

# 八大低云多发机场的云诊断算法应用初探

裴昭昭, 苏艳华, 徐记亮

民航气象中心, 北京

收稿日期: 2022年3月12日; 录用日期: 2022年4月5日; 发布日期: 2022年4月12日

## 摘要

使用FNL (0.25°\*0.25° NCEP GFS)的6小时数值预报资料, 基于C云量诊断法(C方法)、WR95及优化的WR95方法(WR95opt)分别计算我国八大低云多发机场的450米以下最低层云, 使用机场天气报告检验诊断效果, 对比分析表明: 不分时次和季节时, 以及在大部分时次和季节, WR95和WR95opt在大部分机场的准确率、漏报率和TS评分高于C方法; 对于WR95和WR95opt, WR95opt的准确率和漏报率相对较高, WR95在TS评分方面整体上优于WR95opt。三种方法在不同季节、不同时次准确率、漏报率和TS评分有所不同, 但不同季节变化幅度远小于不同时次。在选取的八个机场中, 三种方法在华东地区中南部的4个机场表现普遍好于其他地区的机场。

## 关键词

云量诊断算法, WR95算法, 低云多发机场

# Preliminary Study on the Application of Cloud Diagnosis Algorithm in Eight Airports with Multiple Low Clouds

Zhaozhao Pei, Yanhua Su, Jiliang Xu

Aviation Meteorological Center, Beijing

Received: Mar. 12<sup>th</sup>, 2022; accepted: Apr. 5<sup>th</sup>, 2022; published: Apr. 12<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

Using the 6-hour numerical weather prediction data of FNL (0.25°\*0.25° NCEP GFS), based on C cloud amount diagnosis method (C method), WR95 and optimized WR95 method (WR95opt), the lowest layer clouds below 450 meters in the top eight low cloud-prone airports in China are calculated respectively. The diagnostic results were tested by aerodrome routine weather reports

(METAR). The comparative analysis showed that the accuracy rate, missing report rate and TS score of WR95 and WR95opt in most airports were higher than those of C method regardless of time and season, and in most time and season. For WR95 and WR95opt, the accuracy rate and missing report rate of WR95opt are higher than those of WR95, but the TS score of WR95 is overall higher than that of WR95opt. The accuracy rate, missing report rate and TS score of the three methods are different in different seasons and different times, but the variation range in different seasons is far smaller than that in different times. Among the selected eight airports, the performance of the three methods in four airports in the central-south part of East China is generally better than that in other regions.

## Keywords

Cloud Diagnosis Algorithm, WR95 Algorithm, Airports with Multiple Low Clouds

Copyright © 2022 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

低云是影响航空器起飞、着陆的重要危险天气之一。当飞机在被低云覆盖的机场着陆时,出云后离地面高度很低,若未对准跑道往来不及修正,容易造成飞机复飞。有时,由于指挥或操作不当、飞行员精力分配不均等多种原因,还可能造成飞机提前接地、与地面障碍物相撞、冲出跑道等,造成飞行事故。例如,2002年4月15日,国航波音767/2552号客机在韩国釜山机场失事,就与当时釜山机场的低云天气有关。因此,机场落地最低运行标准中通常包括云底高度[1]。云底高的观测和预报是民航气象预报与服务的一项重要内容,是机场例行天气报告、特殊天气报告、机场预报、着陆预报等飞行气象情报中必须包括的气象要素[2][3]。

随着遥感技术的迅猛发展,观测云的手段方法越来越多,除传统的地面人工观测外,飞机探测、卫星红外可见光遥感、卫星微波遥感、测雨雷达、激光雷达、微波辐射计等,但各种方法各有优缺点,都只能反映云的一部分信息[4][5]。为了更全面地了解云的情况,开展了多种云的分析方法的研究探索。其中,探空识别法可以利用相对湿度确定云的垂直结构,包括云底、云顶、云的层数及云层厚度[4]。Poore等利用探空湿度(温度露点差)廓线判定了云顶和云底高度[6],Wang等改进了Poore的方法,提出了利用相对湿度廓线判定云的垂直结构的具体阈值标准,简称WR95算法[7]。赵仕伟等将WR95探空分析云结构算法应用到数值模式中,以模式输出的数据代替探空数据,结果表明利用模式输出数据进行云底高度的诊断分析是可行的,且该方法对中、低云较为适用[8]。蔡淼等在WR95基础上对相对湿度阈值进行了优化,优化的WR95准确率和TS评分略有提高,且对云层数量的判断更接近于卫星观测情况[9]。此外,很多研究者开展了云量的诊断预报研究[10][11][12][13],其中,Xu等基于CRM模拟结果提出了一种云量诊断方法[14],称为C云量诊断法,被应用于NCEP GFS模式中[15][16]。

