

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, [ZHAO Xi, LI Jingmeng, TONG Hongmei. Comparative Analysis of Low Visibility and Low Runway Visual Range at Jinan Airport[J]. Journal of Arid Meteorology, 2017, 35(5): 847-856], DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2017)-05-0847

## 济南机场低能见度和低跑道视程对比分析

赵熙<sup>1</sup>, 李京萌<sup>2</sup>, 童红梅<sup>3</sup>

(1. 民航山东空管分局气象台, 山东 济南 250000; 2. 民航山东空管分局进近管制室, 山东 济南 250000; 3. 湖北省黄石市气象局, 湖北 黄石 435000)

**摘要:**利用济南机场2010—2016年逐时地面观测资料和跑道视程资料,应用数理统计方法对低能见度( $VIS \leq 800$  m)、低跑道视程( $RVR \leq 550$  m)和 $\leq 400$  m RVR出现的月、日特征及其之间的关系进行对比分析。结果表明11月至次年2月为三者频发期;一天中22:00—23:00(世界时)是三者频发期,其中低RVR现象在17:00—02:00尤为突出。低能见度和低RVR持续时间和出现次数成反比。雾和冻雾是造成低能见度和低RVR的主要视程障碍现象,降水对低能见度的影响大于对低RVR的影响。11月至次年2月,两者呈显著正相关,差值较小,3—10月没有明显的相关性,差值较大。一天之中两者23:00—15:00相关性较好,差值较小,16:00—22:00没有明显的相关性,差值较大。“冲突样本”多出现在3—10月雨后有轻雾或部分雾的16:00—22:00。低能见度和低RVR与22:00的相对湿度、温度露点差、风向、前一日能见度及6 h、12 h温差呈显著性相关;用最优子集回归方法分季节建立低能见度和低RVR的预报方程,经检验,两者TS评分达到一定水平。

**关键词:**济南机场;低能见度;低跑道视程;冲突样本;对比分析

文章编号:1006-7639(2017)05-0847-10 DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2017)-05-0847

中图分类号:P457.7, V321.2<sup>+</sup>23

文献标志码:A

### 引言

在民航史上,约30%的飞行事故与天气直接或间接有关,陆瀛洲<sup>[1]</sup>指出,在所有因天气造成的飞行事故中,低能见度占49%左右。低能见度天气严重威胁航空运输安全,同时,低能见度可导致大面积航班延误或取消及大量旅客滞留,严重影响旅客出行,并给航空业造成巨大的经济损失。

在我国空中交通管制中,与能见度有关的术语主要有主导能见度(visibility,简称VIS)和跑道视程(runway visual range,简称RVR)。主导能见度是指观测点四周一半或机场一半以上视野内能达到的最大水平距离,这些区域可以是连续的也可以是不连续的,主导能见度是观测员在观测平台上以目测方式得到。跑道视程<sup>[2]</sup>是指在跑道中线上,航空器上的驾驶员能看到跑道面上的标志或跑道边界灯或中线灯的距离,跑道视程是机器计算的,它的值与大气透明度、背景亮度及跑道灯光强度有关。主导能见

度和跑道视程都是反映目标物清晰度的气象要素,但由于两者定义和观测目标不同,是两个不同的概念,不能相互代替,两者既有一定的相关性<sup>[3]</sup>,又有一定差异。为方便书写记录,本文中机场主导能见度简称机场能见度或能见度。

许多学者对能见度的气候特征和影响因子进行了深入分析<sup>[4-9]</sup>,范引琪等<sup>[10]</sup>研究发现1980—2003年京津冀大部分地区能见度呈下降趋势;赵习方等<sup>[11]</sup>指出北京地区秋冬季是低能见度的高发期,一天之中清晨能见度最低;王晓敏等<sup>[12]</sup>分析指出能见度与相对湿度呈指数函数关系,与 $PM_{2.5}$ 和 $PM_{10}$ 浓度呈幂函数关系;宋徽等<sup>[13]</sup>发现天津“较差”能见度出现频率呈上升趋势,能见度与相对湿度呈负相关,与风速呈正相关,能源消耗的增加致使污染物增多,对能见度造成很大影响。赵玉广等<sup>[14]</sup>、吕博等<sup>[15]</sup>对华北平原持续性大雾过程的特征及成因进行了分析;黄继雄等<sup>[16]</sup>研究了首都机场浓雾中能见

收稿日期:2017-03-06;改回日期:2017-05-21

作者简介:赵熙(1991—),女,山东菏泽人,助理工程师,主要从事民航天气观测与分析工作。E-mail:sunnyzhaoxi@126.com。

度突发性振荡及其演变规律。民航气象工作者对机场能见度的研究主要集中在气候特征方面,如李健等<sup>[17]</sup>指出郑州机场年平均能见度呈上升趋势,低能见度的天数呈下降趋势;沈俊等<sup>[18]</sup>在研究上海虹桥机场能见度特征时发现,虹桥机场能见度呈下降趋势,但低于着陆标准的能见度发生频数却在逐渐减少;胡迪等<sup>[19]</sup>研究发现雾是造成武汉天河机场低能见度的最主要原因,春、秋、冬三季低能见度的持续时间以 2~4 h 居多。

以上研究主要针对单一能见度分析,对跑道视程,特别是跑道视程与能见度的对比分析较少<sup>[20-21]</sup>,对华北地区跑道视程的分析更少。华北地区是中国四大灰霾污染严重区域之一,同时也是中国民航飞行流量最大的区域之一,低能见度和低 RVR 对于航班正点、飞行安全、航空公司制订经济合理的飞行计划及管制员的指挥压力都影响巨大。本文选取华北地区雾霾典型性城市之一的济南,对低能见度和低 RVR 在不同时间尺度下出现的频次特征及两者的相关性和差异进行对比分析,找出其规律和特征,以期为提高机场运行效率、保障飞机安全运行提供参考。

