

厦门机场冬春季低能见度天气过程对比分析

史文倩, 施 思, 杨晓凤, 苏 蕾

中国民用航空厦门空中交通管理站, 福建 厦门

收稿日期: 2026年8月2日; 录用日期: 2026年9月1日; 发布日期: 2026年9月9日

摘 要

选取2021~2025年厦门高崎国际机场4次典型冬春季平流海雾低能见度天气过程, 从环流形势、层结结构、地面风场演变及主流数值预报模式预报性能四个方面开展系统性对比分析。结果表明: (1) 四次大雾过程均受控于“高空干冷、低空暖湿、地面低压倒槽”典型环流配置, 近地面沿海弱冷空气渗透是平流海雾登陆机场的核心触发机制, 东路沿海冷空气路径对厦门机场雾情影响最为显著; (2) 近地面稳定逆温层是大雾长时间维持的关键层结条件, 低逆温层底更易催生强浓雾, 但全球ECMWF模式对浅薄近地面逆温层识别能力存在明显短板, 易出现漏报; (3) 地面东北风是海雾向机场输送的关键风向, 风向转为东北后20 min~1 h内机场能见度将快速大幅下降, 1~3 m/s东北风最利于雾团稳定维持。基于多过程对比提炼本场冬春季海雾预报四大关键着眼点, 可为沿海机场低能见度天气预警、航空气象保障提供技术参考。

关键词

平流海雾, 低能见度, 环流形势, 层结特征, 数值预报评估

A Comparative Analysis of Low Visibility Weather Processes at Xiamen Airport in Winter and Spring

Wenqian Shi, Si Shi, Xiaofeng Yang, Lei Su

Xiamen Air Traffic Management Station of Civil Aviation Administration of China, Xiamen Fujian

Received: August 2, 2026; accepted: September 1, 2026; published: September 9, 2026

Abstract

Four typical winter-spring advection sea fog events with low visibility from 2021 to 2025 at Xiamen Gaoqi International Airport are analyzed from circulation pattern, stratification, surface wind and ECMWF forecast performance. Results show (1) all fog events feature the circulation pattern of dry-

cold upper air, warm-humid lower air and surface low-pressure inverted trough. The infiltration of weak cold air along the near-surface coast is the core triggering mechanism for advection sea fog to make landfall at airports, and the cold air path along the eastern coast has the most significant impact on fog conditions at Xiamen Airport. (2) A stable near-surface inversion layer is a key stratification condition for the long-term persistence of dense fog. The bottom of a low inversion layer is more likely to generate dense fog. However, the global ECMWF model has a significant shortcoming in its ability to identify shallow near-surface inversion layers, which can easily lead to missed reports. (3) Northeasterly winds at ground level are the key wind direction for transporting sea fog to airports. After the wind direction turns northeast, airport visibility will drop rapidly and significantly within 20 minutes to 1 hour. Northeasterly winds of 1~3 m/s are most conducive to the stable maintenance of fog masses. Based on multi-process comparisons, four key points for sea fog forecasting in winter and spring have been extracted for this airport, which can provide technical reference for low visibility weather warnings and aviation meteorological support at coastal airports.

Keywords

Advection Sea Fog, Low Visibility, Circulation Pattern, Stratification Characteristics, Numerical Forecast Evaluation

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

厦门高崎国际机场坐落于厦门岛东北岸，特殊沿海地形使其成为我国东南沿海受平流海雾影响突出的民航机场之一。冬春季平流海雾是制约本场航班起降、造成大面积航班延误与备降的首要危险天气，其生消、登陆时间与风向风速、海气温差、局地潮汐等要素高度耦合，预报难度大。据厦门机场航空气候整编资料统计，1971~2010年厦门区域年均海雾日数超60天，但2021~2025年机场跑道受海雾直接影响的有效雾日显著低于区域气候均值，反映出海雾影响机场存在极强局地性，不能直接套用区域气候统计结论开展机场专项预报。

