

环境试验与观测

不同统计方法对高原和高纬度地区 低温极值结果的影响

刘溅洪^{1,2,3}, 罗来正^{1,2,3}, 王健坤^{1,2,3}, 陈雪晴⁴, 龙仕腾¹, 吴欣睿¹

(1.西南技术工程研究所, 重庆 400039; 2.国防科技工业自然环境试验研究中心, 重庆 400039;
3.环境效应与防护重庆市重点实验室, 重庆 400039; 4.中国航空综合技术研究所, 北京 100028)

摘要: **目的** 研究不同统计方法下高原和高纬度地区低温极值的特征。**方法** 利用高原和高寒地区国家级地面气象观测站 2010~2020 年间的小时温度数据, 研究不同严酷月基准条件下两地低温工作极值的变化情况。**结果** 3 种严酷月基准条件下, 高原地区低温严酷月相同, 工作极值没有发生变化; 高纬度地区低温严酷月发生变化, 导致工作极值最大差值达到 3.2 °C。另外, 3 种条件下高原地区的低温工作极值均高于高纬度地区。**结论** 装备在典型地区服役过程中的环境工作极值统计应明确严酷月基准条件。

关键词: 高原地区; 高纬度地区; 低温; 严酷月; 记录极值; 工作极值

中图分类号: P426.6

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2023)12-0149-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2023.12.019

Effect of Calculation Method on Low Temperature Operational Extremes Results of Plateau Area and High Latitude Area

LIU Jian-hong^{1,2,3}, LUO Lai-zheng^{1,2,3}, WANG Jian-kun^{1,2,3}, CHEN Xue-qing⁴, LONG Shi-teng¹, WU Xin-rui¹

(1. Southwest Institute of Technology and Engineering, Chongqing 400039, China; 2. Natural Environment Test and Research Center of Science, Chongqing 400039, China; 3. Laboratory of Environmental Effect and Protection, Chongqing 400039, China;
4. China aero-poly technology Establishment, Beijing 100028, China)

ABSTRACT: The work aims to study the low temperature extreme characteristics of the plateau area and the high latitude area under different calculation methods. Specifically, the changing situation of the operational extremes of these two areas under different harsh monthly base conditions were researched by the precipitation temperature data of national meteorological observation stations from 2010 to 2020 of the plateau area and the high latitude area. Results showed that harsh moth and operational extremes of the plateau area had no change under three harsh monthly base conditions. But the harsh moth of the high latitude area changed, leading a maximum difference of 3.2 °C of operational extremes in the high latitude area. Additionally, the low temperature operational extremes of the plateau area were higher than that of the high latitude area. Therefore, the corresponding harsh monthly base condition should be clarified for the environmental operational extremes equipment in the service process of typical areas.

KEY WORDS: plateau area; high latitude area; low temperature; harsh month; recorded extremes; operational extremes

收稿日期: 2023-06-17; 修订日期: 2023-08-20

Received: 2023-06-17; Revised: 2023-08-20

引文格式: 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 Jian-hong, LUO Lai-zheng, WANG Jian-kun, 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.

自然环境是影响装备完好性的重要原因之一^[1],其造成装备损坏的占比能够达到整个使用过程损坏量的50%~60%^[2-3],导致大量的人力物力用于装备的日常维护^[4-5],阻碍了社会经济的发展,也给装备安全服役带来了较大威胁^[6]。因此,如何提高装备全寿命期的环境适应性是保障装备、设施设备安全可靠服役的必然要求。

我国幅员辽阔,严寒区域范围广,低的气温和长的低温持续时间导致装备在高原地区和高寒地区常常出现性能/功能失效^[7],严重影响两地装备效能的发挥^[8-10]以及人类活动^[11]。自然环境中,低温常常导致金属材料/构件出现尺寸变化、脆性增大^[12-13];橡胶、塑料硬化结构强度下降^[14],并易使减振或密封失效^[15-16];提高润滑油脂黏度而加大摩擦力^[17];降低蓄电池内阻而使其容量下降^[17];元器件性能改变、参数漂移^[18];内燃机气缸内充气量减少,燃烧室积碳严重^[19],发动机无法正常启动^[20-21],电子设备失灵等^[2]。因此,国内出版了GJB 150.4A《军用装备实验室环境试验方法第四部分:低温试验》^[22]等实验室低温试验标准,用于指导装备低温试验的设计,探究装备的低温性能。目前,GJB 150.4A中低温试验的温度参数采用的是GJB 1172.2—91《军用设备气候极值地面气温》^[23]中统计的全国低温工作极值,低温工作极值的定义及筛选方法参照GJB 1172.1—91《军用设备气候极值总则》^[24]。为了更精细地研究多层次产品在低温环境下的自然失效原因,国内科研机构通过在高原或高寒地区安装环境因素观测装置,采集两地主要环境因素,统计分析环境因素记录极值、工作极值等数据^[25],编制相应的环境谱^[20],指导产品失效机理分析和实验室加速试验设计。其中,工作极值是建立在严酷月的基础上,然而GJB 1172.1—91中定义的严酷月基准条件并不唯一,这可能导致同一站点或区域的工作极值统计结果出现差异,进而影响环境谱的编制。张先勇等^[25]对高纬度地区的漠河站1991~2005年间的低温工作极值进行了统计,并指出了不同严酷月基准条件统计的漠河站低温工作极值的最大差值达到了3.7℃。但是,关于不同严酷月基准条件对一定区域内工作极值的影响未见报道,这势必会影响区域环境谱编制的准确性。本文采用高原和高纬度地区的国家级地面观测站采集的温度信息,研究严酷月基准条件的变化对低温工作极值统计结果的影响。

