

基于气象要素的贵阳机场目视进近条件分析

杨凤婷

民航贵州空管分局, 贵州 贵阳

收稿日期: 2026年9月19日; 录用日期: 2026年10月13日; 发布日期: 2026年10月21日

摘 要

利用贵阳机场2021年9月至2026年8月的常规观测资料, 依据机场目视进近气象条件标准, 统计分析了气象条件达标率的时间分布特征、地面风特征及气象条件不达标成因。结果表明: 目视进近气象条件的时间分布具有明显的间歇性与波动性。达标率逐年呈上升趋势, 月季分布表现出“夏优冬劣”的单峰型特征, 并且, 达标率在一日的午后至傍晚较高, 日出前后较低。目视进近气象条件达标时段, 内地面风以偏南风为主, 整体风场条件较温和。不达标成因中, 云底高不足占主导地位, 雨层云是导致云底高不足的首要云状, 低云与轻雾、弱降水叠加是制约目视进近的重要天气场景。

关键词

目视进近, 气象条件, 达标率, 贵阳机场, 时间特征

Analysis of Visual Approach Conditions at Guiyang Airport Based on Meteorological Factors

Fengting Yang

Guizhou Sub-Bureau of Southwest Regional Air Traffic Administration of Civil Aviation of China, Guiyang
Guizhou

Received: September 19, 2026; accepted: October 13, 2026; published: October 21, 2026

Abstract

Using the routine observational data of Guiyang Airport from September 2021 to August 2026, and according to the airport's meteorological condition criteria for visual approach, the temporal distribution characteristics of the compliance rate, surface wind characteristics, and causes of non-compliance were statistically analyzed. The results show that the temporal distribution of the

meteorological conditions for visual approach exhibits obvious intermittency and volatility. The compliance rate shows an upward trend year by year, and the monthly and seasonal distribution presents a unimodal pattern of "better in summer and worse in winter". Moreover, the compliance rate is higher from afternoon to early evening and lower around sunrise. During the periods meeting the meteorological conditions for visual approach, surface winds are predominantly southerly, and the overall wind field conditions are relatively mild. Among the causes of non-compliance, insufficient cloud base height is dominant, with nimbostratus being the primary cloud type causing insufficient cloud base height; the combination of low clouds with light fog and weak precipitation is an important weather scenario restricting visual approach.

Keywords

Visual Approach, Meteorological Conditions, Compliance Rate, Guiyang Airport, Time Characteristics

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

目视进近是指飞机驾驶员在进近着陆过程中,以目视方式完成进近和着陆的一种运行方式[1]。随着民航业的快速发展,飞行流量的增长与空域容量的矛盾日益突出,需要更充足的空域给予支撑[2][3]。目视进近作为一种灵活高效的进近方式,近年来已成为提高民航运行效率的重要手段之一[4]。研究表明,与仪表进近相比,目视进近能够有效缩短航空器之间的间隔,提升跑道容量和机场运行效率,同时减少燃油消耗与碳排放[5]。然而,气象条件的好坏,是目视进近能否实施的前提和决定性因素[6][7]。

贵阳机场地处云贵高原东麓,山地地形导致气候复杂多变。受云贵准静止锋、西南涡及地形共同影响[8],机场低云、大雾、降水及对流天气频发,顺利实施目视进近对气象条件的监测与预报提出了更高需求。为揭示贵阳机场目视进近气象条件的时间演变规律与总体达标水平(达标率),本文基于贵阳机场2021年双跑道建成以来至2026年8月共6年的气象资料,从气象条件的时间分布特征、不满足目视进近气象条件的气象原因等方面展开分析,以期为后续目视进近运行的时段选择和气象保障提供技术参考。

