

贵阳龙洞堡机场霜天气预报技术研究

罗 娅, 宋 媛

民航贵州空管分局, 贵州 贵阳

收稿日期: 2024年8月15日; 录用日期: 2024年9月16日; 发布日期: 2024年9月24日

摘 要

利用2008~2023年ECMWF ERA5再分析资料及贵阳机场自观数据、机场天气报告及观测纪要栏数据分析了贵阳机场霜天气的环流形势、时间特征及气象因子的阈值, 以期提高贵阳机场霜天气的预报预警能力。结果表明: 1) 贵阳机场霜日年平均为2.8天, 主要发生在11月~次年2月; 2) 霜日平均环流形势: 500 hPa、700 hPa均为弱脊控制, 850 hPa为弱高压控制, 地面为弱均压场控制; 3) 夜间辐射降温明显, 04~08时温度及露点温度均在0°C以下, 07时降至最低; 霜前日平均最高温为10.6°C, 霜日平均最低温为-2.8°C, 平均温差为13.4°C; 霜日03时后相对湿度大于90%; 出霜时风向多为风向不定(占比32.3%)或静风(占比24.5%)、风速多小于2 m/s (87.9%)、天空状况多为晴到少云; 4) 霜出现时常伴随视程障碍现象, 其中轻雾最多(54.5%), 其次为冻雾(29.5%); 主导能见度和跑道视程整体呈先降低后抬升的趋势, 冻雾伴霜日雾一般较浓, 主导能见度和跑道视程较低, 可低至50 m, 持续时间较长; 5) 出霜时平均海平面气压范围为1024~1026 hPa。

关键词

贵阳机场, 霜, 冻雾, 气象阈值

Research on Frost Weather Forecast Technology for Guiyang Longdongbao Airport

Ya Luo, Yuan Song

Guizhou Sub-Bureau of Southwest Air Traffic Management Bureau of CAAC, Guiyang Guizhou

Received: Aug. 15th, 2024; accepted: Sep. 16th, 2024; published: Sep. 24th, 2024

Abstract

Using ECMWF ERA5 reanalysis data from 2008 to 2023, as well as observational data from Guiyang Airport, airport weather reports, and observation summary columns, the circulation pattern,

temporal characteristics, and meteorological factor thresholds of frost weather at Guiyang Airport were analyzed in order to improve the forecasting and early warning capabilities of frost weather at Guiyang Airport. The results show that: 1) The average frost days at Guiyang Airport are 2.8 days per year, mainly occurring from November to February of the following year; 2) The average circulation pattern of frost days: weak ridge control at 500 hPa and 700 hPa, weak high pressure control at 850 hPa, and weak mean pressure field control at the ground level; 3) During the night, the cooling effect from radiation is significant, with temperatures and dew points both dropping below 0°C between 04:00 and 08:00, reaching their lowest point at 07:00. The average maximum temperature prior to frost is 10.6°C, while the average minimum temperature on frost days is -2.8°C, resulting in an average temperature difference of 13.4°C. After 03:00 on frost days, the relative humidity generally exceeds 90%. At the time of frost occurrence, the wind direction is often variable (32.3% of the time) or calm (24.5%), with wind speeds mostly below 2 m/s (87.9%), and sky conditions are typically clear to partly cloudy; 4) Frost often accompanies visual impairment, with light fog being the most common (54.5%), followed by freezing fog (29.5%); The dominant visibility and runway visual range show an overall trend of first decreasing and then increasing. Frost fog with frost is generally thicker, and the dominant visibility and runway visual range are lower, up to 50 m, with a longer duration; 5) The average sea level pressure range during frost is 1024~1026 hPa.

Keywords

Guiyang Airport, Frost, Frozen Fog, Meteorological Threshold

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

霜是指贴近地面的空气受地面辐射冷却作用而降温到霜点(指露点低于 0°C)以下, 在地面或物体上凝华而成的白色冰晶[1]。霜对飞行安全的影响不容忽视, 飞机关键表面结霜会干扰通信系统、降低飞机操控性能, 严重时会引起飞机失速, 甚至发生飞行事故[2]。机场道面结霜会威胁跑道安全, 影响飞机滑行和起降。根据中国民用航空局明确规定, 航空器在起飞前要求一些关键表面不能带冰冻污染物(冰、雪、霜)起飞[3]。霜一般出现在夜间至早晨, 正值机场航班进出港早高峰, 飞机除霜会使航班出现不同程度的延误, 对旅客的出行及航班运行造成不利影响。

近年来, 不少气象工作者对霜进行了大量研究[4]-[8]。黄继雄等[9]研究发现, 首都机场霜发生在 11 月~2 月, 结霜时风速小、气温低、露点高, 相对湿度多大于 80%, 多伴有雾等天气现象; 陈晓龙等[10]发现上海虹桥机场出霜当日往往没有降水, 弱降水或明显降水天数较少; 廖毅等[11]发现西安咸阳机场结霜时最低温度范围为-8°C~0°C, 相对湿度多数大于等于 85%, 风向为偏西风或静风, 风速小于 3 m/s; 徐海等[12]认为成都双流机场霜日气温在 07 时左右下降至 0.5°C, 相对湿度在 04 时后维持在 95%左右, 天空状况为多云到少云; 王朝斌等[13]发现重庆江北机场霜前日与霜日温差在 4°C~8°C, 最低温一般降至 -2°C~2°C。而针对贵阳机场霜发生的特征及其与气象要素关系方面的研究还比较少。

本文通过分析贵阳机场霜的环流形势及相关气象要素特征, 探寻霜的发生及演变规律, 以期提高贵阳机场霜天气的预报预警能力, 为航空安全运行做好服务, 提升航班正常率。

2. 资料与方法

本文主要使用 2008~2023 年贵阳机场自动观测数据(包含风、温度、露点温度、相对湿度、跑道视程

等)、机场天气报告及观测纪要栏数据、ECMWF ERA5 再分析资料(时间分辨率为小时,空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$), 主要为位势高度及海平面气压资料。