1 数据

本文所用温度资料为国家气象信息中心整编的高原地区海拔在2 500~5 000m内和北纬49°以北的高纬度地区的国家级地面气象观测站2010~2020年的逐小时温度资料。考虑到记录的完整性和可比性,本文挑选两地1年内缺测时间不超过30d的台站分析。

2 数据处理方法

2.1 低温记录极值

以采集或收集的高原和高纬度两地11年间的逐时温度数据样本为基础,采用式(1)确定两地的低温记录极值:

$$X_i \geq X_{\min} \quad (1)$$

式中: X_i 是温度数据样本总体中第*i*个样本的值; X_{\min} 是温度数据样本总体中的最小值。

2.2 低温工作极值

工作极值是依据单个测站某气象要素严酷月的逐时资料和时间风险率确定的保障设备正常工作的临界值。根据GJB 1172.1—1991中对工作极值的确定方法描述可知,首先需要确定区域内各单站的低温严酷月,再从严酷月中统计出各时间风险率对应的数据,即为低温工作极值。其中,严酷月是通过特定方法确定的一定时间范围内某气象要素明显高于或低于其他月份的月份;时间风险率指某气象要素在严酷月出现不小于或不大于某特定值的小时数占应有记录总小时数的百分率。

根据GJB 1172.1—1991的方法可知,低温严酷月可通过比较各月的月最低值、月平均值小于某一阈值的天数等进行确定。

单站低温工作极值的确定:将低温严酷月的逐时记录由小到大排序,由式(2)确定的第*i*个记录为时间风险率等于*t*的工作极值。

$$i = \text{INT}(t \cdot N) \quad (2)$$

式中:*i*为排序后的记录号;*t*为时间风险率;*N*为严酷月记录总数;INT(*t*·*N*)表示将“*t*·*N*”实化整。

区域低温工作极值的确定:在单站低温工作极值计算结果的基础上,选取各单站各时间风险率下的最低温度为对应的工作极值。

3 结果与讨论

3.1 低温记录极值与海拔高度间的关系

高原和高纬度两地的低温记录极值随海拔高度的变化关系如图1所示。两地低温记录极值均出现在冬季,1月占比最多,其中高原地区低温记录极值为-45.9℃,略高于高纬度地区的-47.7℃。两地低温记录极值均随海拔的升高而降低,高原地区的低温记录极值在海拔升高到1 876m的过程中降低了34℃,高寒地区的低温记录极值在海拔升高到566m的过程中降低了9.2℃,两地低温记录极值随海拔高度降低的速率相近,说明在同一地区,海拔高度是影响低温记录极值的主要因素之一。不同的是,高原地区各观测站的低温记录极值几乎均在-40℃以上,而高寒

地区则几乎均在-40℃以下, 说明纬度也是影响低温记录极值的主要因素。另外, 高原地区更高海拔区域未安装气象站, 在现有气象观测数据基础上, 高寒地区的低温极值更低。

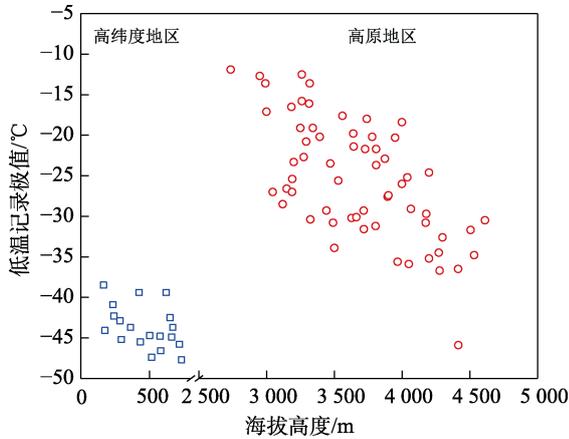


图 1 高原和高纬度地区 2010~2020 年间低温记录极值随海拔高度的变化情况

Fig.1 Relationship between low temperature record extremes and the altitude of plateau area and high latitude area from 2010 to 2020

