

# 基于西安咸阳机场近20年降水特征及一次短时强降水的分析

罗 垒<sup>1\*</sup>, 高 永<sup>1</sup>, 刘晓达<sup>2</sup>

<sup>1</sup>中国民用航空西北地区空中交通管理局, 陕西 西安

<sup>2</sup>中国民用航空西南地区空中交通管理局, 四川 成都

Email: 1016507351@qq.com

收稿日期: 2021年6月4日; 录用日期: 2021年6月22日; 发布日期: 2021年6月29日

## 摘 要

利用ERA5逐小时再分析资料及民航西北空管局气象中心观测室编制的观测年总簿、月总簿, 分析了西安咸阳机场近20年降水的时间分布特征, 结果表明, 2001~2020年, 西安咸阳机场逐年降水量呈现出明显的波动变化和枯丰年交替的现象, 降水量总体呈微弱减少趋势; 年均降水量为546.03 mm, 降水量最多的2003年达1072 mm, 降水量最少的2016年仅394.9 mm; 各季降水量由多到少依次为夏季 > 秋季 > 春季 > 冬季。此外, 通过对西安咸阳机场一次短时强降水的分析, 并结合天气对民航运行的影响, 结果表明, 副高边缘配合低层切变辐合系统是造成此次短时强降水的原因。发生强降水的区域具有明显的垂直速度负值区和明显的正涡度中心带, 散度场的低空辐合、高空辐散结构及其演变与强降水的发生、发展密切相关, 研究结果有助于增强夏季短时强降水的临近预测能力和航空气象保障能力。

## 关键词

航空气象, 时间分布, 短时强降水, 环流背景, 对流不稳定能量, 动力学特征

# Analysis of Precipitation Characteristics and a Short-Term Heavy Precipitation in Xianyang Airport of Xi'an in Recent 20 Years

Lei Luo<sup>1\*</sup>, Yong Gao<sup>1</sup>, Xiaoda Liu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Northwest Air Traffic Management Bureau CAAC, Xi'an Shaanxi

<sup>2</sup>Southwest Air Traffic Management Bureau CAAC, Chengdu Sichuan

\*第一作者。

---

Email: 1016507351@qq.com

Received: Jun. 4<sup>th</sup>, 2021; accepted: Jun. 22<sup>nd</sup>, 2021; published: Jun. 29<sup>th</sup>, 2021

---

## Abstract

Based on the hourly reanalysis data of ERA5 and the annual and monthly records compiled by the meteorological center of Northwest Air Traffic Control Bureau of CAAC, the temporal distribution characteristics of precipitation in Xi'an Xianyang Airport in recent 20 years are analyzed. The results show that the annual precipitation of Xi'an Xianyang Airport shows obvious fluctuation and alternation of dry and rainy years from 2001 to 2020, and the precipitation shows a weak decreasing trend; the average annual precipitation is 546.03 mm, with 1072 mm in 2003 and 394.9 mm in 2016. The order of precipitation in each season is summer > autumn > spring > winter. In addition, through the analysis of a short-term heavy rainfall in Xi'an Xianyang Airport, combined with the impact of weather on civil aviation operation, the results show that the edge of subtropical high combined with low-level shear convergence system is the cause of the short-term heavy rainfall. The low-level convergence, high-level divergence and their evolution of divergence field are closely related to the occurrence and development of heavy rainfall. The research results are helpful to enhance the ability of near prediction and aviation meteorological support of short-term heavy rainfall in summer.

## Keywords

Aviation Meteorology, Time Distribution, Short Term Heavy Rainfall, Circulation Background, Convective Instability Energy, Dynamic Characteristics

---

Copyright © 2021 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

随着国内民航的快速发展和航班量的稳步增长,天气原因对民航的影响越来越大[1]。降水是基本航空气象要素之一,它能使能见度降低、产生碎云、飞机结冰,强降水特别是短时强降水往往引起能见度等气象要素剧变,还可能使发动机熄火、恶化飞机的空气动力、飞机滑跑产生滑水现象等,造成飞机复飞、备降甚至发生飞行等级事故[2]。《民用航空气象地面观测规范》[3]把大雨的判定标准规定如下:雨落如倾盆、模糊成片、雨声如擂鼓、水潭形成极快,或降雨强度  $\geq 8.1$  mm/小时。

降水对飞行有着极大的影响[4],当飞机着陆时,降水使飞行员无法目视准确判定飞机离跑道的高度,容易造成接地不良,严重时可能造成事故[5]。例如1997年5月8日,南航重庆飞深圳航班由于飞机在最后进近过程中遭遇强降雨使能见度急剧下降,机组在看不清跑道面时着陆,最终导致了人为责任原因的重大空难事故[2]。

长期以来,国内基于强降水相关的研究工作也有很多。例如,崔竹囡[6]等通过对咸阳机场1992~2003年天气资料的分析,表明夏季是咸阳机场的主要降水季节,秋季次之。在偏暖的年份里,雨水偏少,低于常年降水量,而在偏冷的年份里,雨水往往多于常年。樊李苗[7]等研究了中国短时强降水对流天气的环境参数特征,并对所选取的探空数据和环境参数进行了分类和对比分析。应冬梅[8]等选取了江西8次

典型的强对流天气过程, 得到冰雹大风和短时强降水两类强对流天气的多普勒天气雷达回波特征。国内学者[9]利用 RmAPs-CAV1.0 的预报结果, 对新疆西部一次短时强降水进行了模拟分析, 发现 RMAPS-CAV1.0 能准确反映短时强降水系统的重要预报参数, 如降水量、开始时间等。王光明[10]等通过对怀化市汛期短时强降水特征分析, 表明产生短时强降水的天气系统主要有低涡型和切变线型。肖贻青[11]通过对西安东部一次局地短时强降水天气过程分析, 发现小尺度的地面辐合和地形抬升是该次短时强降水的触发及加强条件; 台风外围的偏东气流为强降水提供了充足的水汽和不稳定能量, 有利于短时强降水触发后较大能量的释放并提升降水效率。国内学者[12]从机器学习的角度对未来较短时间内的降雨强度进行预测, 实验结果表明, 该算法能有效地提取雷达回波图的时空特征, 减小了降雨预测值与实际值之间的误差, 提高了短期降雨预测的精度。

