

新疆昭苏彩虹环流特征及其可预报性分析

李冬梅¹ 李如琦² 唐冶² 高明华³ 王媛³

(1 新疆农业气象台, 乌鲁木齐 830002; 2 新疆气象台, 乌鲁木齐 830002; 3 伊犁州气象局, 伊宁 835000)

摘要: 采用2017—2019年NCEP/NCAR逐日 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 再分析数据和伊犁州昭苏气象站彩虹观测记录, 对昭苏出现彩虹的环流特征进行了分型, 并通过对数值模式预报产品的检验分析了昭苏彩虹的可预报性。结果表明: 昭苏4—9月都可观测到彩虹, 绝大多数出现在17—22时; 500 hPa的环流可归纳为西南气流型、偏西气流型、脊区型和西北气流型4种环流型, 700 hPa存在风的辐合或切变, 叠加地形的抬升作用, 使对流不稳定强烈发展, 对流系统生成, 利于对流性降水的出现; ECMWF模式对环流形势的预报时效可达7 d; 提出了经过实践检验的昭苏彩虹预报思路, 概率约为65%。

关键词: 彩虹特征, 环流分型, 可预报性, 昭苏

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2022.02.011

Characteristics and Predictability of Rainbow Circulation in Zhaosu

Li Dongmei¹, Li Ruqi², Tang Ye², Gao Minghua³, Wang Yuan³

(1 Xinjiang Agricultural Meteorological Observatory, Urumqi 830002

2 Xinjiang Meteorological Observatory, Urumqi 830002 3 Yili Meteorological Bureau, Yining 835000)

Abstract: Using NCEP / NCAR daily $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ reanalysis data from 2017 to 2019 and the rainbow observation records of Zhaosu meteorological station in Yili, the circulation characteristics and its predictability of rainbow in Zhaosu are analyzed. The results show that rainbows can be observed from April to September in Zhaosu, and most of them occur at 17–22 o'clock. The circulation situation at 500 hPa can be summarized as four types: southwest flow type, west flow type, ridge type and northwest flow type. There is wind convergence or shear at 700 hPa, and superimposed topographic uplift, the convective instability develop strongly and the convective system is generated, which is conducive to the convective precipitation. The ECMWF model can predict the circulation situation in 7 days. The prediction idea of Zhaosu rainbow is proposed, and the probability is about 65%.

Keywords: rainbow's characteristics, circulation classification, predictability, Zhaosu

0 引言

昭苏县位于伊犁河谷西南部山间高原盆地, 是古丝绸之路要道, 边境线长约220 km, 是新疆唯一一个没有荒漠的县。昭苏属大陆性温带山区半干旱半湿润冷凉型气候, 冬长夏短, 没有明显的四季之分, 春秋湿润、寒冷、多雾, 盛夏多雷、多雨。全年无霜期平均为96 d, 年均降雨量507 mm, 4—9月降水量达全年降水量83%, 尤其是6月和7月降水日达60%。昭苏地处山间盆地, 三面环山, 东边为狭长山谷, 西边为开阔盆地, 每年5—9月, 冷暖空气交汇频繁, 对流天气频发, 夏季每旬有5—6天为雷阵雨, 常会出现西边日落东边雨的现象, 满足了彩虹出现的条件, 为彩虹预报提供了独特而有利的条件。彩虹自古以来是美好的象征, 彩虹预报对推进当地发展全域旅游无疑是

锦上添花, 也是拓展气象预报业务新领域的一次成功探索。

由于地形原因, 昭苏对流性降水多发, 彩虹主要出现在对流性降水之后。对于对流性降水的研究多集中于短时强降水, Doswell^[1]指出大多数的强降水是对流性的, 预报短时强降水首先要理解其产生的条件; Polston^[2]归纳了美国强对流天气的两种环流形势; 孙继松等^[3-4]、俞小鼎^[5]总结了短时强降水预报的基本原理和主要思路、方法, 郑媛媛等^[6]、周后福等^[7]、郝莹等^[8]分析了短时强降水的多尺度环境特征, 并给出了预报预警指标, 樊李苗等^[9]对中国短时强降水等强对流天气的环境参数特征进行了分类和对比分析, 许爱华等^[10]、曾波等^[11]提出了中国中东部地区短时强降水的基本类别和环境场特征, 白晓平等^[12]建立了西北地区东部短时强降水的概念模型, 其他学者^[13-18]分别对国内不同地区短时强降水的天气气候特征、环流形势、发生发展机理和预报指标进行了统计和分析, 得到了许多重要的结论。

