

王秀成, 邢杉, 赵志军, 等, 2017. 一种基于对流云特征温度判别的雷暴解释预报算法[J]. 气象, 43(10): 1232-1240.

一种基于对流云特征温度判别的 雷暴解释预报算法^{*}

王秀成 邢杉 赵志军 巩敏莹 李艳芳

中国民用航空西北地区空中交通管理局气象中心, 西安 710082

提 要: 为了满足航空用户对于高效率高分辨率雷暴短期预报产品的需求, 提出了一种基于对流云特征温度的雷暴解释预报算法。该算法根据模式资料计算得到对流云云顶和云底温度、 -20°C 层和 -10°C 层高度等要素, 利用相关判据直接得到格点雷暴预报产品。利用 2012—2014 年中国 35 个机场的雷暴观测资料和同期美国全球预报系统(Global Forecast System, GFS)模式预报资料对该算法进行了检验, 风险评分和技巧评分均表明该算法在上述机场具有较高的雷暴预报水平和正技巧, 时间精度可达 ± 1.5 h。同时利用 2014 年中国 5 个机场人工发布的终端机场天气预报(Terminal Aerodrome Forecast, TAF)与算法进行比较, 结果表明: 算法在较 TAF 至少提前 8 h 发布的情况下, 风险评分略低于 TAF, 探测概率达到或远高于 TAF。该算法满足了目前航空用户对于高时间和高空间分辨率雷暴短期预报产品的需求。

关键词: 机场, 航路, 雷暴, 解释预报

中图分类号: P413.457

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2017.10.007

A Thunderstorm Explanation Forecast Algorithm Based on Convective Cloud Characteristic Temperature Judgment

WANG Xiucheng XING Shan ZHAO Zhijun GONG Mingying LI Yanfang

Meteorological Centre, Northwest Regional Air Traffic Management Bureau of Civil Aviation of China, Xi'an 710082

Abstract: A thunderstorm explanation forecast algorithm based on convective cloud characteristic temperature is proposed in order to satisfy aviation needs for efficient, high spatial and high temporal resolution short-term thunderstorm forecasts. The algorithm is based on convective cloud top and base temperatures, -20°C and -10°C isothermal layer geopotential heights. Forecast performance of the algorithm, which is evaluated using the 2012—2014 observations at 35 airports in China and Global Forecast System (GFS) history products, shows high threat scores, positive skill scores and ± 1.5 h forecast time accuracy in all airports. Meanwhile, the algorithm is compared with forecast performance of Terminal Aerodrome Forecast (TAF) issued in 2014 by five airport weather services in China. The results show threat scores of the algorithm are a little lower than TAF, and probability of detection equal to or much higher than TAF in the condition issued at least 8 h earlier than TAF. Thunderstorm forecast products based on the algorithm can meet the needs of aviation users.

Key words: airport, airway, thunderstorm, explanation forecast

^{*} 中国民用航空局空中交通管理局科技项目“一种新的雷暴解释预报算法的研究与应用”资助

2016 年 6 月 3 日收稿; 2017 年 5 月 12 日收修定稿

第一作者: 王秀成, 主要从事航空气象预报与服务工作. Email: wx666@139.com

引 言

雷暴预报一直是国内外气象界关注的一个重点和难点。雷暴预报按时效可以分为临近预报和短期预报。临近预报时效为 0~6 h,重点为 0~2 h(俞小鼎等,2012)。雷暴临近预报手段较多,如借助多普勒天气雷达以及结合雷达回波外推的融合临近预报技术(王秀明等,2015),预报人员完全可以提前 1~2 h 发布雷暴天气预警。但实际工作中,以民航业为例,为了便于制作飞行计划和实施空域流量管理,还希望得到时效更长的雷暴短期预报产品。因此民航业对时效为 6~36 h 的雷暴短期预报产品有迫切需求。国内在雷暴短期预报方法方面的研究较多(李娜等,2015;田琨等,2013;杨仲江等,2013;曾淑玲等,2012;王振会等,2011;郝莹等,2007)。其主要原理大致为基于雷暴发生的静力不稳定、水汽和抬升机制三要素(王秀明等,2014)和各种统计学原理的配料法(胡邦辉等,2010;施萧等,2012)。上述方法在所研究地区具有较好的预报效果,但不同地区不同统计方法建立的预报方程迥异,无法大范围高效率地预测雷暴出现的具体时间和地点,不能满足民航业的实际需求。本文提出了一种普遍适用的基于对流云特征温度判别的雷暴解释预报方法,并且在中国主要民用机场进行了预报检验。

1 算法和资料

1.1 算法

数值预报产品是雷暴短期预报不可或缺的资料。目前多数雷暴短期预报方法都是以雷暴发生的三要素为基础并结合数值预报产品的统计学方法。随着技术的进步,模式对于静力不稳定、水汽和抬升条件的模拟越来越理想,这使得直接利用模式资料预报雷暴成为可能。考虑到雷暴发生时必定伴有对流云出现。如果数值模式能够提供对流云预报产品,那么可以寻求相关算法制作格点雷暴预报产品。美国全球预报系统(Global Forecast System, GFS)模式产品在我国气象相关业务中应用广泛,该模式提供格点对流云预报产品,包括云量、云顶和云底气压。

