, 对影响 T_{bs} 的要素进行分析, 建立了防辐射罩站观测气温订正模型, 最后得到上述 4 点对 T_{co} 异常偏高情况、偏差变化特征、订正方法研究等方面有参考意义的结论, 可望为提高气象灾害综合风险普查工作中气温观测资料的可用性提供参考依据和技术支撑。但由于观测条件限制, 未在防辐射罩站点当地设置气温对照试验, 虽然 2.2 节表明 T_{ne} 可以在一定程度上反映防辐射罩站周边实际气温情况, 但下一步仍需在防辐射罩站点当地设置对比气温观测试验, 用来更加准确地观测防辐射罩站和百叶箱站观测气温变化情况, 以期提高防辐射罩站观测气温订正模型的订正效果。

另外, 站点观测气温偏高并不仅仅只与防辐射罩有关, 还与区域自动气象站地理位置、周边环境以及下垫面材质有关 (Sugawara et al., 2019; Lu et al., 2023), 上述原因均可能导致 T_{co} 进一步升高, 因此后续研究中可针对不同地理环境条件, 对站点高温状况和变化规律进行进一步评估。最后, 研究中使用多元线性回归方法和随机森林方法来订正 T_{co}, 均取得了较好的订正效果, 但建模使用的两种模型, 在线性拟合和机器学习领域均较为常见和传统; 近年来, 随着机器学习和深度学习方法不断发展, 优秀模型

不断涌现, 例如较为新颖的卷积神经网络模型 (Jeong et al., 2021; Lucia et al., 2022) 和长短期记忆神经网络模型 (Hou et al., 2022; Khedhiri, 2022), 在面向大数据量训练数据集时, 拟合效果优于传统机器学习方法, 在面向强噪音数据集、高冗余数据集时也有着较好模拟表现。后续研究中可利用新机器学习和深度学习方法建模, 并与现有模型进行对比分析, 以期提升模型订正效果。

参考文献 (References):

黄天文,焦飞,伍志方.2024.一种基于迁移学习和长短期记忆神经网络的降水预报方法[J].暴雨灾害,43(1):45−53. Huang T W, Jiao F, Wu Z F. 2024. A precipitation forecast method based on transfer learningand long short term memory [J]. Torrential Rain and Disasters,43(1):45−53 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023−118

何志军,封秀燕,何利德,等.2010.气象观测资料的四方位空间一致性检验[J].气象,36(5):118−122. He Z J, Feng X Y, He L D, et al. 2010. Examination of meteorological data by the horizontal space consistency analysis from four directions [J]. Meteorological Monthly, 36(5):118−122 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2010.5.018

浦玮.2019.自然通风防辐射罩辐射误差修正算法研究与应用[D]. 南京:南京信息工程大学. Pu W. 2019. Research and application of radiation error correction algorithm for naturally ventilated radiation shield [D]. Nanjing:Nanjing University of Information Science and Technology (in Chinese). doi:10.27248/d.cnki.gnjqc.2019.000272

孙越,王海军,周月华,等.2023.三种插值方法对区域自动气象站日气温缺测数据插补的适用性研究[J].暴雨灾害,42(1):97−104. Sun Y, Wang H J, Zhou Y H, et al. 2023. Applicability of three interpolation methods in estimating daily temperature with missing data from regional automatic weather station [J]. Torrential Rain and Disasters, 42(1):97−104 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2022−183

孙中琳,刘清惓,杨杰,等.2021.一种自然通风防辐射罩的设计与研究[J].科学技术与工程,21(31):13262−13267. Sun Z L, Liu Q Q, Yang J, et al. 2021. Design and research of a natural ventilation radiation shield [J]. Science Technology and Engineering,21(31):13262−13267 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1671−1815.2021.31.007

王海军,刘莹.2012.综合一致性质量控制方法及其在气温中的应用[J].应用气象学报,23(1):69−76. Wang H J, Liu Y. 2012. Comprehensive consistency method of data quality controlling with its application to daily temperature [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 23(1):69−76 (in Chinese). doi:10.11898/1001−7313.20120108

