

文章编号: 2096-1618(2023)04-0467-05

欧洲细网格数值预报产品在双流机场低能见度天气预报中的应用研究

刘辉权, 邹永成, 王凌云, 褚芸欣, 赵夏菁
(民航西南空管局气象中心, 四川 成都 610202)

摘要:针对目前双流机场主导能见度及跑道视程缺乏客观预报产品的问题,利用2009–2019年的自动观测、天气报告和EC细网格数值预报产品,基于双流机场低能见度天气学预测模型,建立主导能见度和跑道视程预测软件。该软件结合民航运行规范,利用归一化方法对EC细网格数值预报能见度产品进行修订,利用RVR与主导能见度的统计关系得到精细化的RVR预测产品,并利用历史个例前期地面气象要素的统计值进行消空。研究结果表明,该软件具有良好的准确性、稳定性,可有效降低双流机场低能见度天气的空报率和漏报率。

关键词:低能见度;跑道视程预报;能见度预报;数值预报;天气学预报模型;大雾

中图分类号:P463.1

文献标志码:A

doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2023.04.014

0 引言

随着民航业从高速发展向高质量发展转变,广大旅客和民航运行部门对航班安全性和准点率的要求也越来越高。低能见度天气是秋冬季造成机场航班大面积延误的主要天气,大雾是引起低能见度的主要天气现象,因此开展大雾预报研究对于民航气象部门具有重要意义^[1-2]。

关于大雾的研究,前人多集中在个例分析、气候特征和形成的环流形势等方面^[3-6],杨晶铁等^[7]研究了双流机场低能见度天气气候特征及其与气象要素的相关性;邹永成等^[8]给出双流机场大雾发生前气象要素特征和阈值;周璞等^[9]研究发现双流机场跑道视程与低能见度之间的线性对应关系。尽管这些研究增进了对大雾概念模型、生消及强度变化的认识,但对提高大雾精细化预报贡献仍不足。部分民航机场初步开展了大雾数值预报产品开发工作,乌鲁木齐地窝堡机场基于EC细网格数值预报产品建立乌鲁木齐机场未来21 h能见度预报模型^[10];贵阳龙洞堡机场建立了辐射雾MOS预报系统^[11]等。

由于大雾预报的复杂性和民航部门数值预报技术发展的相对滞后,目前大雾的业务预报能力进展仍然缓慢^[12]。对于多数机场气象台站,预报员根据前期天气形势或利用数值模式提供的形势场预报结果,运用天气学基本原理和分析方法,结合本地大雾概念模型和经验对大雾进行预报^[13],这种方式准确性、稳定性、精细程度较差,对大雾生消、强度变化的预测客观性差,依赖主

观判断,难以满足民航用户对精细化预报的要求。目前雾还不是数值预报直接给出的指导产品,预报员分析数值预报产品效率较低,难以满足高效的民航气象服务需求;由于民航运行具有的特殊性,II类、III类精密进近高度依赖跑道视程(runway visual range, RVR)预报,而现有数值预报难以直接给出可靠的客观参考产品^[14-15]。因此,各地民航气象部门亟需开发一种本地化、适用民航运行要求的低能见度数值预报产品。本文选择结合EC细网格数值预报产品(简称“EC预报产品”)和气象要素统计结果,以双流机场低能见度天气学预测模型为核心,开发一套适用于双流机场的低能见度预测软件。由于双流机场低能见度天气主要由辐射雾引起的,故本文研究涉及的低能见度天气预测方法均基于双流机场的辐射雾天气来开展。

1 资料

双流机场的基准点坐标为30°34.8'N, 103°56.9'E, 机场标高495.3 m。数值模式资料采用30.25°N~31°N, 103.75°N~104.5°N(图1)的面平均EC预报产品,包括风、温、相对湿度、云量、露点温度等;其他资料包括2009–2019年双流机场逐小时自动观测资料和天气报告,包括主导能见度、跑道视程RVR、气温、露点温度、修正海平面气压、相对湿度等。