Michimoto(1991)在研究闪电放电和雷达回波的关系时指出,首次放电现象发生在 30 dBz 回波越

过 -20°C 层高度后约 5 min。因此雷暴发生时云顶温度应达到或低于 -20°C 。该温度指标在国内许多文献教材中均有提及(朱乾根等,2000),而且在实际短期临近预报工作中常结合雷达回波顶高判断是否出现冰雹(俞小鼎等,2006)。其次,雷暴云电荷结构理论和数值模拟研究表明 -10°C 层在云电荷分离过程有极其重要的作用, -10°C 层为上部负电荷区和下部正电荷区的分界层(徐良韬等,2012;郅秀书等,2014)。Michimoto(1993)研究日本冬季雷暴的研究也发现 -10°C 层海拔高度位于 1.8 km 以下时云伴随弱的闪电现象或者没有闪电发生,其结论基于日本沿海海拔较低的雷达站资料得出。由于中国幅员辽阔,地面海拔悬殊,本文在应用上述结论时改为更为严格的标准,即 -10°C 层距地高度不低于 1.8 km,而且对流云云底温度应大于 -10°C 。这种改变提高了算法在西部高原地区的适用性,也不影响其在东南沿海的预报效果。

此外,俞小鼎等(2012)研究指出,数值模式对于局地雷阵雨几乎没有预报能力。在实际工作中也发现 GFS 模式对局地雷雨无能为力,而且即使 GFS 模式预报了局地或孤立雷雨,其可信度也很低,容易造成雷暴空报。为了降低雷暴空报率,引入孤立雷暴判据。所谓孤立雷暴,即如果某个格点预判出现雷暴,即以该点为中心,直径约 200 km 范围内,如无其他格点出现对流云,则判断该格点为孤立雷暴,不予采信。之所以直径选 200 km,主要因为陆汉城(2004)指出 β 中尺度天气系统是中尺度天气学研究的重点,其尺度为 20~200 km,取其尺度上限。计算过程中为了避免反复计算格点间球面距离,本文取以格点为中心 $N\times N$ 的网格方阵来判断格点是否为孤立雷暴。为了确保较高的探测概率,结合本文所选模式分辨率 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$, N 值取 5,如图 1。

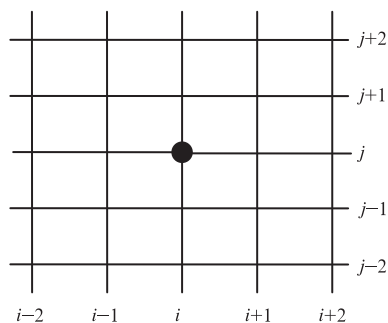


图 1 孤立雷暴格点示意图

Fig. 1 Chart of isolated thunderstorm grid

即如果格点 (i, j) 预判有雷暴,而图 1 中其周围 100~150 km 范围内的其他 24 个格点均无对流云,则 (i, j) 为孤立雷暴,雷暴预报不可信;否则 (i, j) 为非孤立雷暴格点,雷暴预报可信度高。

综合以上结论提出了一种基于对流云特征温度判别的雷暴解释预报算法。图 2 为算法流程图。具体步骤为:首先利用程序找到所有出现对流云的格点,再读取对流云的云顶和云底气压预报值,结合模式温度层结曲线,采用对数气压线性插值方法得到云顶和云底温度,同时计算 -10°C 层距地高度,进入判断过程。如果格点同时满足判据 A、B、C 和 D,那么判断有雷暴,否则无,得到格点雷暴预报产品。再利用判据 E 逐站点判别,如果扫描半径内有非孤立雷暴格点,那么站点有雷暴,否则无,得到站点雷暴预报产品。实际工作中只有当雷雨发生在机场周围 70~80 km 或更近时,才考虑其可能影响机场,因此判据 E 中扫描半径取 70 km。

该算法的物理依据在于根据雷暴发生时对流云云顶和云底的温度特征来判断雷暴。对流云发展越旺盛,则云顶越高,云顶温度越低,越有可能出现雷暴;反之对流云云顶温度越高,云顶越低,对流越不强盛,出现雷暴可能性越小。云顶温度判据 A 的引入限定了雷暴发生时对流云顶的最低高度。实际制作雷暴预报时发现某些模式格点满足判据 A,但同时云底温度也较低,云厚度不大。青藏高原秋、冬季午后由于热力对流作用这种现象非常普遍,由于对流并不旺盛,雷暴较少发生。如果仅利用判据 A 制作雷暴预报,则会预报高原秋、冬季午后频发雷暴,

与实际不符。云底温度判据 B 的引入有效降低高原秋冬季雷暴空报率,增加算法普适性,而且判据 A 和 B 配合达到了限定雷暴发生时对流云最小厚度的作用。

1.2 资料

GFS 模式每天运行 4 次,初始场时次分别为 00,06,12 和 18 UTC(协调世界时),垂直方向 26 层,时间分辨率为 3 h,预报时效为 384 h(16 d)。GFS 实时预报资料可以通过互联网免费获取(<http://www.nco.ncep.noaa.gov/pmb/products/gfs/>)。目前可获取的模式资料有 4 种分辨率: $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$, $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$, $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$ 和 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 。本文选取 GFS 2012—2014 年分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$,初始场为 00 和 12 UTC,范围为中国区域,预报时效为 12,15,18 和 21 h 的历史预报场。如果资料缺失,则用其他初始场的相应预报场代替;得到 2012—2014 年每天逐 3 h 模式预报资料,并利用雷暴解释预报算法得到所研究机场 2012—2014 年每天逐 3 h 雷暴预报资料。观测资料选取 2012—2014 年中国实行 24 h 不间断观测,且不曾迁址的 35 个民用机场逐小时或逐半小时发布的航空例行天气报告(Meteorological Terminal Aviation Routine Weather Report, METAR),以及遇天气发生重要变化时随时发布的特殊天气报告 SPECI(Special)。表 1 包含上述 35 个机场的信息。由于数值预报资料时间间隔为 3 h,有效时刻分别为每日 00,03,..., 21 UTC,为了便于和预报资料进行比较,将每个机

