Climate Change Research Letters 气候变化研究快报, 2026, 15(6), 1134-1145
Published Online November 2026 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/ccrl
https://doi.org/10.12677/ccrl.2026.156120

Hans汉斯

西安机场冬半年逆温层与主导能见度的对应关系统计分析

张高杰

中国民用航空西北地区空中交通管理局气象中心，陕西 西安

收稿日期：2026年9月30日；录用日期：2026年10月27日；发布日期：2026年11月3日

摘　要

利用EC 0.25° × 0.25°再分析资料，提取2021年1月~2025年12月期间每年冬半年共509个观测日、世界时15~02时共2588条逆温层记录，按天气现象将样本分为三类：总体情况、降水类(RA/SN)和高湿度类(BR/FG，不含RA/SN)，分析逆温层的时间变化特征及其与主导能见度的对应关系。结果表明：① 冬半年逆温层出现频次呈“12月~1月双峰、10月与3月双谷”特征，12月和1月分别达576和588个时次，合计占45.0%；41.2%的逆温层位于近地层(950 hPa以下)，中低层(775~875 hPa)逆温平均厚度最大(772 m)。② 降水类样本(n = 118)逆温层最厚(672.0 m)、梯度最弱(0.126℃/100 m)、层底最高(1244 m)，且能见度与厚度、梯度、层底高度的相关性均不显著(|Spearman ρ| ≤ 0.10, p > 0.28)，提示降水环境下能见度主要受降水过程控制，逆温层结构不是主要决定因素。③ 高湿度类样本(n = 714)中，主导能见度与逆温层厚度呈显著负相关(Spearman ρ = −0.168, p < 0.001)，与层底高度呈弱负相关(ρ = −0.103, p < 0.01)，与梯度呈弱正相关(ρ = +0.077, p < 0.05)；<0.5 km浓雾对应“厚而低”的逆温结构(厚度767 m、层底高度751 m)，FG样本能见度中位数仅350 m，逆温厚度达755.0 m。④ 两类低能见度天气的逆温结构明显不同：降水类呈“厚弱高远”型，高湿度类呈“较低较薄”型并随厚度增加而能见度下降，在航空气象低能见度预报中应区分天气背景进行诊断。

关键词

西安机场，逆温层，主导能见度

Statistical Analysis of the Correspondence between Inversion Layer and Prevailing Visibility at Xi’an Airport in Winter-Half Year

Gaojie Zhang

Meteorological Center of Northwest Regional Air Traffic Management Bureau, Civil Aviation Administration of China, Xi’an Shaanxi

文章引用: 张高杰. 西安机场冬半年逆温层与主导能见度的对应关系统计分析[J]. 气候变化研究快报, 2026, 15(6): 1134-1145. DOI: 10.12677/ccrl.2026.156120

Received: September 30, 2026; accepted: October 27, 2026; published: November 3, 2026

Abstract

Based on EC 0.25˚ × 0.25˚ reanalysis data, a total of 2 588 inversion-layer records were extracted for winter-half years from January 2021 to December 2025, covering 509 observation days at 15:00~02:00 UTC. Samples were classified into three groups according to weather phenomena: all cases, precipitation cases (RA/SN), and high-humidity cases (BR/FG, excluding RA/SN). Temporal variations of inversion layers and their correspondence with prevailing visibility were analyzed. The results show that: ① The frequency of winter-half-year inversions presents a bimodal pattern in December-January and double-valley pattern in October and March, with 576 and 588 hourly occurrences in December and January respectively, accounting for 45.0 % in total. 41.2 % of inversions occur in the near-surface layer (below 950 hPa), and inversions in the mid-lower level (775~875 hPa) have the largest mean thickness (772 m). ② For precipitation samples (n = 118), inversions are the thickest (672.0 m), with the weakest lapse-rate gradient (0.126˚C/100 m) and the highest base height (1244 m). No significant correlations are found between visibility and inversion thickness, gradient or base height (|Spearman ρ| ≤ 0.10, p > 0.28), indicating that visibility under precipitation conditions is mainly governed by precipitation processes rather than inversion-layer structure. ③ In high-humidity samples (n = 714), prevailing visibility is significantly negatively correlated with inversion thickness (Spearman ρ = −0.168, p < 0.001), weakly negatively correlated with base height (ρ = −0.103, p < 0.01), and weakly positively correlated with gradient (ρ = +0.077, p < 0.05). Dense fog with visibility < 0.5 km corresponds to "thick and low-base" inversion structures (thickness 767 m, base height 751 m). For FG samples, the median visibility is merely 350 m with an inversion thickness of 755.0 m. ④ Distinct inversion-layer structures exist for the two low-visibility weather types: precipitation cases feature "thick, weak-gradient and high-base" inversions, whereas high-humidity cases show relatively "low and thin" inversions, with visibility decreasing as inversion thickness increases. Weather backgrounds should be differentiated in diagnostic work for aeronautical meteorological low-visibility forecasting.

Keywords

Xi'an Airport, Inversion Layer, Prevailing Visibility

Copyright © 2026 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

低能见度是影响机场运行安全和航班正常率的最主要气象因素之一。当主导能见度或跑道视程低于运行标准时，航班往往面临延误、返航乃至备降，给航空公司和旅客带来显著经济损失[1]。在造成机场低能见度的各类天气现象中，雾(FG)与轻雾(BR)出现频率高、突发性强、预报难度大，历来是航空气象保障业务关注的重点[1] [2]。

雾的本质是贴地层空气中悬浮大量水滴或冰晶微粒、使水平能见距离降到 1 km 以内的天气现象，其形成与维持同边界层稳定度密切相关[3]。逆温层作为低空大气层结稳定度的核心指标，通过抑制湍流垂直交换、锁定近地层水汽与气溶胶，成为雾和霾发生、发展、维持的关键背景条件。李子华[3]在总结中国 40 余年雾的研究时指出，辐射雾多形成于晴夜静风、存在贴地逆温的稳定边界层内；刘小宁等[2]的气候统计也表明我国大雾日数与冬季稳定层结天气密切相关，朱承瑛等[4]对江苏省秋冬季强浓雾发展过程