陕西省地处西北地区东部, 是我国暴雨多发地区之一, 暴雨最易发生在 6~9 月, 主要集中在 7 月份[13]。关中地区位于陕西省中部, 平均海拔 520 m, 属于温带大陆季风气候[14], 西安咸阳机场处在关中平原的西部, 2020 年 8 月 7 日, 机场出现短时强降水, 共造成 70 架次航班放行延误, 8 架次进出港航班取消, 3 架次航空器因雨量较大而复飞。为探讨本次强降水的成因, 本文利用常规天气图、雷达回波等观测资料, 结合对流不稳定能量和强降水区中的大气动力学特征进行分析, 对进一步提高短时强降水的预警预报工作具有重要的意义。

## 2. 资料

本文资料包括: 1) ERA5 逐小时再分析资料(<https://cds.climate.copernicus.eu/>), 该资料的水平空间分辨率为  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ , 垂直范围为 1000 hPa~1 hPa, 选取位势高度、相对湿度、风的 U, V 分量、垂直速度、涡度(相对)、散度作为研究对象。2) 话音方式的航空器空中报告资料来自民航西北空管局气象中心预报室, 包括报告时间, 航班号, 位置, 高度, 强度, 对航班的影响等信息。3) 西安咸阳机场降水量资料来自民航西北空管局气象中心观测室编制的观测年总簿、月总簿。4) 2020 年 8 月 7 日的每日航班运行数据来自西安咸阳机场运管委, 数据内容包括放行延误班数, 航班总数, 平均出港延误时间, 进出港架次(含取消架次)等内容。

## 3. 西安咸阳机场降水时间分布特征

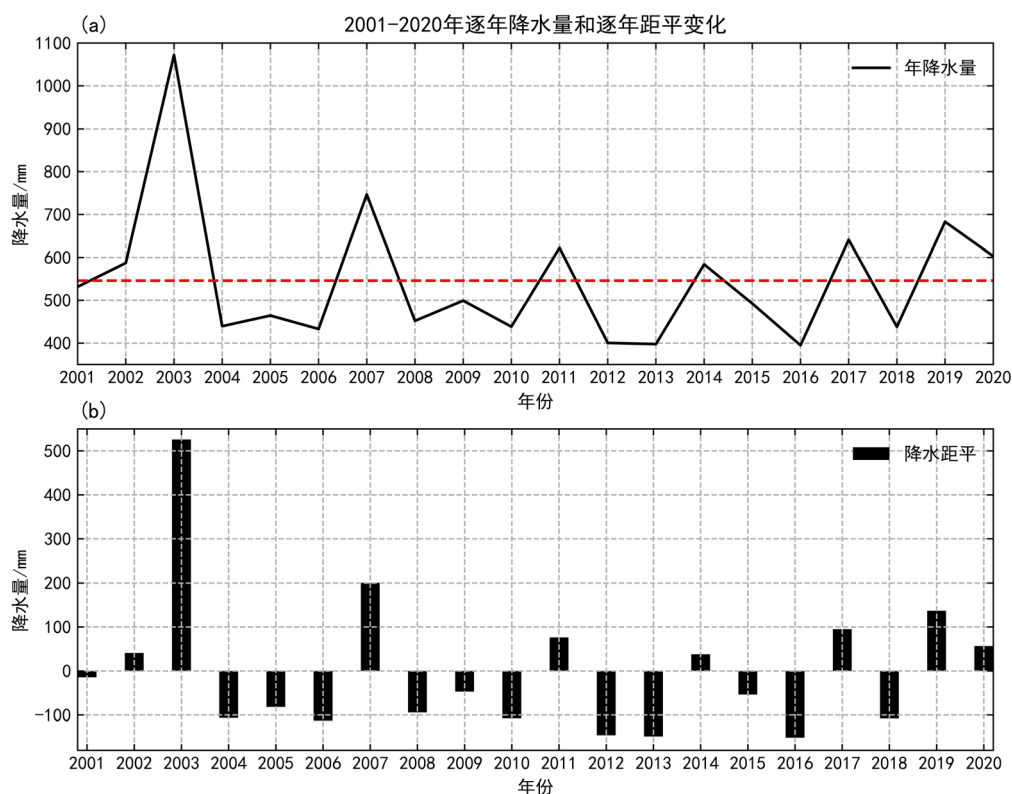
### 3.1. 降水量的年分布特征

由图 1 可见, 2001~2020 年西安咸阳机场逐年降水量呈现出明显的波动变化和显著的枯丰年交替的现象, 降水量总体呈微弱减少趋势。从年变化来看, 2001 年以来, 西安咸阳机场 20 年的年均降水量为 546.03 mm, 降水量最多的 2003 年达 1072 mm, 降水量最少的 2016 年仅 394.9 mm, 最多年是最少年的 2.71 倍。具体来看, 2001~2003 年, 西安咸阳机场年降水量逐年递增, 2003 年降水量达到近 20 年来最高值, 随后下降; 2003~2020 年, 逐年降水量表现为枯丰年交替的现象(图 1(a))。从降水距平来看, 有 8a 降水量偏多, 为正距平, 12a 降水量偏少, 为负距平。其中, 降水正距平最大的 2003 年达 525.97 mm, 是降雨量最多的一年。降水负距平最大的 2016 年, 2013 年, 2012 年分别为 151.13 mm, 148.43 mm, 145.63 mm, 这是近 20 年来降水量最少的三个年份(图 1(b))。

### 3.2. 降水量的季节分布特征

根据西安咸阳机场观测年总簿中记录的降水量, 统计机场各季降水量的平均值、最大值、最小值(表 1)。从表 1 可以看出, 西安咸阳机场春、夏、秋、冬各季平均降水量的比重分别为: 18.6%, 44.93%, 32.21%, 4.3%, 各季降水量由多到少依次为夏季 > 秋季 > 春季 > 冬季。其中, 春季降水量的最大值为 2015 年的

158.8 mm, 最小值为2001年的57.9 mm; 夏季降水量的最大值为2007年的549.6 mm, 最小值为2015年的148.4 mm; 秋季降水量的最大值为2003年的407.6 mm, 最小值为2013年的77.8 mm; 冬季降水量的最大值为2006年的61 mm, 最小值为2015年的5.4 mm。



