

区域历史气压数据预测方法研究

刘溅洪, 罗来正, 王健坤, 李茜, 吴欣睿, 孙有美

(西南技术工程研究所, 重庆 400039)

摘要: **目的** 研究区域气压、温度、湿度等典型环境因素历史数据的精确预测方法。**方法** 通过分析气压的时空变化规律, 采用样条函数拟合气压在时间维度上的变化规律, 利用高斯分布刻画不同站点间空间上的相关性, 构建区域历史气压数据时空分布模型。**结果** 模型对海南岛某站气压数据拟合值与实测值的最大绝对误差不超过 0.8 hPa, 平均绝对误差不超过 0.2 hPa。模型对海南岛某站气压的预测平均绝对误差在 6 hPa 以下 (占比 95.3%), 对高原地区某站气压的预测平均绝对误差约为 29.5 hPa, 平均相对误差为 4.6%, 预测精度较高。**结论** 采用构建的时空分布模型能够为区域环境因素极值计算提供更多的基础数据, 该方法还可以广泛应用于绝对湿度、温度等环境因素边界条件的预测。

关键词: 历史环境因素; 样条函数; 时间序列模型; 时空分布模型; 边界条件; 预测

中图分类号: P426.6

文献标志码: A

文章编号: 1672-9242(2025)02-0167-06

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2025.02.019

Forecasting Methods of Regional Historical Atmospheric Pressure

LIU Jianhong, LUO Laizheng, WANG Jiankun, LI Qian, WU Xinrui, SUN Youmei

(Southwest Institute of Technology and Engineering, Chongqing 400039, China)

ABSTRACT: The work aims to research the accurate prediction method of historical data of regional typical environmental factors, such as pressure, temperature and humidity. Specifically, by analyzing the spatial and temporal variation of atmospheric pressure, spline function was used to fit the temporal variation, and Gaussian distribution was used to depict the spatial correlation between different stations. Then, a spatial and temporal distribution model of regional historical environmental factors was constructed. Results showed that the maximum absolute error and the average absolute error between the fitted and measured atmospheric pressure data of a station in Hainan Island were less than 0.8 hPa and 0.2 hPa respectively. In addition, the average absolute error of the model for a station in Hainan Island was less than 6 hPa (95.3%), which was about 29.5 hPa for a station in the plateau area. Meanwhile, the average relative error was about 4.6%, indicating high prediction accuracy of the model. Therefore, the constructed spatiotemporal distribution model provides more basic data for the calculation of the extremes data of regional historical environmental factors, and it also provides new ideas for predicting boundary conditions of environmental factors such as absolute humidity and temperature.

KEY WORDS: historical environmental factors; spline function; time series model; spatiotemporal distribution model; boundary conditions; prediction

收稿日期: 2024-09-03; 修订日期: 2024-12-18

Received: 2024-09-03; Revised: 2024-12-18

引文格式: 刘溅洪, 罗来正, 王健坤, 等. 区域历史气压数据预测方法研究[J]. 装备环境工程, 2025, 22(2): 167-172.

LIU Jianhong, LUO Laizheng, WANG Jiankun, et al. Forecasting Methods of Regional Historical Atmospheric Pressure[J]. Equipment Environmental Engineering, 2025, 22(2): 167-172.

装备在寿命期内会受到各种环境因素的作用,将导致材料、结构、元器件、分系统乃至整机的性能劣化和功能失常^[1],从而影响功能和性能的正常发挥。二战期间,美军军事装备在亚洲和非洲的沙漠、高原、热带及亚热带地区产生腐蚀、长霉,造成60%的航空电子产品的功能丧失^[2]。据统计,武器装备50%以上的故障与其环境有关^[3-4]。因此,为了掌握环境因素对装备的影响,在试验过程中准确摸清环境因素的作用规律,美国等发达国家陆续在全球的各种类型环境建立了试验场站^[5],系统积累全球自然环境因素数据,并开展全球性环境试验研究。美、英等国相继编制和修订了MIL-STD-210A和MIL-STD-210B《军用设备气候极值》^[6]、MIL-STD-210C《军用系统及设备设计和试验用气候数据》^[7]、MIL-HDBK-310《军用产品开发用全球气候数据》^[8]和DEF STAN 00-35《国防装备环境手册》^[9]等与环境或环境数据相关的标准和手册,并在AR70-38《极端气候条件材料的研究、发展、测试与评价》^[10]和MIL-STD-810H《环境工程考虑和实验室环境试验》^[11]中,以环境因素极值对全球范围进行了分级,对不同地区使用的产品的试验和评价进行了严格的质量控制。