## 1 济南机场概况

济南遥墙国际机场位于山东省西北部(36°51'25"N,117°12'55"E),于 1992 年 7 月 26 日建成并正式投入使用,海拔高度为 23.3 m。机场地势平坦,西北部临黄河,黄河距离机场仅 4 km,东边有一大型水体白云湖,白云湖面积 17.4 km<sup>2</sup>,距离机场 12 km,机场南部 20 km 为丘陵山区地带。目前机场有跑道、滑行道各一条,跑道全长 3 600 m,宽度 45 m,跑道磁航向 5°~185°,跑道的两头和中间均配备了 RVR 探测仪器,其两端为大气透射仪,中间为前向散射仪。济南遥墙机场为双向 I 类精密进近 4E 类机场,主要运行 A/B 类飞机,最低运行标准的起飞最低标准是能见度(VIS)不低于 800 m 或跑道视程(RVR)不低于 400 m,着陆最低标准是 VIS 不低于 800 m 或 RVR 不低于 550 m。

## 2 资料与方法

### 2.1 资料来源

济南遥墙机场 1992—2009 年为供航观测,不实施全天候 24 h 观测。2010 年之后,实施 24 h 人工观测。为保证观测资料的连续性与稳定性,选取 2010—2016 年 24 h 逐时主导能见度值与跑道视程值,主导能见度为人工地面观测结果,跑道视程值由

跑道端探测仪器测得,通过自动观测系统(automated weather observing system,简称 AWOS)输出。根据民航局 57 号令规定<sup>[22]</sup>,航空器 I 类精密进近着陆标准是能见度不小于 800 m 或跑道视程不小于 550 m,将 VIS≤800 m 定义为低能见度,RVR≤550 m 定义为低跑道视程(低 RVR)。

### 2.2 分析方法

由于所选样本具有数目较大、分辨率高、连续性好和稳定性强的特点,利用数理统计方法,分析不同时间尺度下低能见度和低 RVR 出现频次的变化特征,并对两类数据在同一时次的差值、差值的算术平均、差值的平均差和相关系数的月、日变化特征进行对比分析。

差值的算术平均值:设  $X_i$  为第  $i$  次能见度值, $Y_i$  为第  $i$  次 RVR 值,两组样本的差值为  $A_i = X_i - Y_i$ ,差值的算术平均值  $\bar{A} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_i$ ,其反映两种观测值的系统性偏差<sup>[23]</sup>。差值的平均差:差值  $A_i$  序列的平均差为:  $V_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |A_i - \bar{A}|$ ,其反映差值离散度的大小, $n$  为两组样本的样本数。

## 3 结果分析

### 3.1 低能见度和低 RVR 的月出现频次对比

图 1 为低能见度、低 RVR 和 ≤400 mRVR 出现频次的月变化。可以看出,7 a 内低能见度次数最多(1 274 次),低 RVR 次之(985 次),≤400 mRVR 最少(780 次),3 条曲线均呈以夏季为中心的不对称“U”型分布,其中低 RVR 和 ≤400 mRVR 变化规律比较一致。低能见度 1 月达到峰值,7 a 出现 341 次,占其总次数的 26.8%,低 RVR 和 ≤400 mRVR 则在 12 月达到峰值,分别出现 210 次和 178 次,占各自总次数的 21.3% 和 22.8%;三者均在 3 月出现次数最少,占各自总次数的 2% 以下。

3—6 月为低能见度和低 RVR 现象出现较少,7—10 月出现次数逐渐增加,11 月至次年 2 月为高发阶段。其中低能见度、低 RVR 和 ≤400 mRVR 在 3—6 月出现的次数分别为 79、96 和 72 次,占各自总次数的 6.2%、9.7% 和 9.2%;7—10 月出现的次数开始增多,分别为 295、350 和 253 次,占各自总次数的 23.2%、35.5% 和 32.4%,低 RVR 的比率高于低能见度的比率;11 月至次年 2 月出现的次数分别是 900、539 和 455 次,占各自总次数的 70.6%、54.7% 和 58.3%,低能见度次数迅速增多,是 7—10 月的 3.1 倍。值得注意的是,3—10 月低能见

度的次数并不比低 RVR 和  $\leq 400$  m RVR 次数多,反而是低 RVR 的次数最多。

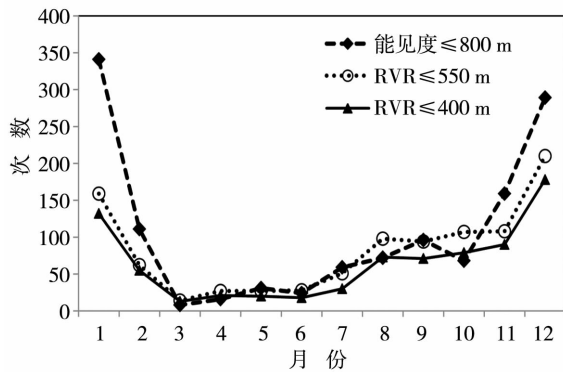


图1 2010—2016年济南机场低能见度、低RVR和 $\leq 400$  m RVR出现次数的月变化  
Fig.1 The monthly variation of occurring times of low visibility, low RVR and RVR less than 400 m at Jinan Airport during 2010 - 2016