2. 数据与方法

文章选取贵阳机场双跑道建成以来2021年9月至2026年8月的常规观测资料,具体包括:(1)贵阳机场逐小时整点人工观测数据,涵盖总云量、低云量、云底高、主导能见度、天气现象等气象要素;(2)贵阳机场自动观测系统分钟级观测资料,包含风向、风速、云底高、温度、露点温度、相对湿度等气象要素;(3)贵阳机场多普勒天气雷达探测资料、风廓线雷达探测资料,用于补充对复杂天气过程及风场变化的监测;(4)贵阳机场逐日重要天气卡片,补充常规逐时观测的不足,实现对复杂天气的精细化演变追踪;(5)欧洲中心ERA5 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 逐小时再分析资料,用以分析大气环流背景场。本文采用数理统计和对比分析法,对贵阳机场目视进近气象条件的时间分布特征及影响因子进行分析。

贵阳机场目视进近运行所采用的气象条件标准为:主导能见度 ≥ 5000 m 且云底高 ≥ 1150 m。依据该标准,对机场2021年9月~2026年8月地面气象观测数据(有效小时数共计43,824 h,有效观测日共计1826天)进行逐小时判定,当某日某一时次气象条件同时满足主导能见度 ≥ 5000 m、云底高 ≥ 1150 m时,记该时次为目视进近气象条件达标时次,并且,若该日07时~24时期间有 ≥ 1 h 满足判定标准,则将该

日记为一个目视进近气象条件达标日；若主导能见度或云底高任意一项要素不满足，则记该时次为目视进近气象条件不达标时次。

季节划分标准为：春季(3月、4月、5月)，夏季(6月、7月、8月)，秋季(9月、10月、11月)，冬季(12月、1月、2月)。本文所涉时间均为北京时间，后不赘述。

3. 贵阳机场目视进近条件气象要素分析

通过计算目视进近气象条件达标时次占总观测时次的比例(达标率)，统计达标率在不同时间尺度上的分布情况，分析其变化规律，并探讨不满足目视进近气象条件时的气象要素情况，在气象维度上分析对目视进近的制约条件。

3.1. 目视进近气象条件达标率的时间尺度特征

3.1.1. 逐年变化

2021年9月~2026年8月机场同时满足能见度 ≥ 5000 m且云底高 ≥ 1150 m的整体情况如表1所示。结果显示，统计时段内达标日数为1133天，占统计总日数的62.0%，然而，达标小时数占总观测小时数的比例仅为23.5%。这表明尽管达标日数占比较高，但每日内满足目视进近气象条件的小时数十分有限，达标日数多而达标小时数少的矛盾较为突出。

2021年9月~2026年8月各年度达标情况如图1所示。其中，2021年(9~12月)和2026年(1~8月)数据时段不足12个月，其统计结果不与其他完整年度直接对比，仅作参考。从2022年~2025年4个完整年度的达标情况来看，达标日数占比由2022年的54.0%逐步提升至2025年的63.6%，达标小时占比由

Table 1. Overall situation of meeting the meteorological conditions for visual approach at Guiyang Airport from September 2021 to August 2026