从20世纪中后期开始^[12],我国逐步开展了国内典型气候区域自然环境及环境效应数据积累,编制和修订了GJB 1172—1991《军用设备气候极值》^[13]、GJB 3617—1999《军用设备海洋气候、水文极值》^[14]和GJB 1060.2—1991《舰船环境条件要求气候环境》^[15]等标准,初步摸清了我国环境因素边界条件,形成了GJB 150A—2009《军用装备实验室环境试验方法》^[16],指导实验室加速试验的设计^[17]。自上述标准发布以来,对有关装备环境因素极值计算的报道较少,极值数据未能及时更新。在装备全天候、多地域服役的要求下^[5],装备面临的环境更加恶劣,摸清其环境适应性底数尤为重要。因此,构建区域气压、湿度、温度等环境因素数据的预测模型,准确预测区域内相同历史时段内的环境因素极值数据,为实验室试验考核提供更多的基础数据,是确保装备作战性能正常发挥的重要前提。本文基于海南岛地区和高原地区的国家级地面观测站采集的气压信息,构建区域环境因素数据预测模型,为装备区域服役环境因素极值的准确表征提供方法。

1 数据

本文所用气压数据为国家气象信息中心整编的海南岛18个和高原局部地区62个国家级地面气象观测站2010—2021年的逐时气压资料。考虑到记录的完整性和可比性,本文挑选区域内一年中缺测时间不超过5d的台站进行分析。

2 数据处理与模型构建

针对气压、温度、湿度等关键环境因素,可以通过充分挖掘其时间维度和空间维度的规律,构建相关数学模型,并进行耦合,建立时空分布模型,预测区域环境因素的记录极值,进而得到更多的实验室加速实验参数。因此,如何建立区域历史环境因素精准预测的时空分布模型是关键。以气压为例,构建模型前需要构建基本假设条件及明确模型输入。

2.1 假设条件

基本假设条件:1)对于任意站点,其气压的变化是连续的,相邻时刻的气压存在相关性;2)地球自转与公转引起的气压变化具有日周期与年度周期;3)相同时刻,空间上相邻地点的气压是连续变化的,不同地点的气压具有相关性;4)不同地点的气压变化趋势具有相同形式,相邻地点的气压变化情况相近。基于上述条件,首先构建单站的时间序列模型,然后考虑各单站气压间的相关性,在时间序列模型中引入空间坐标,进而构建出气压时空分布模型。

2.2 模型输入

模型输入:各观测站点经纬度与高度信息;各观测站点逐小时记录的气压数据。

2.3 气压时间序列模型构建

对于空间中任一给定经纬度和高度地点,其气压随时间呈现出周期性的变化,并存在一定的波动性。因此,可以将时间序列模型分解为趋势项模型和残差项模型:

$$p(t) = p_T(t; \boldsymbol{\alpha}) + p_R(t; \boldsymbol{\delta}) \quad (1)$$

式中: $p_T(t; \boldsymbol{\alpha})$ 为气压时间序列的趋势项; $\boldsymbol{\alpha}$ 为趋势项的参数; $p_R(t; \boldsymbol{\delta})$ 为气压时间序列的残差项; $\boldsymbol{\delta}$ 为残差项的参数; t 为时间。