目前,民航气象服务机构对云的预报更多地依靠经验进行,并且针对机场云的预报诊断研究较少。为了弥补这方面的不足,本文尝试将基于数值模式的云诊断算法应用到机场中,期望找到适用于机场的云诊断算法,为机场云的预报提供一定的参考。在机场范围内,云底高越低,对飞机起降影响越大。民航气象服务机构发布的机场预报、着陆预报中,应当指明450米以下的云层或云块云量的变化或在达到一定云量标准时云高的变化[3]。因此,本文将着重研究云底高在450米以下的最低层云的情况。本文基

于我国大陆地区出现低云日数最多的八个机场(为贵阳龙洞堡、重庆江北、南宁吴圩、昆明长水、上海浦东、福州长乐、温州龙湾和长沙黄花机场)的机场天气报告等资料, 对比分析出现 450 米以下云时云诊断方法的效果, 尝试找出更适用于这些机场的云诊断算法, 为飞行安全提供依据。

## 2. 资料与方法

### 2.1. 资料

本文选取 2016 年 5 月 1 日~2019 年 4 月 30 日共 3 年的 NCEP 再分析资料 FNL (0.25°\*0.25°)逐日 00、06、12、18 (世界时)的 6 小时数值预报资料, 以及对应时次八大低云多发机场的天气报告, 研究云底高在 450 米以下最低层云的诊断方法。

### 2.2. 诊断方法

#### 2.2.1. C 云量诊断法

C 云量诊断法(以下简称 C 方法)是 NCEP GFS 模式中使用的云量诊断计算方法, 这是一种次网格的半经验公式, 使用相对湿度和云水/云冰混合数据计算云量, 广泛应用于数值预报模式云诊断中[14] [15] [16], 计算式为式(1)~(3):

$$C = RH^{0.25} \left\{ 1 - \exp \left[ - \min \left( \frac{2000q_c}{[(1-RH)q^*]^{0.25}}, 50 \right) \right] \right\} \quad (1)$$

$$q^* = \frac{0.622e}{pRH} \quad (2)$$

$$e = RH * 610.78 \left( \frac{273.16}{T} \right)^{-5.07} \cdot \exp \left[ 14.76 \left( 1 - \frac{273.16}{T} \right) \right] \quad (3)$$

其中,  $C$  为云量;  $RH$  为相对湿度;  $q_c$  为云水/云冰混合比;  $q^*$  为饱和比湿;  $e$  为水汽压;  $p$  为气压;  $T$  为温度。

通过以上方法, 可以计算出各高度上的云量, 进而推算出云层的云底高。

#### 2.2.2. 探空识别方法

依靠传统的地面观测或卫星观测等传统方法, 无法全面识别所有高度的云的情况。为解决这个问题, 基于云中水汽达到饱和或过饱和状态的特点, WR95 和优化的 WR95 算法利用大气的相对湿度廓线判定整层大气中云的垂直结构。

WR95 算法[8] [9] (以下简称 WR95)计算云底高的方法为:

判断从地表向上第一层云: 当相对湿度( $RH$ )  $\geq 87\%$ 时, 或当  $84\% \leq RH < 87\%$ 且高度层  $RH$  的变化大于  $3\%$ 时, 即为入云, 对应高度判断为云底; 当  $RH < 84\%$ 时, 即为出云, 对应高度判断为云顶。

判断第  $N$  ( $N \geq 2$ )层云: 当  $RH \geq 84\%$ 时, 即为入云, 对应高度判断为云底; 当  $RH < 84\%$ 时, 即为出云, 对应高度判断为云顶。

优化的 WR95 (以下简称 WR95opt)各高度相对湿度阈值与高度的关系如式(4) [10]:

$$Hr = \begin{cases} 91 & (0 \leq H < 1) \\ -6.416 \times H + 97 & (1 \leq H < 2) \\ -1.223 \times H + 87 & (2 \leq H < 7.562) \\ -4.0 \times H + 108 & (7.652 \leq H \leq 10) \\ 68 & (10 < H) \end{cases} \quad (4)$$