从图 1 中还可以看出, 高原地区的低温记录极值并未出现在海拔最高的观测站, 且其值与该地区其余观测站低温记录极值的差值达到了 6℃ 以上(该点数

据满足 QX/T 118—2020 的质量控制标准)。不同的是, 高纬度地区的各单站记录极值则相差较小。因此, 这 2 种不同的低温记录极值变化规律可能会影响工作极值的统计, 以及环境谱的设计。

3.2 不同严酷月筛选原则下的低温工作极值分析

GJB 1172.2—1991《军用设备气候极值地面气温》中给出了全国工作极值的具体数值, 但是并未明确给出其值对应的严酷月筛选原则, 因此文献报道中也采用了多种方法进行统计, 以此更准确地描述环境极值特征。目前筛选低温严酷月的常见原则包括月最低值、月平均值最低所在月份以及月最低值小于某一阈值的天数最多所在月份。通过不同指标选出的严酷月势必有所区别, 工作极值也会存在差异。尤其是当区域内存在记录极值异常高或低时, 则需谨慎选择严酷月的筛选原则, 使工作极值的统计变得更准确。

3.2.1 单站温度最低值所在月份的低温工作极值

图 1 中已经给出高原和高纬度两地 2010~2020 年间各观测站的温度最低值, 因此上述各站低温极值出现的月份即为低温严酷月。然后参照 GJB 1172.1—1991 规定的工作极值统计方法, 即可确定两地各单站的工作极值, 如图 2 所示。

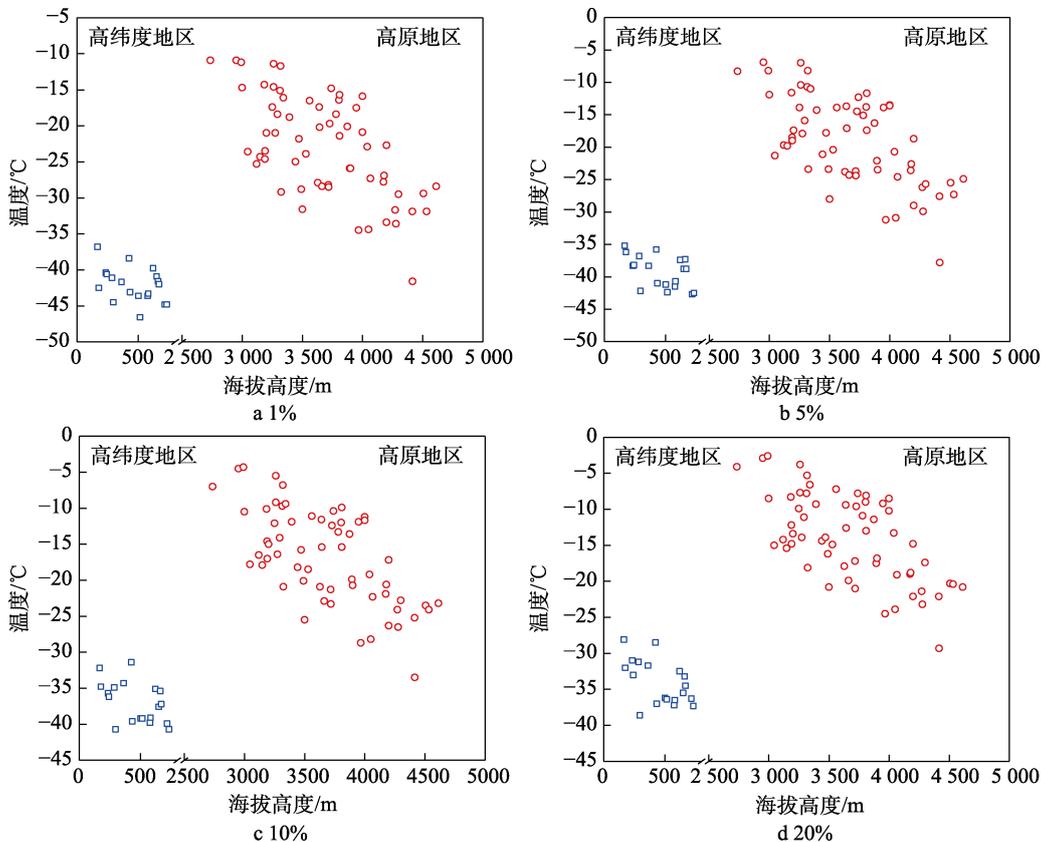


图 2 高原和高纬度地区各单站温度最低值出现月份各时间风险率对应的低温工作极值

Fig.2 Low temperature operational extremes of each station in plateau area and high latitude area in the lowest temperature occurred month undertime risk of 1%, 5%, 10% and 20%