**Figure 1.** Annual precipitation and annual precipitation anomaly trend of Xi'an Xianyang Airport from 2001 to 2020 (The red dotted line in Figure 1(a) is the average annual precipitation)

**图 1.** 2001~2020 年西安咸阳机场逐年降水量和逐年降水量距平变化趋势(图 1(a)中红色虚线为年均降水量)

**Table 1.** Statistics of precipitation of Xi'an Xianyang Airport from 2001 to 2020 (mm)

**表 1.** 西安咸阳机场 2001~2020 年各季降水量的统计(mm)

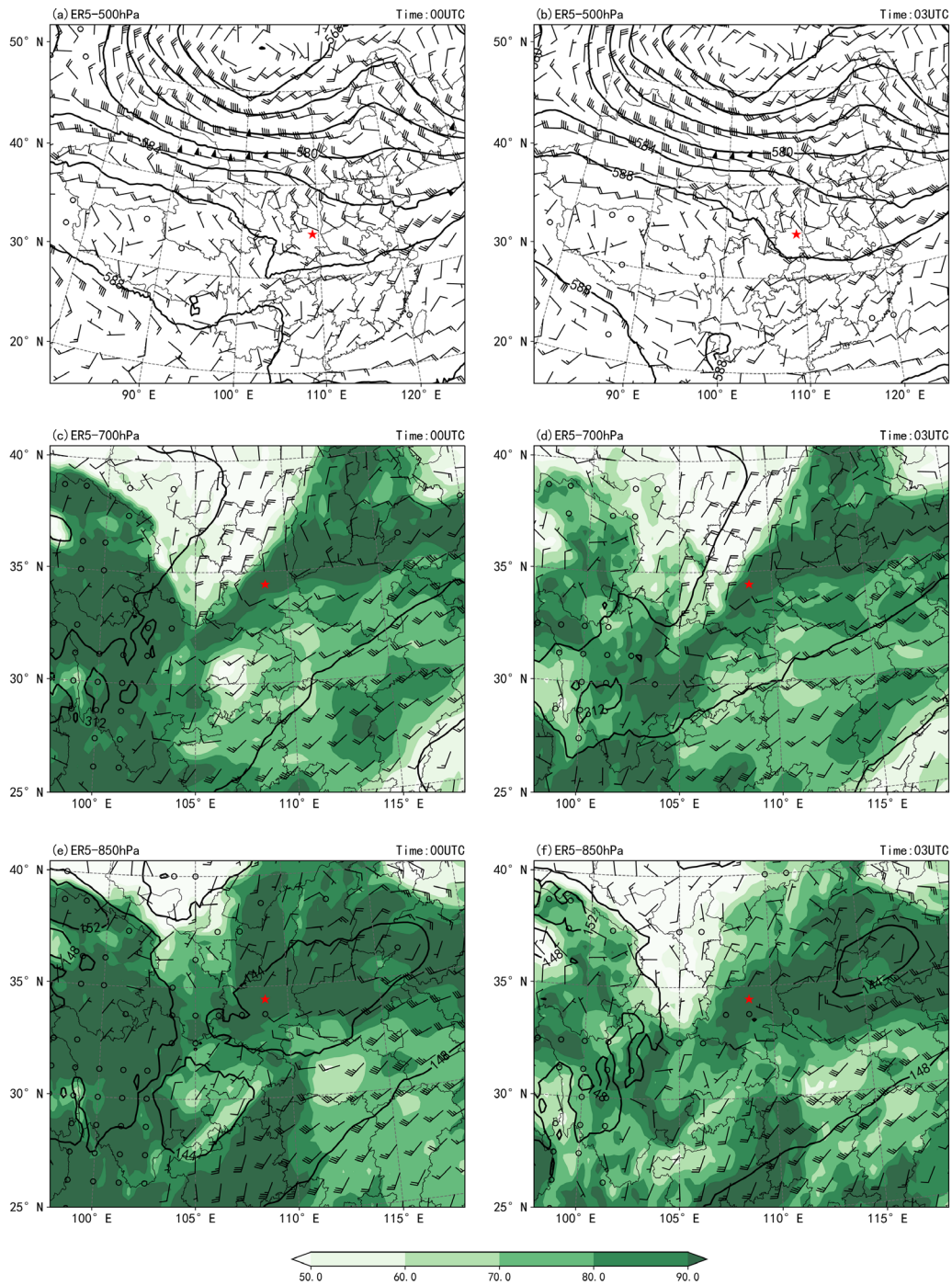
| 项目   | 春季     | 夏季     | 秋季     | 冬季    |
|------|--------|--------|--------|-------|
| 平均值  | 101.56 | 245.35 | 175.87 | 23.25 |
| 最大值  | 158.8  | 549.6  | 407.6  | 61    |
| (年份) | 2015   | 2007   | 2003   | 2006  |
| 最小值  | 57.9   | 148.4  | 77.8   | 5.4   |
| (年份) | 2001   | 2015   | 2013   | 2015  |

## 4. 西安咸阳机场一次短时强降水的分析

### 4.1. 短时强降水对民航的影响

2020 年 8 月 7 日 01 时~04 时(UTC, 下同), 西安咸阳机场出现小到中雨, 短时大雨。大雨时段为 03:14~04:04, 24 h 累计降水量为 30.2 mm, 当日早间出现的短时中到大雨对机场的放行和航班正常性带来了较大的影响。根据西安咸阳机场运管委每日航班运行数据(表 2), 8 月 7 日早间, 共造成放行延误航

班数总计 70 架次(东航 25 架次, 海航 19 架次, 地勤 26 架次)。当日进出港航班共取消 8 架次, 其中进港取消 5 架次, 出港取消 3 架次。此外, 8 月 7 日 02 时~03 时附近, 民航西北空管局气象中心预报室共收到 3 份话音方式航空器空中报告, 均是由于雨量较大造成的航空器复飞, 且复飞高度较低或正处在跑道入口端时复飞, 严重威胁着航空器的起飞爬升和进近着陆(表 3)。



**Figure 2.** Circulation situation diagram (The unit of contour line is dagpm, the unit of wind speed is  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , and the unit of relative humidity is %)