的观测研究同样表明，强浓雾的发展与维持同边界层层结条件密切相关。唐家萍等[5]基于 L 波段雷达探空资料分析重庆市区低空逆温特征，发现逆温层的高度、厚度与大气污染程度存在良好对应关系；张雅斌等[6]对 2013 年 12 月西安一次重污染过程的分析进一步表明，除接地逆温外，近地层不同高度还存在悬浮逆温，逆温层配合高湿条件是污染物累积和能见度恶化的重要因子。

西安地处关中盆地，北接渭北高原、南临秦岭山脉，地形呈喇叭状狭长分布，静稳天气下水平与垂直扩散能力均较弱，是我国雾、霾天气的高发区之一[6] [7]。王丹等[8]利用西安咸阳国际机场专用高速公路沿线交通气象站资料研究发现，该区域雾主要发生在夜间至清晨，典型雾日近地面层均有逆温形成，且以小风、高湿为主要配合条件。就机场低能见度预报方法而言，冯汉忠等[1]较早采用支持向量机方法开展双流机场低能见度天气预报建模；梁卫等[9]基于地面观测资料对南昌昌北机场雾进行了分类统计，均指出逆温、湿度、风速等边界层要素是低能见度预报的关键因子。近年来，欧洲中期天气预报中心(ECMWF)第五代再分析资料 ERA5 以 0.25˚ × 0.25˚的水平分辨率逐小时再现全球大气状态，为缺乏机场本地探空的站点提供了连续、均一的高空层结信息[10]，已在边界层气候特征分析[11]和西安地区空气污染气象条件研究[12]等工作中得到应用与检验。

然而，现有针对西安机场低能见度的研究多基于地面观测或典型个例，尚缺少利用再分析资料对冬半年逆温层特征及其与主导能见度对应关系的系统性统计分析。西安咸阳国际机场冬半年(10 月~次年 3 月)既是逆温、雾、霾的高发季节，也是航班运行受低能见度影响最显著的时段。为此，本文利用 EC 0.25˚ × 0.25˚再分析资料，以机场代表格点提取 2021~2025 年冬半年逐时逆温层记录，结合主导能见度与天气现象观测，按总体、降水类(RA/SN)和高湿度类(BR/FG，不含降水)三类样本，统计分析逆温层的月度、高度与时次分布特征，以及不同天气背景下逆温层参数与主导能见度的对应关系，以期为西安机场冬半年低能见度潜势预报和运行决策提供统计参考。

2. 资料与方法

本文使用欧洲中期天气预报中心(ECMWF) 0.25˚ × 0.25˚再分析资料，选取 34.5˚N、108.75˚E 格点作为西安咸阳国际机场的代表点。需要特别说明的是，本文选取的资料时段为 2021 年 1 月 1 日~2025 年 12 月 31 日，但每年仅选取冬半年 6 个月——即 10 月、11 月、12 月及次年 1 月、2 月、3 月的资料参与统计。在此基础上，提取上述各年冬半年世界时 15 时~次日 02 时(北京时 23 时~次日 10 时)共 12 个时次的逆温层数据，共获得 509 个观测日、2588 条逆温层记录。

采用国际标准大气公式 h = 44330 × [1 − (p/1013.25)^0.1903] (m)，计算逆温层底高度与层中高度。按逆温层底气压将样本划分为：近地层(≥950 hPa)、低层(875~950 hPa)、中低层(775~875 hPa)、中层及以上(<775 hPa)。

按天气现象将样本分为三类开展分析：(1) 总体情况：全部 2588 条记录，用于分析逆温层的时间变化特征；(2) 降水类：天气现象含 RA 或 SN 的样本，共 118 条；(3) 高湿度类：天气现象含 FG 或 BR、且不含 RA 和 SN 的样本，共 714 条。对后两类分别统计主导能见度与逆温层厚度、层底高度、逆温梯度的相关关系，并按能见度等级、逆温参数分箱做组间对比。相关性采用 Spearman (斯皮尔曼)秩相关检验。

3. 总体情况：逆温层的时间变化特征

3.1. 月度分布

冬半年逆温层样本共 2588 例，月度分布呈典型的“隆冬高、过渡季低”特征(图 1)。12 月与 1 月为高发期，分别出现 576 和 588 个时次，合计占全部样本的 45.0%；11 月(432)和 2 月(448)次之，10 月(263)和 3 月(281)最少。这与西安地区隆冬季节长波辐射冷却更强、地面辐射逆温频发、且冷高压背景下下沉