表 1. 2021 年 9 月~2026 年 8 月贵阳机场满足目视进近气象条件总体情况

统计指标	数值
达标日数/日	1133
达标日数占比	62.0%
达标小时/h	10311
达标小时占比	23.5%

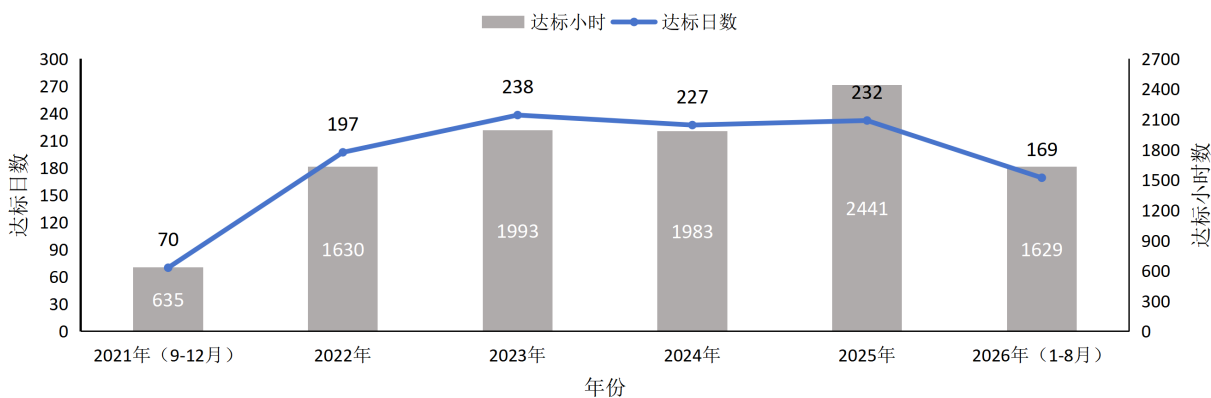


Figure 1. Annual distribution of days and hours meeting the meteorological conditions for visual approach at Guiyang Airport from September 2021 to August 2026

图 1. 2021 年 9 月~2026 年 8 月贵阳机场满足目视进近气象条件日数及小时数逐年分布

18.6%提升至 27.9%，均呈上升趋势，表明贵阳机场目视进近气象条件总体平稳向好。但是，各年度达标日数占比(54.0%~69.5%)始终显著高于达标小时数占比(18.6%~27.9%)，二者差距维持在 35%以上，进一步印证了目视进近气象条件在日内具有明显的间歇性与波动性，即多数达标日内仅部分时段满足目视进近运行要求。

3.1.2. 逐月、逐季节变化

各月满足目视进近气象条件的总体分布如表 2 和图 2 所示。从月分布来看，达标日数占比与达标小时占比均为单峰型分布，峰值出现在盛夏至初秋，谷值出现在冬季，整体呈现“夏优冬劣”的季节特征。

Table 2. Monthly distribution of days and hours meeting the meteorological conditions for visual approach at Guiyang Airport from September 2021 to August 2026

表 2. 2021 年 9 月~2026 年 8 月贵阳机场满足目视进近气象条件日数及小时数逐月分布

月份	达标日数	达标日数占比	达标小时	达标小时占比
1 月	65	41.9%	554	14.9%
2 月	50	35.5%	268	7.9%
3 月	78	50.3%	653	17.6%
4 月	101	67.3%	919	25.5%
5 月	101	65.2%	880	23.7%
6 月	88	58.7%	787	21.9%
7 月	131	84.5%	1177	31.6%
8 月	133	85.8%	1306	35.1%
9 月	127	84.7%	1219	33.9%
10 月	96	61.9%	941	25.3%
11 月	87	58.0%	846	23.5%
12 月	76	49.0%	761	20.5%

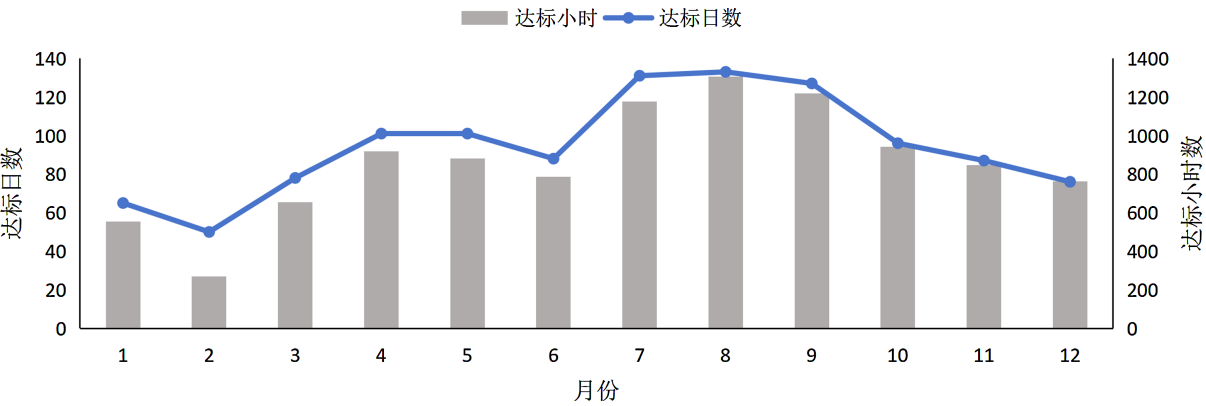


Figure 2. Monthly distribution of the number of days and hours when the visual approach meteorological conditions were met at Guiyang Airport from September 2021 to August 2026