2 机场RVR和主导能见度预测模型的建立

基于2009–2019年双流机场153次低能见度天气

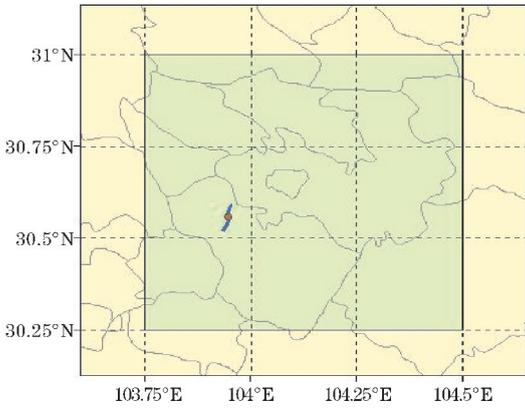


图1 EC预报产品选取范围示意图

表1 双流机场低能见度天气学预测模型各项要素阈值

时段(北京时间)	双流机场低能见度天气学预测模型条件	阈值
00-09时	近地面温度露点差	$T-Td \leq 0.15 \text{ } ^\circ\text{C}$
04-07时	总云量	$Tcc \leq 40\%$
07-09时	低云量	$Lcc > 30\%$
05-09时	近地面风速	$ws < 2.0 \text{ m/s}$
05-09时	近地面逆温(地面至925 hPa高度间的逆温)	逆温差 $\geq 1.0 \text{ } ^\circ\text{C}$
05-07时	高空湿度 850 hPa; 700 hPa; 500 hPa	$RH850 \leq 85\%; RH700 \leq 55\%; RH500 \leq 40\%$
05-07时	高空风场 700 hPa 偏南风; 700 hPa 偏北风; 500 hPa 偏北风	$90 < wd700 < 270$ 且 $ws700 < 7.0 \text{ m/s}$; $0 < wd700 \leq 90$ 或 $270 \leq wd700 \leq 360$ 且 $ws700 > 1.0 \text{ m/s}$; $0 < wd500 \leq 90$ 或 $270 \leq wd500 \leq 360$

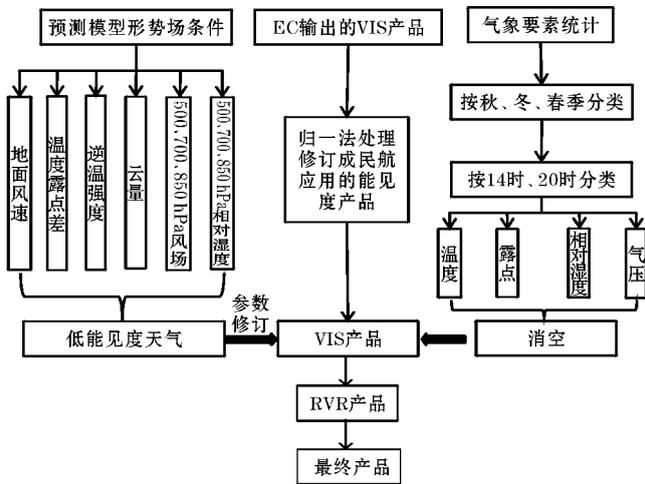


图2 低能见度预测模型的建模技术路线示意图

2.1 能见度预测产品

EC 预报产品中有 VIS 产品,但不能直接应用到民航气象领域,因为在民用航空地面观测规范中规定了主导能见度按等级编报,其中能见度 $\geq 10 \text{ km}$ 按 9999 编报,因此,需要将初始场为 08 时的 VIS 产品变化范围利用式(1)归一化到 0 ~ 10000 m,并保留 VIS 产品的变率,得到能见度预测产品。

$$V_i = 10000V_{e_i}/V_{e_{\max}} \quad (1)$$

式中, V_i 表示第 i 个时次归一化后的 VIS 数值, V_{e_i} 表示第 i 个时次 VIS, $V_{e_{\max}}$ 表示 VIS 产品 30 h 内的最大值。

归一化后的 VIS 产品的变率,定义变率公式:

背景分析的总结,构建双流机场基于天气学概念的低能见度天气预测模型,利用 EC 预报产品判定是否满足双流机场低能见度天气发生的背景条件,包括 500 hPa、700 hPa、850 hPa 及地面风场,500 hPa、700 hPa、850 hPa 相对湿度、总云量和低云量、逆温差,其中各项要素阈值如表 1 所示;利用 EC 预报产品种的 VIS 产品,通过归一化方法处理成范围为 0 ~ 10 km,利用历史实况主导能见度与 RVR 的关系,输出 RVR 预测产品;利用历史个例前期地面气象要素的统计值进行消空。该预测模型主要技术路线如图 2 所示。

$$k_i = m \left(\frac{V_i - V_{i-1}}{t_i V_{\max}} \right) \begin{cases} m = 2000, V_i > 5000 \\ m = 1200, 3000 < V_i \leq 5000 \\ m = 500, 2000 < V_i \leq 3000 \\ m = 300, 1000 < V_i \leq 2000 \\ m = 100, 600 < V_i \leq 1000 \\ m = 50, 0 < V_i \leq 600 \end{cases}$$

式中, k_i 表示归一化后的 VIS 变率, t_i 表示时间间隔, V_i 表示第 i 个时次归一化后的 VIS 产品能见度数值, V_{i-1} 表示第 $i-1$ 个时次归一化后的 VIS 产品能见度数值, V_{\max} 表示北京时间 00-11 时最大的能见度变化值; m 为调节参数,该参数通过结合民航主导能见度发布等级和本地经验确定。

$$VV_i = k_i t + V_0 \quad (3)$$

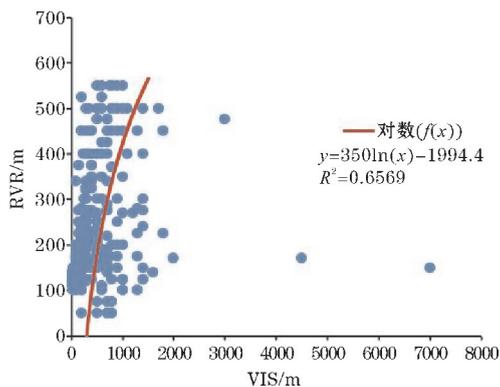
式中, VV_i 为第 i 时刻通过归一化和变率调节后计算主导能见度, V_0 表示初始能见度值。

2.2 RVR 预测产品

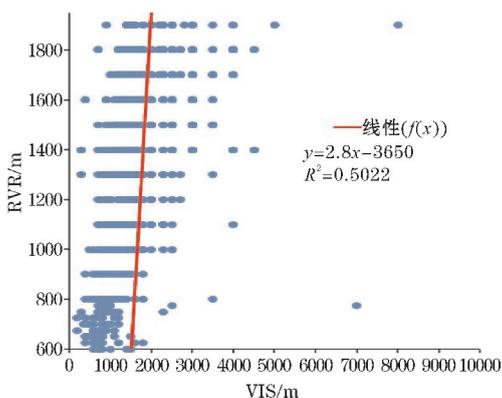
双流机场为双跑道构型,RVR 有 4 个测值,以观测基准点 02 左跑道(简称“02L”)的 RVR 为研究对象,统计历史主导能见度与之关系,以 II 类精密进近 RVR = 550 m 标准分段讨论,经统计发现(见图 3),RVR 低于 550 m 时,RVR 与主导能见度呈现对数关系,RVR 大于 550 m 时,RVR 与主导能见度呈现线性关系,通过分段拟合可得到二者之间的关系为:

$$\begin{cases} RVR = 350 \ln(VV_i) - 1994.4 & 0 < VV_i \leq 1500 \\ RVR = 2.8 VV_i - 3650 & 1500 < VV_i \leq 3500 \end{cases} \quad (4)$$

根据式(4),根据 VV_i 即可得到相应的 RVR 预测产品,当 $RVR \geq 2000$ m时,输出 P2000, ≤ 50 m时,记为 50 m。



(a) VIS 与 RVR(低于 550 m)的统计关系



(b) VIS 与 RVR(大于 550 m)的统计关系

图 3 双流机场低能见度历史个例主导能见度 VIS 与 RVR 的统计关系

2.3 主导能见度和 RVR 预测产品修订

当 EC 预报产品的天气学条件满足双流机场低能见度天气学预测模型,但 EC 预报产品中 VIS 经归一化和变率调节后的输出预报能见度大于 1000 m时,需进行订正。利用箱型图的四分位距(interquartile range, IQR)将 2009-2019 年的历史个例北京时间 00-11 时的主导能见度进行异常值检测,超过上四分位+1.5 倍 IQR 距离,或者下四分位-1.5 倍 IQR 距离的点为异常值,剔除异常值后统计分析发现,主导能见度符合正态分布特点,选择置信水平 95%,分别计算 00-11 时的置信区间(表 2,图 4)。根据置信水平,利用式(5)将式(3)计算得到的 00-11 时的 VIS 进行归一化处理至相应的置信区间,最后得到订正后主导能见度预测产品。