逆温活跃的天气气候背景一致。

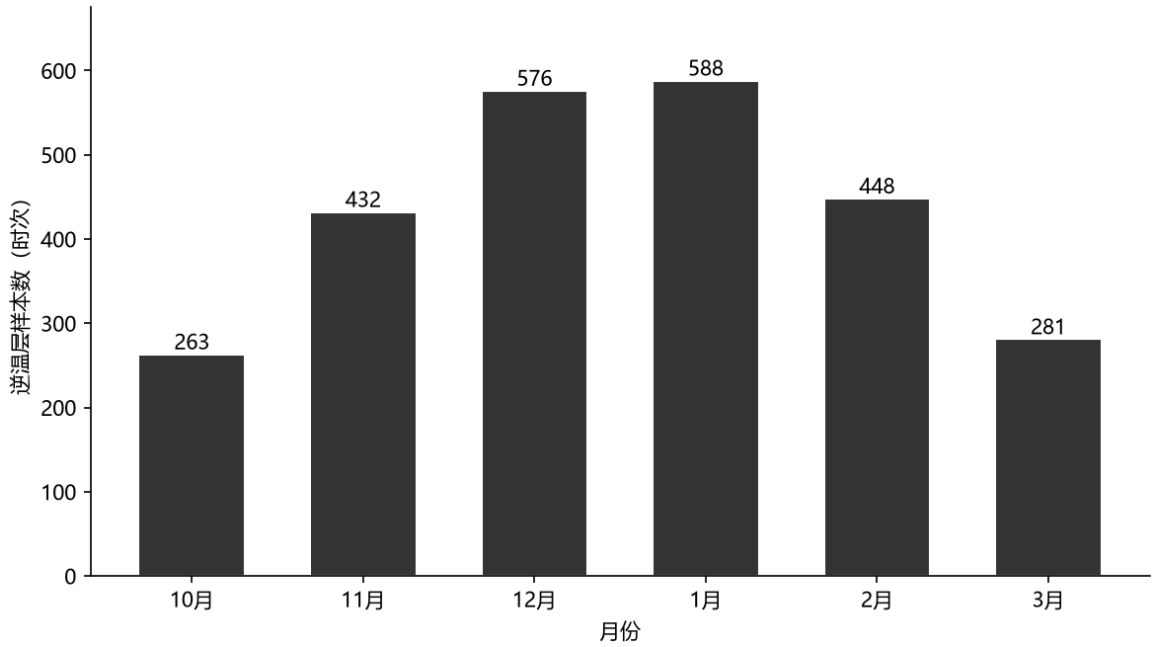


Figure 1. Monthly distribution of inversion layers at Xi'an Airport in winter-half year
图 1. 西安机场冬半年逆温层月度分布

Table 1. Mean characteristic quantities of inversion layers in each month
表 1. 各月逆温层平均特征量

月份	样本数	平均厚度(m)	平均梯度(℃/100m)	层底平均高度(m)
10 月	263	690	0.10	1258
11 月	432	575	0.20	788
12 月	576	624	0.20	870
1 月	588	588	0.20	920
2 月	448	660	0.20	1052
3 月	281	531	0.20	964

从月际变化看(表 1)，10 月逆温层平均厚度最大(690 m)、平均层底高度最高(1258 m)，与秋季冷空气南下、对流层中低层下沉增温形成的盖帽逆温相吻合；11 月平均层底高度骤降至 788 m，反映辐射冷却主导的贴地逆温占比上升；隆冬 12 月~2 月逆温厚度维持在 590~660 m 区间，层底高度 870~1050 m，体现近地层与中低层逆温并存的稳定结构；3 月逆温厚度降至 531 m，回暖期地面辐射减弱，逆温频次与强度同步下降。

3.2. 高度(气压层)分布

按逆温层底高度统计(图 2)，近地层逆温出现 1065 例，占 41.2%；低层逆温 834 例，占 32.2%；中低层逆温 689 例，占 26.6%。未出现底高位于 2000 m 以上的样本，说明西安冬半年逆温层基本集中于对流层下部 2 km 以内。

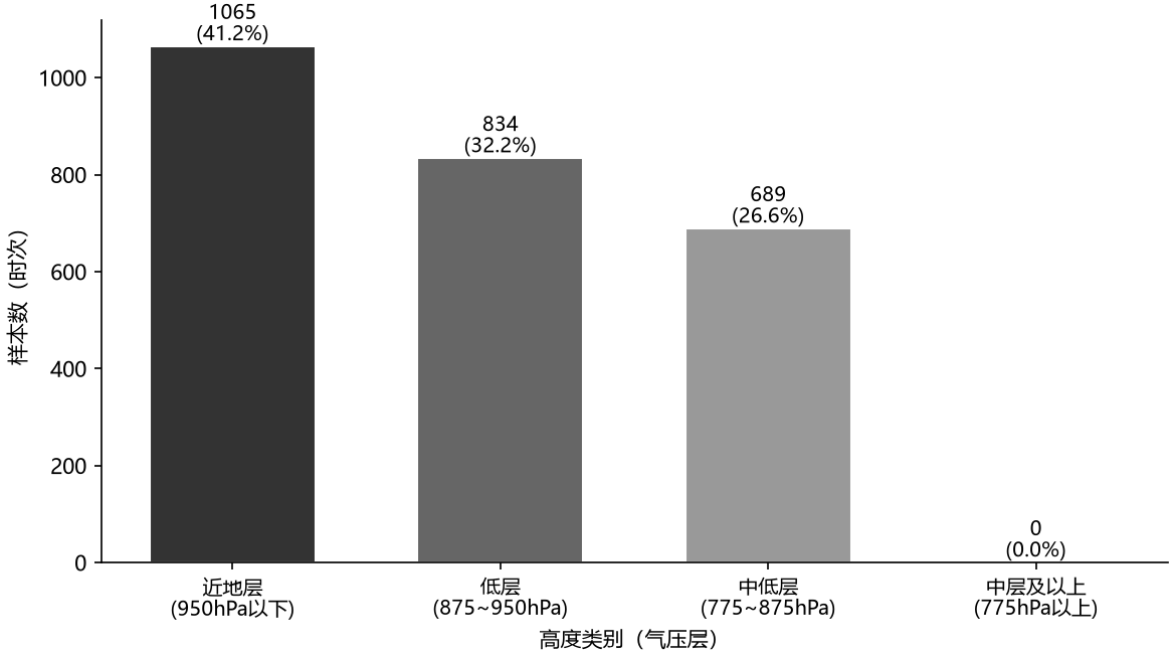


Figure 2. Distribution of heights (pressure levels) of inversion layers
图 2. 逆温层所在高度(气压层)分布

Table 2. Mean characteristic quantities of inversion layers at different heights
表 2. 不同高度逆温层的平均特征量

