

文章编号: 2096-1618(2024)06-0755-06

# 2017–2021年云南沧源佤山机场雨季雾的统计特征

郭萍<sup>1,2</sup>, 李斌<sup>2</sup>, 段绍玲<sup>2</sup>, 张万诚<sup>1,3,4,5</sup>, 王佳妮<sup>2</sup>, 杨宏庆<sup>2</sup>,  
常敬波<sup>6</sup>, 杨雪<sup>6</sup>

(1. 中国气象局横断山区(低纬高原)灾害性天气研究中心, 云南昆明 650034; 2. 云南省临沧市气象局, 云南临翔 677099; 3. 中国气象局大理国家气候观测台, 云南大理 671003; 4. 云南省气象科学研究所, 云南昆明 650034; 5. 中国气象局大理山地气象野外科学试验基地, 云南大理 671003; 6. 云南机场集团有限责任公司沧源佤山机场, 云南沧源 677406)

**摘要:**为研究云南沧源佤山机场(简称佤山机场)遮挡跑道入口的雾的天气特征, 利用机场2017–2021年地面逐日气温、降水、风、湿度以及人工观测天气现象等资料和ERA5逐日再分析资料, 统计分析机场雾的时间变化、地面气象要素以及影响天气系统的基本特征。结果表明: 雾年平均日数137.2 d, 主要集中在当地雨季即6–10月(占全年的80%), 7–9月出现日数最多, 为26 d左右, 但影响航班以7月、8月和10月日数最多。在2~3 m/s的偏东风或3~5 m/s的偏西风作用下, 山谷里的低云抬升至跑道入口形成雾, 上午出现次数多于下午, 多出现在05–10时(北京时间), 持续时间短则40 min, 长则6~9 h, 影响航班的时段大部分在14时之前。主要影响天气系统为西行热带低压和西北太平洋副热带高压(简称副高)、两高(副高与青藏高原高压)辐合、低涡切变线与西南季风。

**关键词:** 佤山机场; 雾; 雨季; 水汽; 地面气象要素; 统计特征

中图分类号: P426

文献标志码: A

doi: 10.16836/j.cnki.jcuit.2024.06.016

## 0 引言

恶劣的能见度严重威胁飞机起飞和着陆的安全, 也会给目视飞行造成困难<sup>[1]</sup>。许多专家对影响机场飞行的低能见度天气做了大量研究工作, 冯彦华等<sup>[2]</sup>统计白云机场低能见度得出, 造成低能见度的天气现象有雾和雨, 春季是多发期, 4月的频数最多, 秋季最少。沈俊等<sup>[3]</sup>、慕熙昱等<sup>[4]</sup>研究表明上海虹桥机场冬季能见度最差, 出现低能见度的频数最高, 而南京禄口机场低能见度呈现双峰双谷结构, 其原因主要由雾造成。对机场低跑道视程数据研究表明, 低跑道视程季节变化基本与低能见度季节变化一致<sup>[5–7]</sup>。针对低能见度天气预报技术的研究与应用主要集中在雾多发的机场, 如: 成都双流、乌鲁木齐地窝堡、南京禄口等<sup>[8–10]</sup>。对川西盆地、首都机场、厦门机场等雾的日变化、季节变化和年际变化研究<sup>[11–14]</sup>, 雾大多出现在冬春季或秋冬季, 进一步研究大雾天气过程的形成条件<sup>[15–16]</sup>, 得出大雾出现时机场上空存在逆温层。因此, 开展影响飞机起降飞行的低能见度天气研究具有

重要的现实意义。

气象要素变化对航班运行的影响及保障, 是机场航务部门重点研究的问题<sup>[17–19]</sup>。云南机场数量较多, 航空资源富集, 但大部分机场是山地机场, 由于影响天气系统复杂, 常常因天气原因导致航班大面积延误和取消, 给飞行安全带来威胁。对丽江机场、腾冲机场、泸沽湖机场的低能见度试验研究表明, 雾形成的低能见度对高原山地机场的航班运行影响最大<sup>[17]</sup>。