王宏记,王海军,曾又枝,等.2008.省级气象信息综合数据库系统的设计与实现[J].暴雨灾害,106(3):283−286. Wang H J, Wang H J, Zeng Y Z, et al. 2008. The design and implementation of comprehensive database for Provincial Meteorological Information [J]. Torrential Rain and Disasters,106(3):283−286 (in Chinese)

王海军,闫荞荞,向芬,等.2014.逐时气温质量控制中界限值检查算法的设计[J].高原气象,33(6):1722−1729. Wang H J, Yan Q Q, Xiang F, et al. 2014. Algorithm design of quality control for hourly air temperature [J]. Plateau Meteorology,33(6):1722−1729 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000−0534.2014.00028

王帅,刘清惓,杨杰,等.2022.地面气象测量温度传感器的设计与实验研究[J].传感器与微系统,41(6):25−28. Wang S, Liu Q Q, Yang J, et al. 2022. Design and experimental study of temperature sensor for ground surface meteorological measurement [J]. Transducer and Microsystem Technologies,41(6):25−28 (in Chinese). doi:10.13873/J.1000−9787(2022)06−0025−04

王晓蕾,韩有君.2008.温湿度传感器防辐射罩研究[J].气象水文海洋仪器,2(2):68−71. Wang X L, Han Y J. 2008. Research on radiation shield of temperature and humidity probes [J]. Meteorological, Hydrological and Marine Instruments,2(2):68−71 (in Chinese). doi:10.19441/j.cnki.issn1006−009x.2008.02.020

王志成,张雪芬,雷勇,等.2015.防辐射罩与百叶箱的防辐射性能比对分析[J].气象水文海洋仪器,32(1):50−54. Wang Z C, Zhang X F, Lei Y, et al. 2015. Comparative analysis on anti-radiation performance of thermometer screen and radiation protection cover [J]. Meteorological, Hydrological and Marine Instruments,32(1):50−54 (in Chinese). doi:10.19441/j.cnki.issn1006−009x.2015.01.010

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,(3):377−384. Xiong A Y, Zhu Y J, Ren Z H, et al. 2006. Differences of surface temperature observations recorded by different sensors in different screens and its causes [J]. Acta Meteorologica Sinica,(3):377−384 (in Chinese) doi:10.3321/j.issn:0577−6619.2006.03.012

袁超,丁善文,于成献,等.2015.防辐射罩与百叶箱温度观测差异性分析[J].山东气象,35(3):60−62. Yuan C, Ding S W, Yu C X, et al. 2015. Analysis of temperature observation differences between radiation shield and thermometer screen box [J]. Shandong Meteorology, 35(3):60−62 (in Chinese). doi:10.19513/j.cnki.issn1005−0582.2015.03.015

严家德,金莲姬,王巍巍,等.2014.百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 J D, Jin L J, Wang W W, et al. 2014. Comparative analysis of maximum and minimum temperatures of LTS and ASPTS [J]. Journal of Applied Meteorological Science,25(2):185−192 (in Chinese). doi:10.11898/1001−7313.20140208

严家德,金莲姬,王巍巍,等.2014.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 J D, Jin L J, Wang W W, et al. 2014. Comparisons of the different temperature observing systems of second generation AWS [J]. Journal of the Meteorological Sciences,34(1):60−65 (in Chinese). doi:10.3969/2013jms.0029

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 J D, Wang C G, Jin L J, et al. 2015. A comparative and modification study of louvred and aspirated shield temperature systems [J]. Climatic and Environmental Research,20(5):533−543 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9585.2015.14187

姚莉,林建,李伟,等.2022.全球逐时地面气温质量检测方法及应用[J].气象科技,50(1):1−8. Yao L, Lin J, Li W, et al. 2022. Quality detection method and application of global hourly surface temperature [J]. Meteorological Science and Technology,50(1):1−8 (in Chinese). doi:10.19517/j.1671−6345.20210236

杨显轲,严家德,郭建侠,等.2018.百叶箱内部风场特征仿真分析[J].气候与环境研究,23(4):493−503. Yang X K, Yan J D, Guo J X, et al. 2018. Simulation analysis of wind field characteristics inside the

reinforced plastics screen [J]. Climatic and Environmental Research, 23(4):493−503 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9585.2018.17129