收稿日期: 2020年5月25日; 修回日期: 2020年7月27日
第一作者: 李冬梅(1975—), Email: maylee9019@163.com
通信作者: 李如琦(1974—), Email: liruqi@sohu.com

新疆夏季局地短时强降水多发，新疆气象科技工作者对全疆短时强降水的影响系统、相关物理量方面的研究取得了许多成果，杨莲梅等^[19]认为中亚低涡是造成新疆短时强降水的重要影响系统之一；杨莲梅等^[20]、张云惠等^[21]分别分析了乌鲁木齐和伊犁河谷短时强降水的中小尺度特征和有利环境条件；曾勇等^[22]、黄艳等^[23]对南疆西部短时强降水的中尺度特征和日变化进行了分析，庄晓翠等^[24]则统计分析了阿勒泰地区短时强降水环流配置和关键环境参数特征。本文将通过检验模式对昭苏对流性降水的形势预报和降水预报产品，分析昭苏彩虹的可预报性。

1 资料

选用昭苏县气象局2017—2019年的虹霓观测记录数据，提取了3年中出现虹霓的日期和时间。采用1日2次的常规探空观测的高度场、风场历史资料和NCEP/NCAR提供的1日4次、格距 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 的高度场、温度场、风场和海平面气压场再分析资料，分析出现虹霓时的环流形势特征。采用ECMWF的3 h对流降水预报（格距 $0.125^{\circ} \times 0.125^{\circ}$ ），和中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所的区域数值模式DOGRAFS的1 h降水预报（格距 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ ）分析昭苏彩虹的可预报性。

2 昭苏彩虹的特征

彩虹是虹和霓的总称，出现在早晚雨后斜阳复出的时刻。在太阳对面的雨幕背景上，正对太阳中心对日点周围，以对日点为中心的鲜艳夺目的彩色圆弧，有时两个，有时一个。根据昭苏县气象局的观测记录，2017—2019年共观测到彩虹现象168次，其中虹121次，霓47次。昭苏彩虹年均出现约45次。从彩虹的月分布分析（图1），4—9月都有出现，6月出现最多，约占全年次数的40%；最早4月12日，最晚9月26日，均出现在2019年。从日分布分析，大多数彩虹出现在17—22时，早晨仅观测到1次，出现在昭苏本站2018年6月7日07时16分，最晚观测记录出现在2017年7月18日22时20分。

绝大多数彩虹出现时天空基本上都存在积雨云，

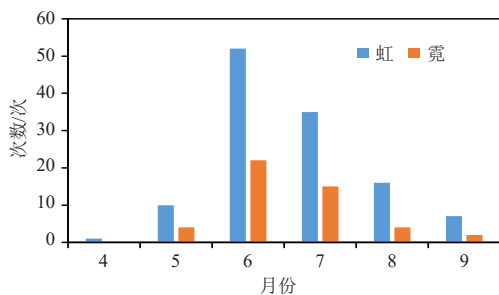


图1 2017—2019年昭苏虹霓观测次数的月分布

Fig. 1 Monthly distribution of rainbow observation times in Zhaosu from 2017 to 2019

地面为偏西风，前一小时内出现阵雨或正伴随有阵雨。当雨后阳光照射空气中的水珠，一次全反射形成外红内紫的虹，两次全反射形成内红外紫的霓，也就是说先形成虹后形成霓，出现霓时必然伴随着虹，因此，选取出现虹的日期记为1个彩虹日，一日出现2次或以上时只记为1个彩虹日，3年共得到昭苏彩虹日92个。