沧源佤山机场(简称佤山机场)位于云南省西南部, 2016年12月通航, 属亚热带低纬高原山地季风气候, 干湿季分明, 雨季降雨日数多, 空气湿度大, 雾遮挡跑道入口的情况频繁发生, 影响飞机降落, 造成航班返航和取消, 2020年被中国民用航空西南地区管理局认定为特殊机场。过去对云南机场低能见度和雾的研究, 基本都是分析主导能见度资料(主导能见度是指观测到的达到或超过四周一半或机场地面一半都能达到的最大水平能见距离<sup>[20]</sup>), 而对云南山地机场雾的研究较少。因此有必要对佤山机场的雾天气进行统计分析, 研究其时间变化特征及影响天气系统。

收稿日期: 2024-05-20

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(42075013); 云南重点研发计划-社会发展专项资助项目(202203AC100006); 云南省科技厅科技计划资助项目(202305AM070004)

通信作者: 张万诚, E-mail: wanzhangcheng@163.com

## 1 资料和方法

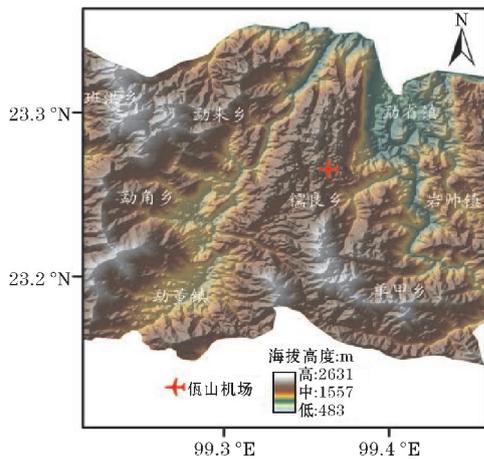
选取佤山机场基准观测站点2017–2021年的地

面逐日气温、降水、风、湿度、主导能见度以及人工观测天气现象等资料;欧洲中期天气预报中心第5代再分析资料(ERA5),空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ ,时间分辨率为1 h,要素为位势高度、风场、气温等。

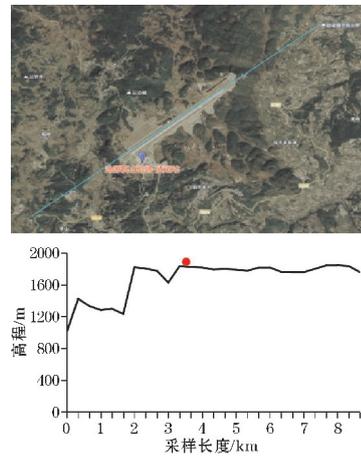
文中提到的雾,民航部门观测规定<sup>[20]</sup>:覆盖机场重要部分的雾,其余部分是晴空,多指影响机场局部区域的雾,雾中能见度 $<1000$  m,雾扩散到离地 $\geq 2$  m高度。佷山机场遮挡跑道入口的雾为人工观测天气现象,由值班员根据演变情况,记录在纪要栏。本文统计纪要栏的雾观测记录,以此分析佷山机场雾的天气特征。

## 2 雾的时间演变特征

佷山机场属山地机场,位于沧源县糯良乡南北走向



(a) 佷山机场地形图



(b) 佷山机场高程剖面(沿蓝线方向,圆点为跑道入口)

图1 佷山机场地形图和高程剖面(来源于水经注高程影像)

的得龙山上(图1a, <http://www.rivermap.cn/>),机场有一条跑道,跑道方向为磁向 $50^{\circ} \sim 230^{\circ}$ ,跑道长2600 m,北低南高。跑道延长线位于东北—西南走向的槽型地带,东北端和东南侧净空较好,北侧、西侧和西南端净空较差。沿佷山机场跑道东北—西南向作一高程剖面(图1b),可看出机场地形复杂,跑道东北端下面是高差800 m的低洼山谷,西南端是隆起的山带,东西两端地形差异大,造成雨季跑道两头不同的天气特点。雨季上午常有低云在山谷中生成并顺着山势抬升至机场道面,覆盖、遮挡东北端跑道入口,形成复杂的低能见度天气。据佷山机场统计,2017–2021年天气对航班运行造成影响共有139 d,其中雾影响119 d,对流、五边乱流、顺风超标影响20 d,雾影响占比高达86%。