其中,  $H_r$  为相对湿度阈值;  $H$  为高度, 单位为千米。同时参考 Zhang 等[17]的方法, 考虑了云层数量的优化。

### 2.2.3. 诊断效果检验

表 1 是参考晴雨预报的混淆矩阵[18]设置混淆矩阵云诊断对应关系, 根据表 1 分别计算八大低云多发机场使用 C 方法、WR95 和 WR95opt 云诊断结果的准确率、漏报率及 TS 评分, 计算式为式(5)~(7)。

Table 1. The test correspondence of confusion matrix for Cloud diagnostics

表 1. 混淆矩阵云诊断检验对应关系

		预报诊断	
		有云	无云
实况	有云	$N_A$ (命中)	$N_C$ (漏报)
	无云	$N_B$ (空报)	$N_D$ (命中否)

$$\text{准确率} = N_A / (N_A + N_B) \tag{5}$$

$$\text{漏报率} = N_C / (N_A + N_C) \tag{6}$$

$$\text{TS评分} = N_A / (N_A + N_B + N_C) \tag{7}$$

准确率数值越大表示预报可信度越高; 漏报率数值越大表示出现漏报的可能性越大; TS 评分综合考虑了准确率、空报率和漏报率, 数值越大表示预报诊断效果越好。

本文将基于 C 方法、WR95 和 WR95opt, 运用 FNL 数值预报资料分别计算八大低云多发机场 450 米以下最低层云的云底高, 利用相应时次的机场天气报告检验其诊断效果, 并进行对比分析, 为机场云的预报提供参考。

## 3. 结果分析

### 3.1. 综合分析

图 1 为 C 方法、WR95 和 WR95opt 诊断的八大低云多发机场 450 米以下, 6 小时出现最低层云的准确率、漏报率、TS 评分表, N 表示诊断无低于 450 米的云。

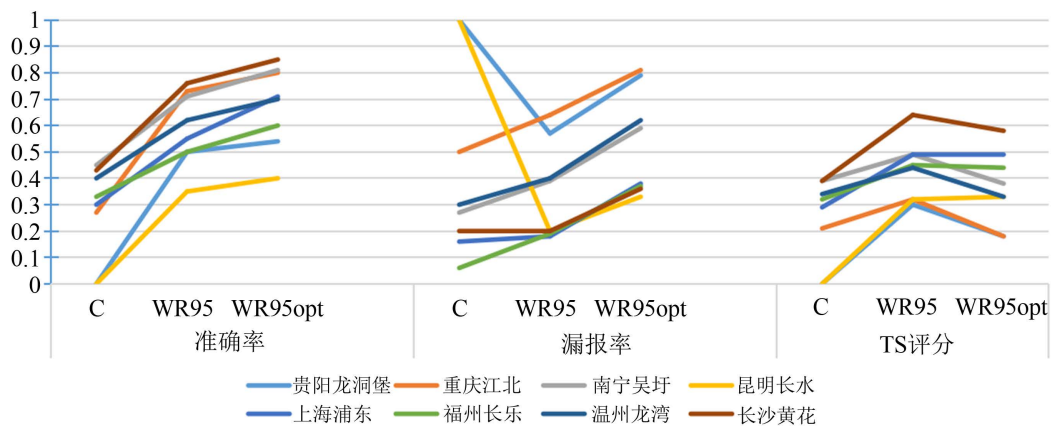


Figure 1. The precision rate, false negative rate, and TS scores of the lowest layer of clouds in the top eight low cloud-prone airports

图 1. 八大低云多发机场出现最低层云的准确率、漏报率、TS 评分表

准确率分析表明, WR95opt 最高, WR95 次之, C 方法最低。C 方法在南宁、长沙和温州机场准确率较高, 在 0.4 (含)以上, 在重庆和上海浦东机场准确率较低, 在 0.3 (含)以下。WR95/WR95opt 在长沙、南宁、重庆、上海浦东和温州机场准确率较高, 在 0.7 (含)以上; 昆明机场准确率最低, 为 0.4。综合三种方法, 长沙、南宁和重庆机场的准确率较高, 昆明和贵阳机场的准确率较低。

漏报率分析表明, 除贵阳和昆明机场外, C 方法漏报率最低, W95opt 漏报率最高。C 方法在福州、上海浦东、长沙、南宁和温州机场漏报率较低, 在 0.3 (含)以下, 其中福州机场最低, 仅为 0.06。WR95 在上海浦东、福州、昆明和长沙机场漏报率较低, 在 0.2 (含)以下; 在重庆和贵阳机场漏报率较高, 在 0.5 以上。WR95opt 在重庆、贵阳、温州、南宁机场的漏报率较高, 均在 0.5 以上。