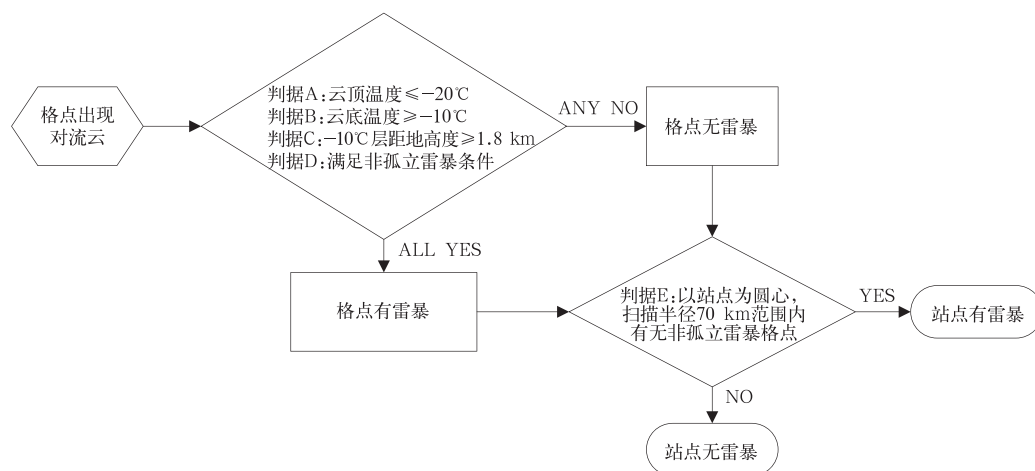


图 2 雷暴解释预报算法流程

Fig. 2 Flow chart of the thunderstorm explanation forecast algorithm

场的观测资料就近整理为逐 3 h 的雷暴有/无观测资料。考虑到目前技术水平,对于雷暴发生的具体时间预报难度较大,先将各机场逐 3 h 观测和预报资料整理为逐 12 h 资料。也就是将每天 00,03,06 和 09 UTC 的 4 份资料合并为 1 份白天资料,12,15,18 和 21 UTC 合并为 1 份夜间资料。首先将逐 12 h 资料进行对比分析,检验雷暴预报有效性。在此基础上再对逐 3 h 资料进行分析,进一步检验雷暴预报的时间精度。

2 检 验

2.1 算法预报检验

首先对 2012—2014 年中国 35 个机场逐 12 h 雷暴预报和观测资料进行了对比分析,得到各机场 3 年平均的逐 12 h 雷暴预报风险评分(threat score, TS)(Palmer and Allen, 1949)、探测概率(probability of detection, POD)和虚警率(false alarm rate, FAR)等指标(表 1)。罗阳等(2009)研究指出 TS 评分因为没有引入参考预报,不是一种技巧型评分指数,不能用来比较不同地区的预报水平,同时指出适用于小概率雷暴事件的技巧评分指数包括公平风险评分(equitable threat score, ETS), Heidke 技巧评分(Heidke skill score, HSS)以及预报技术评分(forecast technique score, FTS)。当技巧评分指数 >0 时,表示预报技巧优于随机预报,否则不具有预报技巧。为了衡量算法的预报技巧,表 1 计算了各机场的 ETS、HSS 和 FTS 3 个技巧评分指数的年平均值。此外为了表征算法的预报稳定性,表 1 还计算了各机场 TS 评分最近 3 年的标准差(standard deviation, SD)。

从表 1 可以发现雷暴预报年平均 TS 评分超过 0.3 的有北京、呼和浩特、南昌、广州和成都 5 个机场,雷暴 POD 为 71%~92%, FAR 为 58%~68%。TS 评分的分子为命中次数,分母为命中、空报与漏报次数之和。对于小概率事件,TS 能够很好地反映预报水平的高低。目前单站 TS 评分能够达到 0.6 左右的雷暴预报方法,其研究时段一般限定在雷暴频发月份,如 6—8 月,而且其选取的训练样本和检验样本雷暴事件所占比例均接近或超过 30%,远高

于雷暴气候概率(杨仲江等,2013;王振会等,2011)。多数方法其单站雷暴 TS 评分介于 0.2~0.3,但其研究时段一般也选在雷暴频发季节,研究范围为单站或一个省区(田琨等,2013;曾淑玲等,2012)。本文算法研究范围为全国,预报时间分辨率逐 12 h,且以年为单位计算 TS 评分。算法在空间跨度大、雷暴气候概率不同的二十多个机场的 TS 评分达到 0.2~0.3 的量级,证明了算法的有效性和普适性。

从 TS 评分标准差 SD 来看,预报稳定性排名前 5 位的机场为重庆、乌鲁木齐、福州、台北、浦东和哈尔滨,标准差介于 0.001~0.01,而稳定性最差的贵阳机场也仅为 0.064,证明算法在不同机场不同年度预报性能表现稳定。特别是算法在高原机场拉萨也有较高且较稳定的表现,年平均 TS 评分为 0.249, SD 为 0.049, POD 为 83.6%, FAR 为 74%。因此判据 B 的引入提高了高原机场雷暴预报水平,同时也没有影响算法在其他机场的表现,达到了预想效果。算法在港澳台等热带沿海地区机场也有较好表现,年平均 TS 评分为 0.15~0.25, POD 为 75%~87%, FAR 为 72%~83%,预报水平较其他地区有所下降。由于西安和乌鲁木齐机场雷暴气候概率最低,预报难度最大,算法 TS 评分最低,但也达到了 0.1~0.13。