### 2.1 年及月的变化

统计分析佷山机场2017–2021年雾日的变化可知,年平均日数为137.2 d,影响航班日数平均每年23.8 d。从雾日数月变化来看(图2),主要集中在6–10月,占全年的80%,与云南雨季时间基本一致<sup>[14]</sup>,11月至次年5月雾出现日数相对较少,占全年的20%。其中,7–9月出现日数最多,为25~26 d,2月和

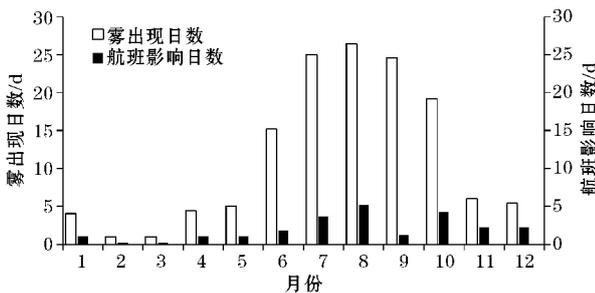


图2 佷山机场2017–2021年雾出现日数和航班影响日数月变化

3月出现日数最少,为1 d。从佷山机场2017–2021年航班影响日数月变化来看(图2),7月、8月和10月影响日数最多,为4~5 d;2月、3月影响日数最少,为0.2 d。

### 2.2 日变化

从雾出现次数的日变化来看(图3),雾的日变化明显,上午多于下午。每天03时(北京时,下同)开始出现,次数逐渐增多,呈稳步增长态势,从05时开始,雾出现次数明显增加,达20次以上,07时后迅速增加,08时达到50次以上,10时、11时超过100次,峰值出现在10时,为107.2次;11时开始下降,15时后快速减少,16时出现次数低于20次,16时后减少趋势平缓。可见,机场雾出现次数较多的时段集中在05–15时,在20次以上,08–13时出现次数大于50次,最多时段是10–11时,超过100次。

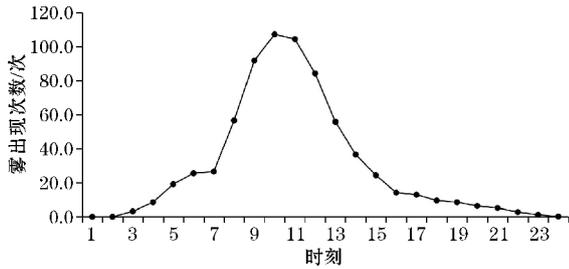


图3 佹山机场2017-2021年雾出现次数日变化

综上,佹山机场雾在6-10月出现日数较多,在15 d以上,7-9月出现日数最多为25 d以上,对航班的影响主要是在7月、8月和10月日数最多。因此,下面重点分析7-8月雾引起的机场低能见度相关的地

面气象要素特征。

### 3 地面气象要素特征

统计佹山机场2017-2021年7-8月的雾个例,选取12个个例分析(表1),雾大多出现在05-10时,持续时间短则40 min,长则6~9 h,影响航班大部分在14时之前。分析12个个例出现雾期间,佹山机场主导能见度最大到10000 m,跑道视程大部分个例大于2000 m。可见,主导能见度和跑道视程不能反映佹山机场的雨季雾天气,需用纪要栏的人工观测记录来分析。