图 2. 2021 年 9 月~2026 年 8 月贵阳机场满足目视进近气象条件日数及小时数逐月分布

具体而言，7~9 月为达标率最高的月份，达标日数占比分别为 84.5%、85.8%和 84.7%，达标小时占比分别为 31.6%、35.1%和 33.9%，其中 8 月达标小时占比为全年最高值。这一时期贵阳机场受副热带高

压边缘暖湿气流控制，低层虽暖湿，但由于午后热力对流较强，不利于水汽的饱和凝结，低云和低能见度天气相对较少，目视进近气象条件最为有利。4~5 月为次高峰，达标日数占比分别为 67.3%和 65.2%，达标小时占比分别为 25.5%和 23.7%，反映出春季中后期目视进近气象条件已明显好转。12 月~次年 2 月为全年达标率最低月份，其中 2 月达标日数占比仅 35.5%，达标小时占比仅 7.9%，均为全年最低值，1 月和 12 月达标小时占比分别为 14.9%和 20.5%。冬季贵阳机场受云贵准静止锋影响频繁，近地层冷却明显，低层水汽充沛，低云、低能见度天气多发，并且，冬季大气低层长存在逆温层，垂直运动不强，导致雨层云、低云和轻雾出现频繁，成为制约目视进近气象条件的主要原因。

此外，各月达标日数占比与达标小时占比之间的差距普遍维持在 30%~55%之间，其中 7~9 月差距最大，说明即使在达标率高的月份，每日内满足目视进近气象条件的时段仍较为有限，目视进近运行对气象条件的时间选择具有较强依赖性。

3.1.3. 逐时变化

各时次满足标准的分布如图 3 所示。从逐小时分布来看，09 时为达标率最低时次，达标小时占比仅 13.3%，10 时略升至 13.9%，11 时起逐步回升，17 时达到全天峰值，达标小时占比为 32.4%，18~21 时维持在 30%~32%的高位，整体呈“午后至傍晚较高、日出前后较低”的特征。从日变化幅度来看，最高时次(17 时，32.4%)与最低时次(09 时，13.3%)相差 19.1%，表明目视进近气象条件在日内波动显著。

为进一步揭示达标率的日变化规律，将全天 24 h 划分为 4 个时段，结果如表 3 所示。前半夜(18~23 时)达标小时占比最高，为 30.4%，上午(06~11 时)最低，仅为 16.1%，下午(12~17 时)和凌晨(00~05 时)分别为 25.7%和 22.0%，介于两者之间。总体来看，下午至前半夜的达标率明显高于上午和凌晨时段，反映

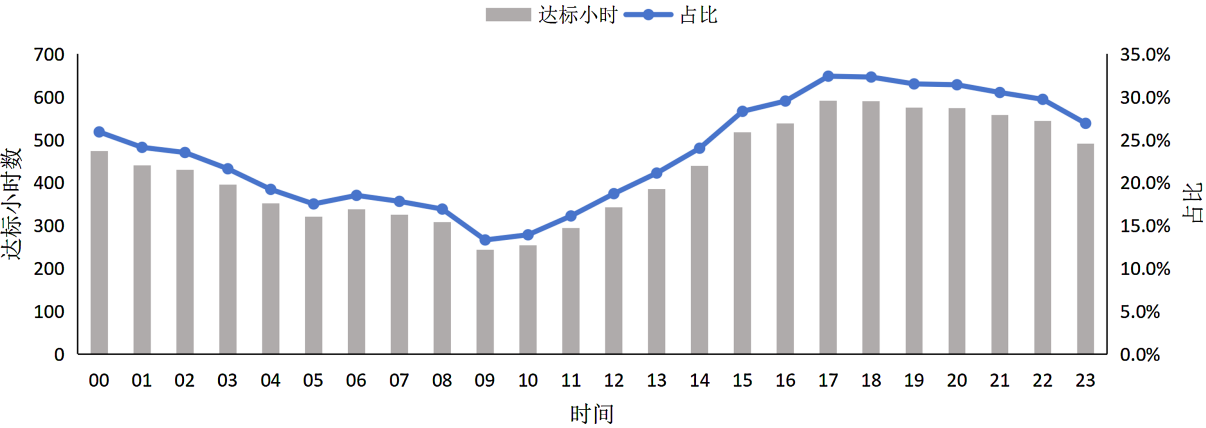


Figure 3. Hourly distribution of the number of hours and proportion of visual approach meteorological conditions met at Guiyang Airport from September 2021 to August 2026

