

首都机场一次对流天气分析与气象运行服务

隋之璇 冯禹铭

中国民用航空华北地区空中交通管理局气象中心 北京 100621

摘要: 针对一次典型的连续性对流降水过程, 本文综合首都机场三条跑道端点PTU、WIND、RAIN实况、半小时雷达及GFS/WAFS环境场, 通过复盘预报场与实况资料的比对分析, 研究预报准确性, 通过实际天气比对预报准确性和研究相对应的预报指标, 提升对预报场利用的效率。本次实况与预报场分析结果显示, 本次过程15:00—16:30UTC为核心影响时段, 模式评估表明12Z起报在位相与落区上更贴近实况, 00Z起报对形势刻画较稳健。本文提出以最接近实况的预报时次为主线、辅以雷达外推, 依据观测实况随时修订, 及时提前为用户服务, 提升预报精度, 提高为管制运行用户的服务效率。

关键词: 首都机场; 对流降水; 预报与实况; 航空气象服务

1 引言

1.1 背景与现实需求

首都机场位于华北平原北缘、燕山山前的地形过渡带, 夏季在副热带高压边缘与冷涡、短波槽活动共同作用下, 容易出现对流性降水的“列车效应”。强降水、雷电与低空风切变往往叠加出现, 直接影响空中交通管制航空器进离场容量, 增加指挥难度。与一般性降雨不同, 连续性对流过程中, 回波带在机场上空反复生成与移过, 变化快、强度大, 对临时流量协调提出挑战, 运行不确定性显著放大, 传统数值预报产品精度难以支撑分钟级调度决策^[1]。对枢纽机场而言, 如何在此背景下准确把握对流发展与减弱的时间窗, 是保障航班正常与安全的关键。

1.2 个例选取与数据方法

本文选取一次具有代表性的连续降水过程进行剖析: 世界时2025年7月28日13:30—23:59 (北京时间7月28日21:30—7月29日07:59)。观测选取三条跑道端(01、36L、36R)PTU(温度、相对湿度)、风WIND与降水RAIN数据, 能见度(VIS)作为补充参考; 雷达采用半小时拼图及关键时窗的基数据, 以14:00—15:30UTC为重点检视时段。实况数据统一采用分钟级时间分辨率, 首先对数据预处理, 进行检查, 对异常跳变数据质量控制, 以三端点交叉比对识别局地传感器偏差; 并对数据进行连续5分钟的滑动平均检验(风向风速保留极值), 筛出异常数据。

预报侧采用GFS与WAFS的500/700/850hPa温度、风场与相对湿度产品, 并引入SI、SWEAT等环境指数场^[2]; 考虑到12Z起报距离实况更近, 兼顾00Z与12Z的对照分析。为表征对流潜势, 提取SI与SWEAT指数, 并据温湿

场近似计算 θ_e 与可降水量(PW)分布, 以识别湿舌与能量聚焦区^[3]。

2 天气形势与对流环境

2.1 大尺度环流背景

本次过程期间, 华北处在一次中纬度短波系统快速东移的影响之下。500hPa上, 28日白天至夜间短波槽自陕甘一带出槽东移, 冷心东移加深, -6°C 等温线先后压至冀中北部, 夜间一度推进至京津以东, 局地短时降至 $-8\sim-10^{\circ}\text{C}$ 。槽前中层冷平流叠加, 配合北侧高空急流的左前侧辐散区覆盖京津冀中北部, 为对流持续发展提供了良好的高空抽吸条件。700hPa明显呈现湿舌北抬的格局, 相对持续维持在70%以上, 湿舌轴线自西南—东北穿越保定—北京—唐山一线。湿舌后侧为较干冷空气潜入, 垂直风切增强, 利于对流。850hPa表现为典型的偏南至西南低空急流, 其右侧出口区恰好位于京津附近, 辐合与上升最为显著。

整体形势为上冷下暖、上干下湿的不稳定结构, 且高空急流与低空急流呈上下耦合, 辐散与辐合成对配置。受地形与下垫面差异影响, 华北中北部形成东西向的高湿带, 湿位涡与 θ_e 脊线大致与太行山东麓一致, 成为对流反复触发与回波“列车效应”的主要锚定区。

2.2 环境条件

不稳定条件方面, SI指数在京津冀大部为 $-3\sim-6$, 局地短时达 -7 左右, 指示抬升凝结后具备明显的对流潜势。SWEAT指数在300~350的适宜区多次覆盖京津, 且在14:00—15:30UTC强回波时段配合700hPa高湿与850hPa急流出口的叠置, 为强对流提供了持续的热力与动力条件。西南至京津的暖湿舌稳定顶托到华北平原北部, 低层偏西南气流把暖湿气团持续北送, 边界层水汽夜间仍