同时表 1 中 ETS、HSS 和 FTS 等 3 个年平均技巧评分指数均表现为较高的正值,即便是 TS 评分最低的西安和乌鲁木齐机场也表现为正技巧。罗阳等(2009)指出 FTS 和 TS 评分对于小概率事件两者差异很小,实际计算的 FTS 和 TS 评分相差确实不大。对于逐 12 h 雷暴预报评分而言,FTS 在雷暴频发机场,如北京和广州,比 TS 评分小,实现了对 TS 评分的扣分;而在雷暴较少的机场,如西安和乌鲁木齐,比 TS 评分大,实现了对 TS 评分的加分。实际计算表明 FTS 达到设计初衷,即因为小概率的事件预报难度更大,正确预报应该给予更多得分。此外,由于雷暴是小概率事件,TS 评分和 FTS 评分差别很小,而且 TS 评分的应用更为广泛,因此以下分析均以 TS 评分为主。

民航业最为关心雷暴发生的具体时间,因此计算了算法逐 3 h 雷暴预报评分(表 2)。表 2 仅列举了部分机场的逐 3 h 评分结果。从计算结果来看,逐 3 h 雷暴预报 TS 评分整体较逐 12 h 评分要低,

表 1 雷暴解释预报算法 2012—2014 年中国机场年平均逐 12 h 雷暴预报评分

Table 1 Annual average 12 h thunderstorm forecast scores of the algorithm
at 35 airports in China in 2012—2014

城市	机场代码	雷暴次数	<i>TS</i>	<i>SD</i>	<i>ETS</i>	<i>HSS</i>	<i>FTS</i>	<i>POD</i>	<i>FAR</i>
沈阳	ZYTX	42.0	0.274	0.035	0.232	0.376	0.272	0.862	0.713
长春	ZYCC	49.3	0.297	0.027	0.250	0.399	0.293	0.838	0.685
哈尔滨	ZYHB	34.3	0.212	0.011	0.176	0.299	0.216	0.798	0.777
大连	ZYTL	24.3	0.213	0.052	0.189	0.315	0.216	0.703	0.767
北京	ZBAA	38.7	0.328	0.048	0.296	0.455	0.325	0.723	0.627
天津	ZBTJ	37.0	0.265	0.028	0.231	0.374	0.265	0.718	0.703
呼和浩特	ZBHH	59.3	0.356	0.043	0.309	0.471	0.348	0.712	0.580
石家庄	ZBSJ	26.3	0.239	0.062	0.215	0.351	0.241	0.636	0.721
太原	ZBYN	38.7	0.299	0.028	0.268	0.422	0.297	0.613	0.624
上海	ZSSS	28.3	0.198	0.028	0.168	0.288	0.202	0.733	0.784
上海	ZSPD	22.3	0.185	0.011	0.160	0.276	0.190	0.837	0.808
南京	ZSNJ	23.7	0.191	0.022	0.164	0.282	0.196	0.923	0.805
厦门	ZSAM	34.7	0.139	0.012	0.097	0.177	0.153	0.893	0.858
福州	ZSFZ	38.0	0.182	0.007	0.139	0.244	0.190	0.812	0.810
南昌	ZSCN	63.0	0.304	0.029	0.242	0.389	0.297	0.862	0.681
济南	ZSJN	26.3	0.250	0.014	0.224	0.366	0.251	0.784	0.731
青岛	ZSQD	13.7	0.174	0.060	0.160	0.273	0.178	0.839	0.820
杭州	ZSHC	35.7	0.223	0.036	0.185	0.311	0.226	0.853	0.766
宁波	ZSNB	34.0	0.217	0.039	0.180	0.304	0.221	0.892	0.777
长沙	ZGHA	56.0	0.255	0.030	0.197	0.328	0.254	0.827	0.730
广州	ZGGG	104.3	0.337	0.037	0.230	0.374	0.313	0.920	0.653
深圳	ZGSZ	67.3	0.249	0.028	0.177	0.300	0.248	0.867	0.740
武汉	ZHHH	35.0	0.238	0.021	0.201	0.334	0.240	0.865	0.753
郑州	ZHCC	15.0	0.152	0.012	0.136	0.239	0.156	0.694	0.835
成都	ZUUU	42.0	0.306	0.038	0.266	0.419	0.302	0.822	0.674
贵阳	ZUGY	50.0	0.193	0.064	0.136	0.237	0.199	0.930	0.804
重庆	ZUCK	39.0	0.205	0.001	0.162	0.279	0.211	0.876	0.788
拉萨	ZULS	68.3	0.249	0.049	0.175	0.297	0.247	0.836	0.740
西安	ZLXY	11.3	0.105	0.039	0.092	0.167	0.109	0.541	0.886
兰州	ZLLL	36.0	0.263	0.038	0.231	0.374	0.263	0.638	0.690
乌鲁木齐	ZWWW	10.3	0.131	0.002	0.121	0.216	0.134	0.504	0.842
台北	RCTP	41.7	0.157	0.008	0.107	0.194	0.169	0.827	0.838
高雄	RCKH	70.7	0.255	0.036	0.183	0.308	0.253	0.751	0.723
香港	VHHH	62.3	0.230	0.048	0.161	0.276	0.232	0.874	0.762
澳门	VMMC	65.7	0.223	0.039	0.150	0.259	0.225	0.849	0.769