2.3.1 趋势项模型

在拟合趋势项时,考虑气压变化的年周期性和日周期性,采用3阶M样条函数进行建模,主要过程如下:利用一组样条的线性组合 $p(t) = \sum_{k=1}^{l_d} \alpha_k^d M_{k/d}^{(3)}(t - \lfloor t \rfloor)$ 描述气压的日周期性;对于气压的年周期性变化,则可以利用2组样条函数 $p_{am}(t) = \sum_{k=1}^{l_{am}} \alpha_k^{am} M_{k/l_{am}}^{(3)}\left(t - \lfloor 366 \frac{t}{366} \rfloor\right)$ 与 $p_{af}(t) = \sum_{k=1}^{l_{af}} \alpha_k^{af} M_{k/l_{af}}^{(3)}\left(t - \lfloor 366 \frac{t}{366} \rfloor\right)$ 分别刻画日气压均值与日气压波动幅值在一年里的变化情况,即年周期性可用 $p(t) p_{af}(t)$ 进行拟合。因此,可以构造气压时间序列的趋势项模型,见式(2)。

$$p(t; \alpha) = \alpha_0 + p_{am}(t) + p(t) p_{af}(t) = \alpha_0 + \sum_{k=1}^{l_{am}} \alpha_k^{am} M_{kl_{am}}^{(3)} \left(t - \lfloor 366 \frac{t}{366} \rfloor \right) + \sum_{k=1}^{l_d} \alpha_k^d M_{kl_d}^{(3)} \left(t - \lfloor t \rfloor \right) \sum_{k=1}^{l_{af}} \alpha_k^{af} M_{kl_{af}}^{(3)} \left(t - \lfloor 366 \frac{t}{366} \rfloor \right) \quad (2)$$

式中: $\alpha = \{\alpha_0, \{\alpha_k^d\}, \{\alpha_k^{am}\}, \{\alpha_k^{af}\}\}$; α_0 为气压时间序列均值; α_k^d 为 M 样条族中的第 k 个基函数的未知参数; $M_{kl_d}^{(3)}$ 为 3 阶气压日周期 M 样条族中的第 k 个基函数, 基函数总数为 l_d ; $M_{kl_{am}}^{(3)}$ 为 3 阶气压均值年周期 M 样条族中的第 k 个基函数, 基函数总数为 l_{am} ; $M_{kl_{af}}^{(3)}$ 为 3 阶气压日波动年周期 M 样条族中的第 k 个基函数, 基函数总数为 l_{af} 。

根据给定的数据 $(t_i, y_i), i=1, \dots, n$, 可以利用最小二乘方法估计气压趋势, 如式 (3) 所示。

$$\hat{\alpha} = \min_{\alpha} \sum_{i=1}^n \left[(p_i - p_T(t_i; \alpha))^2 \right] \quad (3)$$

2.3.2 残差项模型

在获得趋势项样条函数模型中未知参数的估计值后, 可得到任意时刻气压的残差序列 $p_{R,i} = p_i - \hat{p}_{T,i}$ 。其在时间上也存在连续变化特点, 相邻时刻的残差具有相关性, 可利用式 (4) 所示的一般高斯过程对气压时间序列的残差进行回归建模。

$$p \sim \mathcal{N}(\mu \mathbf{1}, K(\mathbf{T}, \mathbf{T}) + \sigma^2 \mathbf{I}) \quad (4)$$

式中: p 为因变量集; \mathbf{T} 为自变量集; μ 为气压残差均值; σ 为随机误差; $\mathbf{1}$ 为各元素均为 1 的 $n \times 1$ 列向量; \mathbf{I} 为对角线是 1、其他元素是 0 的 $n \times n$ 阶单位矩阵。

另外, $K(\mathbf{T}, \mathbf{T})$ 是第 (i, j) 个元素为 $k(t_i, t_j)$ 的 $n \times n$ 方阵, $k(t_i, t_j)$ 常用平方指数核函数进行计算:

$$k(t_i, t_j) = \kappa^2 \exp \left\{ - \sum_{s=1}^d \frac{(t_{i,s} - t_{j,s})^2}{2\gamma_s^2} \right\} \quad (5)$$

式中: $t_{i,s}$ 为自变量 t_i 的第 s 个元素; $t_{j,s}$ 为自变量 t_j 的第 s 个元素; κ 为标准差参数; γ_s 为第 s 维的尺度参数。