高度类别	样本数	占比	平均厚度(m)	平均梯度(℃/100 m)	层底平均高度(m)
近地层(≥950 hPa)	1065	41.2%	468	0.21	323
低层(875~950 hPa)	834	32.2%	658	0.15	902
中低层(775~875 hPa)	689	26.6%	772	0.14	1973

由表 2 可见，逆温层平均厚度与层底高度呈正相关：位置越高，逆温层越厚。近地层逆温虽数量最多，但平均厚度最小(468 m)，且梯度最大(0.21℃/100 m)，表现为典型的浅薄强辐射逆温，多出现于晴夜贴地冷却；中低层逆温平均厚度可达 772 m、底高近 2000 m，通常对应冷高压控制下的下沉逆温或锋面逆温，结构更厚、梯度更弱。

3.3. 时次分布

从世界时 15 时至次日 02 时(对应北京时 23 时~次日 10 时)的逐时分布(图 3)看，逆温层样本在 22 UTC (06 BJT)出现 327 例为峰值，23 UTC (07 BJT) 279 例、21 UTC (05 BJT) 247 例次之；15 UTC (23 BJT)最少，仅 98 例。15~21 UTC (23~05 BJT)样本数从 98 上升到 247，22 UTC 后小幅波动，02 UTC (10 BJT)仍达 139 例。

进一步看逆温层厚度与高度随时次的演变：22~02 UTC (06~10 BJT，清晨至上午)逆温层平均厚度由 641 m 增至 784 m，层底平均高度由 1036 m 抬升至 1431 m；而 15~21 UTC (23~05 BJT，夜间–凌晨)平均厚度 543~602 m、底高 800~900 m，呈贴地强逆温特征。这表明夜间的贴地辐射逆温在日出前后通过湍流混合演变为残留的中低层盖帽逆温，厚度增加、底高抬升，是冬半年清晨雾持续和发展的典型边界层过程。

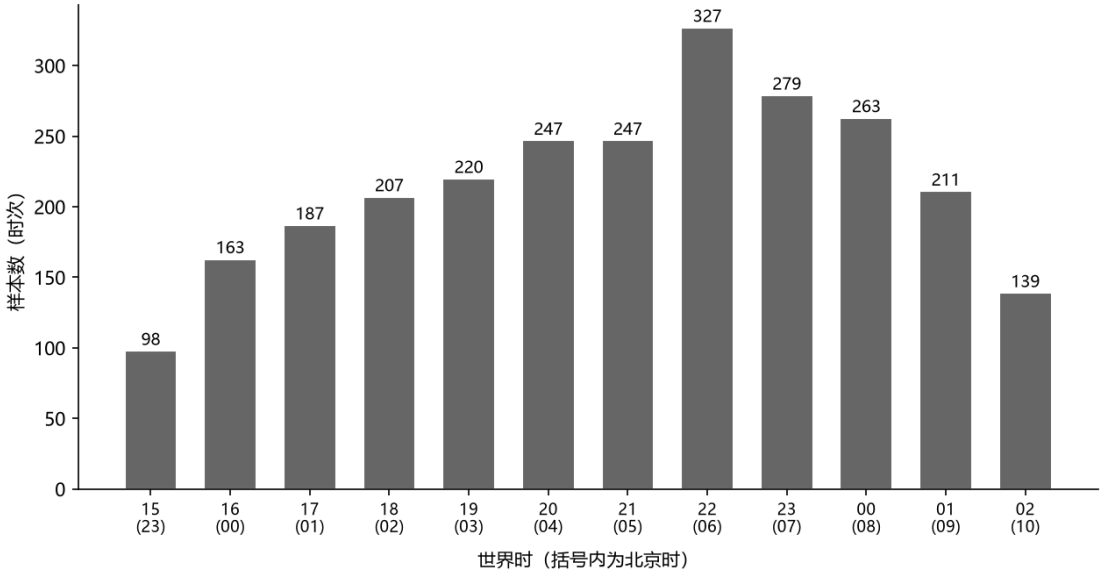


Figure 3. Temporal distribution of inversion-layer occurrences (UTC; Beijing Time in parentheses)
图 3. 逆温层时次分布(世界时，括号内为北京时)

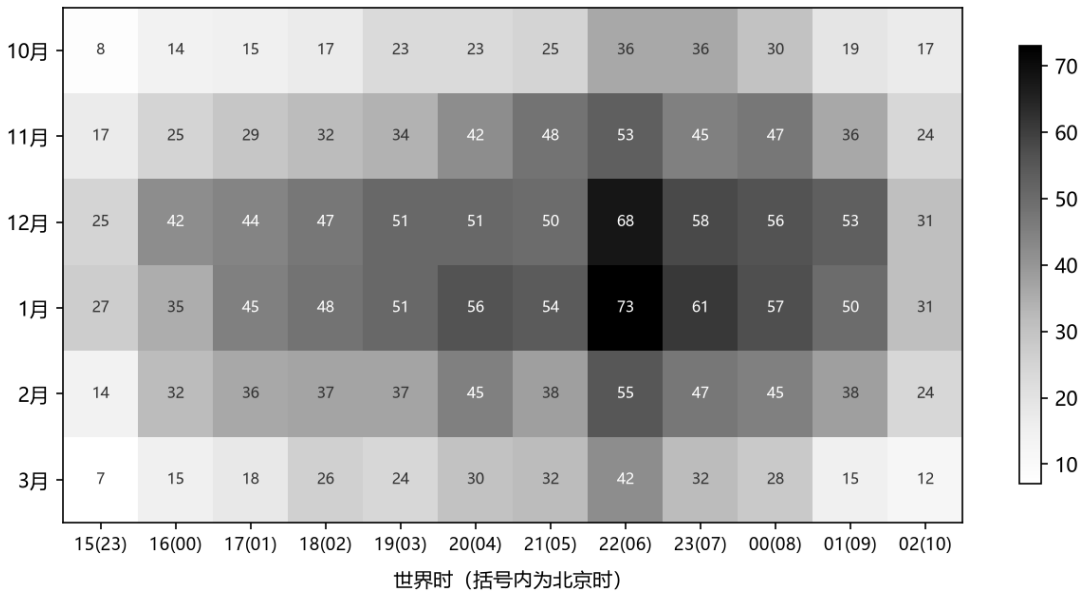


Figure 4. Monthly-hourly heatmap of inversion-layer frequency (all cases, unit: occurrences)
图 4. 逆温层频次月－时次热力图(总体，单位：时次)