$$Va_i = a + \frac{b-a}{10000} VV_i \quad (5)$$

式中, Va_i 为第 i 个时次订正后的能见度值, a 、 b 分别为 00-11 时各时次的置信区间下限值与上限值, VV_i

为式(3)计算出的第 i 个时次的能见度数值。

表 2 不同时次双流机场低能见度天气主导能见度区间

时间	历史平均主导能见度值	归一化置信区间 $[a, b]$
00 时	3316	769 ~ 5183
01 时	3050	869 ~ 4379
02 时	2678	516 ~ 4409
03 时	2378	383 ~ 3886
04 时	2022	317 ~ 3343
05 时	1693	227 ~ 2921
06 时	1405	98 ~ 2578
07 时	1157	-64 ~ 2203
08 时	1025	-61 ~ 1819
09 时	933	5 ~ 1504
10 时	1167	82 ~ 1593
11 时	1779	78 ~ 2412

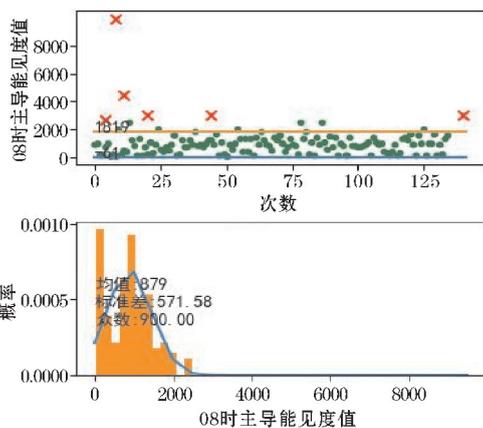


图 4 双流机场低能见度历史个例主导能见度置信区间计算

2.4 基于地面气象要素的修订

根据邹永成等^[8]的研究结果,将不同季节,前日 14 时、20 时地面观测相对湿度、气温、露点温度、修正海平面气压与不同强度历史个例阈值进行比较,利用历史个例前期地面气象要素的统计值进行消空。

3 低能见度天气预报软件设计与应用

3.1 软件设计与实现

如图 5 所示,该软件由 C#构建软件终端界面,python 脚本处理数据。软件由 3 部分组成,界面左侧为地面气象要素统计部分,用于判定前日 14 时、20 时地面气象要素是否符合历史低能见度天气条件;右上为低能见度天气学预测模型部分,系统自动读取 EC 预报产品并输出相应判定结果,预留了双流机场、天府机场两组窗口;界面右下为主导能见度/RVR 预测产品时序柱图,给出主导能见度和 RVR 时间变化特征。



图5 低能见度天气预测软件界面示意图

3.2 应用效果

对2020年12月-2022年4月双流机场的低能见

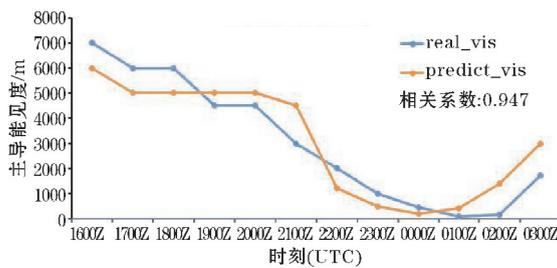
度天气进行预报评估(表3):预测模型的准确率为73.3%,漏报率为20%,空报率6.7%。其中,模型的准确率为88.9%,空报率为0,漏报率为11%,评估效果较好。2022年,由于双流机场观测场的搬迁,受观测环境的变化影响,模型预测评估准确率略有下降,但准确率仍较高。预测模型在一定程度上可有效降低空报率和漏报率,提高低能见度天气预测的准确率。