### 3.2 低能见度和低RVR次数的日变化特征

由图2可知,低RVR和 $\leq 400$  m RVR是以22:00(世界时,下同)为中心的拱形分布,低能见度是以23:00为中心的拱形分布。12:00以后低能见度和低RVR出现次数开始缓慢增多,17:00之后大幅度增加,17:00—02:00为高频时段,该时段低能见度、低RVR和 $\leq 400$  m RVR出现的次数分别为840、816和649次,占各自总次数的65.9%、82.8%和83.2%。说明低能见度和低RVR均集中出现在17:00—02:00,低RVR的比率高于低能见度的比率,即17:00—02:00低RVR的影响逐渐凸显,这和胡伯彦等<sup>[21]</sup>的研究结果“上海虹桥机场19:00—00:00低RVR出现次数占其总次数的比率高于低

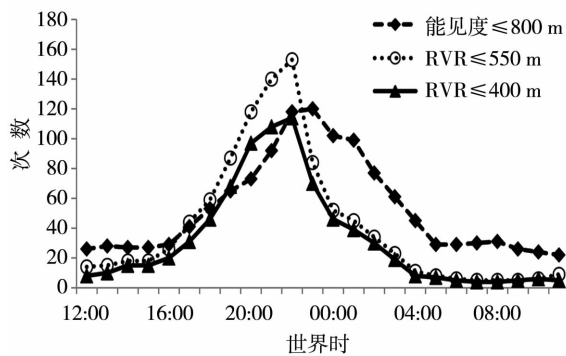


图2 2010—2016年济南机场低能见度、低RVR和 $\leq 400$  m RVR出现次数逐时变化  
Fig.2 The hourly variation of occurring times of low visibility, low RVR and RVR less than 400 m at Jinan Airport during 2010 - 2016

能见度比率”基本一致。03:00以后低能见度和低RVR出现次数迅速减少,04:00—12:00出现的次数最少。

进一步研究发现,12:00—17:00低能见度的出现次数略高于低RVR和 $\leq 400$  m RVR的次数;18:00开始低RVR的次数开始明显增多,18:00—22:00,低能见度、低RVR和 $\leq 400$  m RVR分别出现401、557和433次,低RVR出现次数多于低能见度次数,这个时段低RVR影响最突出;23:00以后低能见度次数明显多于低RVR和 $\leq 400$  m RVR的次数。

### 3.3 持续时间的比较

表1列出低能见度、低RVR和 $\leq 400$  m RVR各持续时间段出现的次数及频率。可以看出,低RVR和 $\leq 400$  m RVR在各持续时间段出现的频率接近,两者持续的时间 $\leq 2$  h的次数最多,占各自的58.5%和58.8%,随着持续时间的延长,出现次数逐渐减少。低能见度和低RVR的持续时间分布略有不同,低能见度的持续时间以1~2 h、3~5 h、6~10 h为主,且在这3个时间段内出现的次数差异不明显,持续时间大于10 h的低能见度出现次数多于低RVR出现次数。2010—2016年低能见度最长持续时间为94 h 50 min,出现在2011年12月3日00:33至6日23:23,该过程中低RVR最长持续27 h, $\leq 400$  m RVR最长持续26 h。在持续的雾和霾天气中,低RVR间歇性出现,RVR白天好转,夜间再逐渐下降,20:00至次日00:00低RVR出现频率最高,这种现象多发生在冬季静稳天气形势下。

进一步统计低能见度、低RVR和 $\leq 400$  m RVR在每个月的持续时间(表略),发现3—10月三者持续时间均较短,分别以持续3~5 h、1~3 h和1~2 h为主;11月至次年2月持续时间较长,分别以5~10 h、3~10 h和3~8 h居多,且超过10 h的情况均出现在11月至次年2月。

### 3.4 造成低能见度和低RVR的天气现象

造成济南机场低能见度和低RVR的视程障碍现象有多种(表2):雾(FG)、冻雾(FZFG)、轻雾(BR)、局部雾(包括部分雾PRFG、碎雾BCFG、浅雾MIFG)、霾(HZ)和烟(FU)。其中雾和冻雾是造成低能见度和低RVR的主要视程障碍现象,轻雾和局部雾对RVR的影响较大。霾和烟导致的低能见度和低RVR次数较少,一般发生在10月至次年2月。

强降水会引起低能见度和低RVR现象,这种情况占12.4%,主要发生在夏季或冬季,当出现短时强降水或强降雪时,常伴有大风、沙尘和低云天气,使能见度或RVR剧降;另外当有雾发生,同时伴有

表 1 低能见度、低 RVR 和  $\leq 400$  m RVR 持续时间对比

Tab. 1 The contrast of duration time of low visibility, low RVR and RVR less than 400 m

持续时间/h	低能见度		低 RVR		$\leq 400$ m RVR	
	次数	频率/%	次数	频率/%	次数	频率/%
1~2	69	31.9	172	58.5	134	58.8
3~5	66	30.6	71	24.1	51	22.4
6~10	56	25.9	36	12.2	30	13.2
11~20	18	8.3	12	4.1	11	4.8
21~40	5	2.3	3	1.0	2	0.9
>40	2	0.9	0	0	0	0

表 2 济南机场低能见度、低 RVR 和  $\leq 400$  m RVR 出现时的天气现象

Tab. 2 The weather phenomena under low visibility, low RVR and RVR less than 400 mm at Jinan Airport

天气现象	低能见度		低 RVR		$\leq 400$ m RVR	
	次数	比例/%	次数	比例/%	次数	比例/%
雾/冻雾	1 033	81.1	626	63.5	559	71.7
轻雾/轻雾和局部雾	0	0	310	31.5	195	25.0
降水和视程障碍现象	209	16.4	45	4.6	26	3.3
霾	22	1.7	3	0.3	0	0
烟	10	0.8	1	0.1	0	0