3. 贵阳机场霜的气候特征

3.1. 年际变化

如图 1 所示, 2008~2023 年贵阳机场共有 44 个霜日, 年平均为 2.8 天。年变化特征明显, 2009 年、2014 年、2021 年出现最多, 为 6 天(占比 13.6)。2011 年、2018 年、2020 年、2022 年均无霜出现。初霜日最早出现在 2009 年 11 月 22 日, 终霜日最晚出现在 2008 年 2 月 29 日。

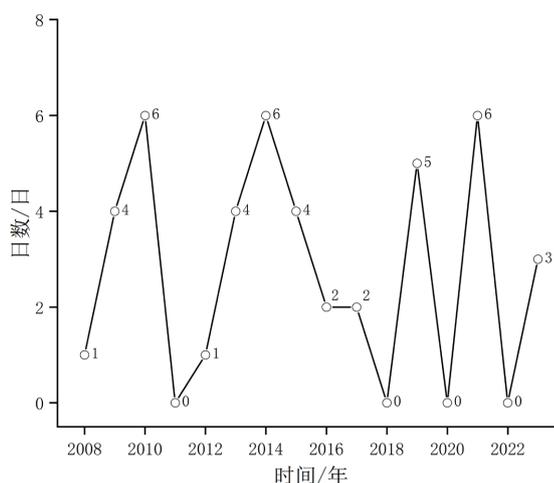


Figure 1. The interannual variation of frost at Guiyang airport from 2008 to 2023
图 1. 2008~2023 年贵阳机场霜的年际变化

3.2. 年变化

如图 2 所示, 贵阳机场霜仅发生在 11 月至次年 2 月, 其中 11 月霜日最少, 仅 4 天(占比 9.1%); 12 月达到峰值, 出现 20 天(占比 45.5%); 次年 1 月开始小幅减少, 出现 15 天(占比 34.1%); 2 月大幅减少, 出现 5 天(占比 11.3%)。

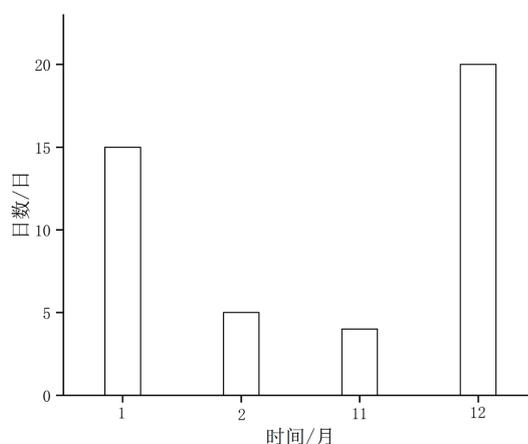


Figure 2. Annual variation of frost at Guiyang airport from 2008 to 2023
图 2. 2008~2023 年贵阳机场霜的年变化

4. 贵阳机场霜的环流形势分析

如图 3(a)~(c)所示, 对霜的 500 hPa、700 hPa、850 hPa 位势高度场进行合成分析, 发现 500 hPa、700 hPa 为弱脊控制, 850 hPa 为弱高压控制。如图 3(d)所示, 贵阳机场霜的海平面气压场为均压场控制。