国内气象学者已针对福建沿海、华东机场海雾开展大量研究工作。区域气候与物理机制方面，黄健等[1]针对华南沿岸海雾开展多年边界层观测，揭示海气温差、海气界面通量对雾滴生成、发展的调控机理。机场个例诊断方面：罗忠红[2]等针对厦门机场单次暴发性浓雾开展天气诊断，证实ECMWF大尺度形势场具备参考价值，但对近地面边界层气象要素刻画存在明显局限；郑泽华[3]等基于闽南沿海地面观测数据统计发现，海雾过程东北风建立与能见度骤降存在显著相关，同时将沿海大雾地面环流划分为低压前型、高压入海型、静止锋型、冷锋前型、均压场型五类。数值预报与可预报性研究方面，对ECMWF、GFS全球模式开展北美西海岸海雾预报能力评估，结果表明，全球模式垂直分层分辨率有限，难以刻画近地面浅薄逆温结构，低估低层边界层稳定度，进而造成海雾事件系统性漏报[4]；一维数值模拟试验表明，适宜强度的向岸风可输送暖湿水汽，为海雾维持提供物质条件，而风速增大将显著增强边界层机械湍流，破坏近地面饱和条件，促使雾层消散[5]。

现有研究多聚焦单一个例诊断或大区域多年气候统计，针对同一机场多次典型冬春季海雾过程的系统性对比分析相对匮乏，对不同环流路径、层结结构、风场演变下雾的强度、持续时长差异缺少定量归纳，同时对主流数值模式在沿海机场弱气压场下的预报误差机理讨论不足。本文选取2021~2025年具有代表性的4次低能见度海雾过程，覆盖间断性大雾、持续性强浓雾、多日连续海雾

的典型案列，提炼本场平流海雾预报关键指标与预报着眼点，提升厦门机场冬春季低能见度天气预警准确率。

2. 资料与个例概况

2.1. 所用观测与预报资料

本文融合多源同步观测与数值预报资料开展综合分析，数据包含厦门机场逐小时 METAR、SPECI 气象实况报文，机场自动观测系统(AWOS)分钟级能见度、跑道视程和风要素序列，中央气象台高低空天气形势图，国家海洋环境预报中心海温实况，厦门市单站探空资料，福建省加密自动站风场与能见度观测数据，ECMWF 模式地面风场预报产品。

2.2. 四次典型大雾过程基础特征

本文筛选 2021~2025 年 4 次影响程度不同、环流路径存在差异的冬春季海雾过程，涵盖间断轻雾、持续性浓雾、多日连续雾等不同类型，各过程最低能见度、跑道视程、云底高度、大雾时段及持续时长统计(见表 1)。

Table 1. Comparison of basic conditions of four fog events
表 1. 四次大雾过程基本情况对比

过程	最低能见度/m (出现时间)	最低 RVR/m	最低云高/m	大雾时段	持续时长
2021.4.1	400(03 时)	1400	150	夜间至次日凌晨间断出现	单次最长 20 分钟
2022.3.26	900(07 时)	1100	90	夜间至次日上午波动明显	持续约 4 小时
2023.2.13	100 (06~09 时)	200	60	凌晨至上午	持续约 3 小时
2025.3.27~28	300 (04~06 时) 400 (02~06 时)	300~400	90	凌晨接连出现	持续约 2~4 小时

3. 天气形势分析

3.1. 2021 年 4 月 1 日过程

中高层高压环流控制南海中部，福建区域处于高压北侧，大气整体干冷，中高层无明显水汽输送通道；低层西南低涡逐步东移发展，切变线延伸至长江中下游，华南及福建位于切变南侧，3 月 31 日西南气流加强为 10~12 m/s 暖湿急流，持续向闽南沿海输送充沛水汽。地面全域受低压倒槽弱气压场控制，气压梯度极小，静稳条件充足，直至 4 月 3 日北方冷高压南下扩散，破坏倒槽环流后大雾趋于消散。

