

丽江机场强降水天气特征分析

代冰冰¹ 陈莉¹ 任菊章²

(1 云南机场集团丽江机场气象台, 丽江 674100; 2 云南省气象科学研究所, 昆明 650034)

摘要: 利用丽江机场自动观测站资料、NCEP再分析资料, 引入HYSPLIT轨迹模式, 对丽江机场2007—2019年出现的强降水天气特征进行分析。结果表明, 丽江机场强降水日数年际差异较大, 年平均强降水日数为7.8 d, 最大日降水量为92.3 mm。强降水天气有明显的季节变化特征, 雨季6—9月的强降水日数占比90%, 暴雨主要分布在7—8月。根据500 hPa高度上主要的影响系统, 总结出7种丽江机场强降水天气形势, 其中切变冷锋型和两高合并型是丽江机场强降水的最主要天气形势, 占比40%。强降水期间丽江机场上空整层为垂直上升速度大值区。水汽主要来自700 hPa高度, 低层水汽辐合, 高层辐散, 有利于水汽向上垂直运动。通过HYSPLIT模式分析, 丽江机场雨季水汽输送通道共有3条, 其中西南路径占比最大, 孟加拉湾地区的水汽输送是丽江机场雨季最主要的水汽来源; 7—8月副热带高压强盛、台风活动频繁, 因此有一定的南海方向水汽输送, 即东南路径; 8—9月受川滇切变线和西南涡影响, 有少量来自川渝地区的水汽输送, 即东北路径。

关键词: 丽江机场, 强降水特征, 水汽输送通道

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2024.02.010

Characteristic Analysis of Heavy Rainfall at Lijiang Airport

Dai Bingbing¹, Chen Li¹, Ren Juzhang²

(1 Lijiang Airport Meteorological Station of Yunnan Airport Group Co., Lijiang 674100;

2 Yunnan Institute of Meteorological Sciences, Kuming 650034)

Abstract: Based on the automatic observation station data of Lijiang Airport, NCEP reanalysis data, and the HYSPLIT trajectory model, the characteristics of heavy rainfall at Lijiang Airport from 2007 to 2019 were analyzed. The results show that the number of heavy rainfall days at Lijiang Airport varies greatly between years, with an annual average of 7.8 days and a maximum daily precipitation of 92.3 mm. The heavy rainfall weather patterns exhibit obvious seasonal variation characteristics. The number of heavy rainfall days from June to September, namely the rainy season, accounts for 90% of the total, and the rainstorms mainly occur in July and August. According to the main impact systems of 500 hPa, seven kinds of heavy rainfall weather situations are summarized at Lijiang Airport. Among the seven types, the shear cold front and two high convergence zone are the most dominating weather patterns of heavy rainfall, accounting for 40%. During the period of heavy rainfall, the whole layer over Lijiang Airport is featured with large vertical velocity. The water vapor mainly comes from the height of 700 hPa, with convergence in the lower layer and divergency in the upper layer. It is conducive to the upward vertical movement of the water vapor. According to the analysis of HYSPLIT model, there are three water vapor transport channels at Lijiang Airport during the rainy season, among which the southwest route accounts for the largest proportion, and the water vapor transport in the Bay of Bengal is the major water vapor source during the rainy season. From July to August, the strong subtropical high and the frequent typhoon activities result in the water vapor transport from the South China Sea, namely the southeast path. Influenced by the Sichuan-Yunnan shear line and southwest vortex, a small amount of water vapor is transported from Sichuan-Chongqing region in August to September, namely the northeast path.

Keywords: Lijiang Airport, heavy rainfall characteristic, water vapor transport channel

0 引言

丽江地处云南西北部, 与青藏高原东南侧相邻, 属于低纬度高原季风气候。受高原地势影响, 北方强

冷空气和西南暖湿气流不易到达, 丽江强降水天气出现的尺度、次数和日降水量均较云南南部地区偏少^[1], 但局地性、突发性特征明显, 常常造成暴雨泥石流、山体滑坡等灾害。丽江机场位于丽江南部的丽江坝子(小盆地)与大理州鹤庆坝子结合部, 为狭小的山谷地型, 受气象条件的影响很大。强降水天气不仅会导致机场跑道阻力减小, 使飞机滑跑距离增加, 同时伴随的低云低能见度天气也会影响飞机的起飞和着陆, 另

收稿日期: 2022年10月14日; 修回日期: 2023年2月1日

第一作者: 代冰冰(1987—), Email: 187158933@qq.com

资助信息: 云南省重点研发计划-社会发展专项
(202203AC100006)