图 3. 2021 年 9 月~2026 年 8 月贵阳机场满足目视进近气象条件小时数及占比逐小时分布

Table 3. Distribution by time period of meeting the meteorological conditions for visual approach at Guiyang Airport from September 2021 to August 2026

表 3. 2021 年 9 月~2026 年 8 月贵阳机场满足目视进近气象条件时段分布

时段	总小时	达标小时	达标小时占比
凌晨(00~05 时)	10956	2408	22.0%
上午(06~11 时)	10956	1761	16.1%
下午(12~17 时)	10956	2812	25.7%
前半夜(18~23 时)	10956	3330	30.4%

出目视进近气象条件在午后至夜间相对更优，而上午时段受低云维持和能见度恢复缓慢等因素影响，达标率处于全天最低水平。

为更直观地展示各月达标率在日内各时次的分布特征，绘制了达标率热力图(图 4)。图中横坐标表示时次，纵坐标表示月份，色块颜色深浅表示该月该时次达标率的高低(跨年合并统计)，为运行人员提前识别有利时段、合理规划目视进近运行的时间窗口提供参考。综合来看，贵阳机场目视进近运行的平均最佳时段为 15~21 时。

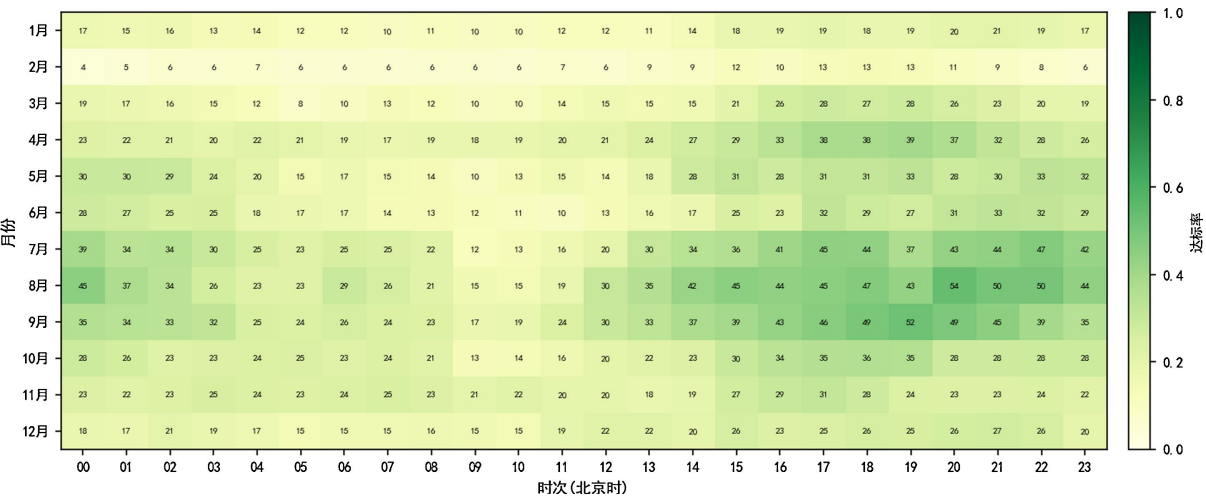


Figure 4. Monthly and hourly breakdown of the proportion of visual approach meteorological conditions met at Guiyang Airport from September 2021 to August 2026