3 月 31 日后半夜弱冷空气沿海上路径渗透抵达厦门本场，地面主导风向由偏南风转为东北气流，外海预先形成的雾团随东北风平流输送至近岸。同期厦门近海海温 21℃，机场近地面气温维持 20℃~22℃，925 hPa 高度层温度等值线覆盖厦门上空，近地面等温/弱逆温层稳定维持，为海雾发展提供稳定层结基底。

3.2. 2022 年 3 月 26 日过程

中高层南支槽东移至华南西部，福建全境处于槽前上升西南气流控制；低层西南涡同步东伸，江淮流域维持切变线，切变南侧西南暖湿急流持续东传。地面层面，华南沿海被低压倒槽控制并缓慢东移入海，北方蒙古气旋东移南下引导弱冷空气自北路渗透。冷空气影响时间较数值预报提前，25 日后半夜地面风向由西南风转为弱东北风，叠加凌晨 4 时潮汐涨潮抬升水汽，海面雾团间歇性向机场输送，造成能见度持续起伏波动。

本场探空观测显示 925 hPa 以下持续存在稳定逆温层, 逆温强度 $2^{\circ}\text{C}\sim 3^{\circ}\text{C}$, 为四次过程中逆温强度最大值, 但受数值模式垂直分辨率限制, 预报场未能识别该浅薄边界层逆温, 出现明显漏报。

3.3. 2023 年 2 月 13 日过程

中高层南支槽稳定位于华南西部, 槽前西南气流维持稳定; 中低层急流轴南侧存在弱下沉气流, 抑制垂直对流发展, 构建静稳环流背景。低层西南涡显著增强, 厦门处于地面低压倒槽前部, 8 m/s 偏南风持续输送水汽, 近地面大范围高湿区覆盖闽南沿海。地面冷锋自华北、东北南下, 锋前长江以南全域维持低压倒槽, 本场位于倒槽南侧水汽饱和区。

12 日夜中路冷空气快速南下至浙赣南部, 华东沿海同步出现冷空气渗透, 浙江沿海站点率先出现海雾; 13 日清晨海上冷锋移动放缓, 与华南暖湿平流交汇形成准静止锋, 锋区南侧暖区水汽达到饱和状态。垂直层结上, 850~925 hPa 湿层持续增厚, 低层暖湿平流作用显著, 有利于强浓雾生成。

3.4. 2025 年 3 月 27~28 日过程

南支槽稳定维持于粤西, 华南至福建全程处于槽前西南急流控制区, 厦门位于急流轴南侧, 伴随弱下沉气流抑制对流运动; 低层福建沿海处于低压槽前高温暖区, 后期逐步转为冷高压前部环流。地面 27 日凌晨冷锋南段抵达江淮流域, 华南至闽南维持低压倒槽南侧饱和和高湿环境, 海面已大范围生成雾区。

27 日傍晚冷空气南下抵达福建北部, 28 日凌晨冷空气受武夷山脉地形阻挡, 西路南下路径受阻, 部分冷空气沿海上东路径向南渗透至福州近海, 闽南至粤东沿海持续维持高湿饱和环境。探空曲线整层盛行西南气流, 逆温层集中分布于 925 hPa 及以下近地面边界层; 物理量场诊断显示低层湿度持续升高、暖湿水汽输送强度增大, 中高层温度露点差同步减小, 水汽垂直分布均匀。

3.5. 共性环流特征

综合四次个例三维环流配置, 可归纳厦门机场冬春季平流海雾统一环流模型: 高空 500~700 hPa 以干冷气流或弱高压脊控制为主, 中低空 850~925 hPa 西南暖湿急流持续输送水汽, 地面长期处于低压倒槽弱气压场。近地面沿海弱冷空气渗透是触发海雾登陆机场的必要条件, 冷空气沿东部沿海路径南下时, 在厦门近海形成冷垫, 暖湿气流沿冷垫抬升冷却, 极易形成持续性平流海雾。其中 2025 年连续雾过程为典型东路冷空气渗透型, 2023 年浓雾过程为中路冷空气叠加沿海渗透复合型, 两类路径均需在预报中重点区分。