由图 4 月－时次频次热力图可见，22 UTC (06 BJT)的高频列在 12 月~2 月各月普遍存在，12 月 22 UTC 单格样本数最高；11 月与 1 月在 18~22 UTC 也保持较高频次。15 UTC (23 BJT)低频列对应入夜早期辐射冷却尚未充分发展，符合逆温层在夜间逐步建立、清晨达峰的物理过程。

4. 降水类(RA/SN)逆温层与主导能见度的对应关系

4.1. 样本概况与逐月分布

天气现象含 RA 或 SN 的降水类样本共 118 例，占总体 4.6%。其中含 RA 的样本 88 例(74.6%)，含

SN 的样本 30 例(25.4%)；部分样本同时含 BR (如−RA BR、−SN BR)，归入降水类。该类逆温层平均厚度 672.0 m、平均梯度 0.126℃/100 m、平均层底高度 1244 m，在三大类中表现为“最厚、最弱、最高”的逆温结构。高度分布上，中低层(775~875 hPa)占 46.6%，低层(875~950 hPa)占 28.8%，近地层占 24.6%。

降水类样本的主导能见度中位数为 4000 m，有效能见度范围 1100~8000 m，另有 9 例记录为 ≥10 km。RA 子样的中位能见度为 4500 m，明显高于 SN 子样的 2200 m，说明降雪对能度的削弱作用强于降雨。

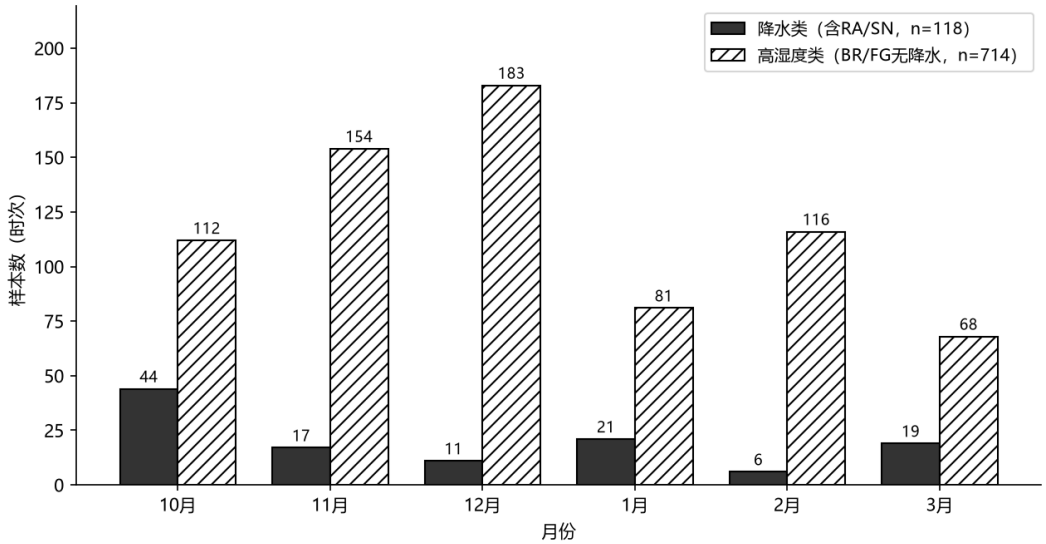


Figure 5. Comparison of monthly distributions of inversion samples for precipitation and high-humidity cases
图 5. 降水类与高湿度类逆温样本的逐月分布对比

图 5 显示，降水类样本在 10 月出现最多(44 例)，12 月与 2 月最少(11 例、6 例)；高湿度类样本则集中在 12 月(183 例)和 11 月(154 例)，1 月最少(81 例)。两类样本的季节峰值相反：降水类集中于深秋(10 月)和初春(3 月)，而高湿度类集中于隆冬，反映了降水过程与辐射雾过程在不同季节的相对重要性。

4.2. 不同能见度等级下的逆温层特征

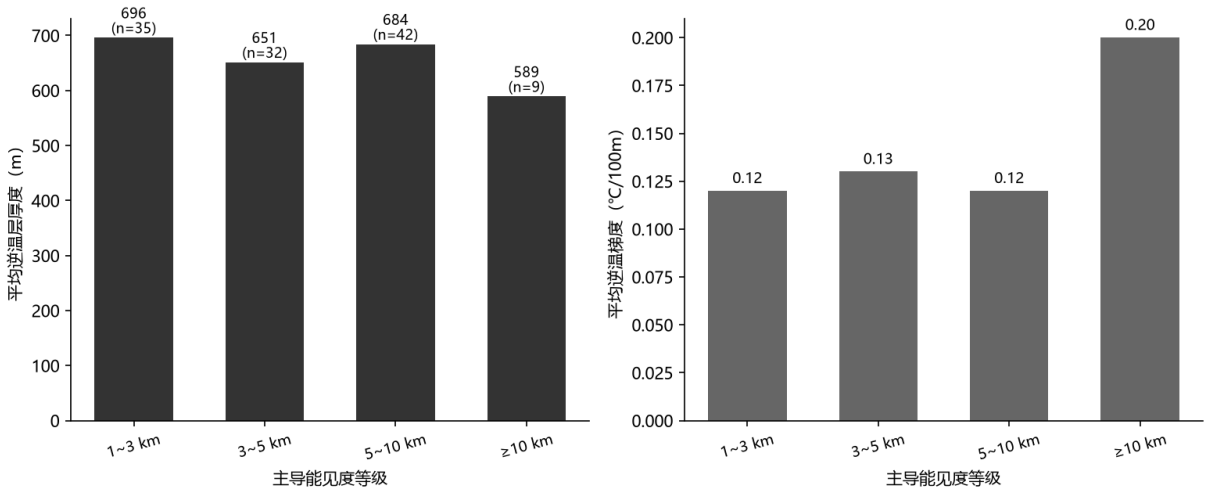


Figure 6. Mean inversion-layer thickness and gradient under different visibility grades for precipitation cases
图 6. 降水类不同能见度等级下的平均逆温层厚度与梯度