弱降水如毛毛雨、小阵雨、雨夹雪和米雪,此时也会出现低能见度和低 RVR 现象。降水和视程障碍现象共同作用造成低能见度的频率有 16.4%,造成低 RVR 和  $\leq 400$  m RVR 的频率只有 4.6% 和 3.3%,可见降水导致的低能见度现象远多于低 RVR。

绝大部分低能见度和低 RVR 是由雾天气造成的<sup>[24]</sup>。3—4 月为冬夏交替之际,大气层结由稳定层结向不稳定层结转化,近地面层的扰动加强,有利于低层水汽和污染物向上扩散,同时冷暖空气交替频繁,南北风速较大,有利于物质水平输送,降水稀少,空气干燥,不利于雾的形成。5—6 月气温升高,降水较少,属于干热型天气,缺少形成雾的物质条件。因此 3—6 月是能见度最好的阶段,该时段低能见度和低 RVR 主要由雨后辐射雾造成,次数较少。7—8 月虽然气温较高,但降水也最多,降水造成低能见度和低 RVR 现象的次数增多,同时,雨后的第二天早晨,由于近地面层湿度较大,辐射冷却后空气达到饱和,形成辐射雾,这种辐射雾持续时间较短,日出后随着气温升高而很快消散。9—10 月是夏季风向冬季风转换的季节,虽然降水逐步减少,但冷空气活动开始增多,气温下降明显,后半夜到早晨空气更容易达到饱和而产生辐射雾,且持续时间较夏季长;11 月至次年 2 月是雾和霾天气的多发季节,当

中纬度环流平直或受弱高压脊控制时,冷空气活动频繁但势力较弱,地面风速较小,不利于污染物和水汽的水平扩散,另外由于冬季夜间时间较长,辐射降温明显,早晨气温较低,致空气饱和而形成雾;同时也易形成辐射逆温,使大气层结更加稳定,空气湍流运动受到抑制,不利于空气的垂直交换,使水汽和污染物积聚在近地面层附近,二者相互作用,水汽是污染物的载体,污染物为水汽凝结提供更多的凝结核,这样有利于雾和霾天气的形成和维持,从而降低了大气的透明度。白天由于气温升高,相对湿度减小,由雾转为霾,后半夜再由霾逐渐转为雾,雾和霾交替出现,在静稳天气下,逆温层有时白天也不消散,有利于雾和霾天气的维持,造成持续的低能见度和低 RVR,影响范围大,对航空运输有严重影响。

由于济南机场西北临黄河,东依白云湖,当地面吹西北风或东北风时,将河面或湖面上的湿润空气向机场输送,增加了机场附近近地面空气湿度,对雾的形成有一定的作用。

#### 4 低能见度和低 RVR 的相关性和差值分析

这里低能见度和低 RVR 样本是指:若某一时次

满足  $VIS \leq 800$  m 或  $RVR \leq 550$  m 之一的(包括同时满足),统计该时次对应的  $VIS$  和  $RVR$  为一组样本,7 a 中共有 1 617 组样本。分别计算低能见度和低  $RVR$  逐月、逐时的相关系数,差值的算术平均及差值平均差,及“冲突样本”的比例,为了分析差值的大小和倾向,再计算低能见度和低  $RVR$  “差值  $\leq 0$ ”样本比例、“差值  $\leq 0$ ”和“差值  $> 0$ ”样本差值的算术平均和差值平均差。低能见度和低  $RVR$  部分样本差值很大,如有些时次能见度较好甚至很好,但  $RVR$  值很低。本文将  $VIS > 800$  m 同时  $RVR \leq 550$  m,或  $VIS$  和  $RVR$  之差大于等于 500 m 这类样本定义为“冲突样本”,找出“冲突样本”的规律和特点,并浅析其产生原因。

#### 4.1 逐月低能见度和低 $RVR$ 的相关性和差值对比分析

由表 3 看出:12 月至次年 1、2 月样本数较大,低能见度和低  $RVR$  的相关性最好,相关系数分别为 0.37、0.72 和 0.6,通过  $\alpha = 0.001$  的显著性水平;其次是 11 月,相关系数为 0.22,通过  $\alpha = 0.01$  的显著

性水平。3—10 月,两组样本之间的相关系数较小,没有通过显著性水平。

“冲突样本”在 3—10 月占较大比例,为 28.3% ~ 70.6%,11 月开始减少,占 16.4%,12 月至次年 2 月所占比例较小,为 2.3% ~ 7.7%。与此相对应,3—10 月两组样本差值的算术平均值(291 ~ 858 m)和差值平均差(451 ~ 795 m)均较大;11 月开始减小,12 月至次年 2 月,差值的算术平均值转变为负值或较小的正值(-77 ~ 9 m),差值平均差为 155 ~ 218 m,较 3—10 月明显减小,说明 12 月至次年 2 月低能见度和低  $RVR$  两组数值差异不大。

进一步分析发现,低能见度和低  $RVR$  “差值  $\leq 0$ ”的样本比例与“冲突样本”的比例呈反位相变化,当“冲突样本”比例较小时,低能见度和低  $RVR$  “差值  $\leq 0$ ”的样本偏多。除去“冲突样本”,分别计算低能见度和低  $RVR$  “差值  $\leq 0$ ”和“差值  $> 0$ ”样本差值的算术平均和差值平均差,结果均较小,即两组样本的差异并不明显,较大差值主要由“冲突样本”所致。

表 3 低能见度和低  $RVR$  各月相关系数及参数分析

Tab.3 The correlation coefficients between low visibility and low RVR in each month and their parameters statistics