4. 大气垂直层结特征对比分析

4.1. 近地面逆温层结特征

四次大雾过程均观测到持续性边界层逆温, 逆温形成机制、厚度、强度存在明显差异。2021 年过程逆温由海陆温差驱动形成, 垂直厚度大、整体稳定度高; 2022 年过程近地面逆温强度达 $2^{\circ}\text{C}\sim 3^{\circ}\text{C}$, 为四次过程最强, 但 ECMWF 模式垂直分辨率不足, 完全漏报该浅薄逆温(见图 1); 2023 年过程模式预报地面至 1000 hPa 存在约 2°C 逆温, 实况地面气温低于预报值, 实际逆温强度高于预报结果(见图 2); 2025 年过程连续两日近地面低层逆温持续维持, 逆温层底高度偏低, 有利于近地面水汽持续堆积, 造成海上大雾连续多日不消。

4.2. 垂直湿度廓线分布

四次过程均呈现低层高湿、中高层偏干的典型海雾湿度结构。2021 年过程夜间近地面温度露点差 $\leq 1^{\circ}\text{C}$, 大雾强盛阶段温度露点差降至 0°C , 近地面完全饱和; 2022 年过程白天持续阴雨, 整层大气湿度偏

高,为夜间海雾储备充足水汽(见图 1);2023 年过程 925 hPa 高度以下温度露点差接近 0°C ,近地面维持 94%以上高湿层,925 hPa 以上维持干暖盖,利于出现最强浓雾(见图 2);2025 年过程低层相对湿度维持 85%左右,水汽持续小幅补充,保障大雾稳定维持。