外飞机在强降水区中飞行，还可能会遭遇积冰、颠簸和风切变，严重威胁航空安全。

强降水天气一直是气象学者们研究的重点。邹灵宇等^[2]针对云南不同等级短时强降水和大风的时空分布特征进行研究，结果表明云南短时强降水和大风多出现在山地和河谷等地形复杂区。李耀孙等^[3]通过对云南雨季和干季的降水特征分析，结果表明受复杂地形影响，云南不同区域降水特征差异显著，且与我国东部地区显著不同，年均降水量大体呈西南高、西北低的分布特征。还有学者对云南局地暴雨分型及物理量场特征等进行了深入分析研究^[3-10]。但针对云南强降水水汽特征分析较少，更是缺少在航空气象领域对高原山地机场的强降水天气特征研究。本文在对丽江机场强降水天气基本特点和分型研究的基础上，利用拉格朗日轨迹模型(HYSPLIT)后向轨迹模式对水汽输送特征进行分析，总结强降水天气的特征，提高强降水预报服务能力以确保飞行安全。

1 资料与方法

主要利用NCEP的日平均、水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 的再分析资料、丽江机场2007—2019年VAISALA自动观测系统资料，以及2017—2019年GDAS资料等。其中GDAS资料是全球同化系统(GDAS)将NCEP资料同化得到6 h一次的再分析资料以及3 h一次的预报资料，水平分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ ，垂直方向上有21层的位势高度、温度、经向风、纬向风、比湿以及垂直速度。

为进一步分析水汽来源，引入NOAA空气资源实验室研发的HYSPLIT模型，GDAS资料为主要的模式输入资料。由于大气中水汽主要集中在对流层低层，而丽江机场海拔较高，为2242 m，因此选取丽江机场(26.68°N 、 100.25°E)上空700 hPa层作为模拟的终止高度。分别对2017—2019年6—9月的水汽输送轨迹进行96 h后向模拟，后向时间步长取3 h，并将相应位置上

的物理量插值到轨迹点上，4个月分别得到720、744、744、720条轨迹。

民航气象在《中国民用航空气象观测规范》中要求日降水量以00时(北京时，下同)为日界，因此，降水量观测、天气现象档案簿等资料多以北京时00—24时作为一天进行统计。若完全按照中国气象局制定的降水量标准判定历年强降水日数及准确日期，受记录详实程度的限制，历年强降水日数及准确日期可能会出现误差。丽江机场使用VAISALA地面自动观测系统进行雨量测量。因大雨及以上量级降水对飞行影响较大，本文指定丽江机场强降水标准为：24 h(00—24时)日降水量 ≥ 25 mm，即达到中国气象局大雨标准就算一次强降水过程。其中暴雨统计标准为日降水量 ≥ 50 mm。文中的水汽轨迹分析对追踪的气团到达所选研究点之前的路径进行模拟，并引入簇分析的方法对轨迹进行聚类分析^[11-12]。

2 丽江机场强降水基本特征

丽江强降水分布为东多西少。丽江机场处于丽江西南部，属于单点性降水，强降水总次数明显偏少。经统计，2007—2019年丽江机场强降水日数为101 d，年平均7.8 d，最大日降水量均没有超过100 mm，仅达到暴雨量级。丽江机场最大日降水量年际差异较大，最大为92.3 mm，出现在2017年8月3日，其次为2019年8月9日的85.2 mm，而2011年最大日降水量仅有32.4 mm，出现在7月26日。

图1给出了2007—2019年丽江机场强降水日数年、月分布。从强降水日数年际变化(图1a)可见，丽江机场强降水天气发生最多的是2018年，共出现15 d，最少的是2012年，强降水日数为2 d。其中，暴雨天气出现最多的是2017年(3 d)，2007、2011、2012、2014和2015年没有出现暴雨天气。丽江机场强降水天气年际差异较大。

从强降水日数月变化(图1b)可见，丽江机场强

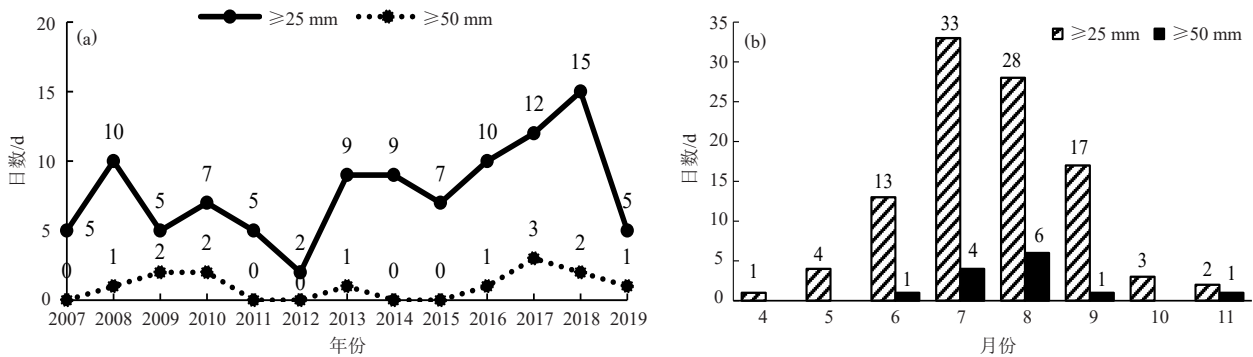


图1 丽江机场2007—2019年强降水天气日数年分布(a)和月分布(b)