3 环流特征及分型

合适的大气环流，是形成昭苏彩虹重要条件之一。昭苏彩虹主要出现在午后，故以20时的环流形势为代表，开展彩虹日环流特征的分析。对比2019年4—9月28个彩虹日20时的500 hPa平均环流与6个月的平均环流（图略），发现西西伯利亚至新疆存在明显的负距平，伊朗高原和中西伯利亚为正距平，表明出现彩虹日西西伯利亚至新疆的低值系统、伊朗副高和西伯利亚脊均偏强，利于昭苏出现降水，可见彩虹日的环流具有明显不同的特征。根据昭苏92个彩虹日20时500 hPa的环流配置，归纳昭苏彩虹日可分为4种环流型：西南气流型、偏西气流型、脊区型和西北气流型。

3.1 西南气流型

西南气流型是昭苏出现彩虹的主要环流型，有45次，占48.9%。该型也是伊犁河谷夏季形成降水的主要环流型，中高纬度一般为两脊一槽形势，大多数情况下，伊朗脊发展北抬至乌拉尔山地区，新疆大部至蒙古高原为脊区，中亚为深厚的低涡或低槽活动区，槽底可以南伸至 35°N ，昭苏位于槽前强盛的西南气流带上（图2）；少数情况下，伊朗脊发展但向东伸展，与新疆脊叠加向西伯利亚发展，低涡位置偏西，呈横槽形势，中心位于西西伯利亚，底部锋区南压至 40°N 附近，昭苏位于新疆脊后部西南锋区上。从700 hPa风场上来看，无论多数情况还是少数情况，在昭苏北部均存在较大的风速区，昭苏附近有较为明显的风速切变和辐合。西南暖湿气流携带的丰沛水汽到达昭苏时，

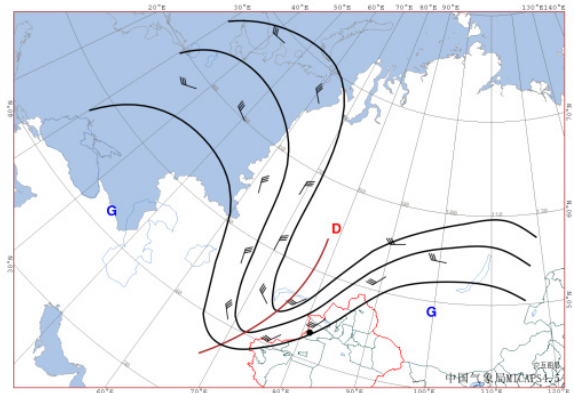


图2 西南气流型500 hPa形势（●为昭苏）

Fig. 2 500 hPa circulation situation of southwest flow type (● is Zhaosu)

受地形的影响, 叠加低层的辐合抬升, 对流不稳定强烈发展, 促使对流系统生成, 易出现强对流天气。

3.2 偏西气流型

偏西气流型共出现29次, 占31.5%。该型近半数情况呈现在中纬度为横槽形势(图3), 伊朗脊发展与东欧脊叠加, 并向东北方向伸展, 西伯利亚低槽南下到巴尔喀什湖以北地区, 并向西发展, 有时会切涡, 在45°N的里海、咸海地区形成横槽, 昭苏正位于横槽底部偏西气流带上; 另外一部分情况中高纬为两支锋区, 北方西伯利亚维持较强的低值系统, 其外围形成较强的北支锋区, 伊朗副高发展向东欧伸展, 40°N附近得中亚至新疆较为平直, 形成偏西风的南支锋区, 昭苏位于南支锋区上, 受锋区上东移的短波的影响, 多出现阵性降雨。700 hPa上多数情况下在昭苏北部有风速的切变, 南部有西南风形成的风向辐合, 而在少数情况下也存在同样的情况, 但强度明显偏弱。

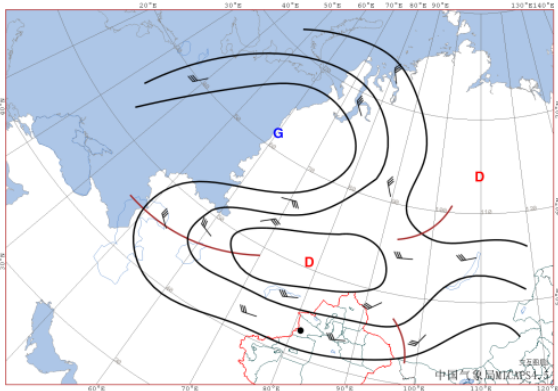


图3 偏西气流型500 hPa形势 (●为昭苏)
Fig. 3 500 hPa circulation situation of west flow type
(● is Zhaosu)