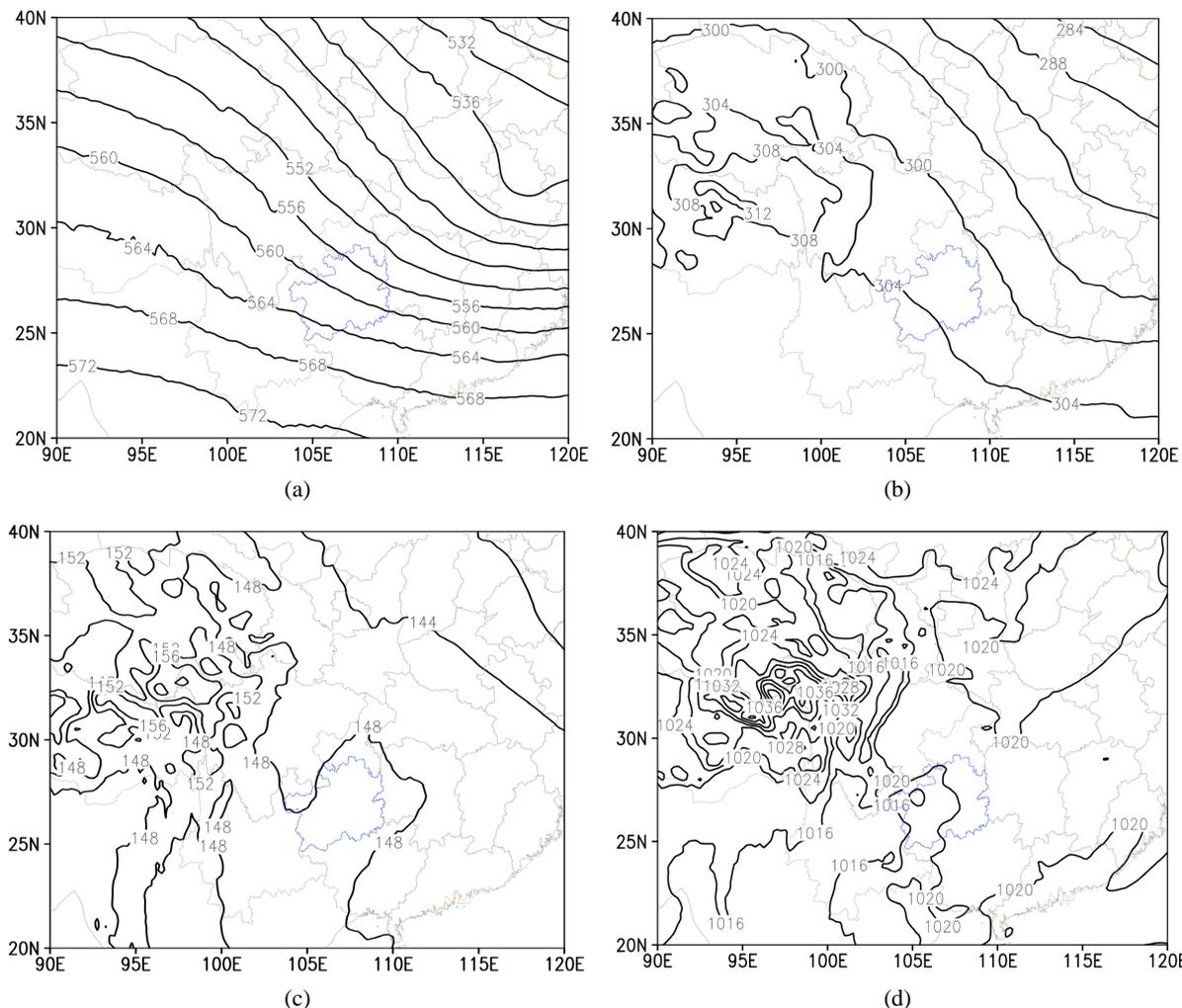


Figure 3. The circulation pattern of frost at Guiyang airport (a) 500 hPa, (b) 700 hPa, (c) 850 hPa potential height (unit: dagpm), (d) sea level pressure (unit: hPa)

图 3. 贵阳机场霜的环流形势(a) 500 hPa、(b) 700 hPa、(c) 850 hPa 位势高度(单位: dagpm)、(d) 海平面气压(单位: hPa)

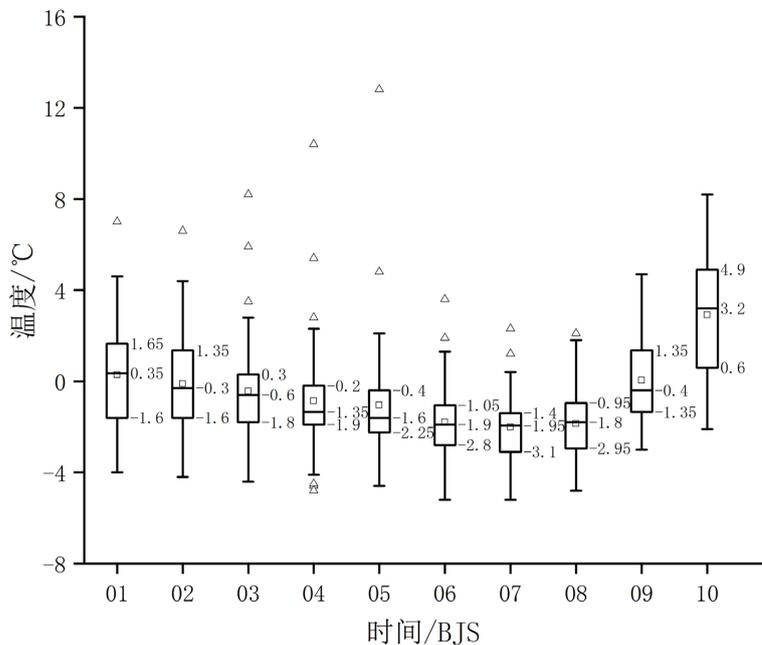
5. 贵阳机场霜的气象要素特征

霜是由水汽凝华或露水冻结形成的冰晶, 它与霜前日最高温、霜日最低温、相对湿度、风向风速、总云量等关系密切, 是多种要素共同作用的结果。

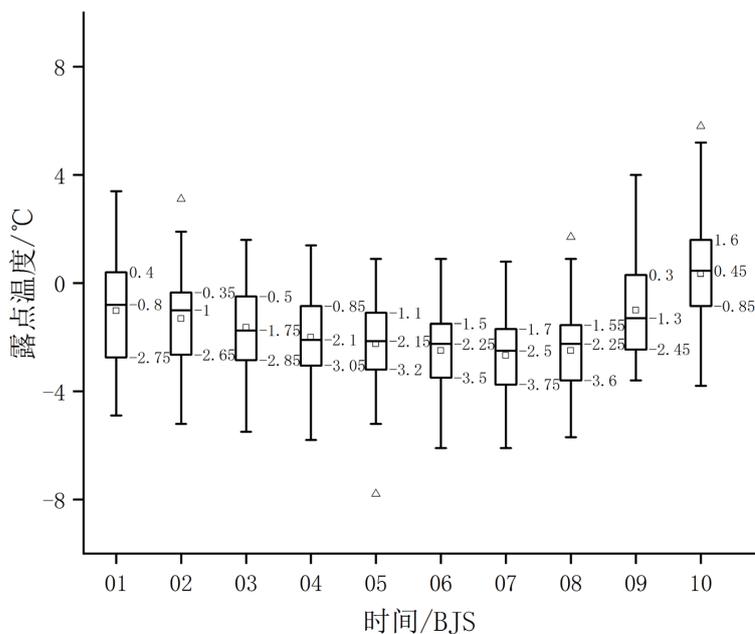
5.1. 霜日温度及露点温度

如图 4(a)所示, 由于辐射降温, 霜日 01~10 时(北京时间, 下同)温度中位数呈先降低(01~07 时)后升高(07~10 时)的分布特征。01 时温度中位数为 0.35℃, 50% 的温度集中在-1.6℃~1.65℃; 02 时温度中位数为-0.3℃, 50% 温度集中在-1.6℃~1.35℃; 03 时温度中位数为-0.6℃, 50% 温度集中在-1.8℃~0.3℃;

04 时温度中位数为 -1.35°C ，50%温度集中在 $-1.9^{\circ}\text{C}\sim-0.2^{\circ}\text{C}$ ；05 时温度中位数为 -1.6°C ，50%温度集中在 $-2.25^{\circ}\text{C}\sim-0.4^{\circ}\text{C}$ ；06 时温度中位数为 -1.9°C ，50%温度集中在 $-2.8^{\circ}\text{C}\sim-1.0^{\circ}\text{C}$ ；07 时温度一般最低，中位数为 -1.95°C ，50%温度集中在 $-3.1^{\circ}\text{C}\sim-1.4^{\circ}\text{C}$ ；08 时开始温度缓慢升高，中位数为 -1.8°C ，50%温度集中在 $-2.95^{\circ}\text{C}\sim-0.95^{\circ}\text{C}$ ；09 时温度中位数为 -0.4°C ，50%温度集中在 $-1.35^{\circ}\text{C}\sim-1.35^{\circ}\text{C}$ ；10 时温度抬升至 0°C 以上，中位数为 3.2°C ，50%温度集中在 $0.6^{\circ}\text{C}\sim 4.9^{\circ}\text{C}$ 。