图6给出了2020年12月8日大雾预测最低主导能见度、RVR与实况的时间变化序列,该模型预测的主导能见度与实况变化趋势基本一致,相关性达到94.7%;模型预测的RVR与实况RVR变化趋势基本一致,相关性为91%,尤其是RVR转差/转好时刻与实况变化吻合,对民航运行决策具有重要应用价值。

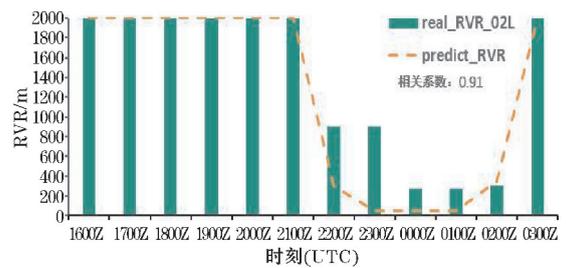
表3 2020年12月-2022年4月双流机场低能见度天气过程预测模型的评估

时间	天气实况	主导能见度最低值		RVR最低值		模型评估
		实况	模型预测	实况	模型预测	
2020-12-8	雾	100	150	250	100	准确
2020-12-20	部分雾	1200	2800	175	2000	漏报
2020-12-21	部分雾	1500	1500	150	100	准确
2020-12-24	轻雾	2300	3000	1200	2000	准确
2020-12-27	雾	100	150	125	100	准确
2021-1-15	轻雾	2700	/	1100	缺数据	/
2021-2-1	轻雾	5000	3000	2000	1300	准确
2021-2-3	轻雾	2300	2600	1100	1300	准确
2021-2-12	雾	900	1500	125	100	基本准确
2021-2-14	雾	100	1700	175	100	基本准确
2022-1-8	雾	150	3000	175	2000	漏报
2022-1-31	雾	200	2900	200	2000	漏报
2022-2-3	部分雾	3000	1500	550	100	准确
2022-2-13	雾	150	1200	125	100	基本准确
2022-4-5	雾	200	1700	200	100	基本准确
2022-4-7	轻雾	2500	1700	1200	200	空报

注:部分雾:RVR 低于550 m,主导能见度大于1000 m;雾:RVR 低于550 m,主导能见度大于600 m;大雾:RVR 低于550 m,主导能见度小于600 m

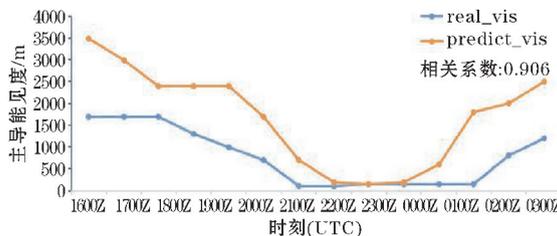


(a) 实况主导能见度与预测主导能见度

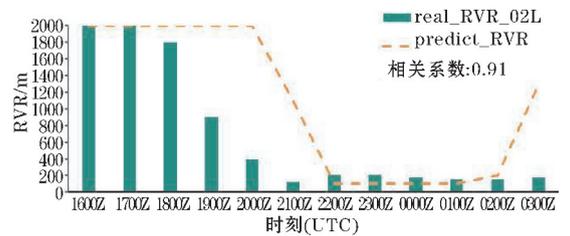


(b) 实况 RVR 与预测 RVR

图6 2020年12月8日大雾预测最低主导能见度、RVR与实况的时间变化序列



(a) 实况主导能见度与预测主导能见度



(b) 实况 RVR 与预测 RVR

图7 2020年12月27日大雾预测最低主导能见度、RVR与实况的时间变化序列

图7给出了2020年12月27日大雾预测最低主导能见度、RVR与实况的时间变化序列,该模型预测的主导能见度与实况变化趋势基本一致,预测值略高于实况值,低能见度持续时段略短于实况,相关性为90.6%;模型预测的RVR与实况RVR变化趋势基本一致,RVR实况比预测值更降低,实况RVR转差偏早、转好偏晚,总体上相关性为91%。

4 结论

讨论构建了双流机场低能见度天气预报软件,结论如下:

(1)该软件结合民航运行规范,利用归一化方法对EC预报产品中能见度进行修订,利用RVR与主导能见度的统计关系输出精细化RVR预报产品,有效解决了目前民航气象业务中缺乏RVR定量预报产品的问题。

(2)通过2020年12月至2021年2月的验证,该方法具有良好的准确性、稳定性,可有效降低双流机场低能见度天气的空报率和漏报率。

尽管构建的软件在实际应用中取得较好效果,但文中确定的参数依赖近10年的历史个例和经验阈值,随着双流机场周边城市化发展,双流机场低能见度天气生消规律的变化可能对本文软件的适用性造成一定影响,因此后续软件中涉及的相关算法仍需继续迭代更新。

参考文献:

- [1] 冯蕾,田华.国内外雾预报技术研究进展[J].南京信息工程大学学报(自然科学版),2014,6(1):74-81.
- [2] 杨晶轶.成都双流机场低跑道视程特征及其与气象要素的关系[J].高原山地气象研究,2018,

32(2):90-95.

- [3] 冯蕾,田华.国内外雾预报技术研究进展[J].南京信息工程大学学报(自然科学版),2014,6(1):74-81.
- [4] 常军,李素萍,李祯,等. CAR和SVM方法在郑州冬半年大雾气候趋势预测中的试用[J].气象与环境科学,2008,31(1):16-19.
- [5] 马晓刚,罗思维,舒海燕,等.中国典型大雾落区基本概念模型的研究与建立[J].气象与环境学报,2013,29(1):62-67.
- [6] 唐信英,罗磊,王鸽,等.四川省大雾时空分布特征研究[J].高原山地气象研究,2009,29(3):60-65.
- [7] 杨晶轶,赖明,黄巧.双流机场一次连续性大雾过程成因分析[J].中国民航飞行学院学报,2016,27(2):15-19.
- [8] 邹永成,赵瑞达,徐海,等.2009~2016年双流机场大雾过程气象要素特征分析[J].高原山地气象研究,2020,40(2):71-73.
- [9] 周璞,张恬月,刘晓达.成都双流机场跑道视程与低能见度的关系[J].陕西气象,2018(3):20-24.
- [10] 王楠,朱蕾,周建军,等.基于EC细网格产品在乌鲁木齐机场低能见度预测中的释用[J].沙漠与绿洲气象,2020,14(2):81-89.
- [11] 刘开宇.贵阳机场辐射雾MOS预报系统的设计与实现[J].云南大学学报(自然科学版),2014,36(S1):112-116.
- [12] 李璇.低能见度时进近管制区运行安全风险分析[J].安全,2020,41(10):24-28.
- [13] 青泉.成都双流机场浓雾预报探讨[J].四川气象,2006,26(4):26-27.
- [14] 吴亮宏.用优化的非线性方程预报双流机场低能见度[J].空中交通管理,1998,4:19-20.
- [15] 鲁燕,肖天贵,唐钱奎.成都地区近30年大雾的气候特征分析[J].高原山地气象研究,2016,36(1):68-74.

Application of European Center Numerical Forecast in Low Visibility Weather Forecast of Shuangliu Airport

LIU Huiquan, ZOU Yongcheng, WANG Lingyun, CHU Yunxing, ZHAO Xiaojing
(The Southwest of Air Traffic Management Bureau Meteorological Center, Chengdu 610202, China)

Abstract: In view of the lack of objective forecasting products for visibility and runway visual range of Shuangliu Airport, the software for visibility and runway visual range prediction was established based on the low visibility synoptic forecasting model of Shuangliu Airport by using automatic observation, weather report and EC thin grid numerical forecasting products from 2009 to 2019. Combined with the operation rules of civil aviation, the software uses the normalization method to revise the EC fine grid numerical visibility forecast product, and uses the statistical relationship between RVR and dominant visibility to obtain the refined RVR forecast product, and uses the statistical value of the ground meteorological elements in the early historical cases to eliminate the air. The results show that the software has good accuracy and stability, and can effectively reduce the false alarm rate and missing alarm rate of low visibility weather at Shuangliu Airport.

Keywords: low visibility; runway visual range forecast; visibility forecast; numerical prediction; synoptic prediction models; fog