3.3 脊区型

脊区型出现12次, 占13.1%。该型多数情况在新疆天山山区呈鞍形场形势(图4), 北支锋区略偏北, 偏西气流带一般位于巴尔喀什湖附近, 伊朗脊向东发展, 经新疆伸到蒙古高原及贝加尔湖地区, 受北部和东部低槽的影响, 脊区在天山山区断开, 从而形成鞍形场, 昭苏位于鞍形场脊区内, 700 hPa风场上昭苏附近由东北风转为西北风, 存在弱的气旋性切变; 个别情况为两槽一脊形势, 伊朗脊发展东扩与新疆脊合并, 脊顶北抬至65°N, 乌拉尔山和西伯利亚地区为低槽区, 昭苏位于脊区内伊朗脊和新疆脊的结合部, 700 hPa风场上昭苏附近西北风转为西南风, 也存在弱的气旋性切变。脊区内气压稳定, 风速较小, 但由于北部气流带和西南部副高外围反气旋性环流的共同作用, 中高层辐散发展, 叠加地面水汽蒸发, 使上升运动迅速发展, 形成对流性降水。

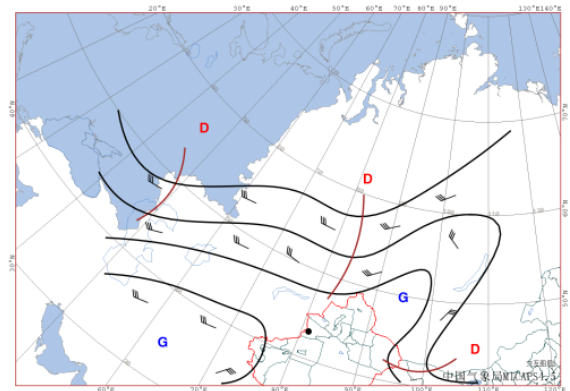


图4 脊区型500 hPa形势 (●为昭苏)
Fig. 4 500 hPa circulation situation of ridge type
(● is Zhaosu)

3.4 西北气流型

西北气流型出现最少, 仅有6次, 占6.5%。该型大多数在中高纬度地区呈西北向东南倾斜的 Ω 形势(图5), 伊朗脊向东北方向强烈发展, 控制中亚至西西伯利亚, 东欧槽和新疆槽分别位于脊的两侧, 昭苏位于脊前槽后西北气流带上; 个别情况下没有明显的 Ω 形势, 伊朗副高发展北抬, 脊顶到达50°N附近, 东欧至西伯利亚为宽广的低槽活动区, 西伯利亚低涡较为强盛, 昭苏位于伊朗脊脊前至西伯利亚低涡底部形成强的西北气流带上, 受气流带上短波槽的影响, 北方冷空气南下与暖气团汇合形成对流性降水。700 hPa风场上来看, 在伊犁河谷都存在明显的西北风带, 东部、北部风速较大, 昭苏附近存在风速的切变。

4 可预报性分析

4.1 彩虹的形成条件

彩虹是太阳光照到水滴上, 经过折射、分光、全反射、再折射回来的外红内紫的圆形光带。出现彩虹的最大太阳高度角为42°22', 太阳高度角越小, 彩虹越大越高; 太阳高度越大, 彩虹越低越小; 雨滴越大,

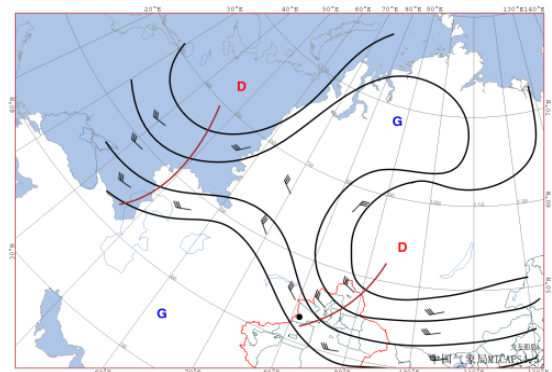


图5 西北气流型500 hPa形势 (●为昭苏)
Fig. 5 500 hPa circulation situation of northwest flow type
(● is Zhaosu)