TS 评分分析表明, 在昆明机场, W95opt 的 TS 评分最高, WR95 次之; 在上海浦东机场, WR95 和 W95opt 的 TS 评分一致, C 方法最低; 在其余机场, WR95 的 TS 评分最高, W95opt 和 C 方法各有高低, C 方法在重庆、南宁和温州机场 TS 评分高于 W95opt, W95opt 的 TS 评分在贵阳、福州和长沙机场高于 C 方法, W95opt 在八大低云多发机场的 TS 评平均值高于 C 方法的平均值。C 方法的 TS 评分在南宁和长沙机场较高, 均为 0.39; C 方法在贵阳和昆明机场没有诊断出 450 米以下的云, 漏报率为 1, TS 评分为 0, 明显差于在其他机场及 WR95/WR95opt 方法。WR95 的 TS 评分在长沙、南宁、上海浦东、福州和温州机场较高, 在 0.4 以上。W95opt 的 TS 评分在长沙、上海浦东、福州机场较高, 在 0.4 以上; 在重庆和贵阳机场较低, 均为 0.18。

### 3.2. 不同时段分析

本文利用 2016 年 5 月 1 日~2019 年 4 月 30 日八大低云多发机场的机场天气报告, 按照前后各 3 小时视为该时段的时间有效范围的原则, 分别统计了 00、06、12、18 (世界时, UTC, 下同)四个时段内出现低云的日数, 低云在 00 和 18 时发生日数较多, 因此本文重点分析云诊断算法在 00 和 18 时的诊断效果。

#### 3.2.1. 00UTC

图 2 为在 00UTC, C 方法、WR95 和 WR95opt 诊断的八大低云多发机场 450 米以下, 6 小时出现最低层云的准确率、漏报率、TS 评分表, N 表示诊断无低于 450 米的云。

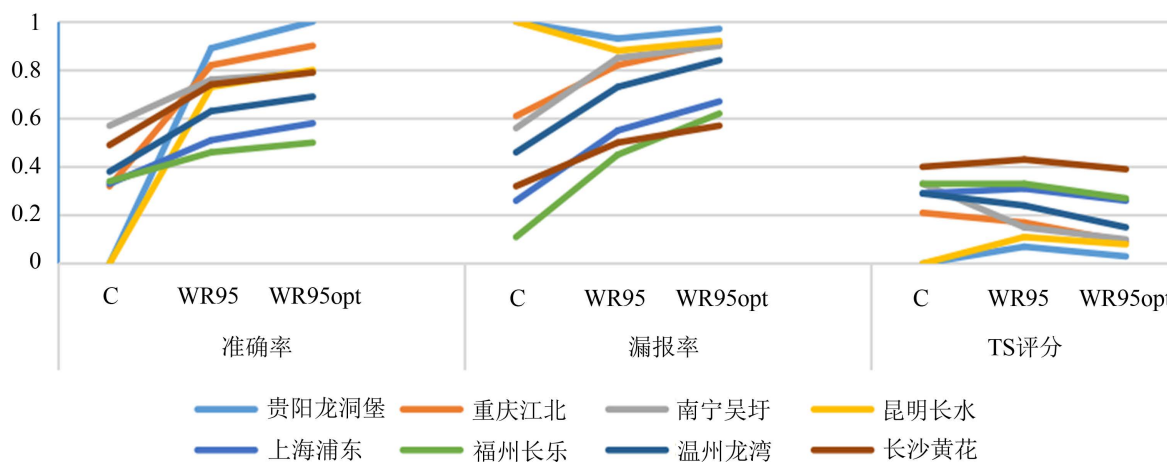


Figure 2. The precision rate, false negative rate, and TS scores of the lowest layer of clouds at 00UTC in the top eight low cloud-prone airports

图 2. 八大低云多发机场 00UTC 出现最低层云的准确率、漏报率、TS 评分表

准确率分析表明,与综合分析相比,三个方法在八大低云多发机场的准确率平均值均有不同程度的上升,WR95 上升幅度最大,为 0.1。在 00UTC,WR95opt 准确率最高,WR95 次之,C 方法最低。其中,WR95opt 在贵阳机场准确率为 1。综合三种方法,南宁、重庆和长沙机场的准确率较高,福州和上海浦东机场的准确率较低。