(a)



(b)

Figure 4. (a) Temperature, (b) Dew point temperature at 01:00~10:00 on frost days
图 4. 霜日 1~10 时(a) 温度、(b) 露点温度

如图 4(b)所示, 霜日 01~10 时露点温度中位数的变化趋势与温度变化趋势比较一致。01~07 时露点温度逐渐降低, 07~10 时露点温度逐渐升高。01 时露点温度中位数为 -0.8°C , 50%露点温度集中在 -2.75°C ~ -0.4°C ; 02 时露点温度中位数为 -1.0°C , 50%露点温度集中在 -2.65°C ~ -0.35°C ; 03 时露点温度中位数为 -1.75°C , 50%露点温度集中在 -2.85°C ~ -0.5°C ; 04 时露点温度中位数为 -2.1°C , 50%露点温度集中在 -3.05°C ~ -0.85°C ; 05 时露点温度中位数为 -2.15°C , 50%露点温度集中在 -3.2°C ~ -1.1°C ; 06 时露点温度中位数为 -2.25°C , 50%露点温度集中在 -3.5°C ~ -1.5°C ; 07 时露点温度中位数为 -2.5°C , 50%露点温度集中在 -3.75°C ~ -1.7°C ; 08 时露点温度中位数为 -2.25°C , 50%露点温度集中在 -3.6°C ~ -1.55°C ; 09 时露点温度中位数为 -1.3°C , 50%露点温度集中在 -2.45°C ~ 0.3°C ; 10 时露点温度中位数为 0.45°C , 50%露点温度集中在 -0.85°C ~ -1.6°C 。

5.2. 霜前日最高温、霜日最低温、温度差

如图 5 所示(图中虚线为平均值), 霜前日最高温在 2.1°C ~ 17.4°C 波动, 平均最高温为 10.6°C ; 霜日最低温在 -5.8°C ~ 1.2°C 波动, 平均最低温为 -2.8°C 。最高温与最低温温差在 5.8°C ~ 18.2°C 波动, 平均温差为 13.4°C 。

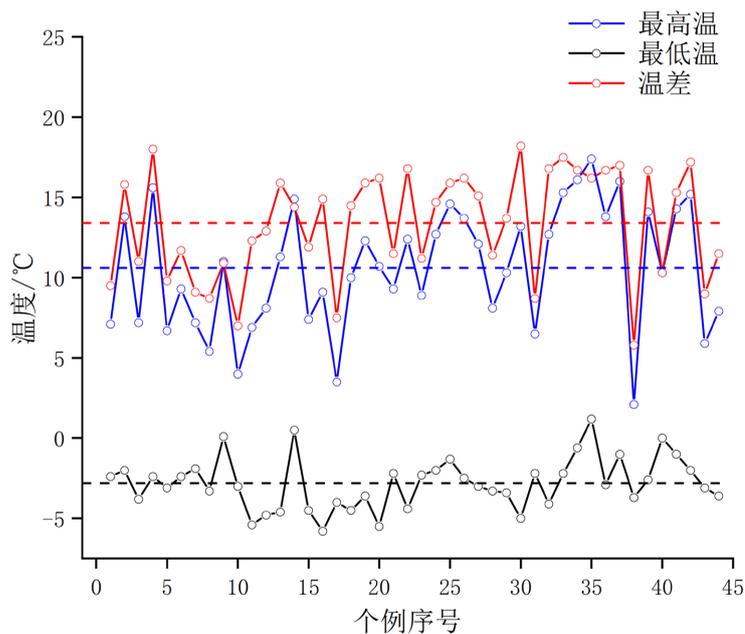


Figure 5. The highest temperature on the day before frost, lowest temperature on frosty days, daily temperature difference
图 5. 霜前日最高温、霜日最低温、日温差

不同月份霜前日最高温、霜日最低温及日温差略有差异。如图 6(a)所示(图中虚线为平均值), 1 月霜前日最高温在 2.1°C ~ 16°C 波动, 平均最高温为 11.2°C ; 霜日最低温在 -5.5°C ~ -1°C 波动, 平均最低温为 -3.0°C ; 温差在 5.8°C ~ 17.2°C 波动, 平均温差为 14.2°C 。如图 6(b)所示, 2 月霜前日最高温在 6.9°C ~ 13.7°C 波动, 平均最高温为 9.8°C ; 霜日最低温在 -5.4°C ~ -2.2°C 波动, 平均最低温为 -3.1°C ; 温差在 9.5°C ~ 16.2°C 波动, 平均温差为 12.9°C 。如图 6(c)所示, 11 月霜前日最高温在 7.2°C ~ 15.6°C 波动, 平均最高温为 11.5°C ; 霜日最低温在 -3.8°C ~ 0.5°C 波动, 平均最低温为 -2.3°C ; 温差在 11.0°C ~ 18.0°C 波动, 平均温差为 13.7°C 。如图 6(d)所示, 12 月霜前日最高温在 4.0°C ~ 17.4°C 波动, 平均最高温为 10.1°C ; 霜日最低温在 -5.8°C ~ -1.2°C 波动, 平均最低温为 -2.7°C ; 温差在 7.0°C ~ 18.2°C 波动, 平均温差为 12.8°C 。