彩虹越亮。霓则是太阳光照到水滴上，经过折射、分光、全反射、再折射回来的外紫内红的圆形光带，色调比虹暗，最大太阳高度角为 $50^{\circ}24'$ 。

彩虹形成在雨后的雨滴幕上，雨滴幕对面须有太阳光照射，人在太阳一侧可以观测到彩虹，对流性降水最容易满足彩虹出现的条件。对流性降水一般尺度(范围、时间)较小，很快云散，太阳重新出头，空气中的水滴含量大，散射太阳光形成彩虹。在地面可视范围内，由于热力作用，西方日头，东方降雨，偏东方向易形成彩虹。反之，东方日头，西方降雨，西方形成彩虹较少见，原因是早上西方出现对流，通常都是较强的典型冷锋系统东移，一般情况可视天空位于上升运动区，东方较少见到蓝天和太阳。彩虹出现的规律为：在可视范围内，下午出现彩虹多，早上少，中午太阳高度角 $>42^{\circ}$ ，不能形成可视彩虹。从昭苏彩虹观测记录分析，观测到虹霓时80%以上伴随着阵性降水(表1)，不到20%观测时无降水，但前期有降水。

表1 观测到彩虹时降水情况(单位:次)

Table 1 Precipitation when rainbow is observed (unit: times)

	2017年		2018年		2019年	
	伴降水	无降水	伴降水	无降水	伴降水	无降水
虹	32	5	38	7	32	7
霓	15	2	13	5	11	1
总计	47	7	51	12	43	8
占比/(%)	87	13	81	19	84	16

4.2 彩虹的可预报性

夏日午后的对流性降水往往会伴随彩虹的出现，因此彩虹的预报也应当建立在对流性降水预报的基础之上。对流性降水尺度小，演变速度快，时间短，局地性强，对流性降水的预报一直以来都是气象研究和业务领域的重要挑战之一，高分辨率数值天气预报模式的应用极大地提高了对流性降水定量预报的准确性。

4.2.1 环流型与彩虹的统计检验

为了分析环流型与出现彩虹关系，从环流的角度检验彩虹的可预报性，普查了2017—2019年4—9月逐日20 h的500 hPa环流形势，按照4种环流型的主要配置，统计了每年各类型的出现次数及出现彩虹的次数(表2)。从表中可以看出各环流类型年出现次数没有明显的规律，与彩虹观测也没有明显的对应关系，但

表2 环流型和彩虹出现次数(单位:次)

Table 2 Circulation type and rainbow occurrence times (unit: times)

年份	西南气流型	偏西气流型	脊区型	西北气流型	合计	占比/%
2017	25/14	15/7	8/6	4/2	52/29	55.8
2018	31/16	25/14	9/4	5/1	70/35	50.0
2019	27/15	13/8	7/2	6/3	53/28	52.8
合计	83/45	53/29	24/12	15/6	175/92	52.5

环流型与彩虹的出现次数比约为2:1，就是说报对了环流型，预报彩虹的成功率可达50%以上。

4.2.2 环流形势的预报检验

考虑到业务应用的问题，昭苏彩虹的中期预报主要基于ECMWF全球模式的形势场预报产品来开展，通过分析数值模式形势预报来判断昭苏是否出现对流性降水。因此，本文检验了昭苏彩虹不同类型环流形势预报的稳定性。

(1) 西南气流型

选取2018年8月28日作为西南气流型的典型个例，彩虹观测时间21:02，方位为 $131^{\circ}\sim 133^{\circ}$ ，最高点仰角为 33° ，太阳方位为W，云状为Cu cap、Cu cong、Cu hum，观测前1小时有阵雨。从当日20时的高度场和风场来看，中高纬度为两脊一槽形势，西西伯利亚为低涡，低涡底部低槽南伸至中亚，昭苏位于槽前西南气流带上，受东北上短波槽影响。根据ECMWF模式24~168 h的500 hPa环流形势预报分析，模式提前7 d即做出了较为准确的预报，并且在随后几天里也没有明显的调整，维持了很好的稳定性。