高原地区和高纬度地区各单站 11 年间的严酷月多出现在 1 月和 12 月，以单站筛选的高原地区时间风险率为 1%、5%、10% 和 20% 的低温工作极值分别为 -41.6、-37.8、-33.5、-29.3 °C，均出现于同一个观测站。以单站筛选的高纬度地区时间风险率为 1%、5%、10% 和 20% 的低温工作极值分别为 -46.6、-42.4、-39.2、-36.4 °C。与低温记录极值相似的是，两地区 1%~20% 时间风险率下的低温工作极值也随海拔高度的增加而降低。其中，高原地区的单站低温工作极值均出现在低温记录极值出现的地区及月份，该站各时间风险率下的低温工作极值与其余 60 个观测站相差达到 4.5 °C 以上。与高原地区不同的是，高纬度地区的 1% 工作极值出现在海拔 500 m 左右，5% 工作极值则出现于海拔约 700 m 处，而 10% 和 20% 工作极值却出现在海拔 300 m 左右。这种变化的原因主要来源于以下 2 点：1) 低温记录极值相差较小，图 1 显示高纬度地区的记录极值仅相差 0.3 °C；2) 低温记录极值月份的气温由低到高的逐次排序变化存在较快的升高过程。

高纬度地区各时间风险率下温度最低值所在月份的温度出现概率如图 3 所示。由图 3 可知，1% 工作极值最低月份的温度在 1% 时间风险率以内的升高速度较快，10% 和 20% 工作极值最低月份对于的温度变化则相对缓慢。因此，上述 2 个原因的共同作用导致不同时间风险率下的工作极值未出现在同一观测站。

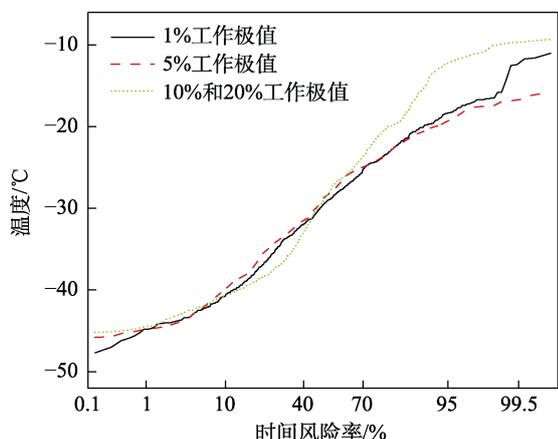


图 3 高纬度地区各时间风险率下工作极值最低月份的温度变化趋势

Fig.3 Temperature change trend in the month when the lowest operational extremes appears at each time risk rate in the high latitude area

现代化军事战争要求武器装备满足全天候、多地域的服役要求。因此，在考虑区域的工作极值时，应该在确定各单站工作极值的基础上，以所有观测站各时间风险率下的最值进行统计。该筛选条件下，高纬度地区时间风险率为 1%、5%、10% 和 20% 的低温工作极值分别为 -46.6、-42.7、-40.7、-38.6 °C。

3.2.2 单站月平均温度最低所在月份的低温工作极值

高原和高纬度两地 2010~2020 年间各观测站的平均温度最低值随海拔高度的变化情况如图 4 所示，两地以平均温度最低所在月份为严酷月筛选得到的低温工作极值如图 5 所示。与图 1 相比，高原地区的平均温度最低值已经不存在异常低温的月份，但是严酷月份未发生变化。因此，该地区的低温工作极值与图 2 中的一致，详见图 5。高纬度地区以月平均值最低月份筛选出的严酷月发生了变化，因此时间风险率为 1%、5%、10%、20% 的低温工作极值分别变为 -43.4、-41.8、-40.6、-38.1 °C。但是，从图 5 可以看出，高纬度地区各时间风险率下的低温工作极值最低值并不是出现在同一观测站。因此，当以所有观测站各时间风险率下的最低值作为该地区的低温工作极值时，则高纬度地区时间风险率为 1%、5%、10% 和 20% 的低温工作极值分别为 -45.6、-43.5、-42.1、-39.0 °C。