因此, 式 (4) 中的模型参数为 $\delta = \{\mu, \sigma, \kappa, \gamma_1, \dots, \gamma_d\}$ 。根据正态分布的密度函数, 可以得到其对数似然函数 $\ell(\delta)$, 然后对 $\ell(\delta)$ 关于 μ 求偏导, 可得 $\ell(\delta)$ 关于 $\{\sigma, \kappa, \gamma_1, \dots, \gamma_d\}$ 的剖面似然函数 ℓ_p , 再分别计算 ℓ_p 关于 $\{\sigma, \kappa, \gamma_1, \dots, \gamma_d\}$ 的偏导, 利用数值方法最大化剖面函数 ℓ_p , 进而得到各参数的极大似然估计。

为了提高残差模型的预测精度, 需要考虑气压变化的日周期性和年周期性。对于时间序列的日周期性, 对日历时间 t_i , 引入以下 2 个时间维度:

$$t_{i,2} = \cos \left(\frac{\text{hour}(t_i)}{12} \pi \right), t_{i,3} = \sin \left(\frac{\text{hour}(t_i)}{12} \pi \right) \quad (6)$$

式中: $\text{hour}(t_i)$ 为时刻 t_i 对应的一天中的小时值, 取值范围为 $[0, 24)$ 。

其次, 考虑时间序列的年度周期性, 类似地引入以下 2 个维度:

$$t_{i,4} = \cos \left(\frac{\text{day}(t_i)}{366} 2\pi \right), t_{i,5} = \sin \left(\frac{\text{day}(t_i)}{366} 2\pi \right) \quad (7)$$

式中: $\text{day}(t_i)$ 为时刻 t_i 在相应年份的天数排序, 取值范围为 $[0, 366]$ 。

综上, 在时间维度上, 对于任意时刻 t_i , 可以将其转换为一个五维的时间坐标 $\mathbf{x}_i^t = (t_{i,1}, t_{i,2}, t_{i,3}, t_{i,4}, t_{i,5})'$, 式中, $t_{i,1} = t_i$ 。因此, 时间序列的残差模型为:

$$p_R(t | \delta) = \mu + K[\mathbf{X}^t, \mathbf{x}^t(t)]' [K(\mathbf{X}^t, \mathbf{X}^t) + \sigma^2 \mathbf{I}]^{-1} (p_R - \mu \mathbf{1}) \quad (8)$$

2.4 气压时空分布模型构建

根据假设条件, 各单站时间序列均可以用相同的模型进行表述, 其区别为模型中参数的不同。

对于趋势项, 考虑 α 的空间相关性, 在经纬度与高度三维坐标平面可以利用高斯过程模型进行建模。假设当前共有 n 个地点, 经纬度与高度分别为 $\mathbf{x}_i^s = (x_{i,\text{long}}, x_{i,\text{lat}}, x_{i,\text{h}})'$, 其中 $i=1, 2, \dots, n$ 。假设各参数 $\beta_l (l=0, \dots, L)$ ($L = l_d + l_{am} + l_{af}$) 随空间坐标的关系可用具有高斯核函数的协方差刻画 (距离越近, 协方差越大; 距离越远, 协方差越小), 即:

$$\alpha_{i,l} \sim \mathcal{N}(\mu_l, K_l(\mathbf{X}^s, \mathbf{X}^s) + \sigma_l^2 \mathbf{I}) \quad (9)$$

进而得到表征气压趋势规律的时空分布模型, 如式 (14) 所示。

$$\tilde{p}_T(t) = p_T(t; \alpha) | [\alpha = \tilde{\alpha}] \quad (10)$$

对于残差项, 在空间维度上, 以站点经度、纬度以及高度分别作为第 6、7、8 维自变量, 构成一个 8 维向量 $\mathbf{x}_i^{st} = (x_{i,1}, x_{i,2}, x_{i,3}, x_{i,4}, x_{i,5}, x_{i,\text{long}}, x_{i,\text{lat}}, x_{i,\text{h}})'$, 作为任意地点任意时刻的时空坐标, 并代入式 (10) 即可。