Fig. 1 Annual distribution (a) and monthly distribution (b) of heavy rainfall days at Lijiang Airport from 2007 to 2019

降水天气有明显的季节变化特征，主要集中在雨季6—9月，这4个月的强降水日数占总日数的90%。其中7月出现日数最多，共33 d。暴雨主要分布在7—8月，占总暴雨日数的77%。干季强降水出现频率很低，特别是12月一次年3月没有出现过强降水天气。

经统计，2007—2019年丽江机场大多数强降水天气持续时间为1 d，共有12次出现连续2 d的强降水过程。丽江机场强降水天气根据降水云层性质及伴随天气，主要分为稳定性降水和对流性降水。101 d强降水天气中，有31 d属于稳定性降水，以层积云和雨层云为主，伴有低云或低能见度，降水日变化不明显；另有70 d属于对流性降水，伴随对流云或雷暴天气，夜间出现对流性强降水的频率明显比白天多，因为产生强降水的中尺度对流系统多出现在夜间。

3 强降水天气形势特征

统计丽江机场2007—2019年的101 d强降水天气过程，造成当地强降水的主要天气系统有西太平洋副热带高压（简称副高）、青藏高原、台风、孟加拉湾低压、南支槽、切变线、西南涡、冷锋等。各系统对丽江机场的影响往往不是单一的，而是多种系统叠加或相互影响，因此本文根据500 hPa高度上主要的影响系统^[13]，总结出7种强降水天气形势，占比从大到小分别为切变冷锋型、两高合并型、两高辐合型、南支槽型、孟加拉湾低压型、副高西伸型和台风外围型。通过表1可以看到以下2个特点。

表1 丽江机场2007—2019年强降水天气500 hPa天气形势统计

Table 1 Statistics on the 500 hPa weather pattern of heavy rainfall at Lijiang Airport from 2007 to 2019

天气形势	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	合计
切变冷锋型		2	5	9	6				22
两高合并型				1	4	11	2		18
两高辐合型			1	8	4	1			14
南支槽型	1	1	5		2	2	1	2	14
孟加拉湾低压型		1		10	2				13
副高西伸型			2	1	5	3			11
台风外围型				4	5				9

1) 切变冷锋型和两高合并型是丽江机场强降水的最主要天气形势，共出现40次，占比40%；其次为两高辐合型、南支槽型、孟加拉湾低压型和副高西伸型，台风外围型占比最少，仅占9%。

2) 切变冷锋型主要出现在夏初至盛夏的5—8月；两高合并型主要出现在夏末初秋的8—10月；两高辐合型和副高西伸型均出现在6—9月副高强盛期间，特别是7月和8月盛夏出现比例较高；南支槽型主要出现在

春末夏初的4—6月和夏末初秋的8—11月；孟加拉湾低压型和台风外围型主要出现在盛夏的7—8月，是热带气旋强盛阶段。

丽江机场7种强降水天气形势特征如下。

1) 切变冷锋型：图2a为22次切变冷锋型强降水平均环流形势。环流特征是500 hPa青藏高原上有低槽切变东移，副高位置偏东，脊线一般在25°N以南或主体位于南海；青藏高原东侧引导北方冷空气南侵，与低层的暖湿西南气流形成东西走向的切变线，切变线两侧的辐合流场在冷空气作用下，使得低层辐合加强，斜压性显著增大，从而产生强降水天气。

2) 两高合并型：图2b为18次两高合并型强降水平均环流形势。环流特征是500 hPa上副高西伸，与青藏高原合并后在孟加拉湾北侧20°—35°N形成一个较窄的连通带，一般呈西北东南向。若连通带位置偏北，丽江机场受高压南侧东南气流控制，有南海的大量水汽输送；若连通带位置偏南，丽江机场受高压北侧偏西或西南气流控制，有孟加拉湾的充沛水汽输送。

3) 两高辐合型：图2c为14次两高辐合型强降水平均环流形势。环流特征是500 hPa上青藏高原和副高强盛，青藏高原主体位于25°—40°N、90°—95°E，副高脊线位于20°—35°N且西脊点位于110°E附近时；两高在四川和云南形成一个鞍型场，丽江机场处于两高间的辐合区内，为丽江机场强降水的形成提供了有利的动力条件。

4) 南支槽型：图2d为14次西南低空急流次南支槽型强降水平均环流形势。环流特征是印度半岛至孟加拉湾北部有南支槽加深东移，500 hPa南支槽大多位于85°—95°E，槽底伸至20°N以南，西太平洋副高脊线位于20°N附近，副高西脊点到达110°E附近，副高西侧和槽前的西南气流叠加形成，强降水落区大多出现在西南低空急流的左前方。