表1 2017-2021年7-8月影响机场运行的雾个例简况表

个例编号	个例时间	雾出现时间段	影响航班情况	影响天气系统
1	2017-07-12	07:40-14:20	1个航班取消(14:25取消)	西行热带低压和副高
2	2017-07-19	07:40-13:30	1个航班返航后取消(12:42返航)	两高辐合
3	2018-07-03	06:35-07:30,08:48-16:47	1个航班返航(10:25返航)	低涡切变线与西南季风
4	2018-07-28	05:40-12:10	2个航班延误(分别于12:56,14:08起飞)	西行热带低压和副高
5	2018-08-05	05:35-06:15,07:45-14:00	2个航班取消	西行热带低压和副高
6	2019-07-05	05:48-14:34	2个航班取消(9:40取消)	西行台风低压和副高
7	2019-08-23	07:45-08:52,10:20-12:50	1个航班返航(10:05返航)	西行热带低压和副高
8	2020-07-27	10:30-15:50	2个航班返航	低涡切变线与西南季风
9	2020-08-19	05:25-13:35	1个航班取消(12:07取消)	两高辐合
10	2020-08-31	09:50-17:20	4个航班返航后取消(12:00-13:00返航)	两高辐合
11	2021-07-22	08:40-12:25,15:38-21:47	1个航班返航后取消(15:40取消)	西行热带低压和副高
12	2021-08-16	09:30-15:20,15:38-18:15	2个航班取消(17:40,17:55取消)	低涡切变线与西南季风

佹山机场(23.28°N,99.37°E,海拔1821.6 m)与沧源国家站(23.16°N,99.26°E,海拔1278.3 m)直线距离约16 km,海拔相差近600 m。表2是两地3个个例的降水量、气温等资料,分析发现两地降水量有差异,其中2020年8月19日相差约16 mm;佹山机场出现雾时影响机场局部区域,能见度<1000 m,雾扩散至

离地高≥2 m,此时沧源国家站未出现雾,最低能见度在4500~5300 m;佹山机场气温比沧源国家站低3℃左右,相对湿度多6个百分点左右。可见,因佹山机场建于糯良乡南北走向的得龙山上,海拔比沧源国家站高,周围地形复杂,气象要素的变化与沧源国家站存在明显差异。

表2 佹山机场和沧源国家站的降水量、能见度、气温、相对湿度

时间	降水量/mm		最低能见度/m	平均气温/℃		平均相对湿度/%	
	佹山机场	沧源国家站	沧源国家站	佹山机场	沧源国家站	佹山机场	沧源国家站
2017-07-12	9.9	11.3	5100	18.4	21.7	96	90
2018-07-03	8.5	5.0	5300	17.6	21.0	94	88
2020-08-19	18.4	34.5	4500	17.6	20.3	96	89

#### 3.1 降水

对12个个例的机场逐小时降水分析,雾出现之前,11个有降水,1个无降水。小雨量级的小时雨量在1 mm以下,中雨和大雨量级的小时雨量在6 mm以下。

从小时降水上看,为间歇性降水或持续性降水,持续性降水的持续时间约5 h以上。雾出现之后到影响航班之前,大部分时段仍有降水,如2019年7月5日(图4a),05:48出现雾,14:34结束,降雨从04时后开始,一直持续到21时,每小时雨量均在0.1 mm以上。

根据研究,云南的雾以辐射雾为主,主要出现在冬季,极少出现平流雾<sup>[21]</sup>。云南有降水后的辐射雾基本上降水出现在白天,夜间影响天气系统减弱后转晴,地