Table 3. Inversion-layer parameters for precipitation cases at various visibility grades
表 3. 降水类各能见度等级的逆温层参数

能见度等级	样本数	平均厚度(m)	平均梯度(℃/100m)	层底平均高度(m)
1~3 km	35	696	0.12	1349
3~5 km	32	651	0.13	1062
5~10 km	42	684	0.12	1360
≥10 km	9	589	0.20	939

图 6 给出降水类样本在不同主导能见度等级下的平均逆温层厚度与梯度。可见：降水类各能见度等级的平均厚度在 589~696 m 之间，变幅不大；1~3 km 等级厚度最大(696 m)，≥10 km 等级厚度最小(589 m) (表 3)。平均梯度在 0.12~0.20℃/100 m 之间(图 6)，同样差异较小。与后文高湿度类相比，降水类不同能见度等级之间的逆温参数差异不鲜明，说明降水条件下主导能见度更多取决于降水强度、雨滴/雪花对光的散射衰减，逆温层结构仅起到稳定维持气溶胶和云底高度的辅助作用。

4.3. 相关分析

Table 4. Correlation coefficients between prevailing visibility and inversion-layer characteristic quantities for precipitation cases
表 4. 降水类主导能见度与逆温层特征量的相关系数

参数	Spearman ρ (p)
厚度(m)	−0.038 (0.7)
梯度(℃/100 m)	+0.056 (0.56)
层底高度(m)	−0.085 (0.38)
层中高度(m)	−0.094 (0.33)

表 4 给出了降水类主导能见度与逆温层特征量的相关系数。可见：降水类样本中，主导能见度与厚度、梯度、层底高度、层中高度的相关系数绝对值均不超过 0.11，且 p 值均大于 0.28，均未通过 0.05 显著性检验。这说明在 RA/SN 天气背景下，逆温层结构对能见度的直接影响很弱，能见度主要受降水粒子本身的消光作用控制。

4.4. 分箱对比

Table 5. Visibility statistics under binned inversion-layer thickness for precipitation cases
表 5. 降水类逆温层厚度分箱下的能见度统计

厚度区间(m)	样本数	平均能见度(m)	中位能见度(m)
300~500 m	59	4574	3500
500~700 m	13	5385	5000
700~900 m	22	5091	6000
900~1200 m	12	5083	4500
1200~1600 m	11	2518	1600

表 5 给出了降水类逆温层厚度分箱下的能见度统计。可见：降水类样本中厚度 300~500 m 时平均能见度为 4574 m；厚度增至 500~900 m 时能见度维持在 5000~5400 m；但当厚度超过 1200 m 时，平均能见度骤降至 2518 m，中位能见度仅 1600 m。这提示深厚的降水性层状云或锋面系统不仅造成降水，还通过深厚逆温层抑制湍流扩散，使能见度显著恶化。

5. 高湿度类(BR/FG，不含 RA/SN)逆温层与主导能见度的对应关系

5.1. 样本概况与逐月分布

天气现象含 BR 或 FG、且不含 RA 和 SN 的高湿度类样本共 714 例，占总体 27.6%。其中含 BR 的样本 683 例(95.7%)，含 FG 的样本 34 例(4.8%)。该类主导能见度范围为 150~5000 m，中位数 4000 m；平均逆温层厚度 591.0 m、平均梯度 0.171℃/100m、平均层底高度 918 m。高度分布上，近地层占 39.1%，低层占 38.5%，中低层占 22.4%，整体较低。

逐月分布上(图 5)，高湿度类样本 12 月最多(183 例)，11 月次之(154 例)，1 月明显减少(81 例)，10 月、3 月分别为 112、68 例。12 月~1 月总体逆温频次最高，但高湿度类在 1 月出现回落，可能与隆冬期降水偏少、辐射雾更依赖于冷空气间歇期的静稳条件有关。

5.2. 不同能见度等级下的逆温层特征

图 7 给出高湿度类样本在不同能见度等级下的平均厚度与梯度。

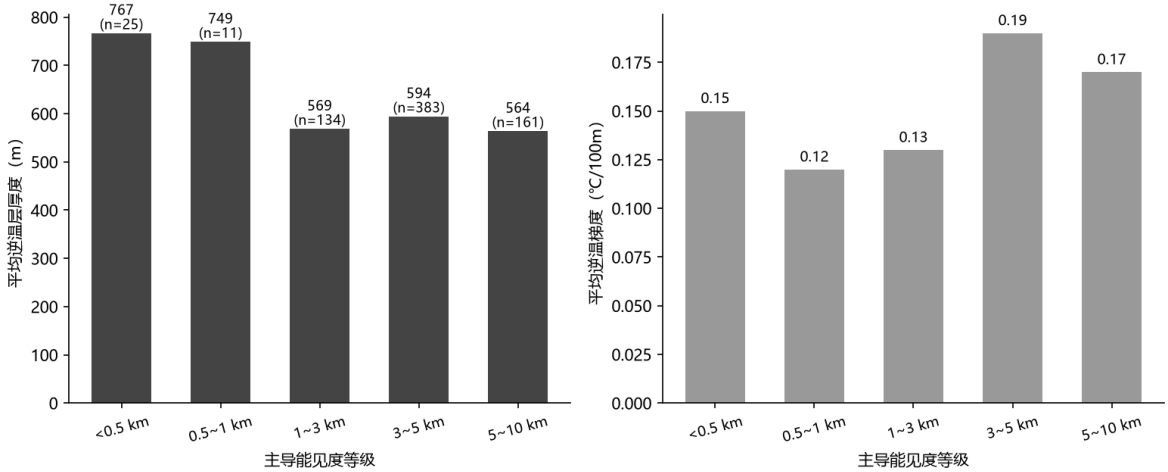


Figure 7. Mean inversion-layer thickness and gradient under different visibility grades for high-humidity cases
图 7. 高湿度类不同能见度等级下的平均逆温层厚度与梯度