漏报率分析表明,与综合分析相比,三个方法在八大低云多发机场的漏报率平均值均有不同程度的上升,C 方法的升幅最小,为 0.1,WR95 和 WR95opt 的升幅分别为 0.36 和 0.27。除贵阳和昆明机场外,C 方法的漏报率明显低于 WR95 和 WR95opt,WR95opt 的漏报率最高。综合三种方法,福州、长沙和上海浦东机场的漏报率较低,贵阳和昆明机场的漏报率较高。

TS 评分分析表明,与综合分析相比,三个方法在八大低云多发机场的 TS 评分平均值均有不同程度的下降,C 方法降幅最小,为 0.01,WR95 和 WR95opt 降幅较大,在 0.19~0.2。C 方法和 WR95 的 TS 评分互有高低,WR95opt 的 TS 评分最低。在重庆、南宁、温州,C 方法的 TS 评分最高;在贵阳、昆明、上海浦东和长沙,WR95 的 TS 评分最高;在福州机场,C 方法和 WR95 的 TS 评分并列第一。综合三种方法,长沙、福州和上海浦东机场的 TS 评分较高,贵阳机场的 TS 评分最低,均低于 0.07。

### 3.2.2. 18UTC

图 3 为在 18UTC,C 方法、WR95 和 WR95opt 诊断的八大低云多发机场 450 米以下,6 小时出现最低层云的准确率、漏报率、TS 评分表,N 表示诊断无低于 450 米的云。

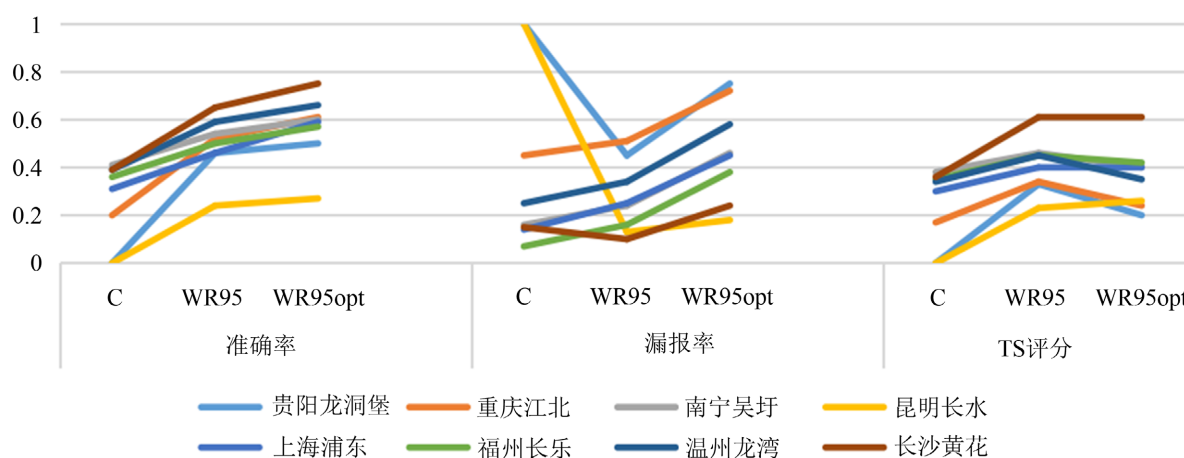


Figure 3. The precision rate, false negative rate, and TS scores of the lowest layer of clouds at 18UTC in the top eight low cloud-prone airports

图 3. 八大低云多发机场 18UTC 出现最低层云的准确率、漏报率、TS 评分表

准确率分析表明,与综合分析相比,三个方法在八大低云多发机场的准确率平均值均有不同程度的下降,C 方法的降幅最小,为 0.02,WR95 和 WR95opt 的降幅为 0.09~0.11。WR95opt 的准确率最高,WR95 次之,C 方法最低。综合三种方法,长沙、温州和南宁机场的准确率较高,昆明和贵阳机场的准确率较低。

漏报率分析表明,与综合分析相比,三个方法在八大低云多发机场的漏报率平均值均有不同程度的下降,WR95 的降幅最大,为 0.08。除贵阳、昆明和长沙机场外,C 方法的漏报率最低,WR95 次之,WR95opt 最高。综合三种方法,长沙、福州和上海浦东机场的漏报率较低,贵阳和重庆机场的漏报率较高。

TS 评分分析表明, 与综合分析相比, 三个方法在八大低云多发机场的 TS 评分的平均值一致或略有下降, 高于其他时次。WR95 和 WR95opt 的 TS 评分明显高于 C 方法。在昆明机场, WR95opt 的 TS 评分最高; 在其余机场, WR95 的 TS 评分最高。综合三种方法, 长沙、南宁和福州机场的 TS 评分较高, 昆明和贵阳机场的 TS 评分较低。