**图 2.** 环流形势图(等高线单位为 dagpm, 风速单位  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 相对湿度单位为%)

**Table 2.** Operation information of Xi'an Xianyang airport transport management committee on August 7, 2020  
**表 2.** 2020 年 8 月 7 日西安咸阳机场运管委运行信息表

| 名称     | 东航           | 海航           | 地勤           | 机场           |
|--------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 放行延误班数 | 25           | 19           | 26           | 70           |
| 总架次    | 284 (含取消: 2) | 191 (含取消: 1) | 418 (含取消: 5) | 893 (含取消: 8) |
| 进港架次   | 143 (含取消: 1) | 95 (含取消: 1)  | 210 (含取消: 3) | 448 (含取消: 5) |
| 出港架次   | 141 (含取消: 1) | 96 (含取消: 0)  | 208 (含取消: 2) | 445 (含取消: 3) |

**Table 3.** List of air reported events of voice mode aircraft on August 7, 2020

**表 3.** 2020 年 8 月 7 日语音方式航空器空中报告事件列表

| 报告时间(BTJ)     | 航班号     | 位置      | 危险天气 | 强度 | 对航班的影响 | 备注   | 高度(英尺) |
|---------------|---------|---------|------|----|--------|------|--------|
| 8 月 7 日 09:54 | 东方 2201 | 05R 入口端 | 其他   | 强  | 复飞     | 雨量较大 | 未知     |
| 8 月 7 日 09:59 | 南方 3721 | 05R 入口端 | 其他   | 强  | 复飞     | 雨量较大 | 未知     |
| 8 月 7 日 11:13 | 东方 2270 | 05L     | 其他   | 强  | 复飞     | 雨量较大 | 610    |

## 4.2. 大气环流背景

8 月 7 日 00~03 时 500 hPa 天气图(图 2(a)、图 2(b))上, 欧亚中高纬为一槽一脊型, 贝湖附近有一低涡, 贝湖以东为高压脊, 东北地区处在脊区控制中, 新疆北部、内蒙古中东部、华北西部处在平直的西风气流中; 陕西中南部存在短波槽, 西太平洋副热带高压呈西北-东南走向, 588 线位于新疆南部, 青海北部, 甘肃南部-陕南, 长江中下游一带, 沿副高外围在陕西中南部形成较一致的偏南气流, 为此次短时强降水提供高温高湿的环流背景。00~03 时, 588 线略有北抬, 陕西中南部短波槽东移。00~03 时 700 hPa 天气图(图 2(c)、图 2(d))上, 我国中东大部处在一致的西南气流中, 长江流域以南存在低空急流; 西北地区东南部有明显的切变系统东移, 且切变辐合区正好处在关中地区, 沿着关中北部-陕南西部有一条带状的水汽辐合带, 相对湿度 > 90%, 为此次短时强降水提供源源不断的水汽供应。00~03 时 850 hPa 天气图(图 2(e)、图 2(f))上, 陕西中南部处在低值系统中, 关中北部是一致的东北风, 其南部为西南风或西北风, 存在风向风速的折角, 相对湿度 > 90%, 水汽条件充沛。受副高外围偏南气流和陕西中南部短波槽东移的共同影响, 配合低层明显的切变辐合, 为西安咸阳机场 8 月 7 日的短时中到大雨的发生提供了较好的动力抬升和暖湿条件[15]。

## 4.3. 对流不稳定能量

对流有效位能(CAPE)是一种与大气中对流现象密切关联的指标, 是强对流天气分析预报的重要参数[16], 一般来讲, 雷暴环境中 CAPE 的观测值通常可能超过 1000 J/kg。此外, K 指数也常用作对流性天气的一个热力指标, 尤其对 24 小时暴雨预报有一定的指标性[17]。通常认为, 该参数与一次雷暴发生的概率有关: <20 K 无雷暴, 20~25 K 孤立雷暴, 26~30 K 大范围分散雷暴, 31~35 K 分散雷暴, >35 k 多雷暴。

由图 3 可见, CAPE 大值区(>1000 J/kg)分布在陕南东部, 关中地区 CAPE 值 < 600 J/kg (图 3(a))。K 指数大值区(>30 K)集中在陕西东南部, 与 700 hPa 切变辐合系统的位置较为吻合。需要注意的是, 此次强降水区与 K 指数 > 35 K 的高能区有较好的对应关系。高能区聚集了足够的不稳定能量, 具备了产生强降水的能量特征[18], 而此时机场此时正处在 K 指数大值区(K > 35), 与当日短时大雨的时段基本一致(图 3(b))。