月份	样本数	相关系数	差值算术平均/ m	差值平均差/ m	冲突样本比例/ %	“差值 $\leq 0$ ”比例/ %	“差值 $\leq 0$ ”平均值/ m	“差值 $> 0$ ”平均值/m (剔除冲突样本)
1	349	0.72	-77	155	2.3	71.9	-168	102
2	116	0.60	9	170	4.3	67.2	-117	112
3	17	-0.13	541	487	70.6	17.6	-500	63
4	35	-0.12	858	795	54.3	22.9	-81	217
5	46	0.01	371	628	28.3	47.8	-205	223
6	40	0.10	612	605	47.5	20.0	-156	206
7	88	-0.07	291	451	31.8	43.2	-151	174
8	136	-0.07	605	689	48.5	24.3	-282	147
9	147	-0.11	477	702	37.4	41.5	-214	181
10	138	-0.04	706	701	55.1	26.8	-170	174
11	195	0.22	121	347	16.4	62.4	-169	162
12	310	0.37	2	218	7.7	64.5	-167	99

#### 4.2 逐时低能见度和低 $RVR$ 的相关性和差值对比分析

由表 4 看出,23:00 和 00:00 - 11:00 低能见度和低  $RVR$  相关性较好,通过了  $\alpha = 0.001$  的显著性水平,12:00 - 16:00 两者相关性较差,仅通过了  $\alpha = 0.1$  的显著性水平,17:00 - 22:00 两组样本没有

相关性,是两组数值大小相冲突的时段。

00:00 - 23:00 “冲突样本”的比例随时间先增多后减少,可分为 4 个阶段:00:00 - 10:00 几乎没有“冲突样本”出现;11:00 - 15:00 “冲突样本”所占比例较小,为 4.3% ~ 12.9%;16:00 开始大幅增加,16:00 - 22:00 “冲突样本”所占比例较大为

21.1%~49.6%,20:00 达到最高;23:00 明显减少,即 16:00-22:00 最容易出现“冲突样本”。

在几乎没有“冲突样本”出现的 00:00-10:00,低能见度和低 RVR 差值的算术平均值皆为负值,差值平均差为 99~191 m;在“冲突样本”比例较低的 11:00-15:00,差值的算术平均值为负值或较小的正值,差值平均差略有增加,为 189~279 m;16:00-22:00 随着“冲突样本”的大幅增加,差值的算术平均值为较大的正值,差值平均差也达到最大值,为 361~731 m;23:00 差值算术平均和差值平均差迅速减小。11:00、16:00、23:00 为转折点。

#### 4.3 “冲突样本”与气象因子的关系

“冲突样本”主要由视程障碍现象引起,视程

障碍现象与气象要素有密切关系,结合“冲突样本”在各月所占比例,分别统计 3-10 月和 11 月至次年 2 月“冲突样本”发生时的气象要素及天气现象。图 3 是“冲突样本”发生时湿度和总云量的分布。可以看出,发生“冲突样本”时相对湿度基本都在 90% 以上,其中 3-10 月相对湿度为 90%~95% 时的发生频率为 52.1%,略大于相对湿度 95%~100% 时的发生频率(46.2%),而 11 月至次年 2 月相对湿度为 95%~100% 时“冲突样本”发生频率为 66.7%,远大于相对湿度为 90%~95% 时的发生频率(25.6%),说明 11 月至次年 2 月发生“冲突样本”对相对湿度的要求更高。

表 4 低能见度和低 RVR 两者逐时相关系数及参数分析

Tab. 4 The hourly correlation coefficients between low visibility and low RVR and their parameters statistics

时间	样本数	相关系数	差值算术	差值	冲突样本	“差值≤0”	“差值≤0”	“差值>0”
			平均/ m	平均差/ m		比例/ %	比例/ %	平均值/ m
00:00	102	0.64	-121	191	1.0	70.6	-217	105
01:00	99	0.76	-119	137	0	82.8	-164	97
02:00	77	0.90	-81	99	1.3	85.7	-116	93
03:00	61	0.91	-114	109	0	88.5	-141	89
04:00	45	0.85	-106	104	0	86.7	-132	67
05:00	29	0.90	-112	104	0	93.1	-125	63
06:00	29	0.90	-138	106	0	93.1	-156	113
07:00	30	0.74	-203	155	0	90.0	-234	83
08:00	31	0.83	-216	154	0	93.5	-235	63
09:00	26	0.85	-219	132	0	100.0	-219	无
10:00	24	0.84	-212	148	0	91.7	-237	63
11:00	23	0.63	-169	189	4.3	87.0	-233	113
12:00	28	0.33	16	272	10.7	67.9	-184	163
13:00	29	0.25	25	279	6.9	82.8	-143	100
14:00	29	0.44	75	248	6.9	72.4	-93	167
15:00	31	0.29	81	244	12.9	61.3	-104	119
16:00	38	0.31	155	361	21.1	47.4	-189	165
17:00	58	0.17	345	520	34.5	36.2	-183	116
18:00	79	0.17	542	692	35.4	36.7	-108	160
19:00	111	0.10	656	688	45.9	24.3	-105	149
20:00	139	0.10	732	731	49.6	20.1	-144	154
21:00	169	0.04	651	699	47.3	22.5	-169	142
22:00	193	0.07	474	562	40.4	23.3	-225	158
23:00	137	0.39	47	250	13.1	46.0	-223	134