图 4. 2021 年 9 月~2026 年 8 月贵阳机场满足目视进近气象条件逐月逐小时占比

3.2. 满足目视进近气象条件时的地面风特征

3.2.1. 风向特征

表 4 是依据 2021 年 9 月~2026 年 8 月达标日的整点记录，统计达标日的风向分布情况。从风向

Table 4. Wind direction distribution when meeting the meteorological conditions for visual approach at Guiyang Airport from September 2021 to August 2026

表 4. 2021 年 9 月~2026 年 8 月贵阳机场满足目视进近气象条件时的风向分布

风向(8 方位)	出现小时数	占比
N	4863	17.9%
NE	4748	17.5%
E	1142	4.2%
SE	1397	5.1%
S	6532	24.0%
SW	3449	12.7%
W	316	1.2%
NW	300	1.1%
静风(C)	380	1.4%
风向不定(VRB)	4064	14.9%

(八分位)分布来看, 达标时段内主导风向为偏南风, 其中 S 方位出现小时数最多, 占比 24.0%, SW 方位次之, 占比 12.7%, SE 方位占比 5.1%。偏南风三个方位合计占比约 41.8%, 表明贵阳机场目视进近气象条件达标时, 近地层主导气流以偏南方向为主。偏北风方位中, N 方位出现小时数占比 17.9%, NE 方位占比 17.5%, 二者合计约 35.4%, 构成次主导风向。E、W 方位出现频率均较低, 分别仅占 4.2%和 1.2%, NW 方位占比最低, 仅 1.1%。此外, 静风(C)占比 1.4%, 风向不定(VRB)占比 14.9%, 反映出达标时段内仍有相当比例的时次风向不稳定或风速较小。

3.2.2. 风速特征

从达标日的风速特征来看(表 5), 风速分主要集中在 2~4 m/s 区间, 该区间出现小时数占比 41.8%, 为达标时段内出现频率最高的风速等级, 0~2 m/s 和 4~6 m/s 区间分别占比 21.1%和 23.4%, 三者合计占比达 86.3%, 表明达标时段内地面风速总体以 2~6 m/s 的弱至中等风速为主。6 m/s 以上的较大风速出现频率显著降低, 其中 6~8 m/s 占比 9.7%, 8~10 m/s 占比 3.3%, 10 m/s 以上仅占 0.7%, 达标时段内风速超过 8 m/s 的小时数合计占比约 4.0%, 说明目视进近气象条件达标时, 地面大风出现概率较低。达标时段内平均风速为 3.2 m/s, 最大风速达 14.0 m/s。

Table 5. Wind speed distribution when meeting the meteorological conditions for visual approach at Guiyang Airport from September 2021 to August 2026

表 5. 2021 年 9 月~2026 年 8 月贵阳机场满足目视进近气象条件时的风速分布

风速分级(m/s)	出现小时数	占比
0~2	5732	21.1%
2~4	11372	41.8%
4~6	6356	23.4%
6~8	2646	9.7%
8~10	902	3.3%
>10	183	0.7%

整体而言, 达标时段内地面风以偏南风为主, 风速集中在 2~6 m/s 区间, 整体风场条件较为温和, 这一分布特征与贵阳机场地处贵州中部南北向河谷地带的局地地形密切相关, 河谷地形对近地层气流具有一定的引导和约束作用, 使得达标时段内的地面风较有利于航空器保持稳定的进近航径和目视参考。

3.3. 不满足目视进近气象条件的原因分析

3.3.1. 气象条件不达标成因分类

将目视进近气象条件不达标成因分为: (1) 仅主导能见度不足(主导能见度 < 5000 m, 但云底高 ≥ 1150 m); (2) 仅云底高不足(云底高 < 1150 m, 但主导能见度 ≥ 5000 m); (3) 主导能见度和云底高二者皆不足。统计结果见表 6。

从三类不达标成因的构成来看, 云底高不足是导致目视进近气象条件不达标的主导因素, 其影响小时数占不达标总小时数的 91.6%; 主导能见度与云底高两者均不满足的时次占 8.3%, 而仅主导能见度不足的时次占 0.1%。这表明, 贵阳机场目视进近气象条件不达标以低层云遮蔽为绝对主导成因, 主导能见度下降多作为伴随因素出现, 单独构成制约的情形极少。因此, 在目视进近气象条件的预报和服务中, 应将云底高的监测与预报作为重要关注要素, 同时对低云与低能见度相伴出现的天气形势进行重点分析。