在 06UTC 和 12UTC, WR95opt 准确率最高, WR95 次之, C 方法最低; C 方法和 WR95 的漏报率在各个机场互有高低, WR95opt 的漏报率最高; WR95 和 WR95opt 的 TS 评分高于 C 方法。

### 3.3. 季节分析

本文统计分析了 2016 年 5 月 1 日~2019 年 4 月 30 日八大低云多发机场的机场天气报告, 低云在春季(3~5 月)和冬季(12 月~次年 2 月)发生日数较多, 在夏季(6~8 月)和秋季(9~11 月)发生较少, 因此本文重点分析云诊断算法在春季和冬季的诊断效果。

#### 3.3.1. 春季

图 4 为在春季, C 方法、WR95 和 WR95opt 诊断的八大低云多发机场 450 米以下, 6 小时出现最低层云的准确率、漏报率、TS 评分表, N 表示诊断无低于 450 米的云。

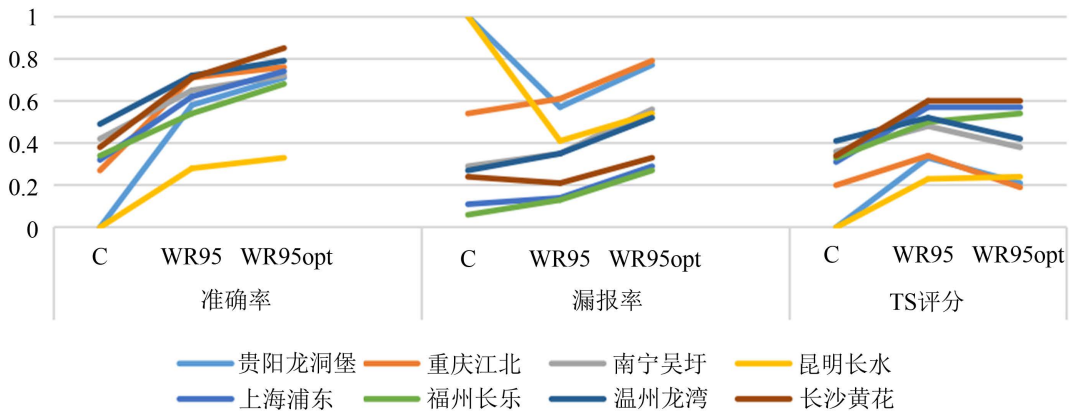


Figure 4. The precision rate, false negative rate, and TS scores of the lowest layer of clouds in spring in the top eight low cloud-prone airports

图 4. 八大低云多发机场春季出现最低层云的准确率、漏报率、TS 评分表

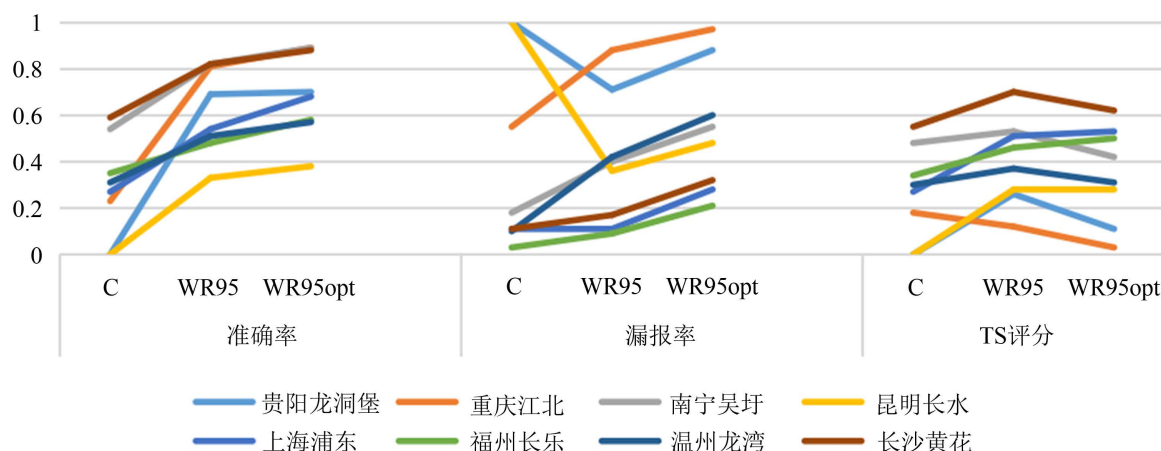
准确率分析表明, 与综合分析相比, 三个方法在八大低云多发机场的准确率平均值均略有上升, 升幅为 0.01~0.02。WR95opt 的准确率最高, WR95 次之, C 方法明显偏低。综合三种方法, 温州、长沙、南宁和重庆机场的准确率较高, 昆明机场的准确率最低。