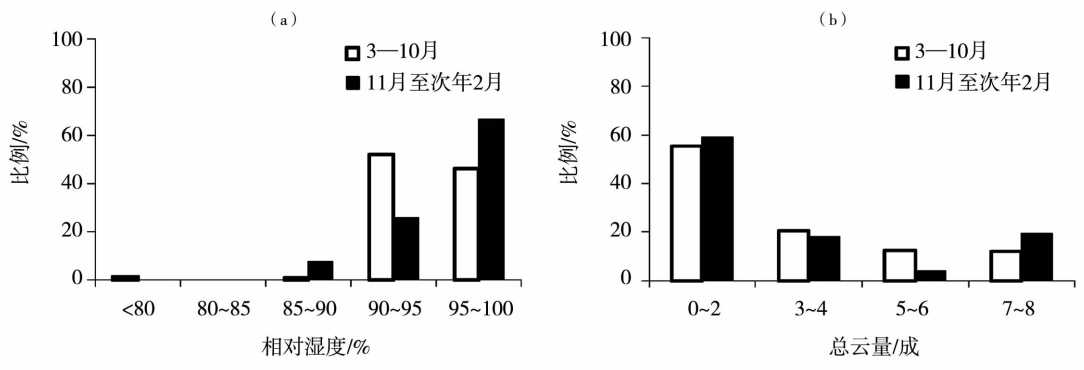


图 3 济南机场“冲突样本”时相对湿度(a)和总云量(b)分布  
 Fig.3 The distribution of relative humidity (a), total cloud amount (b) under “conflict sample” condition at Jinan Airport

云量与“冲突样本”发生的比例呈反位相变化,在少云(0~2成)时发生“冲突样本”的频率最大,3—10月时占“冲突样本”总数的55.2%,11月至次年2月时占总数的59%。进一步研究发现,总云量为0~4成时中云族和高云族占了96%,多是高积云和卷云。充足的水汽条件,同时天空无云或有少量的高积云卷云,为发生辐射雾提供了良好的条件,而由于机场内部自然环境和风向风速的影响,起初形成的辐射雾多是成片、成块的,因而造成跑道上仪器测得的RVR值和四周的主导能见度值有较大差距。当块状的辐射雾范围扩大连成一片,四周的主导能见度值下降,和RVR值越来越接近,“冲突样本”消失。

表5为“冲突样本”出现时的天气现象,引起“冲突样本”的天气现象依次是轻雾(BR)、轻雾与局部雾(包括PRFG、BCFG、MIFG)混合体、雾(FG)(包括冻雾FZFG),其中3—10月轻雾和轻雾与局部雾混合体为引起“冲突样本”的主要天气现象,占全部次数的83%;11月至次年2月“冲突样本”发生时轻雾占53.8%,轻雾与局部雾混合体和有雾时出现“冲突样本”的比例相差不明显;霾(HZ)、烟(FU)、雨(SHRA/RA)对“冲突样本”的影响很小,

均在2%以下。这是由于3—10月较11月至次年2月降水多,雨后空气湿度大,另外气温升高使机场草地上植物的呼吸作用和蒸腾作用加大,将更多的水汽排到空气中,增加了近地层空气的湿度,容易在机场内部形成一团一团的碎雾(BCFG),或者距离地面2m以下的浅雾(MIFG),或者在某一部位形成部分雾(PRFG)。

降水虽然不是引起“冲突样本”的主要天气现象,然而“冲突样本”与降水有密切关系(表略)。3—10月“冲突样本”当日白天有降水的频率为44.1%,前一日有降水的频率为18.8%,也就是说3—10月“冲突样本”有62.9%发生在降水之后;而11月至次年2月降水后只有25.6%,74.4%发生在无降水的情况下。

## 5 预报模型的建立

### 5.1 资料的选取和处理

按春(3—5月)、夏(6—8月)、秋(9—11月)、冬(12月至次年2月)4个时段分类,取2010—2015年逐日能见度和RVR,若某一天只要有一个时次出现低能见度(或低RVR),值为1,否则为0,共有8个预报量序列。

表 5 济南机场“冲突样本”时各天气现象的次数和所占比例  
 Tab.5 The times and its proportion of different weather phenomena under “conflict sample” conditions at Jinan Airport

天气现象	次 数			比例/%		
	3—10月	11—2月	全年	3—10月	11—2月	全年
轻雾	139	42	181	48.3	53.8	49.5
轻雾+部分雾/碎雾/浅雾	100	18	118	34.7	23.1	32.2
雾/冻雾	42	17	59	14.6	21.8	16.1
其他	7	1	8	2.3	1.3	2.2

根据低能见度的形成机制,选取对能见度有影响的要素为预报因子,取 22:00 相对湿度、温度露点差、风速、风向、温度、气压,12:00 总云量和 6 h、12 h、24 h 温度差及气压差,考虑大雾天气的连续性,引进前一日的能见度等,共 23 个因子。其中风向做 0,1 化处理,偏北风、静风及风向不定时记为 1,否则为 0。

样本的筛选,对 22:00 相对湿度小于 90% 和风速大于  $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的样本进行消空,然后对以上因子进行相关分析,取通过  $t$  检验( $\alpha = 0.01$ )的作为初选预报因子。

## 5.2 预报方程的建立

最优子集法是对自变量各种不同组合所建立的回归预报方程进行比较,进而从全部组合中挑选出一个最优回归方程。用最优子集回归法建立低能见度和低 RVR 的四季预报方程,表 6 为方程中预报因子与能见度的相关系数。

表 6 说明低能见度的发生与 22:00 的相对湿度、温度露点差、风向及前一日能见度和 6 h、12 h 温差有很好的相关性,秋冬季节比春夏季节相关性

更好。方程以冬季低能见度为例说明:

$$\text{VIS}_{\text{win}} = -6.5184 + 0.071 X_1 + 0.1427 X_2 + 0.04 X_3 + 0.1195 X_4$$

方程的复相关系数为 0.60,标准误差 0.39。式中:  $\text{VIS}_{\text{win}}$  为冬天低能见度;  $X_1$  为 22:00 相对湿度;  $X_2$  为 22:00 风向;  $X_3$  为 6 h 温差;  $X_4$  为前一日能见度。以上因子物理意义明确,能够较全面地诠释各气象要素对低能见度的影响。