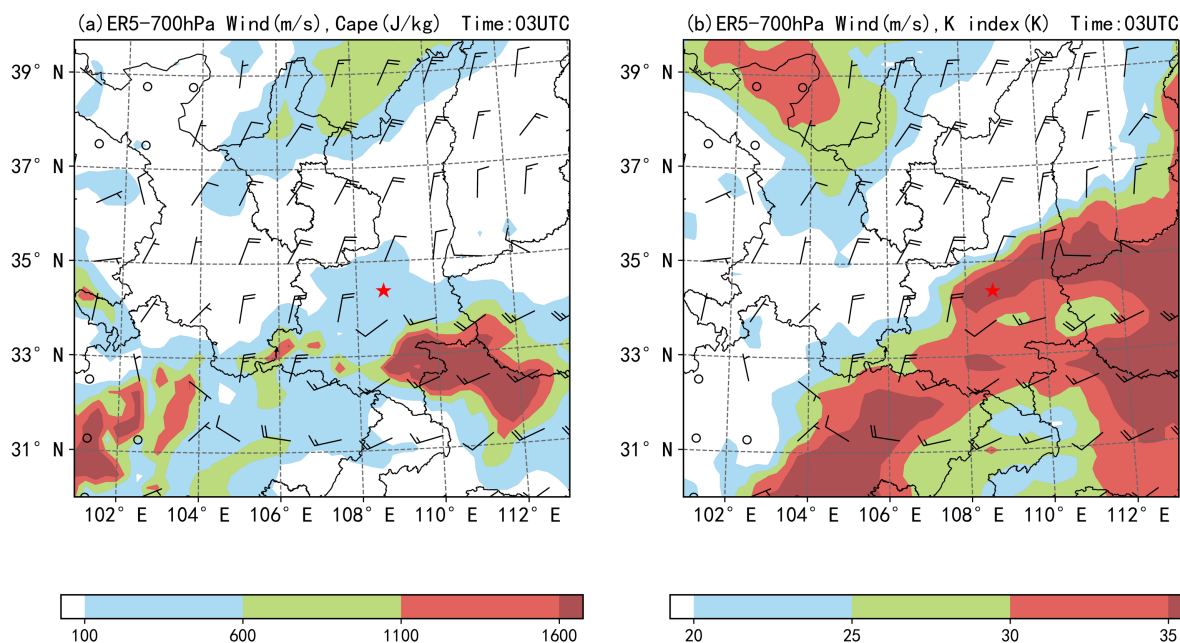
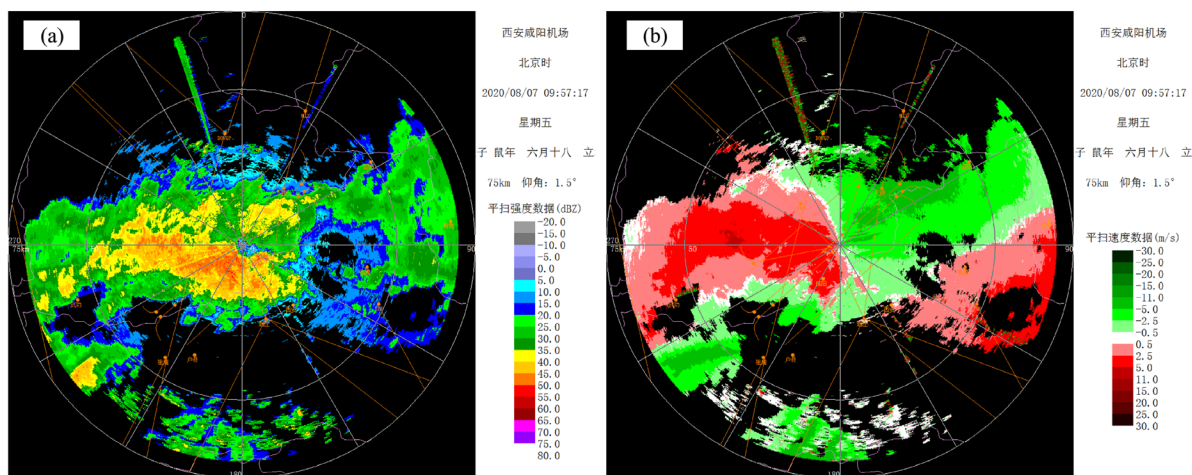


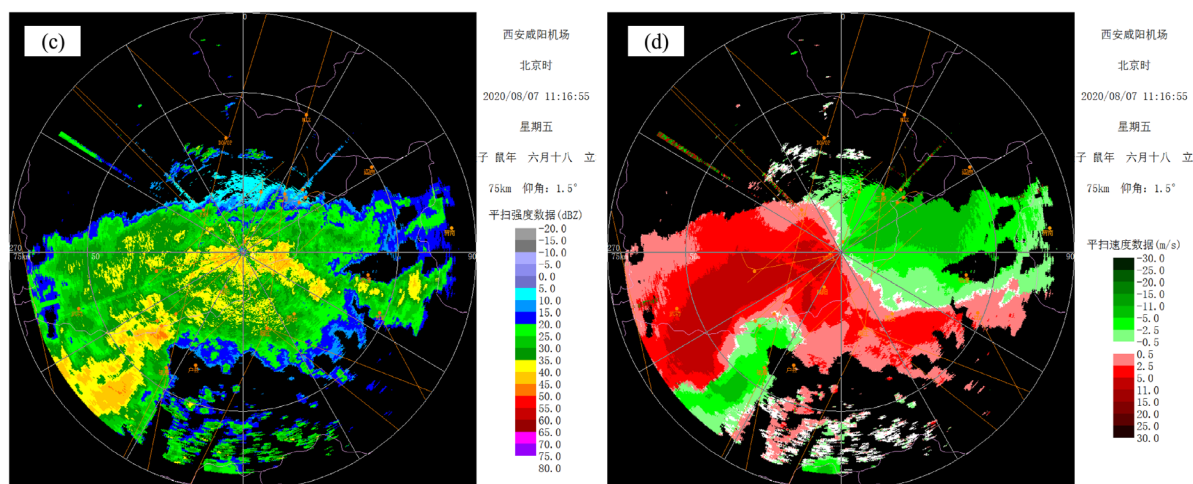
Figure 3. 700 hPa wind field superimposed CAPE value and K index (wind speed unit  $m \cdot s^{-1}$ , CAPE value unit is  $J/kg$ , K index unit is K)

图 3. 700 hPa 风场叠加 CAPE 值和 K 指数(风速单位  $m \cdot s^{-1}$ , CAPE 值单位为  $J/kg$ , K 指数单位为 K)

#### 4.4. 雷达回波特征

图 4 雷达为西安咸阳机场 716A-43 天气雷达(以下简称 716 雷达), 属于 C 波段常规天气雷达[19], 是在原有 716A 雷达的基础上研发的[20], 主要应用于西安咸阳机场航空气象业务。由图 4 所示, 01:57 (UTC) 716 雷达上(仰角为  $1.5^\circ$ , 半径为 75 km), 机场及周边 50 km 范围内出现了成片的强降水回波。其中, 位于机场北侧的最强回波中心强度约为 35~40 dBz, 而机场南侧的最强回波中心强度则大于 45 dBz (图 4(a))。从径向速度图来看, 机场附近以东北风为主(图 4(b)), 此时机场使用 05 方向跑道起降, 在此期间(01:54 及 01:59 UTC), 收到了 2 架次航空器因雨量较大而复飞的报告, 均是出现在机场跑道 05R 入口端, 结合雷达图分析, 造成 2 架次航空器复飞的原因为, 位于机场南侧的强降水对流云团覆盖了跑道的一边、五边, 致使机场南跑道出现短时中到大雨, 从而导致航空器因雨势过大复飞。03:16





**Figure 4.** Radar basic reflectivity factor of Xi'an Xianyang Airport ((a) 09:57; (c) 11:16) and radial velocity field ((b) 09:57; (d) 11:16, positive radial velocity Means stay away from the radar)