阳艳红,王柏林,雷勇.2014.百叶箱与通风防辐射罩的温度对比观测结果分析[J].气象水文海洋仪器,31(4):21−25. Yang Y H, Wang B L, Lei Y. 2014. Comparative analysis on thermometer screens and ventilation radiation shield [J]. Meteorological, Hydrological and Marine Instruments,31(4):21−25 (in Chinese). doi:10.3760/cma.j.issn.0578−1426.2013.05.004

张高健,高山,惠英,等.2024.西安观测站长序列气温资料缺测记录插补和非均一性检验[J].沙漠与绿洲气象,18(1):149−155. Zhang G J, Gao S, Hui Y, et al. 2024. Interpolation and inhomogeneity test of long-term 2 m temperature time series at Xi'an observation station [J]. Desert and Oasis Meteorology,18(1):149−155 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002−0799.2024.01.019

中国气象局.2003.地面气象观测规范[M]. 北京:气象出版社:33-35 China Meterological Administration. 2003. The criterion of surface meteorological observation [M]. Beijing:China Meteorological Press:33-35 (in Chinese)

张鑫宇,陈敏,孙娟珍,等.2021. WRF-DA 中地面观测资料同化方案的改进与应用[J].气象学报,79(1):104−118. Zhang X Y, Chen M, Sun J Z, et al. 2021. Improvement and application of the ground observation data assimilation scheme in WRF-DA [J]. Acta Meteorologica Sinica,79(1):104−118 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2021.004

张媛. 2014. 中国东部近百年地面气温记录中的城市化偏差评价与订正[D]. 北京:中国气象科学研究院. Zhang Y. 2014. Evaluation and correction of urbanization bias in surface temperature records of eastern China in the last century [D]. Beijing:Chinese Academy of Meteorological Sciences (in Chinese)

Alaya M Z, Bussy S, Stéphane G, et al. 2017. Binarsity: a penalization for one-hot encoded features in linear supervised learning [J]. Journal of Machine Learning Research,20:1−34. doi:10.48550/arXiv.1703.08619

Holden A Z, Klene E A, Keefe F R, et al. 2013. Design and evaluation of an inexpensive radiation shield for monitoring surface air temperatures [J]. Agricultural and Forest Meteorology,180:281−286. doi:10.1016/j.agrformet.2013.06.011

Hou J W, Wang Y J, Zhou J, et al. 2022. Prediction of hourly air temperature based on CNN–LSTM [J]. Geomatics, Natural Hazards and Risk,13(1):1962-1986. doi:10.1080/19475705.2022.2102942

Jeong S, Park I, Kim H S, et al. 2021. Temperature prediction based on bidirectional long short-term memory and convolutional neural network combining observed and numerical forecast data [J]. Sensors,21(3):941−941. doi:10.3390/s21030941

Khedhiri S. 2022. Comparison of SARFIMA and LSTM methods to model and to forecast Canadian temperature [J]. Regional Statistics,12(2):177−194. doi:10.15196/RS120204

Lucia D G, Jenny C, Geovanny M. 2022. Short-term spatio-temporal forecasting of air temperatures using deep graph convolutional neural networks [J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 37(5):1649−1667. doi:10.1007/S00477−022−02358−0

Lu Y N, Wang T Y, Huang C, et al. 2023. Radiation and temperature of a tropical grassland in summer times: experimental observations [J]. Atmosphere,14(4):649. doi:10.3390/ATMOS14040649

Sakalis V D. 2022. Observing temperature reliably using passively ventilated radiation shields and a regression-based method to improve accuracy [J]. Bulletin of Atmospheric Science and Technology,3:1−4. doi:10.1007/s42865−022−00046−z

Sugawara H, Kondo J. 2019. Microscale warming due to poor ventilation at surface observation stations [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology,36(7):1237−1254. doi:10.1175/JTECH−D−18−0176.1

Yang J, Liu Q Q, Dai W, et al. 2016. A temperature error correction method for a naturally ventilated radiation shield [J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics,149:40−45. doi:10.1016/j.jastp.2016.09.010

(责任编辑 唐国瑛)