Table 6. Inversion-layer parameters for high-humidity cases at various visibility grades
表 6. 高湿度类各能见度等级的逆温层参数

能见度等级	样本数	平均厚度(m)	平均梯度(℃/100m)	层底平均高度(m)
<0.5 km	25	767	0.15	751
0.5~1 km	11	749	0.12	777
1~3 km	134	569	0.13	1108
3~5 km	383	594	0.19	879
5~10 km	161	564	0.17	886

由图 7 与表 6 可知：① <0.5 km (雾)样本平均逆温层厚度 767 m、层底高度 751 m，在所有等级中最厚且最低，呈“厚而低”的稳定结构；② 0.5~1 km 等级厚度 749 m、底高 777 m，与<0.5 km 接近；③ 1~3 km、3~5 km、5~10 km 等级的平均厚度降至 564~594 m，其中 3~5 km 等级逆温梯度最大(0.19℃/100m)，呈“浅薄强逆温”特征。总体趋势是：能见度越差，逆温层越厚、底高越低；而较高能见度往往对应较薄的辐射逆温。

5.3. 相关分析

Table 7. Correlation coefficients between prevailing visibility and inversion-layer characteristic quantities for high-humidity cases
表 7. 高湿度类主导能见度与逆温层特征量的相关系数

参数	Spearman ρ (p)
厚度(m)	−0.168 (6.4e−06)**
梯度(℃/100 m)	+0.077 (0.039)*
层底高度(m)	−0.103 (0.0059)**
层中高度(m)	−0.110 (0.0032)**

注：*表示 $p < 0.05$，**表示 $p < 0.01$。

表 7 给出了高湿度类主导能见度与逆温层特征量的相关系数。可见：高湿度类样本中：① 主导能见度与逆温层厚度呈显著负相关(Spearman $\rho = -0.168$, $p < 0.001$)，厚度越大越有利于低能见度维持；② 与层底高度、层中高度呈弱负相关($\rho = -0.103$、-0.110, $p < 0.01$)，说明逆温层越低，近地面水汽和污染物越难扩散，能见度越差；③ 与逆温梯度呈弱正相关($\rho = +0.077$, $p < 0.05$)，这与强梯度浅薄辐射逆温多伴随晴空、水汽不足有关，而弱梯度的深厚逆温更易维持大雾。整体相关系数绝对值均低于 0.2，说明雾的形成还受水汽、辐射、风场等多因素共同调制。

5.4. 分箱对比

Table 8. Visibility statistics under binned inversion-layer thickness for high-humidity cases
表 8. 高湿度类逆温层厚度分箱下的能见度统计

厚度区间(m)	样本数	平均能见度(m)	中位能见度(m)
300~500 m	487	3671	4000
500~700 m	28	3636	4000
700~900 m	120	3529	4000
900~1200 m	43	3078	3500
1200~1600 m	30	3503	4000

Table 9. Visibility statistics under binned inversion-layer gradient and base height for high-humidity cases
表 9. 高湿度类逆温梯度与层底高度分箱下的能见度统计

梯度区间	n	平均能见度(m)	层底高度区间	n	平均能见度(m)
0.0℃~0.1℃/100 m	309	3526	200~400 m	279	3842
0.1℃~0.2℃/100 m	168	3460	700~1000 m	199	3334
0.2℃~0.3℃/100 m	115	3782	1000~1600 m	76	3258
0.3℃~0.4℃/100 m	50	3681	1600~3200 m	160	3681

由表 8 可见，高湿度类样本随逆温层厚度增加能见度呈下降趋势：300~500 m 厚度平均能见度 3671 m，900~1200 m 厚度降至 3078 m，降幅约 16%。由表 9 可见，逆温梯度 0.1℃~0.2℃/100 m 区间平均能见度最低(3460 m)，0.6℃~1.5℃/100 m 强梯度区间能见度最高(4156 m)，再次印证“厚弱逆温–低能见度/浅薄强逆温–较高能见度”的分型特征。层底高度位于 700~1600 m 区间时平均能见度最低(3258~3334 m)，而底高 ＜400 m 或 ＞1600 m 时能见度相对较高，说明对雾而言，关键并非逆温层贴地与否，而在于中低空是否形成稳定的逆温盖以抑制扩散。

5.5. BR 与 FG 的对比

Table 10. Comparison of inversion-layer parameters between BR and FG subsamples
表 10. BR 与 FG 子样的逆温层参数对比

天气现象	样本数	中位能见度(m)	平均厚度(m)	平均梯度(℃/100m)	平均层底高度(m)
BR	683	4000	584	0.173	924
FG	34	350	755	0.148	797

由表 10 可见：FG 子样逆温厚度(755 m)较 BR (584 m)大 29%，层底高度(797 m)较 BR (924 m)低，但梯度(0.148℃/100 m)略小于 BR (0.173℃/100 m)。这与“雾对应深厚稳定逆温、轻雾对应浅薄强辐射逆温”的总体结论一致。