(2) 偏西气流型

选取2018年7月14日作为偏西气流型的典型个例，彩虹观测时间18:57，方位为 $81^{\circ}\sim 118^{\circ}$ ，最高点仰角为 23° ，太阳方位为WSW，云状为Cb cap、Cu hum，观测时有阵雨。从20时实况场上可以看到中纬度环流经向度不大，西西伯利亚地区为低涡，呈东西向横槽型分布，昭苏位于低涡底部偏西气流带上，受其上短波槽影响形成降水。从ECMWF环流形势7 d的预报发现，西西伯利亚低涡的位置强度的预报调整明显，变化较大，但偏西气流带的预报相对稳定，且都有短波槽影响，表明可以提前7 d做出正确的预报。

(3) 脊区型

脊区型选取典型个例为2017年6月22日，彩虹观测时间20:58，方位为 $110^{\circ}\sim 165^{\circ}$ ，最高点仰角为 30° ，太阳方位为WSW，云状为Sc cug、Cu hum，观测时有阵雨。20时的500 hPa图上可以看到，环流形势为鞍型场，伊朗—新疆—贝加尔湖为脊区，新疆以北的西伯利亚、青藏高原北部及新疆移动为低涡槽区昭苏位于脊区内。从ECMWF形势场168 h预报可以发现鞍型场形势已经基本出现，新疆位于脊区，随后几天的预报中，仅西伯利亚低槽逐渐加强为低涡，其他系统的预报变化不大，表明7 d的预报相对稳定。

(4) 西北气流型

西北气流型的典型个例为2019年7月20日，彩虹观测时间20:19，方位为 $70^{\circ}\sim 120^{\circ}$ ，最高点仰角为 33° ，太阳方位为W，云状为Cb cap，观测时有阵雨。20时500 hPa环流场上，北方基本上为低值系统控制，

低涡中心位于新疆以北的西伯利亚, 伊朗副高控制整个中亚地区及南疆西部, 昭苏位于低涡底部后部、脊前西北气流带上。分析7 d的形势预报, 可以看到伊朗副高的预报变化不大, 西伯利亚低涡的中心位置、强度在7 d中有较多的调整, 但脊前西北气流带没有大的变化。

综合4个类型典型个例的500 hPa环流形势预报的检验分析, ECMWF模式对于昭苏出现对流性降水的环流形势预报是比较准确的, 一般在168 h就可以做出初步的对流性降水预报, 而且在24~168 h内预报维持相对的稳定。可见, 采用ECMWF模式可以提前7 d得到昭苏可能出现彩虹的预报。

4.2.3 降水预报检验

经统计, ECMWF对流降水和DOGRAFS预报昭苏彩虹日17—22时有降水的比例达85%以上, 20时预报要优于08时预报。

为了进一步了解对于昭苏对流性降水的预报准确性, 检验了ECMWF全球模式的对流性降水预报和区域模式DOGRAFS的逐小时降水预报, 结果为: 2019年4—10月ECMWF对流性降水预报的3 h晴雨预报准确率为84.4%, DOGRAFS逐小时晴雨预报准确率为85.1%, 如果将预报时间段扩展到6 h, 则晴雨预报的准确率可以达到90%以上, 可见采用模式降水预报产品来预报昭苏对流性降水是可行的。近年来, 气象台开展了精细化网格预报产品的研发, 覆盖全疆的5 km格点客观预报产品已经投入业务应用, 经初步检验, 其晴雨预报的准确率已达95%以上, 可基于该产品实现更为精细、准确的彩虹预报。

5 结论与讨论

本文基于昭苏彩虹观测记录, 分析了昭苏彩虹出现的特征, 并根据500 hPa环流特征进行了环流分型, 结合ECMWF环流预报、降水预报和DOGRAFS降水预报的检验, 分析了昭苏彩虹的可预报性, 得到以下结论:

1) 昭苏观测到的彩虹4—9月都有出现, 绝大多数出现在下午17—22时, 彩虹出现时天空基本上都存在积雨云, 地面为偏西风, 前1小时内出现阵雨或正伴有阵雨。观测到彩虹的太阳高度角 $<42^\circ$ 。