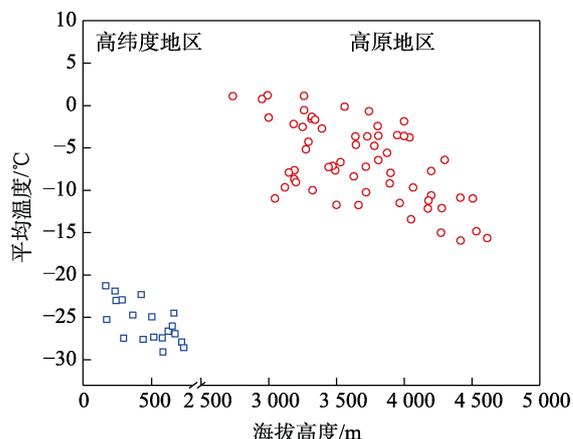


图 4 高原和高纬度地区 2010~2020 年间平均温度随海拔高度的变化情况

Fig.4 Relationship between average annual temperature and the altitude of plateau area and high latitude area from 2010 to 2020

3.2.3 单站月最低温度小于某一阈值的天数最多所在月份的低温工作极值

由图 1 可知，高纬度地区的温度极值低于高原地区，且存在较大差异。因此，两地严酷月筛选的温度阈值需要单独设定。高原和高纬度地区的单站低温严酷月以最低温度分别小于 -35 °C 和 -40 °C 的天数最多进行筛选。结果显示，高原地区和高纬度地区分别有 6 个和 17 个观测站达到条件。进一步分析低温严酷月中的低温工作极值发现，高原地区的低温工作极值未发生变化。

高纬度地区各单站严酷月中的工作极值如图 6 所示，其与海拔高度的变化没有明显的线性关系，1%、5%、10%、20% 时间风险率的低温工作极值分别为 -45.9、-43.0、-41.0、-37.6 °C。从图 6c 可以看出，该地区 20% 的低温工作极值最低值与其他 3 个时间风险率的工作极值并未出现在同一地区。因此，当

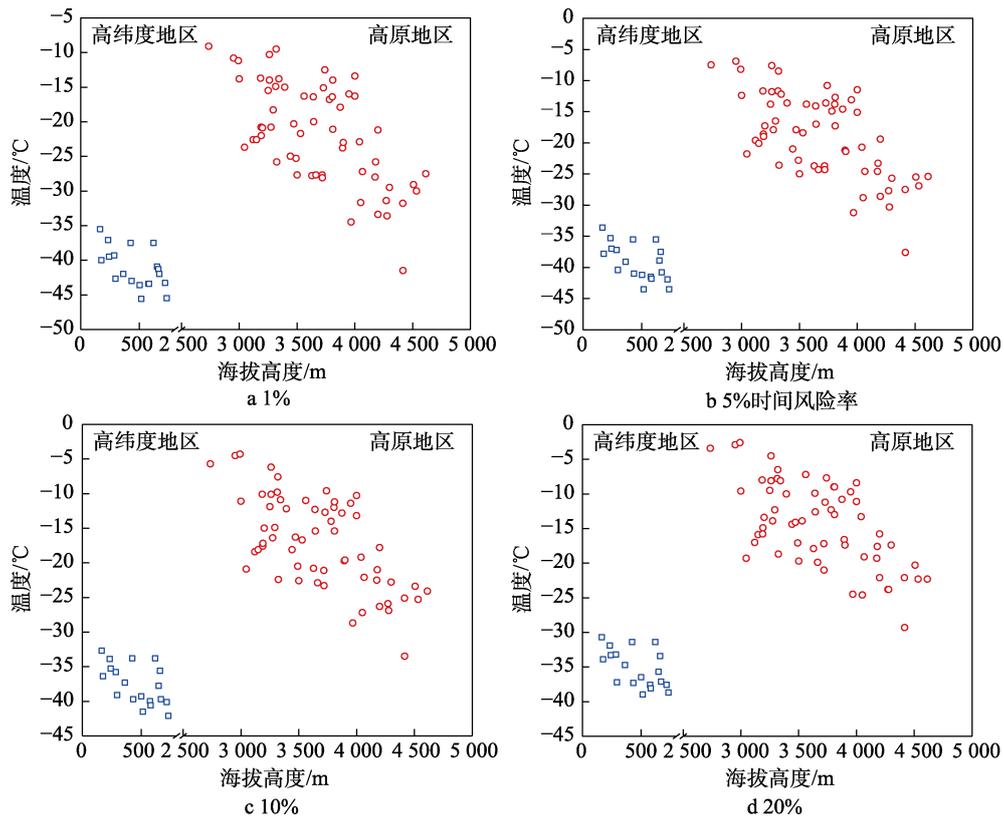


图 5 高原和高纬度地区各单站平均温度最低值出现月份各时间风险率对应的低温工作极值
Fig.5 Low temperature operational extremes at each station in plateau area and high latitude area in the lowest average temperature occurred month undertime risk of 1%, 5%, 10% and 20%