5) 孟加拉湾低压型：图2e为13次孟加拉湾低压型强降水平均环流形势。最常见的环流特征是500 hPa中高纬地区受平直西风气流控制，孟加拉湾地区至印度半岛受低压环流控制，云南大部受低压外围东南气流影响，副高脊线位于30°N附近，控制中国东部地区，副高西南侧为强的东南气流，与孟加拉湾低压外围气流叠加形成东南急流，为丽江机场暴雨提供水汽条件。

6) 副高西伸型：图2f为11次副高西伸型强降水平均环流形势。环流特征是在盛夏及初秋季节，副高西伸至100°—110°E时，丽江正处于副高西北侧的不稳定区域内，低层由来自孟加拉湾的西南气流与副高西

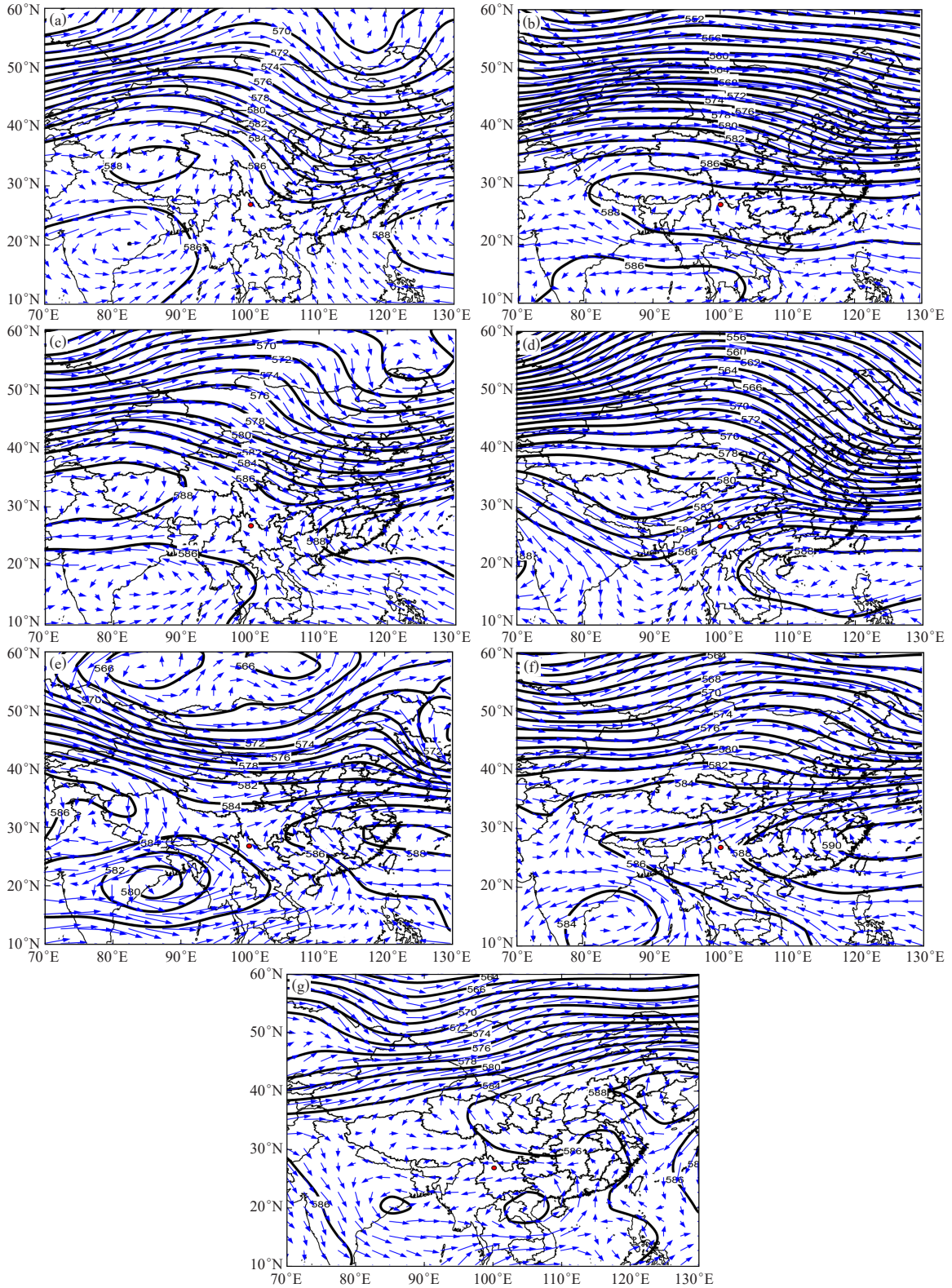


图2 丽江机场7种强降水天气形势平均图 (实线为500 hPa等高线; 箭头为500 hPa流场; 红点为丽江机场位置)
 Fig. 2 Average map of 7 types of heavy rainfall weather patterns at Lijiang Airport (the solid lines: 500 hPa contour lines; arrows: 500 hPa flow fields; the red dots: the location of Lijiang Airport)