面辐射冷却作用使空气中的水汽达到饱和形成雾<sup>[22-23]</sup>。佷山机场的雾属于上坡雾,与辐射雾和平流雾不同。

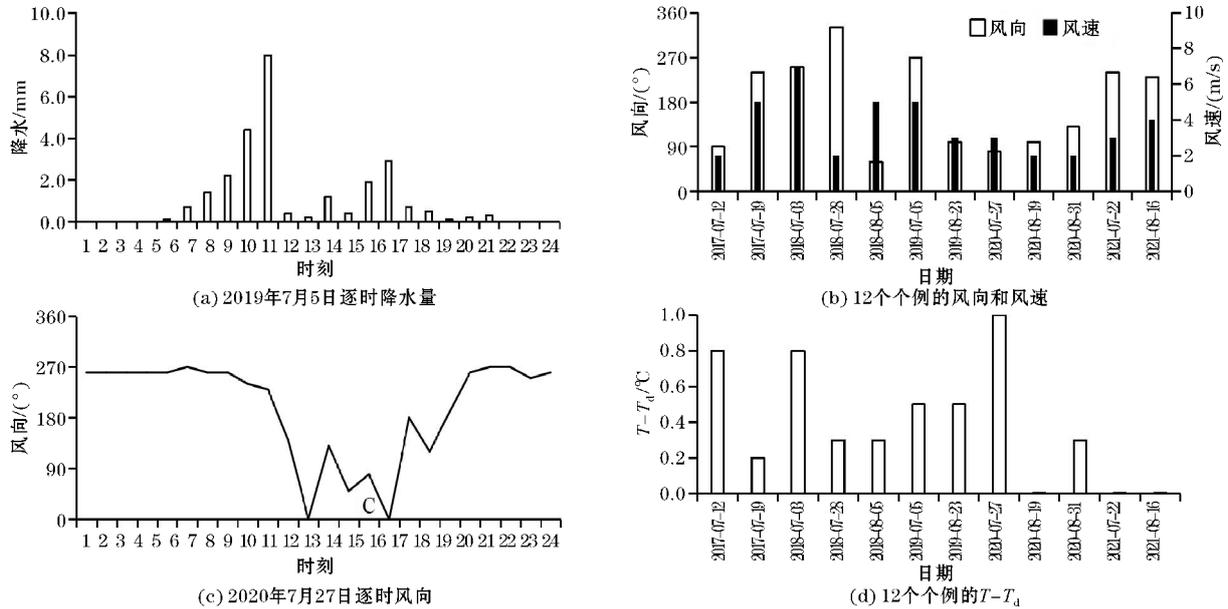


图4 雾出现时的降水量、风向风速、温度露点差

### 3.2 地面风

对12个个例的机场逐时风向和风速分析,发现雾出现时主要有两种特征。一是风向有转变,由西北风或西南风转为偏东风,偏东风的风速较小,大部分风速在2~3 m/s(图4b)。如2020年7月27日(图4c),10:30出现雾,15:50结束,期间10时风向为西南风,11时转为东南风,15时为东风,结束后17时转为南风。机场处于副高外围的偏东(东南)气流或者是受热带低压西行的偏东气流影响,气流携带大量水汽,统计表明其中7个个例的主要影响天气系统为西行热带低压和副高、两高辐合。二是风向无转变,为西南风或西风,西南风或西风的风速较大,大部分风速在3~5 m/s(图4b),这与辐射雾、平流雾发生时地面风速较小不同。机场受西南风或西风影响,且风速较大,表明西南季风较强,统计分析表明其中5个个例的主要影响天气系统为低涡切变线与西南季风、西行热带低压和副高。根据佷山机场观测经验,风向无转变,西南风或西风的风速 $\leq 5$  m/s时,东北端山谷里仍会形成低云,向上抬升遮挡跑道入口;当风速 $> 5$  m/s时,东北端山谷里的低云基本不会向上抬升。个例实况分析与观测经验吻合。

### 3.3 温度露点差与相对湿度

对12个个例的机场逐时温度露点差变化进行分

析,佷山机场7-8月湿度较大, $T-T_d$ 大部分时间在3℃以下。雾开始出现到影响航班期间, $T-T_d$ 在1℃以下,大部分时间低于0.5℃(图4d),说明空气达到饱和状态。主要有两种特征:一种是 $T-T_d$ 明显下降,有6个个例的影响天气系统为西行热带低压和副高、两高辐合、低涡切变线与西南季风;另一种是雾出现前到影响航班期间,持续低的 $T-T_d$ ,大部分时间低于0.5℃,甚至为0.0℃,另有6个个例的影响天气系统为西行热带低压和副高、两高辐合、低涡切变线与西南季风。