3 模型验证

3.1 拟合效果验证

以海南岛地区为例, 基于该区域 18 个观测站点 2010 年 1 月 1 日 0 时—2019 年 12 月 31 日 23 时共

10 a 的气压历史监测数据进行验证。白沙站 2014 年 6 月—2019 年 12 月间的拟合效果以及部分时段的拟合效果如图 1 所示。由图 1 可知, 气压时间序列模型的拟合趋势与实测数据变化趋势相符, 绝大部分数据均在 90% 预测区间内。进一步分析预测值与实测值的平均绝对误差、平均均方根误差以及 90% 预测区间的

覆盖情况见表 1。由表 1 可知, 采用构建的气压时间序列模型对海南岛各观测站气压预测值与实测值间的平均绝对误差不高于 0.5 hPa, 平均均方根误差最大仅 0.7 hPa, 且 90% 预测区间对覆盖了实测气压的 88% 以上, 表明所构建的气压时间序列模型对实际气压的拟合达到了较高的精度。

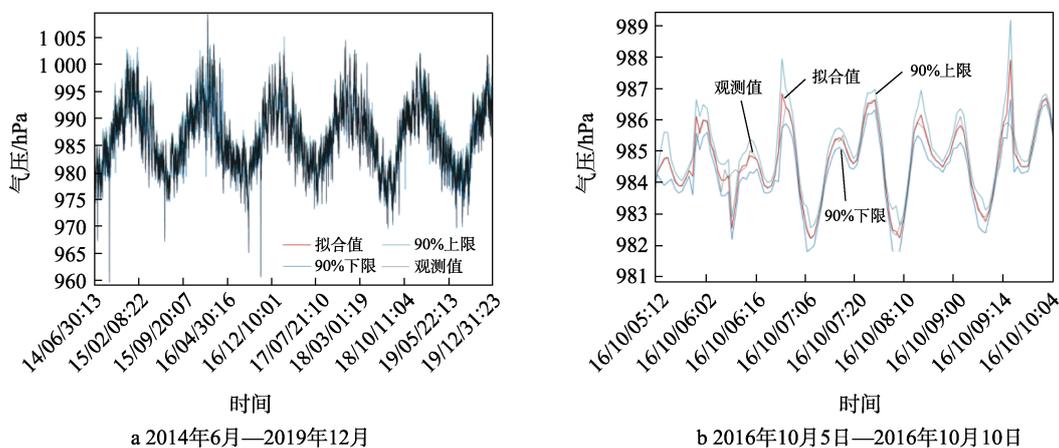


图 1 白沙站气压时间序列拟合效果

Fig.1 Fitting effect of atmospheric pressure time series of Baisha: a) from 06/2014 to 12/2019; b) from 10/05/2016 to 10/10/2016

表 1 气压时间序列模型对海南岛 18 个观测站气压数据的拟合效果

Tab.1 Fitting effect of atmospheric pressure time series model on atmospheric pressure data from 18 observation stations in Hainan Island

站台序号	平均绝对误差/hPa	平均均方根误差/hPa	90%预测区间覆盖率/%
1	0.13	0.24	96.5
2	0.42	0.59	89.1
3	0.32	0.49	91.7
4	0.22	0.39	94.8
5	0.23	0.40	94.3
6	0.39	0.56	90.9
7	0.37	0.54	90.7
8	0.31	0.49	92.4
9	0.46	0.64	88.9
10	0.30	0.47	92.2
11	0.38	0.55	90.2
12	0.41	0.59	90.1
13	0.38	0.55	90.2
14	0.27	0.42	92.4
15	0.47	0.64	88.3
16	0.39	0.55	90.3
17	0.40	0.57	89.9
18	0.33	0.49	91.2

进一步采用构建的时空分布模型对海南岛的气压分布进行拟合, 对比分析了海南岛 18 个观测站 2019 年各月份 1 日 12 时的拟合值与实测值, 比较结

果见表 2。可以看出, 在这 12 个月的对应时刻, 海南岛各站处拟合值与实测值的最大绝对误差不超过 0.4 hPa, 平均最大绝对误差约为 0.2 hPa, 说明所提模型很好地拟合了实际的气压值。

表 2 海南岛 18 个观测站 2019 年各月份 1 日 12 时拟合值与实测值误差

Tab.2 Deviation of fitted value from actual value at 12 o'clock on the 1st day of each month in 2019 for 18 observation stations in Hainan Island