(a) Shear cold front type; (b) Two high merging type; (c) Two high converging type; (d) South branch trough type; (e) Bay of Bengal low-pressure type; (f) Subtropical high westward extension type; (g) Typhoon peripheral type

北侧的西南气流相互叠加,通常形成一股强劲的西南低空急流,为丽江强降水形成提供了充沛的水汽及畅通的水汽通道。

7) 台风外围型:图2g为9次台风外围型强降水平均环流形势。环流特征是500 hPa上当南海、关岛、菲律宾附近海域形成的台风向偏西或西北方向移动时,台风中心位于20°N以北,110°E以西,副高被台风挤压北抬至30°N以北,丽江机场受台风外围云系和副高南侧偏东气流影响,有利于丽江机场出现强降水天气。

4 强降水成因分析

4.1 强降水垂直运动特征

垂直运动与天气的关系最密切。图3为丽江机场沿26.68°N剖面的101 d强降水天气垂直速度平均图。由图可见,强降水期间丽江机场100.25°E上空整层为垂直负速度大值区,说明在700~300 hPa存在较强的上升运动^[14-15]。上升运动带来阴雨天气,下沉运动带来晴好天气。如果水汽含量和水汽输送都非常充分,那么降水量可以与上升运动的速度成正比。与垂直运动相伴的天气系统有锋面、切变线、低涡等。

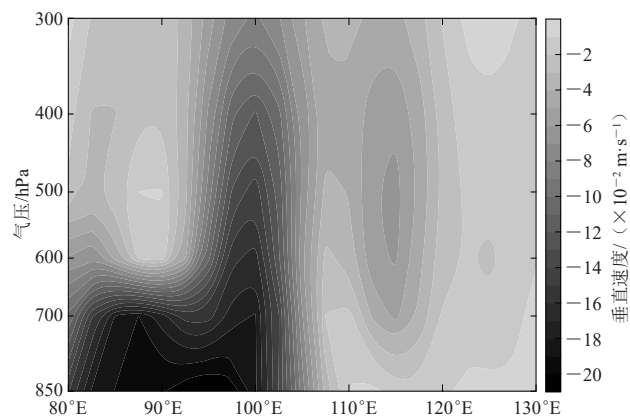


图3 丽江机场沿26.68°N的强降水天气垂直速度平均的垂直剖面图

Fig. 3 Vertical profile along 26.68°N of average vertical velocity of heavy rainfall weather at Lijiang Airport

4.2 强降水水汽特征

从丽江机场强降水天气水汽通量和水汽通量散度平均图(图4)可以看到,丽江机场水汽主要来自700 hPa高度,滇西北至孟加拉湾为水汽通量大值区,水汽主要来自孟加拉湾地区^[16];滇西北在500 hPa上处于水汽辐散区,而700 hPa处于水汽辐合区,低层水汽辐合,高层辐散,有利于水汽向上垂直运动,从而产生强降水天气^[17-18]。

5 强降水水汽输送特征分析

强降水天气的发生要有充足的水汽输送。图5为丽江机场6—9月轨迹聚类后得到的700 hPa水汽输送通道空间分布。从图中可以看出,丽江机场2017—2019年雨季水汽来源有3个路径:一是西南路径,水汽从孟加拉湾南部洋面或缅甸地区越过横断山脉向东北方向输送,到达丽江机场上空;二是东南路径,主要为副高或台风外围气流带来的南海方向的水汽^[19];三是东北路径,水汽在川东及重庆地区累积,后受川滇切变或西南低涡影响^[20],将水汽向西南方向输送至丽江机场。

丽江机场6月水汽输送均来自西南路径(图5a),其中通道1和2为来自缅甸地区的水汽,共占总轨迹数的91%。通道3为孟加拉湾南部洋面的水汽经缅甸南部北上到达丽江机场,该部分水汽占比较小,仅为9%。当有深厚的南支槽时,槽前西南低空急流可以将距离较远的孟加拉湾南部充沛的水汽带到丽江地区^[21],给丽江机场带来强降水天气。

丽江机场7月水汽输送路径主要有2个(图5b),其中通道1和2属于西南路径,通道3为东南路径。通道1来自缅甸地区的轨迹数占比59%,较6月有所下降,通道2来自孟加拉湾地区的轨迹数占比31%,较6月有所增长,说明7月西南季风加强,来自孟加拉湾洋面的水汽更多,丽江机场水汽条件较6月更充沛,强降水概率更高。另外,7月副高北抬西伸,台风也活动频繁,二者外围气流有时将南海方向的水汽输送至丽江地区,因此东南路径(通道3)表现为南海方向水汽输送,占比仅为10%。西南路径占比共90%,仍然是丽江机场7月主要的水汽输送路径。