6. 三类情况的对比讨论

表 11 汇总了总体、降水类与高湿度类三类样本的基本特征。

Table 11. Comparison of sample characteristics among all cases, precipitation cases and high-humidity cases
表 11. 总体、降水类与高湿度类样本特征对比

类别	样本数	平均厚度(m)	平均梯度(℃/100 m)	平均层底高度(m)	中位能见度(m)	主导逆温高度层
总体	2588	610	0.172	949	5000	近地层 41.2%
降水类(RA/SN)	118	672	0.126	1244	4000	中低层 46.6%
高湿度类(BR/FG)	714	591	0.171	918	4000	近地层 39.1%

由表 11 可知，三类样本的逆温结构存在显著差异：降水类逆温最厚(672 m)、最弱(0.126℃/100 m)、最高(1244 m)，多对应锋面或层状云降水过程，能见度主要受降水粒子消光控制，与逆温参数无显著相关；高湿度类逆温相对较薄(591 m)、梯度较强(0.171℃/100 m)、层底较低(918 m)，能见度与厚度、层底高度显著负相关，是典型的辐射雾/轻雾边界层结构；总体样本介于两者之间，并受晴空辐射逆温的“薄而强”样本稀释。因此，在西安机场冬半年低能见度潜势预报中，不能简单用同一套逆温阈值判断所有天气背景，应首先区分是否存在降水，再分别诊断 BR/FG 与深厚逆温的匹配关系。

7. 结论

(1) 基于 EC 0.25˚ × 0.25˚再分析资料 34.5˚N、108.75˚E 格点，西安机场 2021~2025 年各年冬半年(10 月~次年 3 月)逆温层出现频次呈“12 月~1 月双峰、10 月与 3 月双谷”的季节分布；高度上以近地层(≥950 hPa，41.2%)为主，但中低层(775~875 hPa)逆温平均厚度最大(772 m)。

(2) 逆温层时次演变显示出“夜间贴地辐射逆温–清晨抬升为盖帽逆温”的典型日变化特征：02 UTC(10 BJT)平均厚度最大(784 m)、层底最高(1431 m)，对应日出后残留中低空逆温，是冬半年大雾消散与滞留的关键时段。

(3) 降水类样本(n = 118)逆温结构表现为“厚、弱、高”，能见度与逆温厚度、梯度、层底高度的相关性均不显著，说明降水环境下能见度主要受降水强度控制；但厚度 > 1200 m 时平均能见度骤降至 2518 m，深厚逆温对降水天气下的低能见度仍有一定维持作用。

(4) 高湿度类样本(n = 714)中，主导能见度与逆温层厚度呈显著负相关，与层底高度负相关，与梯度弱正相关。浓雾对(能见度 < 0.5 km)应“厚而低”逆温(厚度 767 m、底高 751 m)，中低空 700~1600 m 盖帽逆温对应能见度最低。

(5) 建议在西安机场冬半年低能见度预报与运行决策中，首先区分降水背景：对 BR/FG 无降水天气，重点关注 12 月~1 月 22~02 UTC (06~10 BJT)中低空出现的厚逆温(厚度 ≥ 700 m、梯度 < 0.15℃/100 m)，结合地面湿度与近地层辐射降温强度综合研判雾的发生与持续；对 RA/SN 降水天气，则主要依据降水类型与强度判断能见度，同时警惕厚度 > 1200 m 的深厚逆温对能见度进一步降低的叠加效应。

(6) 能见度的变化受风速、近地面层湿度分布、辐射条件及污染物空间分布等多种因子共同制约。本文仅选取逆温层的强度与厚度特征进行初步分析，尚未系统纳入上述要素的定量影响，分析结论因而具有阶段性。后续可进一步引入边界层湍流、气溶胶光学厚度及温湿廓线等多源观测数据，借助统计回归或机器学习方法构建多要素融合的能见度预报模型，以提升预报的准确性与适用性。

参考文献

[1] 冯汉忠, 陈永谊, 程永芹, 等. 双流机场低能见度天气预报方法研究[J]. 应用气象学报, 2006, 17(1): 94-99.

[2] 刘小宁, 张洪政, 李庆祥, 等. 我国大雾的气候特征及变化初步解释[J]. 应用气象学报, 2005, 16(2): 220-230.

[3] 李子华. 中国近 40 年来雾的研究[J]. 气象学报, 2001, 59(5): 616-624.

[4] 朱承瑛, 朱毓颖, 祖繁, 等. 江苏省秋冬季强浓雾发展的一些特征[J]. 气象, 2018, 44(9): 1208-1219.

[5] 唐家萍, 谭桂容, 谭畅. 基于 L 波段雷达探空资料的重庆市区低空逆温特征分析[J]. 气象科技, 2012, 40(5): 789-793.

[6] 张雅斌, 林琳, 吴其重, 等. “13·12”西安重污染气象条件及影响因素[J]. 应用气象学报, 2016, 27(1): 35-46.

[7] 胡琳, 苏静, 陈建文, 等. 西安地区霾天气特征及影响因素分析[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(7): 41-44.

[8] 王丹, 高红燕, 马磊, 等. 西安咸阳国际机场专用高速公路雾的特征及影响因子[J]. 陕西气象, 2018(2): 16-20.

[9] 梁卫, 吴俊杰, 邹海波. 南昌昌北机场雾的分类特征与统计分析[J]. 气象, 2021, 47(10): 1255-1265.

[10] Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., *et al*. (2020) The ERA5 Global Reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **146**, 1999-2049. https://doi.org/10.1002/qj.3803

[11] Li, X., Dong, Y., Zhang, Y., Shi, Z. and Yao, J. (2023) Climatology of Planetary Boundary Layer Height over Jiangsu, China, Based on ERA5 Reanalysis Data. *Atmosphere*, **14**, Article No. 1330. https://doi.org/10.3390/atmos14091330

[12] 姜雪. 西安市空气污染物浓度统计特征及其气象影响研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2012.