充沛,在这种深厚湿层+上冷下暖的背景里,水汽与能量的补给持续不断供给。

触发条件具有明显的地形与边界层特征。太行山前沿在偏南—西南气流作用下易形成下游辐合,山前暖湿气流受地形抬升后与槽前冷平流相遇,触发线状对流^[4]。从雷达演变看,14:00–15:30UTC强对流以SW–NE排布快速掠过,随后在北京以东、通州—香河一带再生并回灌。边界层日变化对不稳定的释放同样关键。傍晚前后近地层有一定热力残留,抬升凝结层高度较低,加之0–6km垂直风切保持中等偏强,单体更易组织成短生命期的多单体群,造成小时雨强的阶段性跃升。

总的来看,本次过程是一次在中尺度动力强迫和地形—下垫面共同作用下的持续性对流降水:500hPa短波槽与北段急流提供抽吸冷却,700/850hPa湿舌与低空急流提供水汽、辐合,能量足。

3 过程演变与气象服务

3.1 实况演变复盘

本次个例从UTC13:30起进入有组织的降水阶段,启动时段的特征是近地层快速趋饱和、低空辐合显性、浅对流先触发。三条跑道端点的温湿度序列表现为气温缓降、相对湿度逼近饱和,露点与气温差距缩小;风场由白天的偏南—东南流逐步转为切变增强的辐合场,阵风开始抬升,UTC14:00–15:30为过程峰值。雷达显示SW–NE向的强反射带在首都机场北—东象限通过,强度清晰;端点风场短时段内跃变,阵风与湍流强度同步升高,温度骤降的特征在01端更为明显。15:30以后,主雨带逐步东移,机场进入间歇阶段,22:00强回波区再次经过增强,后续雷达上可见在通州—香河一线的再生,间歇性弱至中等强度回波仍会影响进近区域。地面风由外流主导渐转为背景场控制,风向趋稳但仍有波动;温湿度序列呈缓慢回升。

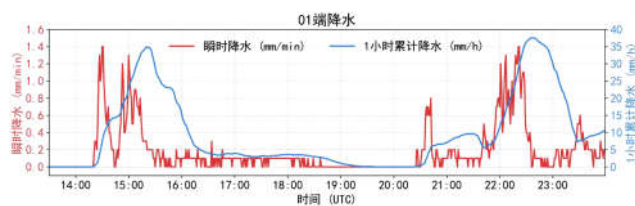


图1 01端降水强度图

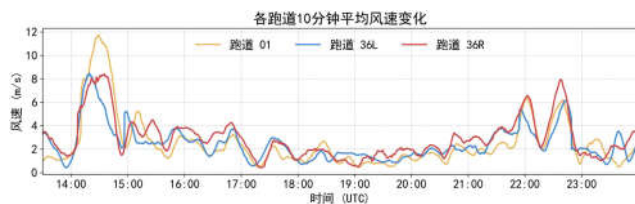
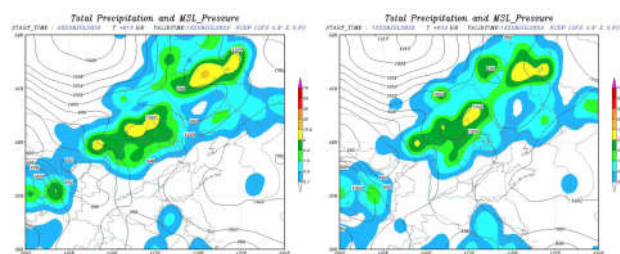


图2 3条跑道10分钟平均风速图

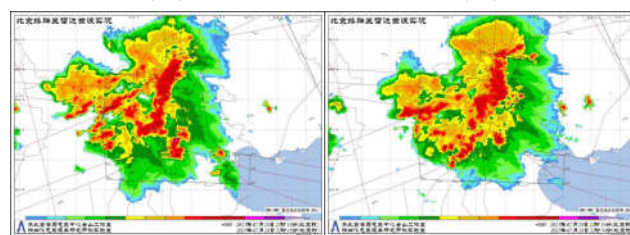
3.2 预报产品与实况对照

将GFS28日00Z与12Z两套起报与机场周边雷达、跑道端点序列进行并置后,可以较为清晰地看到位相与落区的系统性差异。00Z起报对华北中北部的湿舌与辐合线定位偏西偏北,结果是主雨带到站时间窗整体偏早约1–2小时;同时给出的强降水轴线在北京—通州一带略向北偏移至昌平—顺义一线。12Z起报由于吸纳了更多同化信息,位相上明显收敛:强降水信号压向本场及其东南象限,到站误差一般控制在 ± 30 分钟。然而,两套起报都存在共同问题,即强度被平滑^[5]。雷达显示14:00–15:30UTC的条带性强核在机场北东象限反复贴近,地面01端降水与阵风均出现跃升;模式中对这一列车效应的组织尺度与峰值强度仍偏弱,导致对小时层面的雨强与端点阵风缺乏足够的可判别度。