**图 4.** 西安咸阳机场雷达基本反射率因子((a) 09:57; (c) 11:16)及径向速度场((b) 09:57; (d) 11:16, 正径向速度代表远离雷达)

(UTC) 716 雷达上, 强降水对流云团随着 700 hPa 切变辐合系统的东移过境, 降水回波的范围得到了明显的增强。从基本反射率因子来看, 在机场及西安终端区的大部均出现了强度为 35~45 dBz 的强降水回波, 局地回波强度大于 45 dBz (图 4(c))。从径向速度图来看, 机场附近仍然以东北风为主(图 4(d)), 03:13, 收到一架航空器在跑道 05L 进近着陆时复飞报告, 高度为 610 英尺, 结合雷达图分析, 大范围强降水对流云团已经覆盖了机场的一边、五边, 致使机场南北跑道出现短时中到大雨, 导致航空器因雨势太大而复飞。

## 5. 强降水区的动力学特征

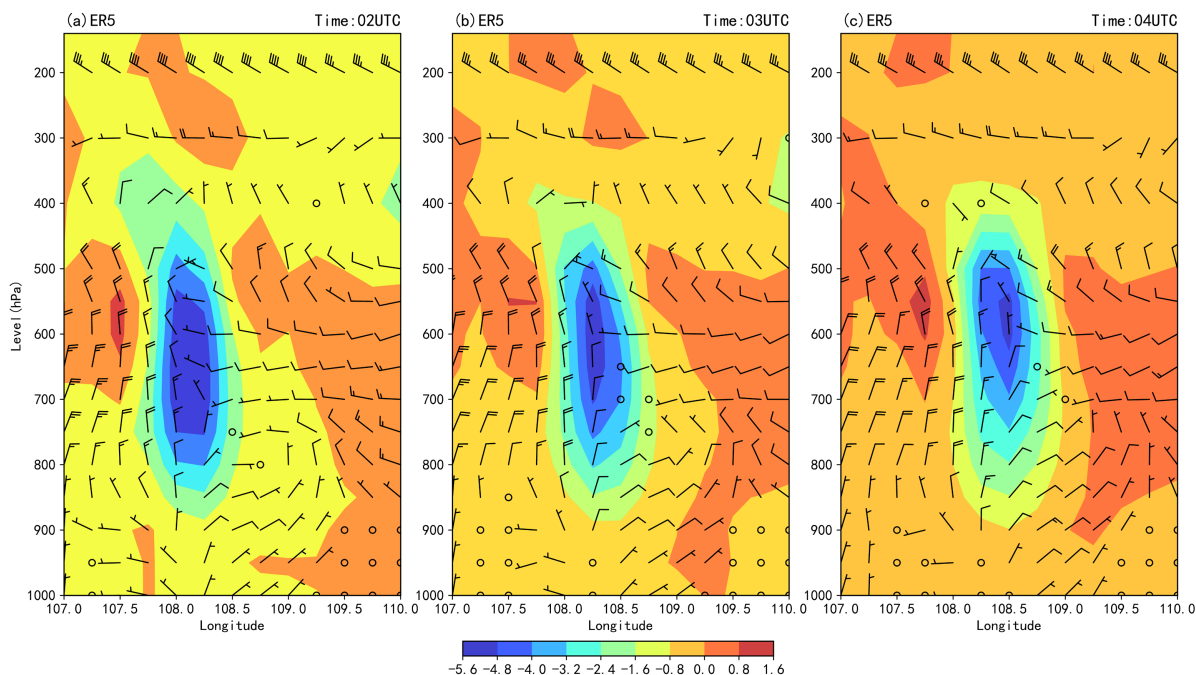
### 5.1. 强降水区的垂直速度场特征

垂直速度[21]是表征空气微团向上或向下运动速度的一个物理量, 负值表示上升运动, 正值表示下沉运动。大气层结中的不稳定能量的释放需要配合一定的抬升运动, 垂直运动会引起各种物理量的向上或向下输送, 进一步将会对天气系统的发展产生影响。一般来讲, 垂直速度负值的绝对值越大, 气块的上升运动就越强, 越有利于天气的生成与发展[22]。西安咸阳机场坐标为 34°26'N, 108°45'E, 图 5 为沿 34.25°N 的垂直速度和风场的剖面图, 由图 5 可见, 02~04 时次, 在机场附近存在明显的垂直速度负值区, 高度为 850 ~400 hPa (图 5(a)~(c)), 垂直速度负值区最大为 $-5.6 \text{ Pa}\cdot\text{S}^{-1}$ , 说明机场上空存在非常明显的上升运动, 上升气流使水汽不断抬升凝结从而在地面产生降水。