丽江机场8月水汽输送路径有3个。轨迹数占比最多的仍然是西南路径(通道3),但占比51%明显低于6月和7月。东南路径(通道2)占比较7月有所增加,为34%,说明8月受副高和台风活动影响,来自南海方向的水汽加强。东北路径(通道1)通过切变线或西南涡将川渝地区的水汽带到丽江机场,常导致丽江机场出现强降水天气。

9月随着副高东退南压,孟加拉湾季风仍然持续^[22-23],丽江机场水汽输送路径有2个方向。西南路径(通道1和2)来自缅甸地区的轨迹数共占比82%,是9月丽江机场水汽输送的主要路径。东北路径(通道3)轨迹数占比为18%,与8月基本一致,通过低层系统将川渝地区的水汽输送至丽江地区,并且高空切变线开始活动,地面常有冷空气向滇西北侵入,导致丽江机场出现锋面过境的连阴雨天气。

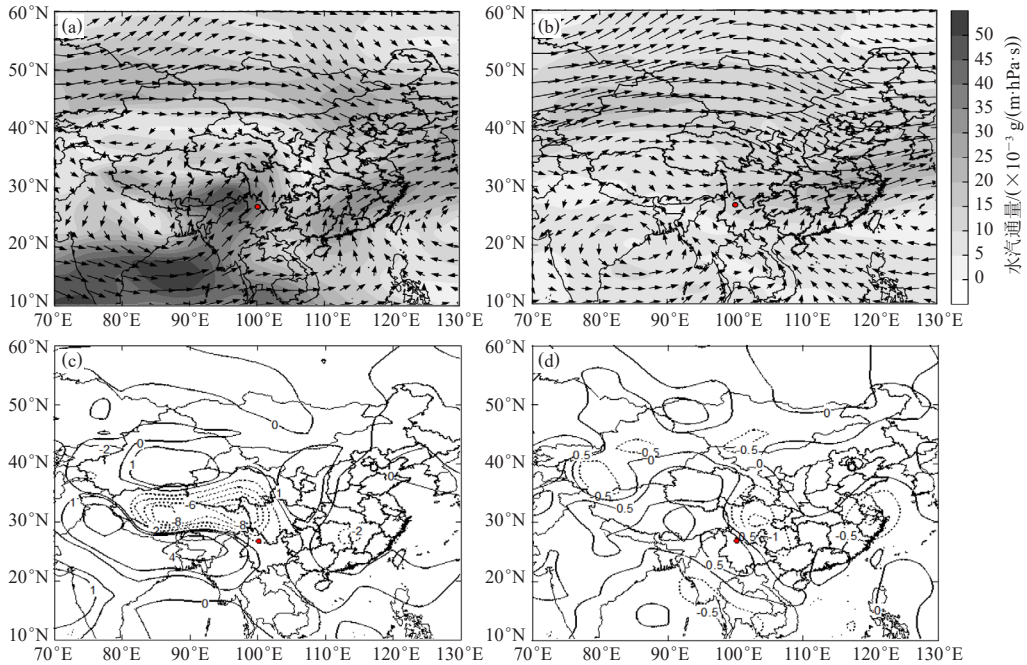


图4 丽江机场强降水天气水汽通量(阴影)和水汽通量散度(单位: $\times 10^{-9} \text{ kg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})$)平均图(红点为丽江机场位置)
(a) 700 hPa水汽通量; (b) 500 hPa水汽通量; (c) 700 hPa水汽通量散度; (d) 500 hPa水汽通量散度

Fig. 4 Average of water vapor flux and water vapor flux divergence during heavy rainfall at Lijiang Airport (unit: $\times 10^{-9} \text{ kg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})$; the red dot: the location of Lijiang Airport)

(a) 700 hPa water vapor flux; (b) 500 hPa water vapor flux; (c) 700 hPa water vapor flux divergence; (d) 500 hPa water vapor flux divergence