站点序号	最大绝对误差/hPa	站点序号	最大绝对误差/hPa
1	0.2	10	0.2
2	0.2	11	0.2
3	0.1	12	0.3
4	0.1	13	0.2
5	0.1	14	0.3
6	0.2	15	0.1
7	0.2	16	0.2
8	0.2	17	0.4
9	0.4	18	0.3

3.2 预测效果验证

时空分布模型能够较好地拟合各观测站的气压, 但仍需要对相邻无观测站区域的气压预测效果进行表征, 本部分主要采用留一交验证叉法对模型的预测精度进行验证。

基于其他 17 个观测站预测的海南岛某站 2019 年

5月1日—10日的气压数值与实测值的变化规律曲线如图2所示,图3进一步给出了5月内31天预测值与实测值间的绝对误差的分布情况。可以看出,预测

值不仅匹配了实测气压的变化趋势,且误差也很小,该站2019年5月的气压预测值与实测值的绝对误差在6hPa以下(占比95.3%)。

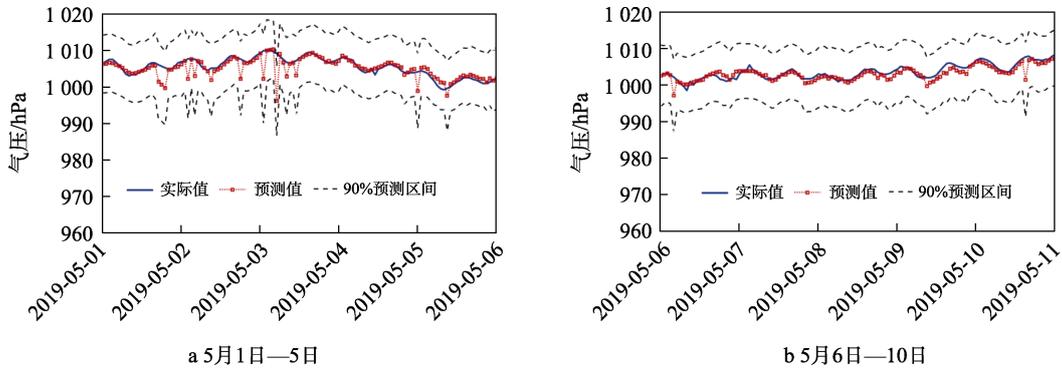


图2 基于留一交叉验证法预测的某站2019年5月份的气压与实测气压变化情况

Fig.2 Predicted atmospheric pressure base on remaining one cross-validation and actual atmospheric pressure changing curve at a certain station in 05/2019: a) from 5/1 to 5/5; b) from 5/6 to 5/10

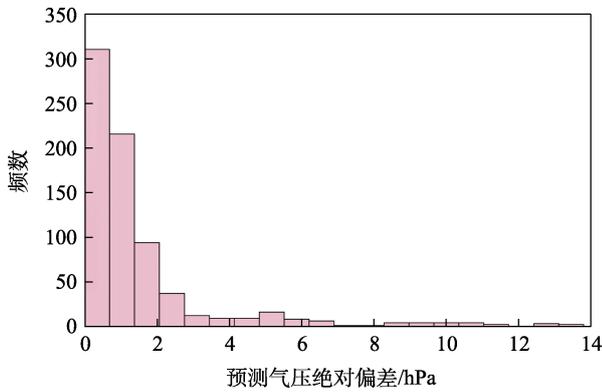


图3 某站2019年5月份实测气压与预测气压间绝对误差的分布情况

Fig.3 Absolute deviation between predicted and actual atmospheric pressure in 05/2019 of a certain station

进一步采用高原地区某站2018年1月整月的气压预测值与实测值进行比较(见图4)可知,所建模型预测的气压值与实测气压记录值的变化规律一致,但是实测气压要高于预测气压。