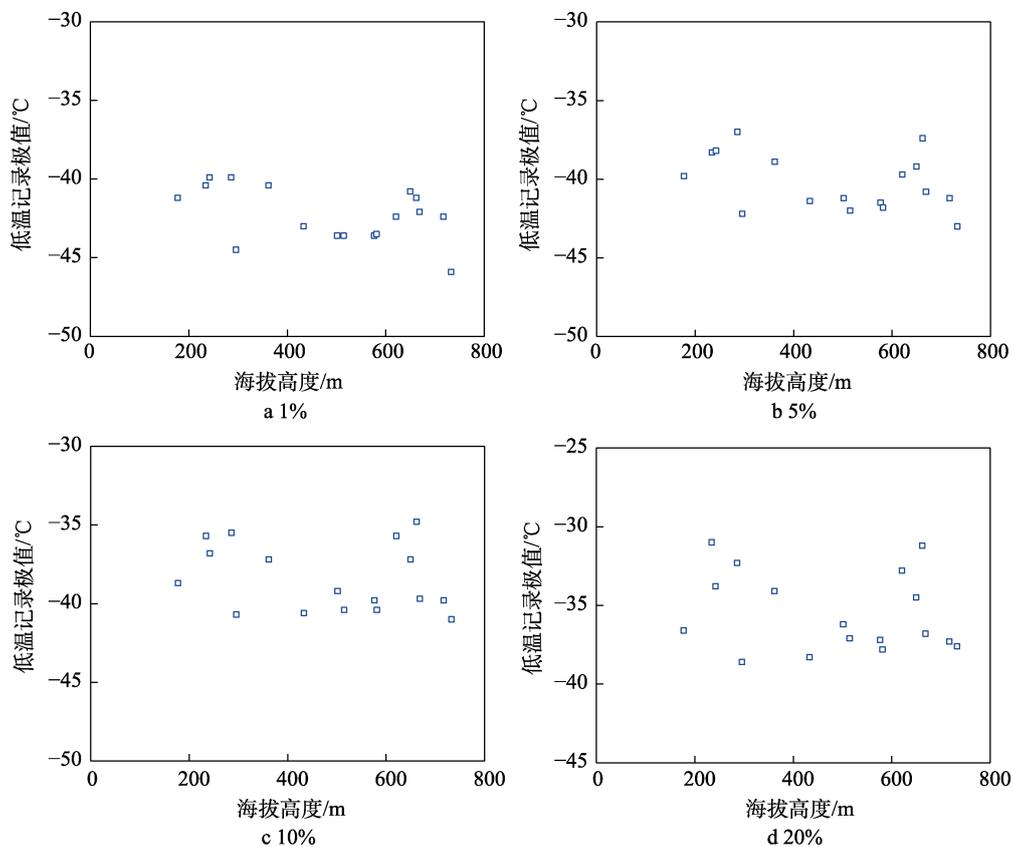


图 6 高原和高纬度地区各单站温度最低值小于某一阈值的天数最多所在月份各时间风险率对应的低温工作极值
Fig.6 Low temperature operational extremes undertime risk of 1% (a), 5%(b), 10% (c) and 20%(d) at each station in plateau area and high latitude area in the month with the maximum number of days when the lowest temperature is less than a certain threshold

以所有观测站各时间风险率下的最低值作为该地区的低温工作极值时,高纬度地区时间风险率为20%的低温工作极值为 -38.6°C 。

3.2.4 不同严酷月确定条件下的工作极值差异分析

3种严酷月基准条件下,高原和高纬度地区4种时间风险率下工作极值间的最大差值见表1。高原地区在几种条件下的工作极值未发生变化,这主要源于该地区海拔4400 m附近观测站低温与其他观测站相差较大,在3种筛选条件下的工作极值与其他观测站相差均达到 4°C 以上。不同条件下,高纬度地区低温工作极值存在明显差异,20%时间风险率内,工作极值的最大差值达到了 3.2°C 。这主要是因为该地区没有低温明显突出的单站,受筛选原则的影响,会得到不同的低温严酷月,从而计算工作极值的基础数据发生了变化。另外,这也与筛选地区内的观测站数量多和时间范围较长有关,若筛选单站1年中的工作极值,则3种筛选条件下的低温严酷月可能不会发生变化。