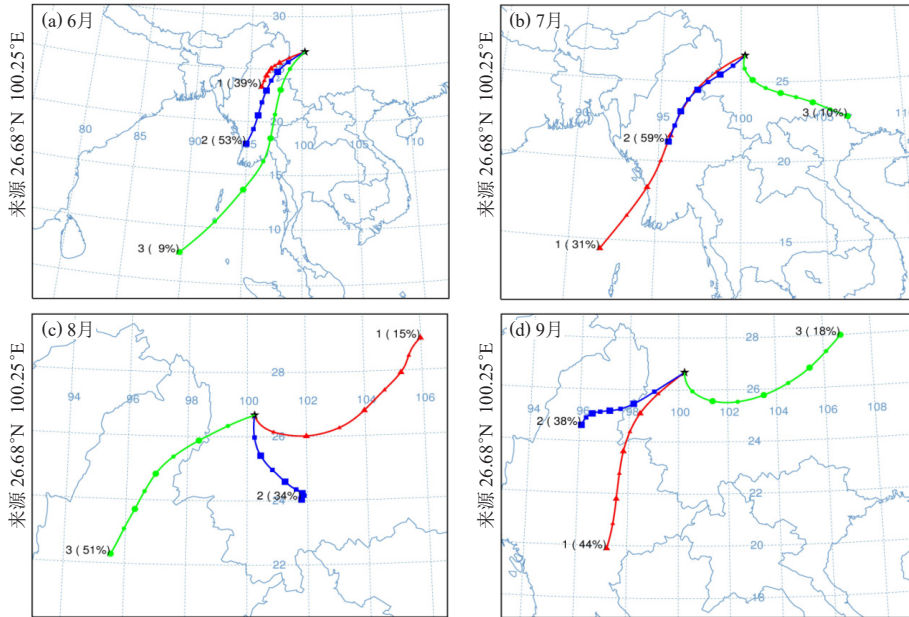


图5 丽江机场2017—2019年6—9月700 hPa水汽输送通道空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of 700 hPa water vapor transport channels at Lijiang Airport from June to September during 2017 to 2019

6 结论

1) 丽江机场强降水日数年际差异较大, 最多的是2018年出现15 d, 最少的是2012年仅出现2 d, 年平均强降水日数为7.8 d。丽江机场最大日降水量为

92.3 mm。强降水天气有明显的季节变化特征, 雨季6—9月的强降水日数占比达90%, 暴雨主要分布在7—8月。丽江机场强降水天气持续时间主要为1 d, 夜间出现对流性强降水的频率明显比白天多。

2) 丽江机场强降水天气形势主要有7种, 其中切变冷锋型和两高合并型是丽江机场强降水的最主要天气形势, 占比40%; 切变冷锋型主要出现在夏初至盛夏的5—8月; 两高合并型主要出现在夏末初秋的8—10月; 两高辐合型和副高西伸型均出现在6—9月副高强盛期间; 南支槽型主要出现在春末夏初的4—6月和夏末初秋的8—11月; 孟加拉湾低压型和台风外围型主要出现在盛夏的7—8月。

3) 强降水期间丽江机场上空整层为垂直上升速度大值区, 是产生强降水的必要条件。强降水的水汽主要来自700 hPa高度, 低层水汽辐合, 高层辐散, 有利于水汽向上垂直运动, 从而产生强降水天气。

4) 通过HYSPLIT模式分析, 丽江机场雨季700 hPa水汽输送通道中西南路径占比最大, 孟加拉湾是丽江机场雨季最主要的水汽来源; 7—8月副高强盛、台风活动频繁, 有一定的南海方向水汽输送; 8—9月受川滇切变线和西南涡影响有少量来自川渝地区的水汽输送; 9月因高空切变线和地面冷空气开始活动, 有少量冷空气沿东北路径入侵, 常造成丽江机场出现锋面过境的连阴雨天气。