表 2 雷暴解释预报算法 2012—2014 年中国部分机场年平均逐 3 h 雷暴预报评分

Table 2 Annual average 3 h thunderstorm forecast scores of the algorithm
at 10 airports in China in 2012—2014

城市	机场代码	雷暴次数	<i>TS</i>	<i>SD</i>	<i>ETS</i>	<i>HSS</i>	<i>FTS</i>	<i>POD</i>	<i>FAR</i>
北京	ZBAA	65.7	0.203	0.035	0.188	0.316	0.205	0.534	0.754
石家庄	ZBSJ	41.3	0.134	0.054	0.124	0.218	0.137	0.465	0.840
太原	ZBYN	55.7	0.165	0.048	0.153	0.263	0.167	0.430	0.784
上海	ZSSS	44.7	0.106	0.027	0.093	0.170	0.109	0.495	0.880
上海	ZSPD	36.0	0.096	0.011	0.085	0.157	0.100	0.582	0.897
厦门	ZSAM	49.0	0.072	0.006	0.056	0.107	0.081	0.702	0.926
广州	ZGGG	169.7	0.183	0.026	0.136	0.239	0.191	0.772	0.806
成都	ZUUU	72.7	0.182	0.028	0.163	0.279	0.185	0.683	0.802
台北	RCTP	68.0	0.095	0.007	0.075	0.139	0.105	0.676	0.900
香港	VHHH	102.3	0.101	0.016	0.071	0.132	0.113	0.607	0.892

但在大多机场仍能够达到 0.1~0.2,而且 3 个技巧评分指数在所有机场都表现为正技巧,年平均 POD 仍有 29 个机场达到了 50%及以上,FAR 在 70%~90%。结果表明依据该算法得到的逐 3 h 雷暴预报产品仍然具有较高的预报技巧,对于预测雷暴发生的具体时间具有较高参考价值。

2.2 算法与人工预报的比较

终端机场天气预报(Terminal Aerodrome Forecast,TAF)是全球民航气象领域通用的一种机场天气预报格式。所有民航机场均要求人工定时发布本机场的 TAF,并且根据需要参加国内和国际民航气象信息交换,供航空公司和空管部门使用。为了进一步检验算法的预报性能,计算了 2014 年北京首都、上海浦东、广州白云、香港国际和台北桃园 5 个机场气象台每日人工发布的 TAF 预报产品的雷暴预报评分,并与同期依据算法制作的雷暴预报进行了比较。北京首都、上海浦东和广州白云 3 个机场每日 22 UTC 之前发布时效为次日 00—24 UTC 的 24 h TAF,10 UTC 之前发布当日 12 UTC 至次日 12 UTC 的预报。香港国际和台北桃园机场每日 23 UTC 发布时效为次日 00 UTC 至第三日 06 UTC 的 30 h TAF,11 UTC 发布当日 12 UTC 至次日 18 UTC 的 30 h TAF。TAF 发布之后,还会根

据实际天气情况进行修订。选取有效时间开始前的最新一份 TAF,取其前 12 h 的预报内容,仿照数值预报资料,整理成为逐 3 h 和逐 12 h 雷暴预报产品,与观测资料进行比较,即可得到 TAF 的雷暴预报评分。在预报时间提前量方面,TAF 为 0~12 h,而算法为 8~20 h,较 TAF 提前 8 h 发布。表 3 为 2014 年上述 5 个机场 TAF 与算法的逐 12 h 雷暴预报评分比较,其中 TAF 评分结果在表中用黑体表示。

从表 3 可以看出广州白云 TAF 雷暴 TS 评分最高,达到 0.463,其次依次是北京首都、香港国际和上海浦东机场,台北桃园机场得分最低,仅为 0.167。算法雷暴 TS 评分略低于 TAF,而且 FAR 也较 TAF 高。不过就 POD 而言,算法普遍优于 TAF,即 TAF 雷暴漏报较多,特别是台北桃园机场 TAF 雷暴 POD 仅为 18.4%,而算法在多数机场均大于 80%。在算法较 TAF 提前 8 h 发布的情况下,尽管 TS 评分略低,FAR 较高,但 POD 却大大优于 TAF,雷暴漏报很少。至于算法虚警率较高的原因,很可能是由于算法利用扫描半径来制作雷暴预报,因此其结论代表以机场为圆心扫描半径内的雷暴发生可能性。对机场气象服务而言,不仅本场雷暴,而且机场终端区,特别是 70 km 内发生的雷暴都应引起关注并且能够提前预报。

表 3 2014 年北京、上海、广州、香港和台北机场 TAF 与雷暴解释预报算法
逐 12 h 雷暴预报评分比较

Table 3 Comparison of average 12 h thunderstorm forecast scores between TAF and
the algorithm in Beijing, Shanghai, Guangzhou, Hong Kong and Taipei Airports in 2014

城市	机场代码	雷暴次数	TS/TAF	TS/算法	POD/TAF	POD/算法	FAR/TAF	FAR/算法
北京	ZBAA	43	0.403	0.307	0.628	0.628	0.471	0.625
上海	ZSPD	20	0.300	0.188	0.450	0.950	0.526	0.810
广州	ZGGG	110	0.463	0.375	0.800	0.955	0.476	0.618
台北	RCTP	38	0.167	0.155	0.184	0.868	0.364	0.841
香港	VHHH	75	0.395	0.283	0.800	0.907	0.562	0.708

注:黑体为 TAF 评分结果。
Note: Blackbody is TAF.