## 5.3 预报方程检验

用 2016 年因子代入预报方程进行检验,结果如表 7。除低能见度春、夏季 TS 评分较低外(2016 年春、夏季只出现 1~2 个低能见度日,不能完全反映预报模型的优劣),低能见度秋冬季及低 RVR 的四季预报 TS 评分均高于 33.3%,空报率高于漏报率,对比《国家气象中心现代化实施方案(2015—2020)》预期目标:2017 年 24 h 雾、霾预警 TS 评分达到 28% 和 30%,表明该预报模型有一定的预报能力。实际工作中,预报值对低能见度的预报有重要的参考价值,在分析天气形势的基础上,可有效降低空报率。

表 6 气象因子与能见度的相关系数

Tab. 6 The correlation coefficients between meteorological factors and visibility

季节	22:00 相对湿度	22:00 温度露点差	前一日能见度	22:00 风向	6 h 温差	12 h 温差	24 h 温差
春	0.225 <sup>b</sup>	-0.177 <sup>a</sup>	0.124 <sup>a</sup>	0.150 <sup>a</sup>	0.135 <sup>a</sup>	—	—
夏	0.188 <sup>c</sup>	-0.184 <sup>c</sup>	0.152 <sup>b</sup>	0.088 <sup>a</sup>	0.178 <sup>c</sup>	0.149 <sup>b</sup>	—
秋	0.169 <sup>b</sup>	-0.176 <sup>c</sup>	0.167 <sup>b</sup>	—	—	0.215 <sup>c</sup>	—
冬	0.459 <sup>c</sup>	-0.437 <sup>c</sup>	0.426 <sup>c</sup>	0.158 <sup>a</sup>	0.351 <sup>c</sup>	0.323 <sup>c</sup>	0.291 <sup>c</sup>

注: a, b, c 表示相应值分别通过 0.1、0.01、0.001 显著性水平;—表示没有通过显著性水平

表 7 2016 年预报方程的检验

Tab. 7 Inspection of forecast equation in 2016

单位: %

季节	低能见度			低 RVR		
	TS 评分	漏报率	空报率	TS 评分	漏报率	空报率
春	16.7	0	83.3	33.3	0.0	66.7
夏	25.0	50	66.7	33.3	0.0	66.7
秋	50.0	0	50.0	75.0	0.0	25.0
冬	56.0	0	44.0	41.7	14.3	54.5

## 6 结论

(1) 低能见度和低 RVR 的月变化是以夏季为中心的不对称“U”型分布, 11 月至次年 2 月是频发

阶段, 3—6 月较少出现, 7—10 月逐渐增加。

(2) 低能见度和低 RVR 在 22:00—23:00 出现最多, 18:00—22:00 低 RVR 出现次数多于低能见度。

(3) 低 RVR 持续时间以 1~2 h、3~5 h 较多,



低能见度持续 1~2 h、3~5 h、6~10 h 的出现次数较多。

(4)造成低能见度的视程障碍现象主要是雾和冻雾,造成低 RVR 的视程障碍现象有雾、冻雾、轻雾和局部雾。二者均与 22:00 的相对湿度、温度露点差、风向、前一日能见度及 6 h、12 h 温差呈显著性相关。

(5)11 月至次年 2 月低能见度和低 RVR 呈显著正相关,差值的离散度较小;3—10 月两者相关性较差,差值较大,“冲突样本”多出现在雨后有轻雾和轻雾与部分雾混合的 16:00—22:00。

(6)用最优子集回归方法建立的预报方程对低能见度和低 RVR 有较好的预报效果。

此预报模型未能分型建立预报方程,致使入选样本范围较大,空报率较高。今后应建立多种预报模型进行对比,并建立集合预报方程,以期提高方程的稳定性。

#### 参考文献:

- [1] 陆瀛洲. 高空高速飞行气象条件[M]. 北京:气象出版社,1994: 153 - 155.
- [2] 中国民用航空总局空中交通管理局. 跑道视程使用规则:MD - TM - 2000 - 47[S]. 北京:中国民用航空总局,2000.
- [3] 朱蕾,朱国栋. SVM 方法在机场跑道视程预报中的应用[J]. 暴雨灾害,2010,29(2):171 - 175.
- [4] 付桂琴,张迎新,张庆红,等. 河北省低能见度事件特征分析[J]. 气象,2013,39(8):1042 - 1049.
- [5] 蔡子颖,刘爱霞,韩素芹,等. 天津低能见度特征初探[J]. 气象,2014,40(1):114 - 118.
- [6] 郝天依,王式功,尚可政,等. 环渤海地区大气低能见度气候特征及影响因子分析[J]. 气象,2012,38(9):1087 - 1095.
- [7] 王淑英,张小玲,徐晓峰. 北京地区大气能见度变化规律及影响因子统计分析[J]. 气象科技,2003,31(2):109 - 114.
- [8] 宋军,孙丽娟,孙贞,等. 1980—2013 年大连市能见度的变化特征及影响因子[J]. 气象与环境科学,2016,39(4):98 - 103.
- [9] 周巧兰,束炯,王坚捍. 上海地区低能见度特征分析[J]. 气象与环境科学,2009,32(2):26 - 29.
- [10] 范引琪,李春强. 1980—2003 京津冀地区大气能见度变化趋势研究[J]. 高原气象,2008,27(6):1392 - 1400.
- [11] 赵习方,徐晓峰,王淑英,等. 北京地区低能见度区域分布初探[J]. 气象,2002,28(11):55 - 58.
- [12] 王晓敏,韩军彩,陈静,等. 石家庄地区能见度变化特征及其与相对湿度和颗粒物浓度的关系[J]. 干旱气象,2016,34(4):648 - 655.
- [13] 宋薇,邱晓滨. 天津地区大气能见度变化特征及影响因子[J]. 气象科技,2015,43(5):898 - 904.
- [14] 赵玉广,李江波,李青春. 华北平原 3 次持续性大雾过程的特征及成因进行分析[J]. 气象,2015,41(4):427 - 437.
- [15] 吕博,贾斌,韩风军,等. 山东中西部一次持续性大雾的形成及维持机制[J]. 干旱气象,2014,32(5):830 - 836.
- [16] 黄继雄,张庆红. 首都机场浓雾中的能见度突发性振荡及其演变规律[J]. 暴雨灾害,2014,33(3):208 - 216.
- [17] 李健,王澄海. 郑州机场 2004—2012 年能见度的变化特征[J]. 干旱气象,2014,32(5):733 - 737.
- [18] 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,2005,24(1):99 - 104.
- [19] 胡迪. 武汉天河机场低能见度现象的气候特征分析[J]. 陕西气象,2006(3):18 - 20.
- [20] 杨瑜,丁文敏. 浦东机场低跑道视程变化特征及其影响机制分析[J]. 干旱气象,2016,34(5):873 - 880.
- [21] 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.
- [22] 中国民用航空总局. 中国民用航空仪表着陆系统 II 类运行规定[S]. 北京中国民用航空总局,1996.
- [23] 王瑞,周学东,李崇志,等. 江苏省能见度的手工与自动观测差异分析[J]. 气象科学,2015,35(2):183 - 188.
- [24] 邵振平. 郑州机场能见度变化特征及雾的成因分析[J]. 气象与环境科学,2014,37(1):75 - 82.