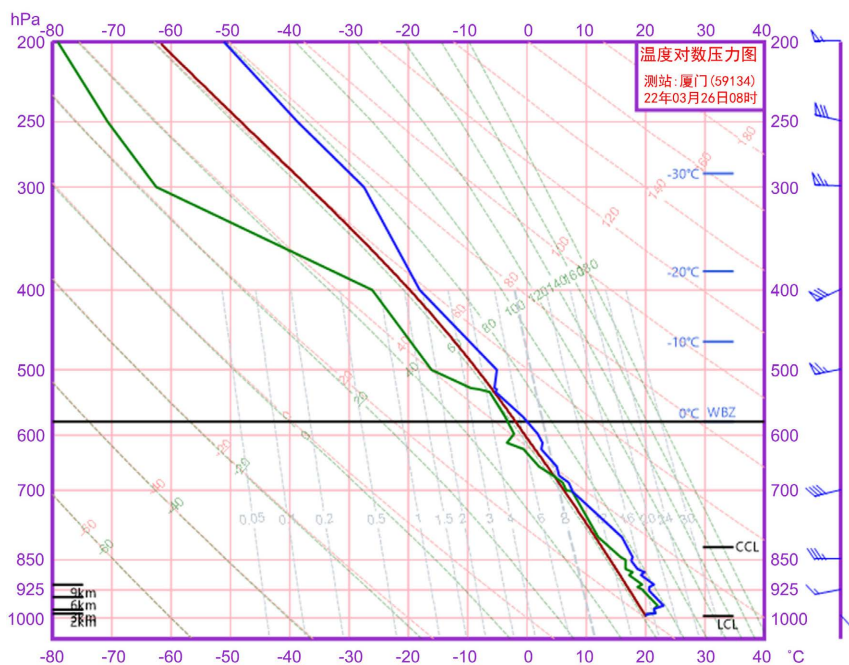


Figure 1. Sounding chart of Xiamen station at 08:00 on March 26, 2022

图 1. 2022 年 3 月 26 日 08 时厦门站探空图

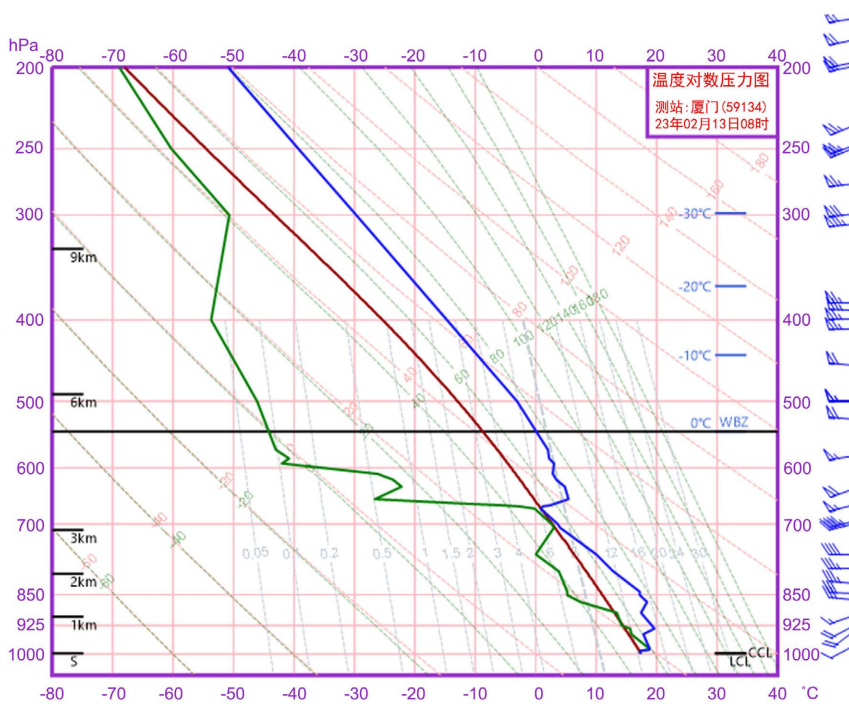


Figure 2. Sounding chart of Xiamen station at 08:00 on February 13, 2023

图 2. 2023 年 2 月 13 日 08 时厦门站探空图

4.3. 大气稳定度条件

四次个例均存在显著对流抑制能量，垂直对流运动微弱，静稳边界层得以长期维持。该结论与杨晶轶对双流机场大雾稳定度研究结论一致：中高层弱下沉气流带来下沉增温效应，与近地面夜间辐射降温共同构建稳定逆温结构，大幅提升边界层稳定度，抑制雾团垂直扩散，延长大雾持续时间[6]。

5. 地面风场演变与能见度响应关系

5.1. 风向转换与能见度下降时序关系

四次过程统一证实：地面东北风是海雾输送至机场的决定性风向，东北风可将海湾、外海成熟雾团直接平流输送至跑道区域。郑泽华等对闽南沿海的统计分析也表明海雾过程中风向转为东北风与能见度下降高度相关[3]。

统计四次过程东北风建立时刻与能见度骤降时间间隔(见表 2)，风向转为东北后 20 min~1 h 内，机场主导能见度将出现断崖式下降。2021 年过程东北风风力不稳定，雾团仅短暂覆盖跑道，最低能见度 400 m 但跑道视程仍维持 1400 m 以上，属于局地片雾，此类局部雾现象在本场冬春季较为常见，预报时需区分全域雾与局部雾。

Table 2. Temporal relationship between wind direction shift and visibility drop in each fog event
表 2. 各次过程风向转变与能见度下降时间关系

过程	风向转东北的时间	能见度明显下降时间
2021.4.1	1 日 02 时	1 日 03 时
2022.3.26	25 日 22 时	25 日 22:21
2023.2.13	13 日 06 时(弱冷平流)	13 日 06:30、07:43
2025.3.27~28	27 日 04 时、28 日 02 时	27 日 05:12、28 日 02:23