参考文献

- [1] 周鹏康, 秦金梅. 云南1981—2010年雨季暴雨时空分布特征[J]. 云南地理环境研究, 2016, 28(4): 63-69.
- [2] 邹灵宇, 于璐, 杨柯, 等. 云南不同强度短时强降水和大风时空分布特征研究[J]. 高原山地气象研究, 2022, 42(2): 32-37.
- [3] 李耀孙, 原韦华, 孙绩华, 等. 云南雨季和干季小时降水的时空特性分析[J]. 高原山地气象研究, 2021, 41(3): 24-32.
- [4] 马志敏, 杨素雨, 王治国, 等. 云南局地暴雨分型研究[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2020, 42(1): 108-118.
- [5] 马文倩, 陈小华, 李华宏, 等. 云南一次极端强降水过程成因和地形影响分析[J]. 高原山地气象研究, 2021, 41(4): 25-34.
- [6] 陈小华, 李华宏, 何钰, 等. 云南切变线类短时强降水MCS特征分析[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2022, 44(3): 550-559.
- [7] 刘磊, 闵颖, 尹丽云. 云南地区强降水物理量场特征分析[J]. 云南地理环境研究, 2019, 31(6): 53-59.
- [8] 苏锦兰, 张万诚, 宋金梅, 等. 云南小时降水的时空分布变化研究[J]. 气象, 2021, 47(2): 133-142.
- [9] 王治国, 米瑞芝, 闵颖, 等. 云南一次两高辐合型短时强降水过程的成因分析[J]. 中低纬山地气象, 2021, 45(3): 48-55.
- [10] 马文倩, 向影, 牛法宝, 等. 云南盛夏一次低涡强降水天气过程诊断分析[J]. 中低纬山地气象, 2022, 46(1): 1-9.
- [11] Draxler R R, Hess G D. Description of the HYSPLIT_4 modeling system: NOAA technical memorandum ERL ARL-224[R]. Silver Spring, Maryland: Air Resources Laboratory, 1997: 1-22.
- [12] Draxler R R, Hess G D. An overview of the HYSPLIT_4 modeling system of trajectories, dispersion, and deposition[J]. Australian Meteorological Magazine, 1998, 47(4): 295-308.
- [13] 米瑞芝, 牛法宝, 向影, 等. MJO影响下2016年云南首场强降水过程的成因分析[J]. 干旱气象, 2017, 35(2): 232-238, 249.
- [14] 朱蒙, 康暑雨, 张艳玲. 豫东地区短时强降水时空分布特征及物理量指标分析[J]. 气象与环境科学, 2020, 43(3): 116-123.
- [15] 蓝俊倩, 张浩川, 徐月飞. 一次有冷空气侵入的梅汛期大暴雨过程诊断分析[J]. 气象与环境科学, 2018, 41(3): 71-80.
- [16] 王欢, 李晶, 庞玥, 等. 2013年重庆秋季连阴雨期间暴雨过程对比分析[J]. 气象与环境科学, 2018, 41(3): 89-97.
- [17] 李京梅. 2014年夏末秋初三门峡市连阴雨成因分析[J]. 气象与环境科学, 2017, 40(2): 115-119.
- [18] 刘林春, 刘炜, 孙鑫, 等. 内蒙古河套地区极端降水特征分析[J]. 干旱气象, 2020, 38(4): 535-542.
- [19] 姜艳. 热带气旋西行造成的远距离降雨特征分析[J]. 高原山地气象研究, 2019, 39(1): 20-25.
- [20] 高松, 陈贵川, 吴钰, 等. 一次西南低涡影响下的川渝地区暴雨个例分析[J]. 干旱气象, 2019, 37(4): 597-612.
- [21] 郑婧, 陈娟, 徐星生, 等. 一次低空急流加强下的暴雨过程成因分析[J]. 干旱气象, 2020, 38(3): 411-422.
- [22] 李扬, 张娇艳, 向波. 全球变暖背景下西太平洋副热带高压变化的探讨[J]. 高原山地气象研究, 2019, 39(2): 8-13.
- [23] 张万诚, 马涛, 郑建萌, 等. 秋季水汽输送特征及其与云南降水的关系[J]. 气象, 2014, 40(3): 336-348.

(编辑: 郑秋红)

(上接66页)

- [12] 陈兴旺. 广义极值分布理论在重现期计算的应用[J]. 气象与减灾研究, 2008, 31(4): 52-54.
- [13] 段忠东, 肖玉凤, 肖仪清, 等. 基于数值模拟的台风危险性分析综述(II)——随机抽样模拟与极值风速预测[J]. 自然灾害学报, 2012, 21(2): 1-8.
- [14] 张铁军, 颜鹏程, 张正英, 等. 多种订正技术在风电场风速预报订正中的应用[J]. 干旱气象, 2018, 36(5): 835-844.
- [15] 韩爽, 杨勇平, 刘永前. 三种方法在风速预测中的应用研究[J]. 华北电力大学学报, 2008, 35(3): 57-61.
- [16] 刘媛媛, 何文春, 王妍, 等. 气象大数据云平台归档系统设计与实现[J]. 气象科技, 2021, 49(5): 697-706.
- [17] 杨萍, 侯威, 封国林. 中国极端气候事件的群发性规律研究[J]. 气候与环境研究, 2010, 15(4): 365-370.
- [18] 侯威, 章大全, 周云, 等. 一种确定极端事件阈值的新方法: 随机重排去趋势波动分析方法[J]. 物理学报, 2011, 60(10): 790-804.
- [19] 赵煜飞, 张强, 余予, 等. 中国小时风速数据集研制及在青藏高原地区的应用[J]. 高原气象, 2017, 36(4): 930-938.
- [20] 王晓惠, 巫黎明, 张洋, 等. 基于非平稳Gumbel分布模型的设计风速及抗风风险研究[J]. 太阳能学报, 2019, 40(11): 3309-3315.
- [21] 杨萍, 刘伟东, 王启光, 等. 近40年我国极端温度变化趋势和季节特征[J]. 应用气象学报, 2010, 21(1): 29-36.
- [22] 赵林, 葛耀君, 项海帆. 极值风速拟合优化策略[J]. 同济大学学报, 2003, 31(4): 383-388.
- [23] 万仕全. 中国降水与温度极值的时空分布规律模拟[D]. 兰州: 兰州大学, 2010.
- [24] 吴佳, 吴婕, 闫宇平. 1961—2020年青藏高原地表风速变化及动力降尺度模拟评估[J]. 高原气象, 2022, 41(4): 963-976.
- [25] 李万润, 张广隶, 李林, 等. 基于长期实测数据的西北地区风力发电场风速风向联合概率分布分析[J]. 兰州理工大学学报, 2022, 48(3): 115-124.
- [26] 曹诗嘉, 侯静雅, 方伟华, 等. 基于站点实测风速的中国台风大风重现期估计[J]. 灾害学, 2019, 34(1): 229-234.

(编辑: 郑秋红)