2.3 算法预报个例分析

经过以上分析,算法在大多数机场都具有较好的雷暴预报 TS 评分,较高的探测概率,但由于虚警率较高,在使用算法雷暴预报产品时,还需要进一步分析。以 2014 年 8 月 30 日西安咸阳机场天气过程

为例,受 500 hPa 副热带高压外围暖湿气流和西风带短波槽共同影响(图 3a),咸阳机场 30 日 01—10 UTC 出现了明显降水天气过程,其中 02—04 及 09 UTC 降水强度达到中雨。咸阳机场以东约 20 km 的西安探空站当日 00 UTC T - $\log p$ 图(图 3b)资料显示 K 指数达到 37℃,SI 指数为 0.45℃,表明大气

层结具有较大的不稳定性。算法根据 GFS 初始场为 29 日 12 UTC, 预报时效为 15 h 的预报资料计算表明 30 日 03 UTC 咸阳机场以东 70 km 范围内出现了一个非孤立雷暴格点(图 3c)。根据算法规则, 判断咸阳机场 30 日 03 UTC 前后将有雷雨。实际观测表明, 咸阳机场 03 UTC 前后以较强降水为主, 当日降水量达到 32.6 mm, 但并没有出现雷雨。机场雷达观测(图略)也表明, 当日陕西关中地区的降水回波呈强度不均匀, 且云中有若干强降水回波单体的典型对流性降水形态。但对流发展高度并不够, 30 dBz 回波顶高仅为 7 km 左右, 而当日探空显示 -20°C 层高度达到 8 km 左右, 因此未出现雷雨。上例表明在强降水过程中 GFS 模式对于对流发展高度的估计可能与实际存在一定偏差。在之前的分析中发现华东和东南沿海机场雷暴 FAR 偏高, 可能也与此有关。该区域夏季受季风影响常出现大范围梅雨锋强降水以及台风强降水, 尽管强降水过程中常常伴随对流活动, 但对流实际发展高度却不一定能达到触发雷暴的条件。此外, 在实际使用过程中还发现 GFS 模式存在高估后半夜对流发展高度的问题, 以上均能导致雷暴预报的空报。

由于秋、冬季雷暴对流指数的表现不如春、夏季明显, 因此秋、冬季雷暴预报难度较大, 且很容易出现漏报。以南京禄口国际机场 2014 年 11 月 27 日强雷雨天气过程为例, 雷雨发生时段为 27 日 09:17—12:00 UTC。时值深秋初冬, 突发强雷暴导致南京机场不少航班返航备降。从南京机场气象台当日发布的 TAF 预报来看, 虽然提前预报了较强降水, 但没有考虑雷暴的可能性, 出现了雷暴漏报。27 日 06 UTC 500 hPa 天气形势(图 3d)表明南京地区受一致槽前西南暖湿气流控制, 冷平流并不显著, 仅 700 hPa 存在一定冷平流。当日 00 UTC 南京探空站 $T\text{-log}p$ 图(图 3e)表明 K 指数仅为 22°C , SI 指数为 3.28°C , 对流有效位能为 $0\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$, -20°C 层高度 6 km 左右, 从对流指数和能量来看雷暴发生概率很小。且南京机场早间气温为 10°C 左右, 中午前后即转为阴天有小雨, 午后最高温度仅升至 15°C , 地面升温并不显著。深秋季节, 在地面升温和对流指数均不显著的情况下, 仅根据 700 hPa 不太明显的冷平流, 提前 5~8 h 发布机场雷雨预报是一个技术难题。但算法根据 GFS 初始场为 26 日

12 UTC, 预报时效为 21 h 的预报资料计算表明 27 日 09 UTC 南京机场以西出现了大范围雷暴区(图 3f)。算法提前 21 h 对雷暴进行了准确预报, 而且预报员至少能在雷暴发生前 15 h 看到雷暴预报产品。算法之所以对秋、冬季雷暴有较高的预报技巧, 是因为判据 A、B 和 C 均与等温层高度有关, 且判据 C 本身就是关于冬季雷暴的研究结论, 冬季大气 -20 和 -10°C 等温层高度均较夏季明显降低, 雷暴发生所要求的对流发展高度也随之降低。一般夏季积雨云顶高需要在 8 km 左右, 才可能出现雷暴, 但秋、冬季可能 6 km 左右就能触发雷暴。只要数值模式对于秋、冬季对流发展高度的模拟与实际相差不大, 算法就能够对其进行准确预报。

3 结 论

民航业对于雷暴预报的时间和空间精度要求较高, 需要在短时间内制作大范围高分辨率的雷暴预报产品。基于对流云特征温度判别的雷暴解释预报算法的提出在一定程度上解决了目前雷暴预报方法局地性强且时间和空间精度不够的问题。该算法在全国绝大多数航路和机场均有较好的预报效果, 特别是在雷暴频发的繁忙机场。实际工作中可以利用该方法至少提前 6 h 发布未来 72 h 全国航路、机场及终端区逐 3 h 雷暴天气预报(图 4)。分析发现该雷暴预报算法时间精度可以达到 $\pm 1.5\text{ h}$; 与机场气象台实际人工发布的 TAF 相比, 尽管 TS 评分略低, 但却有较高的 POD, 而且性能稳定。由于该算法是根据数值预报产品计算得出, 理论上说只要数值预报产品的预报时效足够长, 时间和空间精度足够密, 就能制作相应的雷暴预报产品。此外, 不少研究给出了冰雹发生的层结条件(俞小鼎, 2014; 刘晓璐等, 2014; 刘健文等, 2005), 在该算法的基础上, 很容易根据相关研究成果制作具有一定参考价值的冰雹短期预报产品。