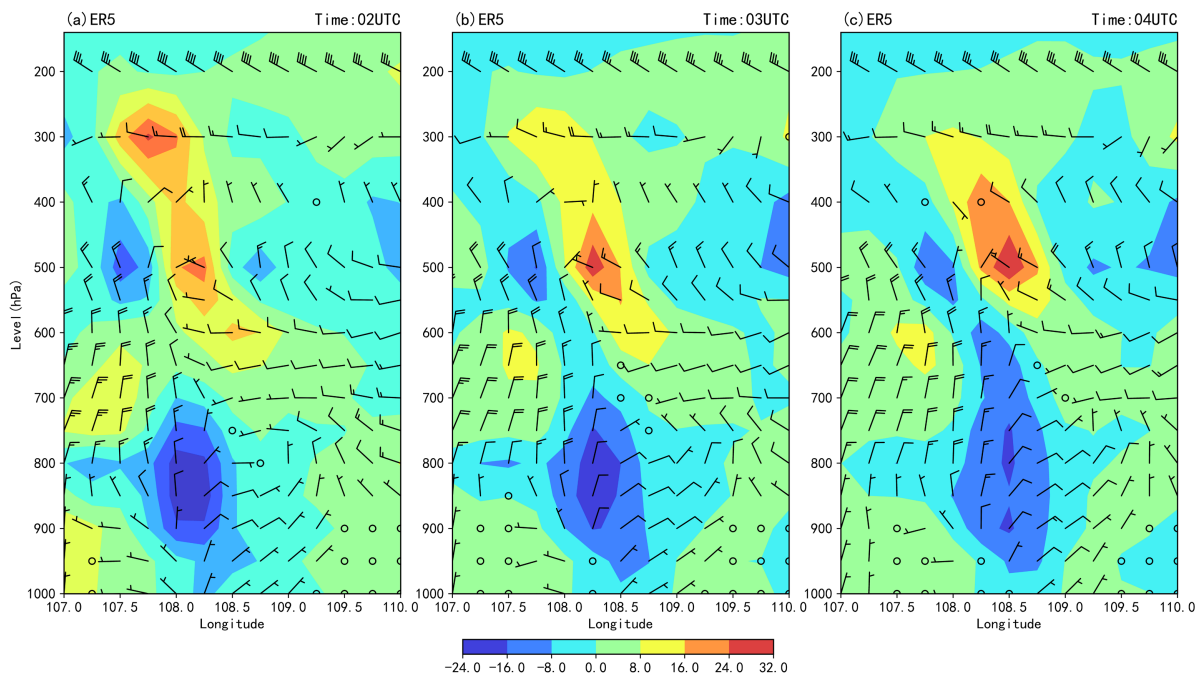
### 5.2. 强降水区的散度场特征

散度是衡量速度场辐散、辐合强度的物理量, 单位为  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ , 辐散时为正, 辐合时为负。根据大气运动的连续性原理, 大气运动的辐散辐合必然与垂直运动相联系, 低空辐合、高空辐散的散度场结构及其演变与强降水的生成发展及落区相对应[23]。图 6 为沿 34.25°N 的散度和风场剖面图(图 6(a)~(c)), 根据散度的垂直分布结构, 02 时 1000~700 hPa 为负散度, 700~200 hPa 为正散度(图 6(a)); 04 时 1000~600 hPa 为负散度, 600~200 hPa 为正散度(图 6(c))。02~04 时次, 低层负散度数值增大, 中层逐渐转为负散度, 高层正散度增强, 辐合的垂直厚度向上扩展, 有利于形成深厚的对流系统[24]。





**Figure 5.** Vertical velocity (shaded, unit:  $\text{Pa}\cdot\text{S}^{-1}$ ) and wind field profile along  $34.25^\circ\text{N}$   
**图 5.** 沿  $34.25^\circ\text{N}$  的垂直速度(阴影, 单位:  $\text{Pa}\cdot\text{S}^{-1}$ )和风场剖面图

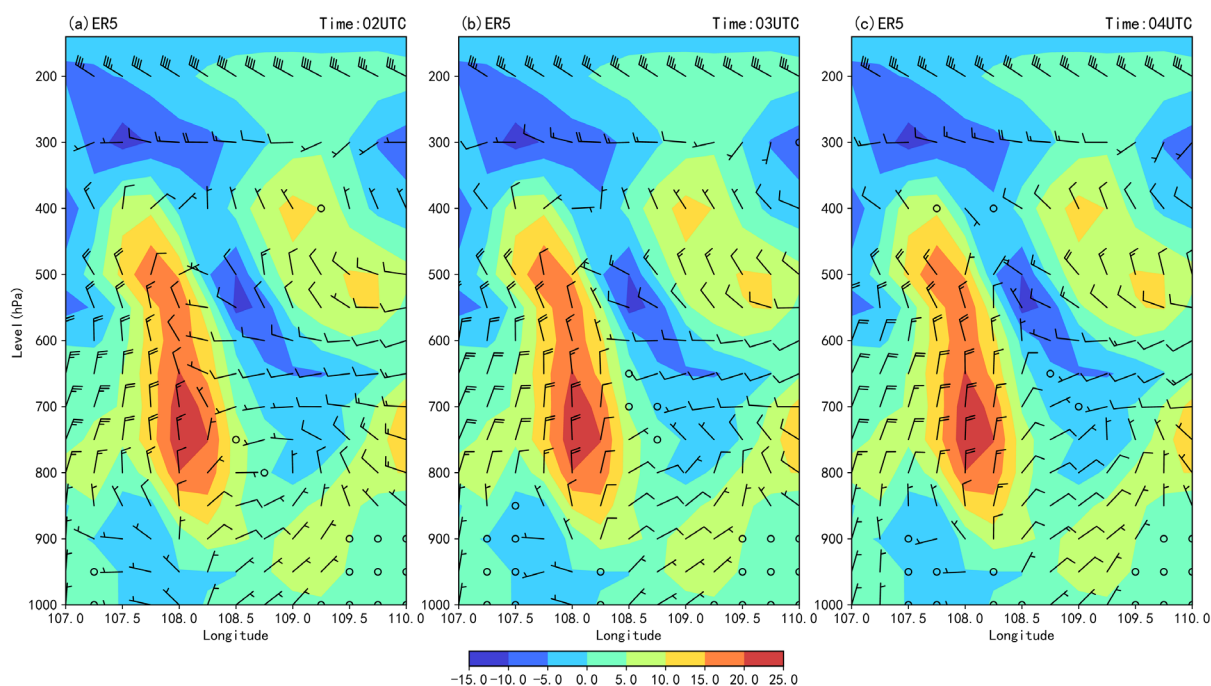


**Figure 6.** Divergence along  $34.25^\circ\text{N}$  (shaded, unit:  $\text{Pa}\cdot\text{S}^{-1}$ ) and wind field profile  
**图 6.** 沿  $34.25^\circ\text{N}$  的散度(阴影, 单位:  $\text{Pa}\cdot\text{S}^{-1}$ )和风场剖面图

### 5.3. 强降水区的涡度场特征

涡度是描述流体旋转特征的微观度量, 单位为  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ , 根据右手定则, 逆时针旋转时为正涡度, 反之则为负涡度; 从动力学角度分析, 根据涡度的变化, 就可以了解气压系统的发生和发展[25]。此外, 强降

水系统的形成和发展与环境涡度的分布和演变有十分密切的关系[26]。图 7 为沿 34.25°N 的涡度和风场剖面图，由图 7 可见，02~04 时次，机场附近 850~400 hPa 存在明显的正涡度中心带(图 7(a)~(c))，正涡度中心最大值为  $25 \times 10^{-5} \text{ S}^{-1}$ ，说明机场上空存在非常明显的气旋性环流，能提供对流系统发展所需的涡度条件，有利于强降水等对流性天气系统的发生发展。