Table 6. Composition of causes of non-compliance with the meteorological conditions for visual approach at Guiyang Airport from September 2021 to August 2026

表 6. 2021 年 9 月~2026 年 8 月贵阳机场目视进近气象条件不达标成因构成

不达标要素	小时数	占不达标小时比例
主导能见度不足	36	0.1%
云底高不足	30695	91.6%
主导能见度与云底高均不足	2782	8.3%

3.3.2. 云底高不足时的云层特征

表 7 列出了不满足目视进近气象条件时出现频率较高的云况。

从云状构成来看，雨层云(FN)是导致云底高不足的首要云状，表中所列 FN 类云况合计出现小时数占云底高不足类总时次的 16.9%，在各类云状中占比最高。雨层云云底低、云层厚，常伴随有降水，是贵阳机场冬、春季最常见的低云类型，也是制约目视进近气象条件的核心云状。积云(FC)类云况占比次之，层积云(SC)出现频率相对较低。

从云底高分布来看，FN 类云况的云底高集中在 60~600 米区间，远低于贵阳机场目视进近云底高标准。其中，云底高 500 米出现频率最高，占比达 6.0%，云底高 60 米、150 米、180 米、300 米、400 米和 600 米各高度出现频率较为接近，占比在 1.7%~2.0%之间；FC 类云况云底高为 700~800 米，合计占比 4.3%；SC 类云况云底高为 1000 米，但云量多为 8/8(满天云)，虽云底高接近标准，但满云量条件下驾驶员完全无法建立目视参考，对目视进近的制约同样严重。

Table 7. Statistics of cloud conditions in the insufficient cloud base height category for visual approach at Guiyang Airport from September 2021 to August 2026

表 7. 2021 年 9 月~2026 年 8 月贵阳机场目视进近气象条件云底高不足类云况统计

云状	云高/m	小时数/h	占云底高不足类比例
FN	60	624	1.9%
	150	584	1.7%
	180	556	1.7%
	300	613	1.8%
	400	619	1.8%
	500	1992	6.0%
	600	659	2.0%
FC	700	824	2.5%
	800	610	1.8%
SC	1000	572	1.7%

综上，预报和服务中应重点关注雨层云的云底高变化，同时对满云量层积云和云况记录异常情形保持警惕。

3.3.3. 气象条件不达标时次天气现象构成

对不达标时次所伴随的天气现象进行统计，结果如表 8 所示。从不达标时次中各类天气现象的出现频率来看，轻雾是出现频率最高的天气现象，占不达标总小时数的 9.1%，小雨次之，占 2.7%，小毛毛雨

占 0.4%，小阵雨占 1.1%。降水与轻雾叠加出现的频率同样较高，其中“小雨、轻雾”组合占 6.4%，“小毛毛雨、轻雾”组合占 1.5%，“小阵雨、轻雾”组合占 0.8%。上述含轻雾的各类天气现象合计占比达 17.8%，表明轻雾是不达标时次中最普遍的伴随天气现象，且常与降水相伴出现。雷暴类天气整体出现频率较低，雷暴、弱雷雨及弱雷雨伴轻雾合计占比仅 0.8%，反映出强对流天气虽对目视进近制约严重，但在贵阳机场不达标时次中所占比例较小。雾和霾的出现频率均较低，分别占 0.3%和 0.2%，与贵阳机场雾日较少、霾天气年发生频率较低的气候特征一致。

需要说明的是，上述各类天气现象占比之和远小于 100%，且各天气现象占比均不足 10%，说明不达标时次中，天气现象多以伴随角色出现，而非主要影响因子。

Table 8. Statistics of accompanying weather phenomena at times of non-compliance with the meteorological conditions for visual approach at Guiyang Airport from September 2021 to August 2026