该算法 FAR 较高的问题是今后持续改进的方向。袁铁和郅秀书(2010)的研究指出: 单体尺度上的闪电频率与 7~11 km 总冰相降水含量之间表现出非常密切的关系, 在其研究的两个地区相关系数都超过了 0.7。因此后期可以考虑如何利用模式产品计算得到 7~11 km 总冰相降水含量, 将其引入

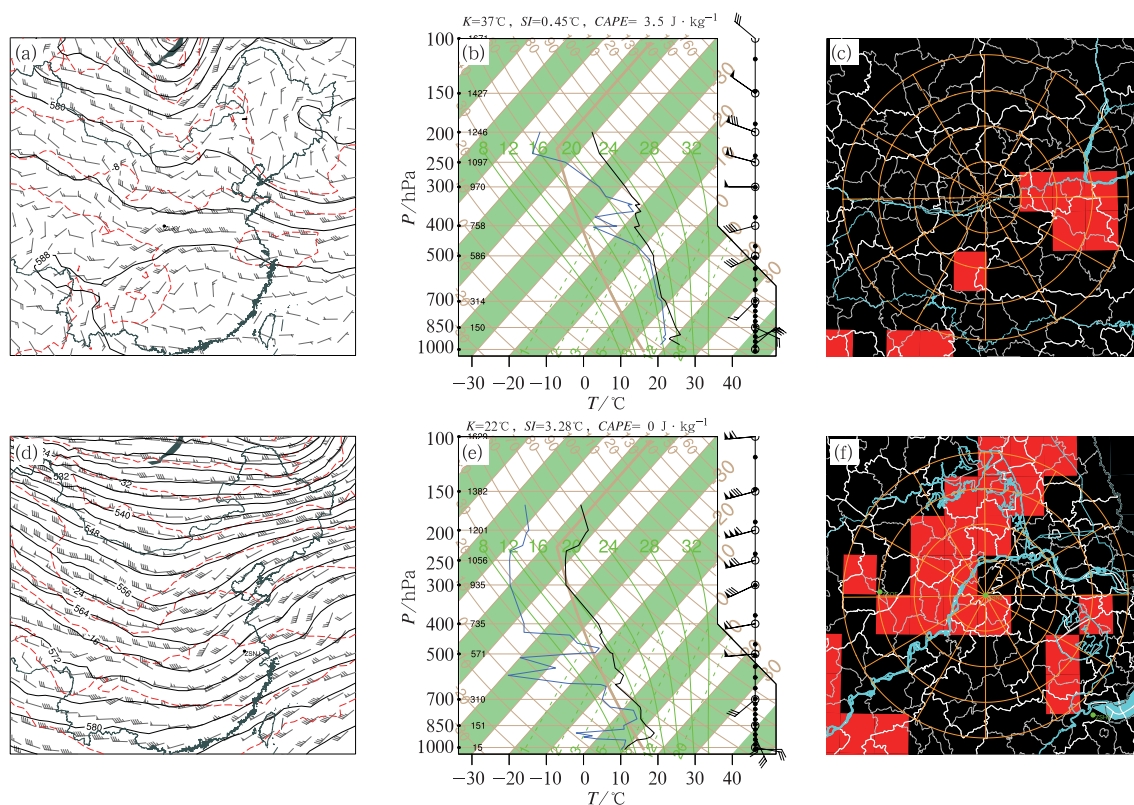


图 3 2014 年 8 月 30 日 00 UTC (a) GFS FNL 500 hPa 高度场(黑实线,单位:dagpm)、温度场(红虚线,单位:℃)以及风场(长横线 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,黑三角旗 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), (b) 西安探空站 $T\text{-log}p$ 图(黑线为温度层结曲线,蓝线为露点曲线,右侧风廓线长横线 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,黑三角旗 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), 以及 (c) 30 日 03 UTC 的雷暴预报产品(红色块代表格点有雷暴,分辨率 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$,圆心为西安咸阳机场,每圈 50 km)。(d) 同(a), 但为 2014 年 11 月 27 日 06 UTC; (e) 同(b), 但为南京探空站 27 日 00 UTC 资料; (f) 同(c), 但为 27 日 09 UTC 且圆心为南京机场

Fig. 3 (a) GFS FNL 500 hPa synoptic weather map at 00:00 UTC 30 August 2014 with geopotential height (black solid contours; unit: dagpm), temperature (red dashed contours, unit: $^\circ\text{C}$) and wind vectors (full barb and flag denote 4 and $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, respectively) included; (b) skew- T diagram of the Xi'an rawinsonde at 00:00 UTC 30 August 2014 with temperature (black line) and dew point temperature (blue line) profiles included and the same wind barb and flag as Fig. 3a; (c) thunderstorm product valid at 03:00 UTC 30 August 2014 (resolution: $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, 50 km per circle, red cells denote thunderstorm, the center of circles denotes the position of Xi'an Xianyang Airport); (d) same as Fig. 3a, but at 06:00 UTC 27 November 2014; (e) same as Fig. 3b, but for Nanjing rawinsonde at 00:00 UTC 27 November 2014; (f) same as Fig. 3c, but at 09:00 UTC 27 November 2014 and the center of circles is Nanjing Airport

算法,很可能进一步降低 FAR,提高 TS 评分。此外,利用 GFS 模式分辨率更为精细的 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 的产品和算法,可以得到空间分辨率大约 $25 \text{ km} \times 25 \text{ km}$ 的雷暴预报产品(图 4)。Lynn et al(2012)提出了一种在数值预报模式中预报云地闪和云间闪的参数化方案。这种方案是雷暴数值预报发展的方