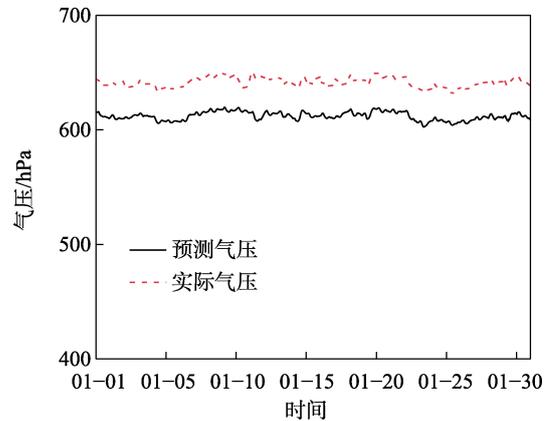


图4 高原地区某站2018年1月实测值与基于其他61个站点的预测值

Fig.4 Predicted atmospheric pressure base on the other 61 stations and actual atmospheric pressure in 01/2018 of a certain station in the plateau area

高原地区某站2018年1月内共744个数据点处预测值与实测值间的绝对误差和相对误差的分布情况如图5所示,可以看出,绝大多数时刻预测值与实

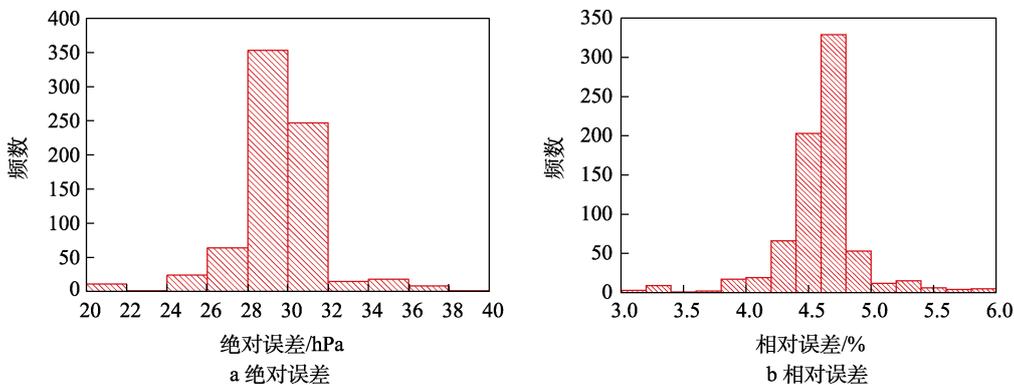


图5 高原地区某站2018年1月的预测气压与实测气压间的绝对误差和相对误差

Fig.5 Absolute error and relative error between predicted and actual atmospheric pressure in 01/2018 of a certain station in the plateau area: a) absolute error; b) relative error

测值的绝对误差在 40 hPa 以下, 平均绝对误差为 29.5 hPa, 多数集中在 28~32 hPa。预测值与实测值间的相对误差均小于 6%, 多集中在 4%~5%, 平均相对误差为 4.6%。

综上所述, 本文构建的气压时空分布模型具有较高的预测精度, 能够对无观测站的相邻区域进行整时气压预测。同时, 对于温度、湿度等与气压变化规律相似、数据格式相同的环境因素数据, 也可以采用本方法进行建模预测。

4 结语

利用样条函数拟合气压时间维度上的变化规律, 通过高斯过程刻画不同站点间气压演变的空间相关性, 构建了区域历史气压时空分布模型, 采用该模型能够实现无观测站的相邻区域整时气压预测。模型对海南某站气压的预测平均绝对误差在 6 hPa 以下(占比 95.3%), 对高原地区某站气压的预测平均绝对误差约为 29.5 hPa、平均相对误差为 4.6%, 预测精度较高。另外, 采用构建的时空分布模型能够为区域气压极值计算提供更多的基础数据, 该方法还可以广泛应用于绝对湿度、温度等环境因素边界条件的预测。

参考文献:

- [1] 牛犇, 刘溅洪. 高原地区机场自然环境谱编制研究[J]. 装备环境工程, 2023, 20(4): 122-127.
NIU B, LIU J H. Compilation of Natural Environment Spectrum of Airport in Plateau Area[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(4): 122-127.
- [2] 文邦伟, 胥泽奇. 外军装备环境适应性典型案例[J]. 装备环境工程, 2005, 2(3): 83-87.
WEN B W, XU Z Q. The Typical Cases of Environmental Worthiness of Foreign Materiel[J]. Metal Forming Technology, 2005, 2(3): 83-87.
- [3] 刘晓娣, 李田科, 韩建立. 基于贮存剖面的弹上电子部件可靠性分析[J]. 装备环境工程, 2024, 21(5): 82-87.
LIU X D, LI T K, HAN J L. Reliability Analysis of Missile-Borne Electronic Components Based on Storage Profile[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(5): 82-87.
- [4] 刘溅洪, 罗来正, 王健坤, 等. 不同统计方法对高原和高纬度地区低温极值结果的影响[J]. 装备环境工程, 2023, 20(12): 149-155.
LIU J H, LUO L Z, WANG J K, et al. Effect of Calculation Method on Low Temperature Operational Extremes Results of Plateau Area and High Latitude Area[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(12): 149-155.
- [5] 张梦. 武器装备环境试验及靶场条件建设研究[J]. 舰船电子工程, 2023, 43(3): 152-155.
ZHANG M. Research on Environmental Test of Weapons and Range Construction of Conditions[J]. Ship Electronic Engineering, 2023, 43(3): 152-155.
- [6] United States Department of Defense. Climatic Extremes for Military Equipment: ML-STD-210B[S]. United States: Air Force Systems Command, 1974.
- [7] United States Department of Defense. Climatic Information to Determine Design and Test Requirements for Military Systems and Equipment: ML-STD-210C[S]. United States: Air Force Systems Command, 1987.
- [8] United States Department of Defense. Global Climatic Data for Developing Military Products: ML-HDBK-310[S]. United States: Naval Publications and Forms Center, 1997.
- [9] Ministry of Defence. Environmental Handbook for Defence Materiel: DEF STAN 00-35[S]. British: British Defence Standards, 1999.
- [10] United States Army. Research, Development, Test and Evaluation of Materiel for Worldwide Use: AR70-38[S]. United States: Army Publishing Program, 1979.
- [11] United States Department of Defense. Department of Defense Test Method Standard: Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests: ML-STD-810H[S]. United States: Defense Logistics Agency, 2019.
- [12] 胡杰, 曹鹏, 马营, 等. 武器装备环境试验现状和思考[J]. 装备环境工程, 2024, 21(6): 16-22.
HU J, CAO P, MA Y, et al. Current Situation and Thinking of Environmental Test of Weapons and Equipment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(6): 16-22.
- [13] 国防科学技术工业委员会. 军用设备气候极值: GJB 1172—1991[S]. 北京: 中国标准出版社, 1991.
Commission of Science, Technology and Industry for National Defense of the CPLA. Climatic Extremes for Military Equipment: GJB 1172—1991[S]. Beijing: China Standard Press, 1991.
- [14] 中国人民解放军总装备部. 军用设备海洋气候、水文极值: GJB 3617—1999[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
General Armaments Department of the People's Liberation Army. Maritime Climatic and Hydrologic Extremes for Military Equipment: GJB 3617—1999[S]. Beijing: China Standard Press, 1999.
- [15] 国防科学技术工业委员会. 舰船环境条件要求气候环境: GJB 1060.2—1991[S]. 北京: 中国标准出版社, 1991.
Commission of Science, Technology and Industry for National Defense of the CPLA. The General Requirement for Environmental Condition of Naval Ships Climate: GJB 1060.2—1991[S]. Beijing: China Standard Press, 1991.
- [16] 中国人民解放军总装备部. 军用装备实验室环境试验方法: GJB 150A—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
General Armaments Department of the People's Liberation Army. Laboratory Environmental Test Methods for Military Material: GJB 150A—2009[S]. Beijing: China Standard Press, 1991.
- [17] 金伟晨. 以南海环境为例的海洋环境下装备适应性研究[J]. 船舶物资与市场, 2018, 26(5): 35-39.
JIN W C. Research on Equipment Adaptability in Marine Environment[J]. Marine Equipment/Materials & Marketing, 2018, 26(5): 35-39.