5.2. 风速对雾生消、强度的调控作用

对比四次过程风速实况可见风速存在显著阈值效应：风力 < 1 m/s (微风、静风)时，雾团缺乏持续输送动力，大雾呈间歇性出现；风力维持 1~3 m/s 适中东北风时，雾团稳定输送、不易消散，大雾持续时间最长；风力 > 5 m/s 时，湍流扰动增强，雾滴快速扩散，能见度快速回升，大雾趋于消散。2023 年过程 06 时后东北风增大至 4 m/s 以上，浓雾强度达到峰值；2025 年过程全程 1~3 m/s 东北风，大雾稳定维持 4 h 左右，与华东干线机场大雾最优风速区间 1~3 m/s 统计结论一致。

5.3. ECMWF 模式风场预报能力评估

ECMWF 模式对低压倒槽背景下夜间弱地面风场预报缺陷为本次对比分析关键结论。以 2021 年过程为例，当日午后至傍晚风向预报偏差 $\leq 30^\circ$ ，具备参考价值；23 时进入夜间弱气压场后，预报风向与实况偏差急剧增大，极端个例风向偏差超 180° ，出现风向反向预报错误。成因在于大雾天气地面多处于低压倒槽弱气压场，水平气压梯度极小，近地面风场对局地海陆地形、海陆风环流高度敏感，全球模式分辨率有限，对局地弱强迫环流系统刻画能力不足，夜间风场预报可信度大幅下降。

6. 结论

(1) 2021~2025 年厦门机场 4 次冬春季低能见度平流海雾均匹配“高空干冷、低空暖湿、地面低压倒槽”标准环流配置，近地面沿海弱冷空气渗透为海雾触发关键条件，东路沿海冷空气路径对本场雾情影

响最显著, 该环流模型具备华东滨海机场普适性;

(2) 近地面稳定逆温层是大雾长时间维持的核心层结条件, 925 hPa 附近偏低逆温层底更易形成强浓雾, 但 ECMWF 模式受垂直分辨率限制, 对浅薄边界层逆温识别存在明显缺陷, 业务预报中必须结合探空、风廓线雷达实况加以订正;

(3) 地面东北风是海雾侵入机场的关键预报因子, 风向转为东北后 20 min~1 h 能见度将快速下降, 1~3 m/s 东北风为大雾稳定维持的最优风速区间, 风速过小易出现间断雾, 风速过大则湍流扰动促使雾团快速消散;

(4) 本场海雾时空分布具有极强局地性, 跑道视程与主导能见度常出现不同步现象, 片雾、局部雾多发, 开展预报预警时需综合参考跑道两端多组自动观测数据, 不可仅依靠主导能见度判定运行标准。

参考文献

- [1] 黄健, 王斌, 周发琇, 黄菲, 吕卫华, 黄敏辉, 等. 华南沿海暖海雾过程中的湍流热量交换特征[J]. 大气科学, 2010, 34(4): 715-725.
- [2] 罗忠红, 江航东, 梁升, 等. 2016 年厦门机场一次爆发性浓雾的天气条件分析[J]. 热带气象学报, 2020, 36(4): 499-507.
- [3] 郑泽华, 陈赛, 林文, 等. 闽南沿海大雾天气地面气象要素统计分析[J]. 海峡科学, 2021(2): 3-10.
- [4] Koračin, D., Dorman, C.E., Lewis, J.M., Hudson, J.G., Wilcox, E.M. and Torregrosa, A. (2014) Marine Fog: A Review. *Atmospheric Research*, **143**, 142-175. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2013.12.012>
- [5] 胡瑞金, 董克慧, 周发琇. 海雾生成过程中平流、湍流和辐射效应的数值试验[J]. 海洋科学进展, 2006, 24(2): 156-165.
- [6] 杨轶晶. 成都双流机场夏季大雾天气特点及形成机理[J]. 高原山地气象研究, 2015, 35(4): 36-41.