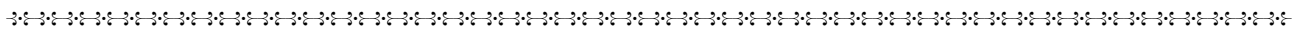
### Comparative Analysis of Low Visibility and Low Runway Visual Range at Jinan Airport

ZHAO Xi<sup>1</sup>, LI Jingmeng<sup>2</sup>, TONG Hongmei<sup>3</sup>

- (1. Meteorological Observatory of Shandong Air Traffic Management Sub - bureau, Jinan 250000, China;
- 2. Jinan Approach of Shandong Air Traffic Management Sub - bureau, Jinan 250000, China;
- 3. Huangshi Meteorological Bureau of Hubei Province, Huangshi 435000, Hubei, China)

**Abstract:** Based on the hourly visibility (VIS) and runway visual range (RVR) observation data during 2010 – 2016 at Jinan Airport, the monthly, diurnal characteristics of low visibility ( $VIS \leq 800$  m) and low RVR ( $RVR \leq 550$  m) and their relationship were comparatively analyzed by using mathematical statistic method. The monthly variation of low visibility and low RVR both presented asymmetric “U” type distribution with the center in summer, and the high – frequency occurred from November to February. The hourly variation of low visibility and low RVR presented arch distribution with the peak at the period of 22:00 – 23:00 (Universal Time), and low RVR appeared more frequently from 17:00 to 02:00. The durations of both were obviously in inverse ratio to the occurring times of both. Fog and pogonip were the main visual obstruction phenomena causing low visibility and low RVR. Rainfall had a greater influence on low visibility than low RVR. There was significantly positive correlation between low visibility and low RVR from November to February, and their difference was smaller. There was no obvious correlation between low visibility and low RVR and their difference was bigger from March to October. From 23:00 to 15:00, there was good correlation between low visibility and low RVR, and their difference was smaller, but there was no obvious correlation between them and their difference was bigger from 16:00 to 22:00. “Conflict sample” mainly occurred from 16:00 to 22:00 with light fog or part fog after rain from March to October. The low visibility and low RVR had significant correlations with relative humidity, depression of the dew point, wind direction, visibility before the day and 6 h, 12 h temperature difference at 22:00. The optimum subset regression method was used to establish forecast equation of low visibility and low RVR under season classification condition, and TS score reached a certain level.

**Key words:** Jinan Airport; low visibility; low runway visual range; conflict sample; comparative analysis



(上接第 846 页)

### Weather Classification of Heavy Pollution in Hebei Province and Its Meteorological Condition Analysis

ZHAO Na<sup>1</sup>, MA Cuiping<sup>1</sup>, LI Yang<sup>2</sup>, YU Zhiqiang<sup>3</sup>

- (1. Hebei Provincial Environmental Meteorological Center, Shijiazhuang 050021, China;
- 2. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China;
- 3. Hebei Provincial Meteorological Bureau, Shijiazhuang 050021, China)

**Abstract:** The observations from 196 environmental observation stations and meteorological data during 2013 – 2016 were used to classify weather situation that was prone to occurring heavy pollution in Hebei Province, then six weather types including convergent type, returning flow type, uniform pressure field type, high pressure rear type, northwest high pressure type and north high pressure type were given, among them, the northwest high pressure type appeared most frequently, then followed by uniform pressure field type, while returning flow type occurred least. Based on the statistics of mixed layer height, static stability weather index, breeze days and air pollutant concentration from three representative stations of Hebei Province in autumn and winter during 2014 – 2016, it was showed that there was a good correlation between air pollution and three indexes, when mixed layer height was lower, the static stability weather index was higher and breeze days was more, there would be more conducive to the formation of air pollution. In addition, through comparing the height of the mixed layer and the static stability weather index under different weather types when heavy pollution occurred, the corresponding relationship between weather types and meteorological characteristic was obtained. The north high pressure type was most stable, while northwest high pressure type was likely to be destroyed.

**Key words:** heavy pollution; meteorological classification; weather condition