漏报率分析表明, 与综合分析相比, 三个方法在八大低云多发机场的漏报率平均值持平或略有降低。除贵阳、昆明和长沙机场外, C 方法的漏报率明显低于 WR95 和 W95opt 的漏报率, W95opt 的漏报率最高。综合三种方法, 福州、上海浦东和长沙机场的漏报率较低, 贵阳、昆明和重庆机场的漏报率较高。

TS 评分分析表明, 与综合分析相比, 三个方法在八大低云多发机场的 TS 评分平均值略有上升或持平。WR95 和 WR95opt 的 TS 评分互有高低, C 方法的 TS 评分明显偏低。综合三种方法, 长沙、上海浦东和温州机场的 TS 评分较高, 昆明、贵阳和重庆机场的 TS 评分较低。

#### 3.3.2. 冬季

图 5 为在冬季, C 方法、WR95 和 WR95opt 诊断的八大低云多发机场 450 米以下, 6 小时出现最低层云的准确率、漏报率、TS 评分表, N 表示诊断无低于 450 米的云。



**Figure 5.** The precision rate, false negative rate, and TS scores of the lowest layer of clouds in winter in the top eight low cloud-prone airports

**图 5.** 八大低云多发机场冬季出现最低层云的准确率、漏报率、TS 评分表

准确率分析表明,与综合分析相比,三个方法在八大低云多发机场的准确率平均值均略有上升,升幅 0.02~0.04。WR95opt 的准确率最高,WR95 次之,C 方法明显偏低。综合三种方法,长沙、南宁和重庆机场的准确率较高,昆明机场的准确率最低。

漏报率分析表明,与综合分析相比,C 方法在八大低云多发机场的漏报率平均值均有所下降,降幅 0.05;WR95 和 WR95opt 有所上升,升幅为 0.01~0.04。除贵阳和昆明机场外,C 方法的漏报率最低,WR95opt 的漏报率明显偏高。综合三种方法,福州、上海浦东和长沙机场的漏报率较低,贵阳和重庆机场的漏报率较高。

TS 评分分析表明,与综合分析相比,C 方法在八大低云多发机场的 TS 评分平均值略有增加,WR95 和 WR95opt 的 TS 评分略有降低。在贵阳、南宁、温州和长沙机场,WR95 的 TS 评分最高;在昆明、福州和上海浦东机场,WR95opt 的 TS 评分最高。在重庆机场 C 方法的 TS 评分最高,此外除南宁机场外,C 方法的 TS 评分均为三种方法中最低。综合三种方法,长沙、南宁和上海浦东机场的 TS 评分较高,重庆、贵阳和昆明机场的 TS 评分较低。

在夏季和秋季,WR95opt 的准确率最高,WR95 次之,C 方法明显偏低;C 方法的漏报率最低,WR95 次之,WR95opt 最高;WR95 和 WR95opt 的 TS 评分高于 C 方法。

#### 4. 结论与讨论

1) 不论是否分时次或季节,在绝大多数情况下,WR95 和 WR95opt 在绝大部分机场的准确率、漏报率和 TS 评分高于 C 方法。WR95 的准确率、漏报率和 TS 评分相对高于 WR95opt。

2) 由于 WR95 和 WR95opt 的准确率和漏报率都相对较高,在实际运用中,对于 WR95 和(或) WR95opt 诊断有低云的情况要特别关注。

3) 分时次和分季节讨论时,三种方法的准确率、漏报率和 TS 评分均有不同程度的变化,但不同季节的变化幅度远小于不同时次,说明季节变化对三种方法整体有效性影响有限,时次变化对三种方法整体有效性影响较大。

4) 分时次讨论时,在福州、上海浦东和温州机场,WR95 和 WR95opt 在 00UTC 和 06UTC 的准确率的相对较高;其余机场在 12UTC 和 18UTC 的准确率相对较高。