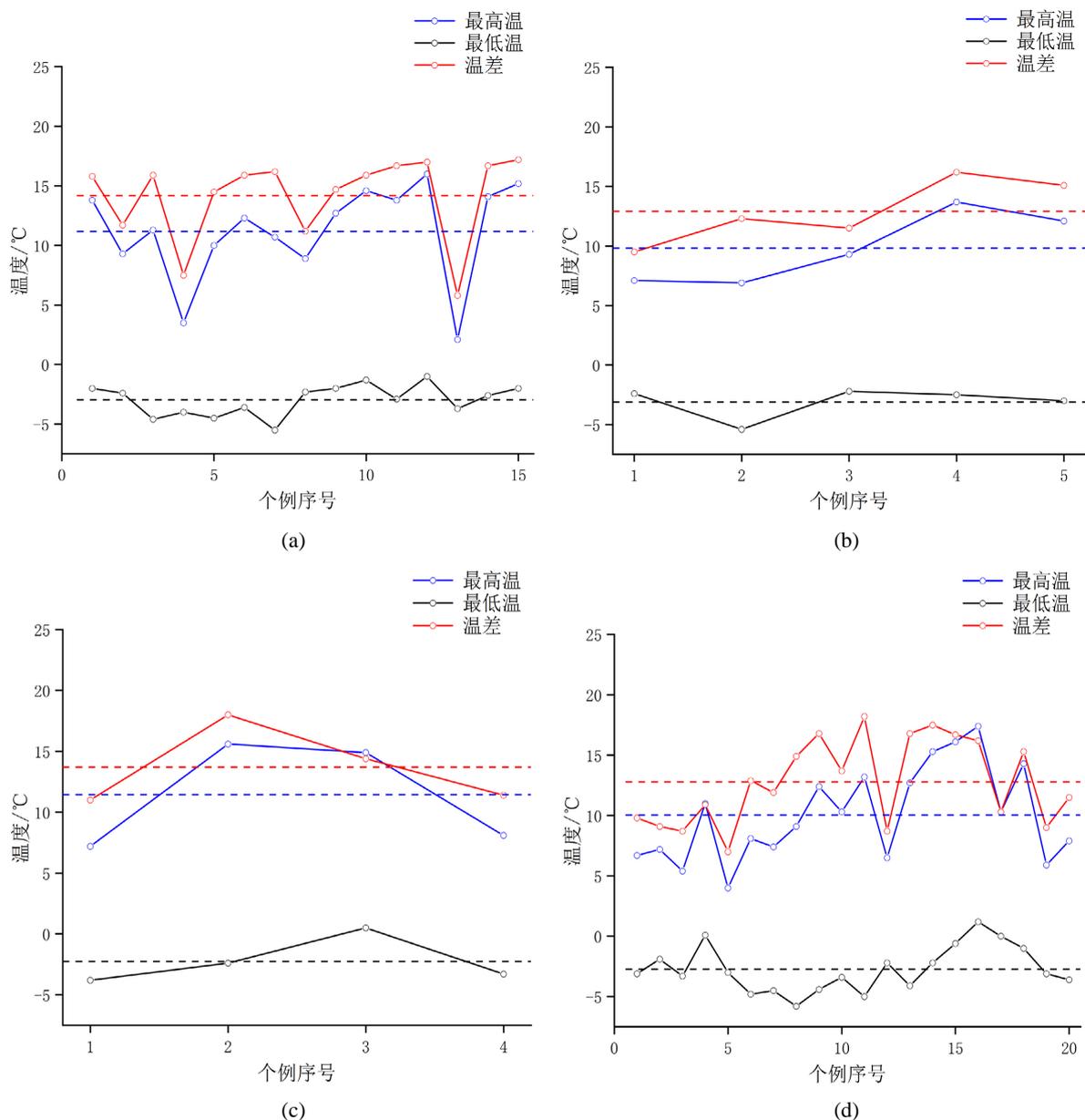


Figure 6. Same as Figure 5, (a) January, (b) February, (c) November, (d) December

图 6. 同图 5, (a) 1 月, (b) 2 月, (c) 11 月, (d) 12 月

5.3. 霜日相对湿度分布

如图 7 所示, 霜日 01 时相对湿度中位数为 93%, 50% 的相对湿度集中在 87.5%~95%; 02 时相对湿度中位数为 94%, 50% 的相对湿度集中在 88.5%~96%; 03 时中位数为 95%, 50% 的相对湿度集中在 90.5%~97%; 04 时中位数为 95%, 50% 相对湿度集中在 92%~97%; 05 时中位数为 95%, 50% 相对湿度集中在 92.5%~97%; 06 时中位数达到峰值(96%), 50% 相对数湿度集中在 93%~97%; 07 时中位数为 95.5%, 50% 的相对湿度集中在 93%~97.5%; 08 时中位数为 95.5%, 50% 的相对湿度集中在 94%~97.5%; 09 时中位数为 95%, 50% 的相对湿度集中在 91%~98%; 10 时相对湿度整体降低, 中位数为 85%, 50% 的相对湿度集中在 76%~96%。

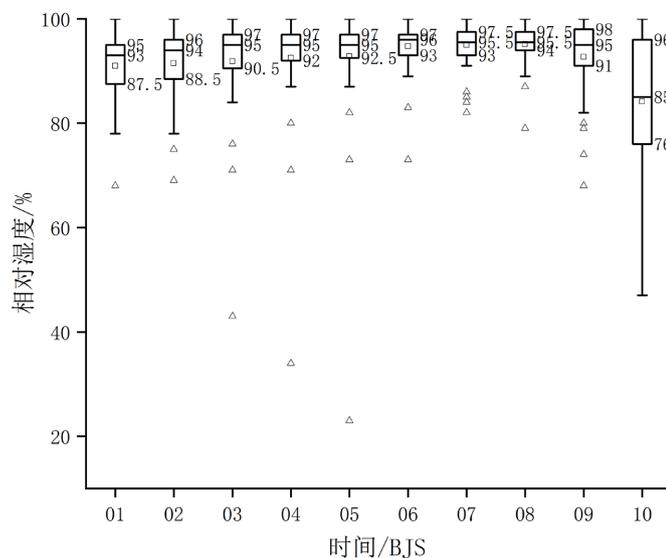


Figure 7. Relative humidity at 01:00~10:00 on frost days

图 7. 霜日 01~10 时相对湿度

5.4. 霜日风向风速分布

如图 8 所示, 霜日 01~10 时风向不定(VRB)占比最多(32.3%), 静风(C)次之(占比 24.5%), 偏北风和东北风占比 17.9%, 偏南风占比 15.7%。风速大多小于 2 m/s (占比 87.9%)。其中, 静风(风速 0 m/s)占比 24.5%, 风速[1, 2) m/s 占比 63.4%, 风速[2, 3) m/s 占比 8.1%, 风速 ≥ 3 m/s 占比 4.0%。