表1 两地同一风险率下低温工作极值的最大差值

Tab.1 Maximum difference of low temperature operational extremes at the same time risk rate in the two areas

时间风险率/%	高原地区	高寒地区
1	0	3.2
5	0	1.7
10	0	2.9
20	0	2.6

4 结语

采用以月最低值、月平均值最低所在月份以及月最低值小于某一阈值的天数最多所在月份为严酷月条件,分析了高原和高纬度地区2010~2020年间的低温极值特征,得到如下结果:

1)在现有气象观测站数据中,3种条件下高原地区的低温工作极值均高于高纬度地区。

2)高原地区出现了明显温度更低的月份,所以3种低温严酷月基准条件下,高原地区的低温严酷月和低温工作极值均未发生变化。

3)高纬度地区未出现单站低温特别严酷的月份,3种条件下的低温严酷月发生了变化,工作极值的最大差值达到了 3.2°C 。

4)武器装备在典型地区服役过程中的环境极值统计需考虑不同严酷月确定条件对工作极值的影响,给出工作极值对应的严酷月确定条件。

5)针对武器装备全天候、多地域服役环境适应性考核对环境极值的需求,在统计各单站工作极值的基础上,考虑以各时间风险率下各单站的最大/小值作为最终的工作极值,进而设计区域环境谱。

参考文献:

- [1] 闫杰,刘丽红,纪春阳,等.国内外自然大气环境试验的发展[J].中国腐蚀与防护学报,2009,29(1):69-75.
YAN J, LIU L H, JI C Y, et al. Development of Natural Atmospheric Environmental Test in the World[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2009, 29(1): 69-75.
- [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] 周堃,钱翰博,刘伟,等.浅谈装备环境适应性与可靠性[J].装备环境工程,2014,11(1):72-76.
ZHOU K, QIAN H B, LIU W, et al. Discussion on Environmental Worthiness and Reliability of Materiel[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(1): 72-76.
- [4] 柯伟.中国工业与自然环境腐蚀调查的进展[J].腐蚀与防护,2004,25(1):1-8.
KE W. Progress in Public Inquiry Concerning Corrosion in Chinese Industrial and Natural Environments[J]. Corrosion & Protection, 2004, 25(1): 1-8.
- [5] 林翠,王凤平,李晓刚.大气腐蚀研究方法进展[J].中国腐蚀与防护学报,2004,24(4):249-256.
LIN C, WANG F P, LI X G. The Progress of Research Methods on Atmospheric Corrosion[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2004, 24(4): 249-256.
- [6] 侯保荣,张盾,王鹏.海洋腐蚀防护的现状与未来[J].中国科学院院刊,2016,31(12):1326-1331.
HOU B R, ZHANG D, WANG P. Marine Corrosion and Protection: Current Status and Prospect[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2016, 31(12): 1326-1331.
- [7] 李贺,张建军,傅耘,等.严寒地区飞机温度环境分析与预测方法研究[J].环境技术,2022,40(2):174-182.
LI H, ZHANG J J, FU Y, et al. Research on the Analysis and Prediction Method of Aircraft Temperature Environment in Severe Cold Areas[J]. Environmental Technology, 2022, 40(2): 174-182.
- [8] 张亚星.高原高寒地区对装备作战试验的影响研究[J].价值工程,2020,39(18):188-189.
ZHANG Y X. Research on the Influence of Plateau and Cold Area on Operational Test[J]. Value Engineering, 2020, 39(18): 188-189.
- [9] 俞一鸣,赵广彤.高原环境对防空武器装备的影响及改进措施[J].现代防御技术,2011,39(2):172-175.
YU Y M, ZHAO G T. Performance of Antiaircraft Weapon Equipment Influenced by Plateau Environment and Its Improvement Measures[J]. Modern Defence Technology, 2011, 39(2): 172-175.
- [10] 苏志善,李华聪,徐刚刚.航空发动机燃油系统附件低温试验方法[J].装备环境工程,2021,18(6):94-100.
SU Z S, LI H C, XU G G. Low Temperature Test Method