5) 三种方法在 00UTC 的漏报率高于或等于其他时次,尤其 WR95 和 WR95opt 的漏报率明显偏高。



在实际运用中, 当 WR95 和 WR95opt 在 00UTC 未诊断有低云, 但 C 方法诊断有低云时, 需关注出现低云的可能性。

6) WR95 和 WR95opt 的 TS 评分在 00UTC 最低; 在大部分机场, 在 18UTC 或 12UTC 最高。C 方法的准确率和 TS 评分在不同季节、不同时段、不同机场没有明显的变化规律。

7) 三种方法在不同机场表现不同, 从 TS 评分来看, WR95 和 WR95opt 在长沙、上海浦东、福州和温州机场表现相对最好, C 方法在长沙、温州和福州机场表现最好, 表明云诊断方法在华东地区中南部的机场表现好于我国其他地区, 还需进一步开展研究。

## 参考文献

- [1] FAA.RTCA Inc. (2005) Document RTCA/DO-254, Design Assurance Guidance for Airborne Electronic Hardware (AC 20152).
- [2] 民航局空管办. AP-117-TM-02R1. 民用航空气象地面观测规范[S]. 北京: 中国民用航空局空管行业管理办公室, 2012.
- [3] 民航局空管办. AP-117-TM-2019-01. 民用航空气象预报规范[S]. 北京: 中国民用航空局空管行业管理办公室, 2019.
- [4] 韩成鸣, 李耀东, 史小康. 云分析预报方法研究进展[J]. 地球科学进展, 2015, 30(4): 505-516.
- [5] 陈超, 郭晓军, 邱晓斌, 等. 中国华北地区云垂直结构及云水含量卫星遥感研究[J]. 气象与环境学报, 2015, 31(5): 159-164.
- [6] Poore, K.D., Wang, J.H. and Rossow, W.B. (1995) Cloud Layer Thicknesses from a Combination of Surface and Upper-Air Observations. *Journal of Climate*, **8**, 550-568. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1995\)008<0550:CLTFAC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1995)008<0550:CLTFAC>2.0.CO;2)
- [7] Wang, J.H. and Rossow, W.B. (1995) Determination of Cloud Vertical Structure from Upper-Air Observations. *Journal of Applied Meteorology*, **34**, 2243-2258. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1995\)034<2243:DOCVSF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1995)034<2243:DOCVSF>2.0.CO;2)
- [8] 赵仕伟, 赵增亮, 史荟燕, 等. WR95 探空分析算法在中尺度数值模式中的应用研究[C]//第 26 届中国气象学会年会人工影响天气与大气物理学分会论文集. 杭州: 中国气象学会, 2009: 165-173.
- [9] 蔡淼, 欧建军, 周毓荃, 等. L 波段探空识别云区方法的研究[J]. 大气科学, 2014, 38(2): 213-222.
- [10] 黄海亮, 靳双龙, 王式功, 等. 相似预报方法在山西省云量预报中的应用[J]. 干旱气象, 2018, 36(5): 845-851.
- [11] 赵中军, 靳双龙, 刘晓琳, 等. 环渤海地区云量的精细化预报方法[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2019, 55(4): 541-548.
- [12] 杜晖, 殷启元, 贾晓红, 等. 动态时变参数方法在云量精细化预报中的应用研究[J]. 热带气象学报, 2020, 36(6): 834-845.
- [13] 陈雪娇, 刘奇俊, 马占山. GRAPES 全球模式云方案的诊断研究[J]. 气象学报, 2021, 79(1): 65-78.
- [14] Xu, K.M. and Randall, D.A. (1996) A Semiempirical Cloudiness Parameterization for Use in Climate Models. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **53**, 3084-3102. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1996\)053<3084:ASCPFU>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1996)053<3084:ASCPFU>2.0.CO;2)
- [15] 张寅, 罗亚丽, 管兆勇. NCEP 全球预报系统在 ARM SGP 站点预报大气温度、湿度和云量的检验[J]. 大气科学, 2012, 36(1): 170-184.
- [16] 张金强. 地基探测与 NCEP GFS 模式预报云量在 ARM SGP 站点的对比[J]. 气象与环境科学, 2016, 39(1): 12-18.
- [17] Zhang, J.Q., Chen, H.B., Li, Z.Q., et al. (2010) Analysis of Cloud Layer Structure in Shouxian, China Using RS92 Radiosonde Aided by 95 GHz Cloud Radar. *Journal of Geophysical Research*, **115**, D00K30. <https://doi.org/10.1029/2010JD014030>
- [18] 何佳, 惠建忠, 何险峰, 等. Python 在短临气象预报检验中的应用[J]. 气象科技, 2021, 49(5): 738-745.