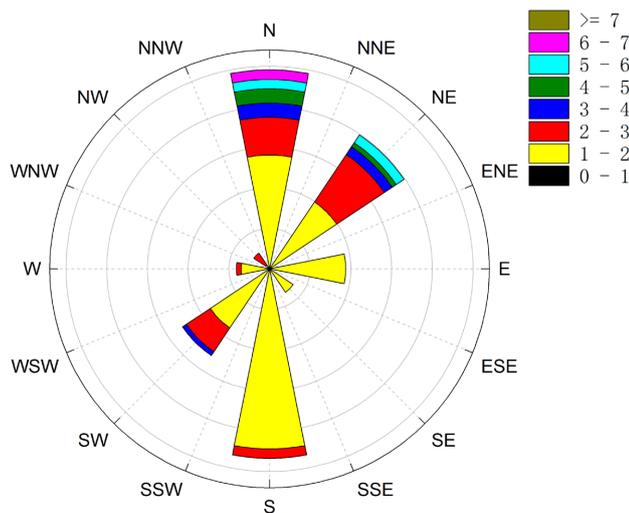


Figure 8. Wind direction and speed at 01:00~10:00 on frost days

图 8. 霜日 01~10 时风向风速

5.5. 霜日总云量分布

如图 9 所示, 霜日 01~10 时总云量多在 5 个量以下, 天空状况为晴到少云。利于夜间辐射降温, 使水汽凝华形成霜。其中, 霜日 01~06 时、09~10 时总云量中位数小于等于 1 个量, 07 时中位数为 3 个量, 08 时中位数为 2 个量。

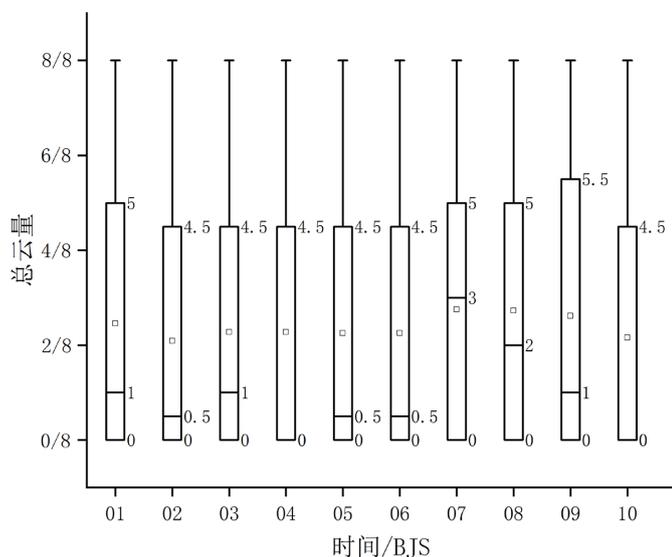


Figure 9. Total cloud cover at 01:00~10:00 on frost days
图 9. 霜日 01~10 时总云量

5.6. 霜日夜晨伴随天气现象

如图 10 所示, 霜出现时常伴随视程障碍现象。贵阳机场霜日伴随轻雾(BR)次数最多(占比 54.5%), 其次为冻雾(FZFG) (占比 29.5%), 霾(HZ) (占比 2.3%)、霾伴轻雾(HZ 伴 BR) (占比 4.5%)、雪(SN) (占比 2.2%)、无天气现象(占比 7%)次数较少。

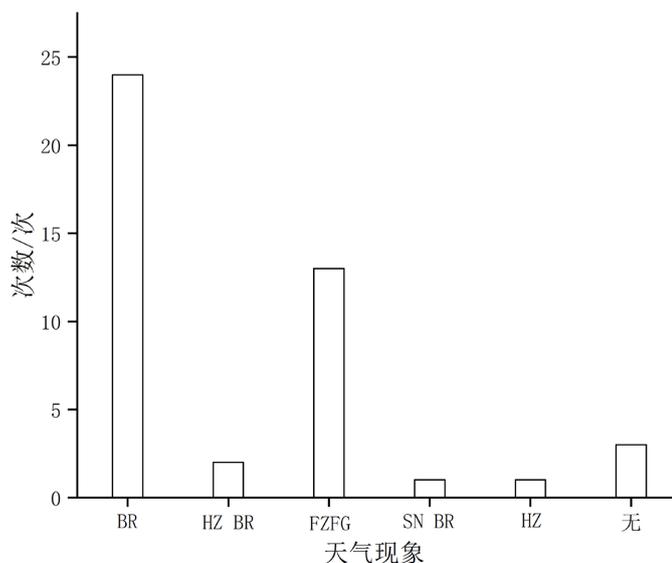


Figure 10. Accompanying weather phenomena at night and in the morning on frosty days
图 10. 霜日夜晨伴随天气现象

5.7. 霜日主导能见度和跑道视程(RVR)分布

如图 11(a)所示, 霜日 01~10 时主导能见度整体呈先降低后抬升的趋势, 01 时主导能见度中位数为 6000 m, 02~03 时小幅下降至 5000 m, 04 时为 4500 m, 05 时为 4000 m, 06 时下降至 3750 m, 07~08 时

下降至最低 3000 m, 09 时小幅上升至 3250 m, 10 时明显抬升至 4250 m。06~09 时出现低能见度的概率较大(冻雾伴霜天气)。如图 11(b)所示, 霜日 01~04 时, RVR 大多为 P2000, 05 时 RVR 主要集中在 1450~P2000, 06 时集中在 1550~P2000, 07 时集中在 1300~P2000, 08 时、09 时集中在 1400~P2000, 10 时集中在 1950~P2000。