向。但目前主要全球数值模式均未发布相应的雷暴数值预报产品。本文提出的雷暴解释预报算法简单,可以基于任何数值预报模式,仅需模式输出对流云云量,云顶气压和云底气压 3 个变量即可。基于对流云特征温度判别的雷暴解释预报算法目前可以在一定程度上满足实际工作的需求。

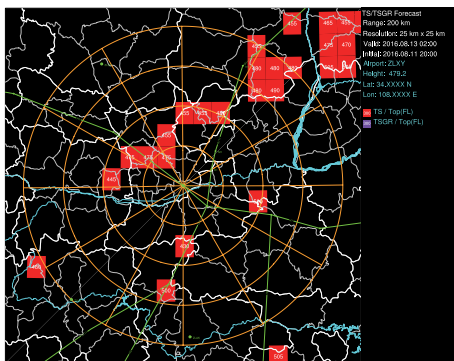


图 4 西安进近管制区雷暴/冰雹以及对流云顶高[单位:FL(flight level)]
预报产品

(图中航路和导航点信息仅为演示作用)

Fig. 4 Thunderstorm/Hail and convective cloud top height [unit: FL (flight level)] forecast in Xi'an approach control area

(Information of air routes and navigation stations is not real)

致谢:中国民用航空西北地区空中交通管理局气象中心周文杰、刘彦彤为本文提供历史雷达和观测数据,在此表示感谢。

参考文献

- 郝莹,姚叶青,陈焱,等,2007. 基于对流参数的雷暴潜势预报研究[J]. 气象,33(1):51-56.
- 胡邦辉,袁野,王学忠,等,2010. 基于贝叶斯分类方法的雷暴预报[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版),11(5):578-584.
- 李娜,冉令坤,孙建华,等,2015. 基于 NCEP/GFS 资料的中国东部地区雷暴预报研究[J]. 气象学报,73(3):459-470.
- 刘健文,郭虎,李耀东,等,2005. 天气分析预报物理量计算基础[M]. 北京:气象出版社:196-204.
- 刘晓璐,刘建西,张世林,等,2014. 基于探空资料因子组合分析方法的冰雹预报[J]. 应用气象学报,25(2):168-175.
- 陆汉城,2004. 中尺度天气原理和预报:第 2 版[M]. 北京:气象出版社:7-9.
- 罗阳,赵伟,翟景秋,2009. 两类天气预报评分问题研究及一种新评分方法[J]. 应用气象学报,20(2):129-136.
- 郗秀书,刘冬霞,孙竹玲,2014. 闪电气象学研究进展[J]. 气象学报,72(5):1054-1068.
- 施萧,徐幼平,胡邦辉,等,2012. 支持向量机在雷暴预报中的应用[J]. 气象,38(9):1115-1120.
- 田琨,郭凤霞,曾庆峰,等,2013. 南京地区雷暴活动强度潜势预报[J]. 气象科技,41(1):177-183.
- 王秀明,俞小鼎,刘黎平,等,2015. 融合临近预报技术探讨[J]. 气象科学,35(3):297-304.
- 王秀明,俞小鼎,周小刚,2014. 雷暴潜势预报中几个基本问题的讨论[J]. 气象,40(4):389-399.
- 王振会,张祎,朱佳,2011. 基于最小二乘支持向量机的雷暴预报初探[J]. 热带气象学报,27(2):161-165.
- 徐良韬,张义军,王飞,等,2012. 雷暴起电和放电物理过程在 WRF 模式中的耦合及初步检验[J]. 大气科学,36(5):1041-1052.
- 杨仲江,蔡波,刘畅,2013. 利用双隐层 BP 网络进行雷暴潜势预报试验—以太原为例[J]. 气象,39(3):377-382.
- 俞小鼎,2014. 关于冰雹的融化层高度[J]. 气象,40(6):649-654.
- 俞小鼎,姚秀萍,熊廷南,等,2006. 多普勒天气雷达原理与业务应用[M]. 北京:气象出版社:150.
- 俞小鼎,周小刚,王秀明,2012. 雷暴与强对流临近天气预报技术进展[J]. 气象学报,70(3):311-337.
- 袁铁,郗秀书,2010. 中国东部及邻近海域暖季降水系统的闪电、雷达反射率和微波特征[J]. 气象学报,68(5):652-665.
- 曾淑玲,巩崇水,赵中军,等,2012. 动力-统计方法在 24 小时雷暴预报的应用[J]. 气象,38(12):1508-1514.
- 朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等,2000. 天气学原理和方法:第 3 版[M]. 北京:气象出版社:402-403.
- Lynn B H, Yair Y, Price C, et al, 2012. Predicting cloud-to-ground and intracloud lightning in weather forecast models[J]. Wea Forecasting, 27(6):1470-1488.
- Michimoto K, 1991. A study of radar echoes and their relation to lightning discharge of thunderclouds in the Hokuriku District. Part I: observation and analysis of thunderclouds in summer and winter[J]. J Meteor Soc Japan, 69(3):327-336.
- Michimoto K, 1993. A study of radar Echoes and their relation to lightning discharges of thunderclouds in the Hokuriku District. Part II: observation and analysis of "single-flash" thunderclouds in midwinter[J]. J Meteor Soc Japan, 71(2):195-204.
- Palmer W C, Allen R A, 1949. Note on the Accuracy of Forecasts Concerning the Rain Problem[R]. Washington, DC: US Weather Bureau Manuscript:1-4.