**Figure 7.** Vorticity (shaded, unit:  $10^{-5} \text{ S}^{-1}$ ) and wind field profile along 34.25°N  
**图 7.** 沿 34.25°N 的涡度(阴影, 单位:  $10^{-5} \text{ S}^{-1}$ )和风场剖面图

## 6. 结论

通过对西安咸阳机场近 20 年降水时间分布特征的统计和机场一次短时中到大雨的强降水个例分析，可以得出以下结论：

1) 2001~2020 年，西安咸阳机场逐年降水量呈现出明显的波动变化和枯丰年交替的现象，降水量总体呈微弱减少趋势。年均降水量为 546.03 mm，降水量最多年份为 2003 年，年降水量达 1072 mm，降水量最少的年份为 2016 年，年降水量仅 394.9 mm。机场各季降水量由多到少依次为夏季 > 秋季 > 春季 > 冬季，所占比重分别为：44.93%，32.21%，18.6%，4.3%。

2) 从环流形势来看，此次短时强降水是由副高边缘偏南气流与低层切变辐合系统共同作用的结果。中高纬稳定的环流形势是强降水发生的有利背景，副高边缘提供了高温高湿的环境条件。低层切变辐合系统和一致的西南风是此次降水的主要水汽通道和能量通道，对此次短时强降水过程的产生、维持和发展起了重要作用。此外，此次短时强降水区与 K 指数 > 35 的高能区有较好的对应关系，对于今后短时中到大雨的预报有一定的指示性作用。

3) 通过对强降水区动力学特征的分析，表明短时强降水区具有明显的垂直速度负值区和明显的正涡度中心带，散度场的低空辐合、高空辐散结构及其演变与强降水的发生、发展密切相关，有利于短时强降水等对流性天气系统的发生发展。

4) 由于本文仅对西安咸阳机场一次强降水个例进行分析，分析得出的结论并不具备代表性，要做深

入的研究, 还需要统计分析更多的强降水个例, 结合详细、准确的航空器空中报告及时间、空间分辨率更高的气象资料去验证。

## 参考文献

- [1] 金耀廷. 虹桥机场低云与降水分布特征及相关性分析[J]. 空中交通, 2017(8): 43-45.
- [2] 陈建德. 强降水对飞行的影响[C]//中国气象学会. 第30届中国气象学会年会论文集. 南京: 中国气象学会, 2013: 1-6.
- [3] 中国民用航空局空管局. 民用航空气象地面观测规范[Z]. 武汉: 中国民用航空局空管局, 2012.
- [4] 杨柳嫦. 湛江机场近29年降水特征分析[J]. 微计算机信息, 2016(8): 65-66.
- [5] 翟洪岩. 降水对飞行的影响及解决措施[J]. 科技信息, 2012(29): 234, 272.
- [6] 崔竹因, 孙力平. 咸阳机场气候与影响飞行的天气分析[J]. 民航科技, 2005(2): 36-38.
- [7] 樊李苗, 俞小鼎. 中国短时强对流天气的若干环境参数特征分析[J]. 高原气象, 2013, 1(1): 156.
- [8] 应冬梅, 许爱华, 黄祖辉. 江西冰雹、大风与短时强降水的多普勒雷达产品的对比分析[J]. 气象, 2007(3): 48-53.
- [9] Gao, H., Bao, D., Li, W. and Zheng, Z. (2021) Analysis on the Influence of Topography on a Short-Time Local Heavy Rainfall Forecast in Western Xinjiang. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **668**, 012032. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/668/1/012032>
- [10] 王光明, 王文闻, 王强, 等. 怀化市汛期短时强降水特征分析[J]. 中低纬山地气象, 2020, 44(1): 54-59.
- [11] 肖贻青, 胡启元, 井宇, 王洁, 刘勇. 西安东部一次局地短时强降水天气过程分析[J]. 陕西气象, 2020(6): 3-10.
- [12] Sun, D., Wu, J., Huang, H., et al. (2021) Prediction of Short-Time Rainfall Based on Deep Learning. *Mathematical Problems in Engineering*, **2021**, Article ID: 6664413. <https://doi.org/10.1155/2021/6664413>
- [13] 梁生俊, 马晓华. 西北地区东部两次典型大暴雨个例对比分析[J]. 气象, 2012, 38(7): 804-813.
- [14] 岳大鹏, 李奎, 张肖南, 等. 关中地区近50年来降水量变化的特征分析[J]. 陕西农业科学, 2014, 60(2): 49-52.
- [15] 井宇, 陈闯, 屈丽玮, 等. 副高边缘西安地区一次短时暴雨分析[J]. 陕西气象, 2018(4): 7-12.
- [16] 张夏琨, 朱跃进, 郭品文. 对流有效位能的不同计算方法及其对比[C]//中国气象学会. 第33届中国气象学会年会. 南京: 中国气象学会, 2016: 1-11.
- [17] 孟妙志. K指数在暴雨分析预报中的应用[J]. 气象, 2003, 29(8): 1-2.
- [18] 徐继刚. 太原机场一次典型暴雨案例分析[J]. 空中交通, 2017(7): 50-53.
- [19] 周文杰, 高联辉, 杨迪. 咸阳机场C波段中频相参多普勒天气雷达工作原理及维护应用[J]. 空中交通, 2016(11): 25-28.
- [20] 高联辉, 张红卫. 716雷达发射机触发故障实例分析[J]. 陕西气象, 2010(6): 25-26.
- [21] 杨大升. 动力气象学[M]. 北京: 气象出版社, 1980.
- [22] 袁春梅, 张军辉. 2019年7月11日双流一次强降水过程成因分析[J]. 气候变化研究快报, 2020, 9(6): 10.
- [23] 张小玲, 程麟生. 96.1 暴雪期中尺度切变线发生发展的动力诊断 II: 散度和散度变率诊断[J]. 高原气象, 2000, 19(4): 459-466.
- [24] 陈永仁, 李跃清. “12.7.22”四川暴雨的MCS特征及对短时强降雨的影响[J]. 气象, 2013, 39(7): 848-860.
- [25] 朱乾根. 天气学原理和方法[M]. 北京: 气象出版社, 2007.
- [26] 汪钟兴, 孙淑清. 暴雨系统中环境涡度场与散度场之间相互关系[J]. 气象学报, 1988, 46(4): 110-114.