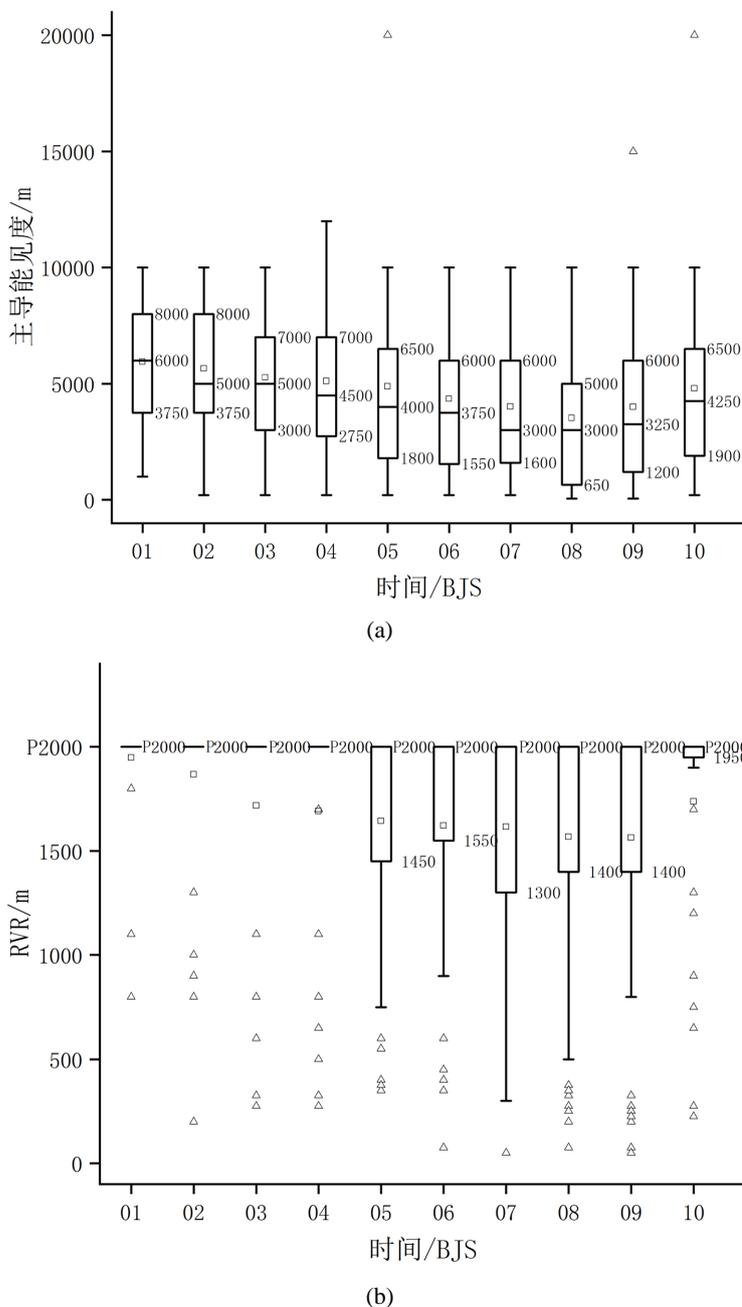


Figure 11. (a) Lead visibility, (b) Runway visual range at 01:00~10:00 on frost days
图 11. 霜日 01~10 时(a) 主导能见度、(b) 跑道视程 RVR

以下挑选冻雾伴霜个例中冻雾时间大于 1 小时的个例进行分析, 图 12 中折线表示不同冻雾伴霜个例。如图 12(a)所示, 冻雾伴霜日主导能见度最早在 02 时可降至 1000 m 以下。冻雾一般较浓, 持续时间

较久。09 时主导能见度大多小于等于 800 m, 10 时均小于 4000 m。冻雾伴霜出现时主导能见度一般较低, 大多可低至 200 m, 最低至 50 m。如图 12(b)所示, 冻雾伴霜日, RVR 最早在 01 时可降至 1000 m 以下, 持续时间较久。冻雾伴霜出现时 RVR 一般较低, 大多可低至 250 m, 最低至 50 m。09 时 RVR 大多在 800 m 以下。

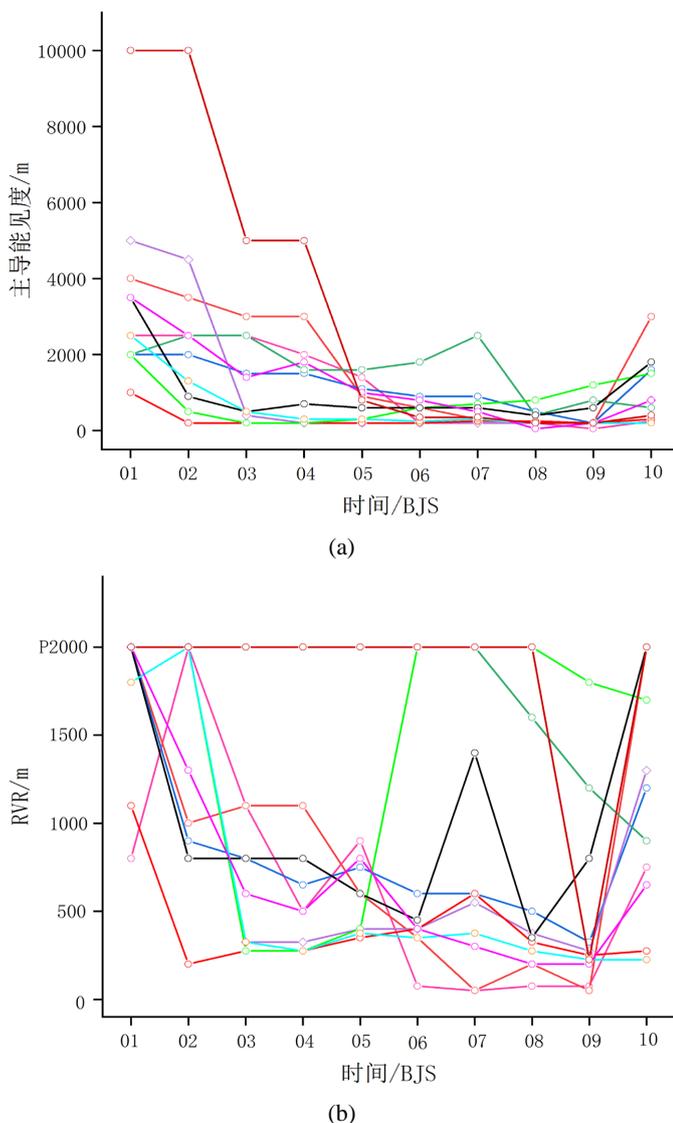


Figure 12. (a) Lead visibility, (b) Runway visual range of frozen fog with frost cases at 01:00~10:00
 图 12. 冻雾伴霜个例 01~10 时(a) 主导能见度、(b) RVR