- for Aviation Engine Fuel System Accessories[J]. Equipment Environmental Engineering, 2021, 18(6): 94-100.
- [11] 陈曦, 朱美洁, 王化, 等. 驻藏某部高寒山地驻训卫勤保障的难点及对策[J]. 西南军医, 2020, 22(3): 277-279.
Chen Xi, Zhu Mei-jie, Wang Hua, et al. The difficulties and countermeasures of stationing a certain alpine mountainous area in Tibet for training and guarding services[J]. Journal of Military Surgeon in Southwest China, 2020, 22(3): 277-279.
- [12] 陈曦, 朱美洁, 王化, 等. 驻藏某部高寒山地驻训卫勤保障的难点及对策[J]. 西南军医, 2020, 22(3): 277-279.
CHEN X, ZHU M J, WANG H, et al. Difficulties and Countermeasures of Medical Support for Training in Alpine Mountain Areas of a Certain Unit in Tibet[J]. Journal of Military Surgeon in Southwest China, 2020, 22(3): 277-279.
- [13] 孙伟, 傅学庆, 孟大禹. 极地装备环境试验的思考[J]. 船舶, 2023, 34(2): 112-117.
SUN W, FU X Q, MENG D Y. Thoughts on Environmental Test of Polar Equipment[J]. Ship & Boat, 2023, 34(2): 112-117.
- [14] 刘俊学, 胡唐胜, 陈晓宾. 高寒山地战场对武器装备的影响[J]. 兵器知识, 2013(11): 29-32.
LIU J X, HU T S, CHEN X B. Influence of Cold Mountain Battlefield on Weapons and Equipment[J]. Ordnance Knowledge, 2013(11): 29-32.
- [15] 刘钊, 焦毅. 航空装备高原寒区保障资源配置研究[J]. 环境技术, 2017, 35(1): 44-47.
LIU Z, JIAO Y. Research on Configuration of Support Resources of Aviation Equipment in Frigid Plateau Region[J]. Environmental Technology, 2017, 35(1): 44-47.
- [16] 张鑫, 韩建立, 王瑶, 等. 弹载电子设备加速贮存试验环境谱设计研究[J]. 舰船电子工程, 2021, 41(1): 117-121.
ZHANG X, HAN J L, WANG Y, et al. Study on Spectral Design of Accelerated Storage Test Environment for Missile-Borne Electronic Equipment[J]. Ship Electronic Engineering, 2021, 41(1): 117-121.
- [17] 谢章用, 闫杰, 陆家乐. 高原环境下电子装备环境适应性问题研究[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2022, 40(S2): 94-96.
XIE Z Y, YAN J, LU J L. Research on Environmental Adaptability of Electronic Equipment in Plateau Environment[J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2022, 40(S2): 94-96.
- [18] 唐其环, 张先勇, 张燕. 敦煌地区干热与干冷环境特征研究[J]. 装备环境工程, 2020, 17(12): 81-85.
TANG Q H, ZHANG X Y, ZHANG Y. Environmental Characteristics of Dry Heat and Dry Cold in Dunhuang Area[J]. Equipment Environmental Engineering, 2020, 17(12): 81-85.
- [19] 刘学斌, 丁光雨, 郑兴帅, 等. 武器装备典型故障和环境效应统计分析[J]. 装备环境工程, 2022, 19(4): 46-53.
LIU X B, DING G Y, ZHENG X S, et al. Statistical Analysis of Typical Faults and Environmental Effects of Weapons and Equipment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(4): 46-53.
- [20] 刘威, 薛雪东, 王品. 高原高寒战场环境下某型导弹武器系统保障研究[J]. 科技风, 2018(8): 191.
LIU W, XUE X D, WANG P. Research on the Support of a Missile Weapon System in Plateau Cold Battlefield Environment[J]. Technology Wind, 2018(8): 191.
- [21] 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.
- [22] 王坚, 王保贵, 张晨, 等. 高原气候环境对装备影响及适应性措施[J]. 环境技术, 2013, 31(6): 25-28.
WANG J, WANG B G, ZHANG C, et al. Countermeasures on Influence of Plateau Climate Environment on Equipment and Its Environmental Worthiness[J]. Environmental Technology, 2013, 31(6): 25-28.
- [23] GJB 150.4A, 军用装备实验室环境试验方法第四部分: 低温试验[S].
GJB 150.4A, Laboratory Environmental Test Methods for Military Material—Part 4: Low Temperature Test[S].
- [24] GJB 1172.2—91, 军用设备气候极值—地面气温[S].
GJB 1172.2—91, Climatic Extremes for Military Equipment—Surface air temperature[S].
- [25] GJB 1172.1—91, 军用设备气候极值—总则[S].
GJB 1172.1—91, Climatic Extremes for Military Equipment—General[S].
- [26] 张先勇, 唐其环, 张燕. 漠河低温工作极值及其统计方法探讨[J]. 装备环境工程, 2021, 18(9): 125-131.
ZHANG X Y, TANG Q H, ZHANG Y. Discussion on Operational Extreme Value and Statistical Method of Mohe Low Temperature[J]. Equipment Environmental Engineering, 2021, 18(9): 125-131.

责任编辑: 刘世忠