表 8. 2021 年 9 月~2026 年 8 月贵阳机场目视进近气象条件不达标时次伴随天气现象统计

天气现象	小时数/h	占不达标小时比例
小毛毛雨	148	0.4%
小雨	897	2.7%
小阵雨	358	1.1%
轻雾	3051	9.1%
小毛毛雨、轻雾	489	1.5%
小雨、轻雾	2150	6.4%
小阵雨、轻雾	258	0.8%
雷暴	53	0.2%
弱雷雨	84	0.3%
弱雷雨、轻雾	93	0.3%
小冻雨、轻雾	51	0.2%
雾	94	0.3%
霾	67	0.2%

综上，预报和服务中应重点关注低云与轻雾、弱降水叠加出现的天气场景，此类场景虽以低云为不达标主因，但轻雾和降水的叠加效应可能使能见度进一步恶化，增加目视进近运行的复杂性和不确定性。

4. 结论与讨论

本文利用贵阳机场 2021 年 9 月~2026 年 8 月的常规观测资料，依据机场的目视进近气象条件标准，统计分析气象条件达标率的时间分布特征、地面风特征及不达标成因，主要结论如下。

- (1) 贵阳机场目视进近气象条件总体呈现达标日数多而达标小时数少的特征，表明目视进近气象条件具有明显的间歇性与波动性。达标率的年变化总体呈上升趋势。月季分布为“夏优冬劣”的单峰型分布，7~9 月达标率最高，12 月至次年 2 月达标率最低。逐时分布呈“午后至傍晚较高、日出前后较低”的特征，其中 17 时达标率最高，09 时最低，机场目视进近运行的平均最佳时段为 15~21 时。
- (2) 满足机场的目视进近气象条件时，机场地面风以偏南风为主，S 方位出现频率最高，风速主要集中在 2~6 m/s。整体风场条件较为温和，有利于航空器保持稳定的进近航径和目视参考。
- (3) 目视进近气象条件不达标的成因中，云底高不足占据绝对主导地位，主导能见度与云底高均不足

为次要原因,而仅主导能见度不足的时次占比很低。雨层云是导致云底高不足的首要云状,500 m 出现频率最高。天气现象方面,轻雾出现频率最高,小雨次之,表明低云与轻雾、弱降水叠加是制约目视进近的重要天气。

(4) 本文仅采用固定的标准进行统计分析,且统计方向着重探讨了目视进近气象条件的达标率,并未考虑管制间隔、跑道运行模式、空域限制等情况,后续需引入更多要素,选取更丰富的场景分析动态的判定标准,并结合实际目视进近实施情况,开展进一步分析,以更准确评估目视进近的可用窗口与运行效益。

参考文献

- [1] 孙茜. 从法规角度探讨目视飞行和目视进近的规范化发展[J]. 中国航班, 2024(29): 11-13.
- [2] 黄龙杨, 屈文秋. 基于目视和仪表混合运行的进近空域容量研究[J]. 集成电路应用, 2021, 38(6): 188-191.
- [3] 董震岭, 马涛. 福州机场实施目视间隔与进近可行性与必要性分析[J]. 中国民用航空, 2016(3): 57-59.
- [4] 高浩然, 姚永强, 王军, 等. 目视间隔和目视进近模式应用效率提升研究[J]. 民航学报, 2023, 7(4): 74-77.
- [5] 高国政, 郭峰, 吴涛. 首都机场多跑道运行进近方式适配性及优化策略研究[J]. 民航学报, 2026, 10(3): 45-51.
- [6] 朱代武, 陈九昊, 李晨鹿. 近距平行跑道目视进近条件下的碰撞风险分析[J]. 民航学报, 2018, 2(1): 26-30.
- [7] 李云, 喻晗, 罗娅, 等. 贵阳龙洞堡国际机场目视进近气象条件分析[J]. 气象水文海洋仪器, 2025, 42(4): 41-45.
- [8] 杨静, 杜小玲, 朱文达, 等. 贵州锋面雾的基本特征及静止锋进退对其生消的影响分析[J]. 暴雨灾害, 2020, 39(5): 496-507.