5.8. 霜日海平面气压分布

如图 13 所示, 霜日 01~10 时海平面气压整体变化不大。中位数在 1024.2~1029.3 hPa 波动, 01 时集中在 1022.8~1029.3 hPa, 02 时集中在 1022.5~1029.2 hPa, 03 时集中在 1022.3~1028.7 hPa, 04 时集中在 1021.7~1028.6 hPa, 05 时集中在 1021.2~1028.2 hPa, 06 时集中在 1021.1~1028.1 hPa, 07 时集中在 1021.5~1028.5 hPa, 08 时集中在 1021.9~1028.8 hPa, 09 时集中在 1022.1~1029.1 hPa, 10 时集中在 1022.3~1029.0 hPa。

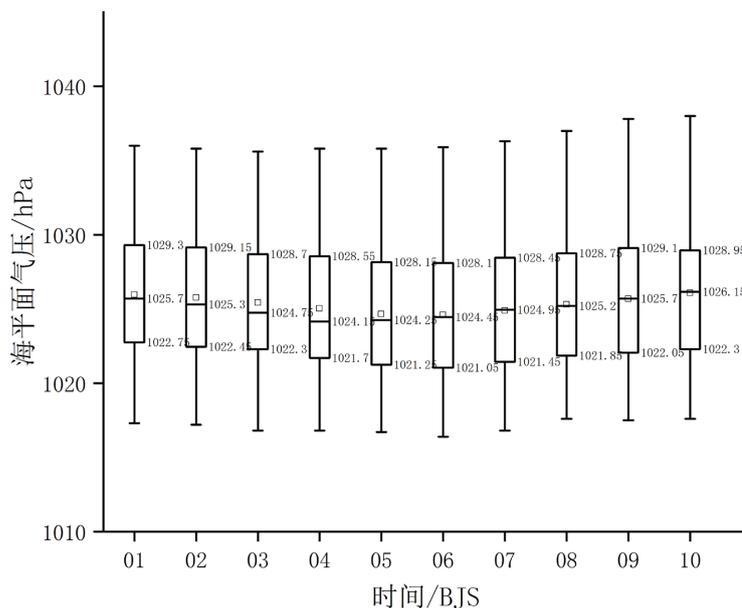


Figure 13. Sea level pressure at 01:00~10:00 on frost days

图 13. 霜日 01~10 时海平面气压

6. 结论

- 1) 贵阳机场霜日年平均为 2.8 天, 主要发生在 11 月~次年 2 月。
- 2) 霜日平均环流形势: 500 hPa、700 hPa 均为弱脊控制, 850 hPa 为弱高压控制, 地面为弱均压场控制。
- 3) 夜间辐射降温明显, 04~08 时温度及露点温度均在 0℃ 以下, 07 时降至最低; 霜前日平均最高温为 10.6℃, 霜日平均最低温为 -2.8℃, 平均温差为 13.4℃; 霜日 03 时后相对湿度大于 90%; 出霜时风向多为风向不定(占比 32.3%)或静风(占比 24.5%)、风速多小于 2 m/s (87.9%)、天空状况多为晴到少云。
- 4) 霜出现时常伴随视程障碍现象, 其中轻雾最多(54.5%), 其次为冻雾(29.5%); ; 主导能见度和跑道视程整体呈先降低后抬升的趋势, 冻雾伴霜日雾一般较浓, 主导能见度和跑道视程较低, 可低至 50 m, 持续时间较久。
- 5) 霜出现时平均海平面气压范围为 1024~1026 hPa。

参考文献

- [1] 叶殿秀, 张勇. 1961-2007 年我国霜冻变化特征[J]. 应用气象学报, 2008, 19(6): 661-665.
- [2] 中华人民共和国应急管理部. 中国东方航空云南公司包头“11.21”特别重大空难事故基本情况及处理结果 [EB/OL]. https://www.mem.gov.cn/gk/sgcc/tbzdsgdcbg/2006/200612/t20061221_245272.shtml, 2006-12-21.
- [3] 中国民用航空局. 中国民用航空局咨询通告, 地面结冰条件下的运行, AC-121-50R1 [EB/OL]. <http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/GFXWJ/>, 2024-08-15.
- [4] 马树庆, 杨菲芸. 我国霜期、霜冻时空特征及其对气候变暖的响应[J]. 气象灾害防御, 2015, 22(2): 1-4, 36.
- [5] 孙娅蕾, 赵秋菊, 唐梦琴. 霜的形成与相关气象要素分析[J]. 现代农业科技, 2017(20): 202, 204.
- [6] 许艳, 王国复, 王盘兴. 近 50a 中国霜期的变化特征分析[J]. 气象科学, 2009, 29(4): 4427-4433.
- [7] 李婉, 李帅, 高淞. 近二十年桃先机场霜的统计分析 with 飞行安全[J]. 中国航班, 2022(26): 171-174.
- [8] 李新峰, 陈博. 近 11 年浦东机场霜天气特征研究[J]. 河南科技, 2022, 41(22): 97-101.
- [9] 黄继雄. 近十年首都机场霜的特征及与气象要素相关性分析[J]. 气象灾害防御, 2018, 25(3): 27-31.

- [10] 陈晓龙. 虹桥机场近 20 年霜统计浅析[J]. 中国航班, 2022(27): 111-114.
- [11] 廖毅, 张俊雅, 强晓西. 西安咸阳机场近 20 年霜天气特征统计和分析[J]. 中国航班, 2019(14): 183-184.
- [12] 徐海, 杨栋楠, 傅文伶, 等. 成都双流国际机场霜、雪天气特征及其对运行的影响[J]. 陕西气象, 2022(3): 42-47.
- [13] 王朝斌, 张静. 重庆机场近 20 年霜天气统计特征和分析[J]. 民航管理, 2017(3): 47-49.