对12个个例的机场逐时相对湿度变化进行分析,雾开始出现到影响航班期间,相对湿度都超过90%,其中有4个个例达100%。

可见,雾出现影响飞机降落时,温度露点差在1℃以下,相对湿度超过90%,说明雾出现时湿度大。

## 4 结论与讨论

本文统计分析了2017-2021年佷山机场雾的时间变化、地面气象要素以及影响天气系统的主要特征,得出以下结论:

(1)雾年平均日数137.2 d,7-9月出现日数最多,为26 d左右,但影响航班以7月、8月和10月日数最多,为5 d左右。从日变化来看,上午出现次数多于下午,从05时开始,雾出现次数明显增加,10时达到峰

值,15时后快速减少。雨季雾多出现在05-10时,持续时间短则40 min,长则6~9 h,影响航班大部分在14时之前。

(2)分析表明机场雾出现前后,地面基本有降水。雾开始出现到影响航班期间的湿度大,相对湿度超过90%, $T-T_d$ 大部分时间低于0.5℃。雾出现时,地面风主要有两种表征,一是风向由西北风或西南风转为偏东风,风速在2~3 m/s;另一种是风向为西南风或西风,风速在3~5 m/s。

(3)主要影响天气系统为西行热带低压和副高、两高辐合、低涡切变与西南季风。

佹山机场的雾天气,是在适宜的风向风速条件下,在特殊地形影响下,东北端山谷中的低云顺着山势抬升至机场道面形成雾,遮挡跑道入口,影响飞机降落。佹山机场雨季雾的形成与辐射雾、平流雾不同,本文仅对此类特殊雾进行一些统计分析,今后在收集更多个例的基础上还需对此类机场雾形成的天气条件(成因)进行合成分析,对地形影响进行数值模拟试验,并进一步研究佹山机场雾的生消机理。

致谢:感谢云南机场集团资助项目(2021JC17)对本文的资助

## 参考文献:

- [1] 张燕光. 航空气象学[M]. 北京:中国民航出版社,2014:99-104.
- [2] 冯彦华,邓文珍. 白云机场低能见度气候的统计特征[J]. 热带气象学报,1998,14(4):369-373.
- [3] 沈俊,阎凤霞,王燕雄. 虹桥机场能见度变化特征分析[J]. 热带气象学报,2008,24(1):99-104.
- [4] 慕熙昱,徐琪,周林义,等. 基于AWOS数据的南京禄口机场低能见度特征统计研究[J]. 高原气象,2018,37(4):1129-1142.
- [5] 胡伯彦,冯雷,陈志豪. 1996-2013年上海虹桥机场低能见度及低跑道视程特征分析[J]. 气象科技,2015,43(1):151-155.
- [6] 明虎,陈丽杰,高联辉,等. 机场低能见度自动观测设备测量数据对比[J]. 应用气象学报,2015,26(6):750-758.
- [7] 赵熙,李京萌,童红梅. 济南机场低能见度和低跑道视程对比分析[J]. 干旱气象,2017,35(5):847-856.
- [8] 刘辉权,邹永成,王凌云,等. 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[J]. 成都信息工程大学学报,2023,38(4):467-471.
- [9] 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.
- [10] 余星源,聂颖,刘红年. 南京禄口机场低能见度天气统计分析及其判断模型[J]. 气象科学,2022,42(5):661-667.
- [11] 李子良,傅刚,郝丽萍. 川西盆地雾和能见度的气候特征及其对飞行的影响[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版),2007,37(2):191-196.
- [12] 陈露,顾雷. 首都机场雾过程的气候特征分析[J]. 气候与环境研究,2008,13(6):783-790.
- [13] 罗忠红,江航东,梁升,等. 2016年厦门机场一次爆发性浓雾的天气条件分析[J]. 热带气象学报,2020,36(4):499-507.
- [14] 段玮,段旭,邢冬,等. 影响云南地区适航条件的视程障碍天气气候特征[J]. 气象科技,2019,47(2):329-336.
- [15] 顾雨亭,严小杰,许东蓓,等. 山地机场一次平流雾天气演变特征及成因分析[J]. 高原山地气象研究,2023,43(1):71-80.
- [16] 岳炼,段炼. 双流机场一次低能见度天气过程分析[J]. 高原山地气象研究,2020,40(3):66-72.
- [17] 高云峰. 云南山地机场天气特征分析研究[M]. 昆明:云南人民出版社,2022:1-10.
- [18] 张序,黄昕月,兰梓洲,等. 从极端天气事件演变规律看双流机场低能见度运行安全[J]. 成都信息工程大学学报,2018,33(4):470-476.
- [19] 冯琬,陈建洲,吴俊杰,等. 中国机场雷暴特征的统计分析[J]. 成都信息工程大学学报,2016,31(1):110-115.
- [20] 中国民用航空局空管行业管理办公室. 民用航空气象地面观测规范(AP-117-TM-02R1)[Z]. 2012:34-80.
- [21] 郭荣芬,鲁亚斌,海云莎. 云南辐射雾的气候分布特征及天气成因[J]. 气象科技,2008,36(3):281-288.
- [22] 尤红,杨明,郭荣芬,等. 云南昆洛高速峨山段典型山地雾的诊断分析[J]. 气象,2008,34(8):87-94.
- [23] 朱虹,沈茜,何娟. 昭通机场两次辐射雾过程的对比分析[J]. 气象科技,2021,49(5):770-776.