(a)

(b)



(c)

(d)

图3 降水场00Z数值起报(a)、降水场12Z数值起报(b)、实况雷达(c)、实况雷达(d)

与雷达对照可以解释这种系统性偏差的来源。其一,触发点刻画不足。模式在700/850hPa的辐合带与 θ_e 脊线给出了合理指引,但对冷池外流边界的位置与传播速度缺乏显式描述,难以再现风向跃变—温度阶跃这一套典型信号,从而在何时第二次覆盖本场上出现不确定。实际中,山前一平原下垫面差异与城市热岛使外流边界更易在北京以东再触发,形成补尾回波,而网格平均使强核在时间与空间上被摊薄。综合来看,12Z起报更贴近实况的路径,00Z起报更能反映大尺度趋势与形态。

4 气象服务分析

强对流天气影响安全运行,低空风切变与颠簸风险同步上升,若不及时调整,将在接地与复飞判定上压缩裕度。同时流量协调上,存在备降条件是否满足、航线

如何安排、备降机场是否有余度接收的客观条件，增加了运行风险，因此及时准确的气象服务至关重要。

在本次对流降水过程中，预报与观测的协同配合是提升服务效能的核心。过程前期，预报员利用分析资料，提前锁定强雷雨过程时间段，为观测员对当天天气观测提供前期把控，关注要暴雨方向，首都机场北向视野好，远闪、雷暴云容易观测到，提前做好心理准备，并针对关键期增加观测次数，对能见度等方面增加观测侧重点。同时，观测员及时将消息同步给预报员，当观测到天空状况波动、对流发展旺盛时，及时与预报值班员取得有效沟通，了解天气的发展演变趋势，巡视各类设备的运行情况，有不正常或卡顿做到了及时沟通；同时做好风切变报告接收准备，更好的与预报联络风切变情况，辅助预警。

在对外服务上，气象预报员、观测员紧密配合，沟通最新进展，通过数值资料与实况场的不断订正分析，提高临近预报精度，对于管制用户能做到提前服务、精确服务。例如，在本次天气过程中，强降水峰值到达前，观测员提前对塔台用户服务，通报雷暴云自西向东移动，36L跑道能见度快速下降，预计5分钟左右逐渐影响36R跑道，主导能见度将会快速下降，为进离场航空器提前预警；预报员随时与管制用户沟通，辅助流量调控，保障管制部门决策连续性。

5 结论

本文以7月28日首都机场一次连续性降水个例为对象，整体形势上，短波槽东移提供中层冷平流与上升抽吸，暖湿舌与高湿带在太行山东麓一线北抬并维持，低

空急流右侧出口区的辐合覆盖京津周边，水汽与动量的通量向北输送。地形扮演定位器和放大器角色，垂直切变与上升通道的配置决定了对流的组织形式。

在预报上，更近时次预报产品更接近实况，但整体刻画仍偏平滑，基于此，预报资料分析建议新为主，以实况资料纠偏。本次研究表明，枢纽机场对流降水气象服务需构建“协同—校验—修订”的闭环体系，在人员配合上，预报与观测的“双向反馈”机制可显著提升预报精度，能有效规避单一资料的局限性，为分钟级调度提供可靠支撑。

参考文献

- [1]陈朝平,卢萍.SWCWARMs模式不同起报时次对“18·05·21”强降水过程的预报能力评估[J].高原山地气象研究,2020,40(3):9.DOI:10.3969/j.issn.1674-2184.
- [2]周泓,闵颖,许彦艳,等.滇中地区不同影响系统下3次短时强降水过程的大气环境特征和雷达特征分析[J].高原气象,2024,43(1):166-183.DOI:10.7522/j.issn.1000-0534.2023.00046.
- [3]于雷,丁和悦,张会,etal.河北保定市“23·7”强降水过程的观测特征分析[J].气候与环境研究,2024,29(4):478. DOI:10.3878/j.issn.1006-9585.2024.24015.
- [4]刘士军.六盘山区一次对流性降水天气成因及其云降水宏微观特征分析[J].内蒙古科技与经济,2022(24):62-65.
- [5]孙禄,罗雄,唐利琴,等.CPEFS模式预报产品在昌都市一次降水天气过程中的检验[J].科技创新与应用,2023,13(4):72-78.DOI:10.19981/j.CN23-1581/G3.2023.04. 017.