## Statistical Characteristics of Rainy Season Fog at Cangyuan Washan Airport in Yunnan Province from 2017 to 2021

GUO Ping<sup>1,2</sup>, LI Bin<sup>2</sup>, DUAN Shaoling<sup>2</sup>, ZHANG Wancheng<sup>1,3,4,5</sup>, WANG Jiani<sup>2</sup>,

YANG Hongqing<sup>2</sup>, CHANG Jingbo<sup>6</sup>, YANG Xue<sup>6</sup>

(1. Research Center for Disastrous Weather in Hengduan Mountains, China Meteorological Administration, Kunming 650034, China; 2. Lincang Meteorological Office of Yunnan Province, Linxiang 677099, China; 3. Dali National Climate Observatory, China Meteorological Administration, Dali 671003, China; 4. Meteorological Science Institute of Yunnan Province, Kunming 650034, China; 5. Dali Mountain Meteorological Field Science Experiment Base, China Meteorological Administration, Dali 671003, China; 6. Yunnan Airport Group Co., LTD. Cangyuan Washan Airport, Cangyuan 677406, China)

**Abstract:** To study the weather characteristics of the fog blocking the runway entrance at Yunnan Cangyuan Washan Airport (referred to as Washan Airport), using the daily surface temperature, precipitation, wind, humidity, and artificially observed weather phenomena at the airport from 2017 to 2021 as well as daily reanalysis data from ERA5, the temporal variation of airport fog, surface meteorological elements and basic characteristics affecting weather systems are statistically analyzed. The results show: The annual average number of fog days is 137.2 days, mainly concentrated in the local rainy season from June to October (accounting for 80% of the whole year), the highest number of days occur from July to September each year which is about 26 days, but the number of days affecting flights is the largest in July, August and October. Under the influence of easterly winds ranging from 2 to 3 m/s or westerly winds ranging from 3 to 5 m/s, low clouds in the valley rise to the runway entrance to form fog, they appear more frequently in the morning than in the afternoon, mostly from 5 to 10 o'clock (Beijing time), with a duration of as short as 40 minutes and as long as 6 to 9 hours, Most of the time periods that affect flights are before 14 o'clock. The main weather systems are the westward tropical depression, the northwest Pacific subtropical anticyclone (referred to as the subtropical high), the convergence of the two highs (subtropical high and Tibetan high), the low vortex shear line and the southwest monsoon.

**Keywords:** Washan airport; fog; rainy season; moisture; surface meteorological elements; statistical characteristics