2) 昭苏彩虹500 hPa的环流形势, 可归纳为4种环流型: 西南气流型、偏西气流型、脊区型和西北气流型, 各环流型700 hPa都存在风的辐合或切变, 叠加地形的抬升作用, 使对流不稳定强烈发展, 对流系统生成, 利于对流性降水的出现。

3) ECMWF模式对不同环流型500 hPa环流形势均有较好的预报性能, 预报时效可达7 d以上, 且

24~168 h预报基本维持稳定。ECMWF全球模式的对流性降水预报和区域模式DOGRAFS的逐小时降水预报对昭苏晴雨预报的准确率可达90%。

4) 经过实践检验的昭苏彩虹预报思路: 提前7 d根据数值模式形势预报判断是否符合对流性降水形势, 符合则预报可能出现彩虹, 概率约为50%; 提前2~7 d根据数值模式降水预报17~22时有降水且将停止时, 预报可能出现彩虹, 概率约为60%; 提前1 d, 判断太阳高度角 $<42^\circ$ 的具体时间是否有对流性降水; 临近时根据雷达和卫星云图判断对流云团移动速度和路径, 确定观测时间和地点, 概率约为65%。

参考文献

- [1] Charles A, Doswell III, Steven J, et al. Tornado forecasting: a review. *Geophysical Monograph Series*, 1993, 79: 557-571.
- [2] Polston K L. Synoptic patterns and environmental conditions associated with very large events. Preprints, 18th conference on severe local storms. American Meteorological Society, 1996: 349-356.
- [3] 孙继松, 陶祖钰. 强对流天气分析与预报中的若干基本问题. *气象*, 2012, 38(2): 164-173.
- [4] 孙继松, 戴建华, 何立富, 等. 强对流天气预报的基本原理与预报方法. 北京: 气象出版社, 2014.
- [5] 俞小鼎. 短时强降水临近预报的思路与方法. *暴雨灾害*, 2013, 32(3): 202-209.
- [6] 郑媛媛, 姚晨, 郝莹, 等. 不同类型大尺度环流背景下强对流天气的短时临近预报预警研究. *气象*, 2011, 37(7): 795-801.
- [7] 周后福, 邱明艳, 张爱明, 等. 基于稳定性和能量指标作强对流天气的短时预报指标分析. *高原气象*, 2006, 25(4): 716-722.
- [8] 郝莹, 姚叶青, 郑媛媛, 等. 短时强降水的多尺度分析及临近预警. *气象*, 2012, 38(8): 903-912.
- [9] 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. *高原气象*, 2013, 32(1): 156-165.
- [10] 许爱华, 孙继松, 许东蓓, 等. 中国中东部强对流天气的天气形式分类和基本要素配置特征. *气象*, 2014, 40(4): 400-411.
- [11] 曾波, 湛芸, 李泽椿. 中国中东部地区夏季中尺度对流系统发生前环境场特征. *高原气象*, 2016, 35(2): 460-468.
- [12] 白晓平, 王式功, 赵璐, 等. 西北地区东部短时强降水概念模型. *高原气象*, 2016, 35(5): 1248-1256.
- [13] 尹承美, 梁永礼, 冉桂平, 等. 济南市短时强降水特征分析. *气象科学*, 2010, 30(2): 262-267.
- [14] 沈澄, 孙燕, 魏晓奕, 等. 基于物理量参数的江苏短时强降水预报模型的研究. *气象*, 2016, 42(5): 557-566.
- [15] 苏永玲, 何立富, 巩远发, 等. 京津冀地区强对流时空分布与天气学特征分析. *气象*, 2011, 37(2): 177-194.
- [16] 谷秀杰. 河南省短时强降水及其云团特征分析. *气象与环境科学*, 2013, 36(1): 15-20.
- [17] 杨波, 孙继松, 毛旭, 等. 北京地区短时强降水过程的多尺度环流特征. *气象学报*, 2016, (6): 919-934.
- [18] 陈元昭, 俞小鼎, 陈训来. 珠江三角洲地区重大短时强降水的基本流型与环境参量特征. *气象*, 2016, 42(2): 144-155.
- [19] 杨莲梅, 张云惠, 秦贺, 等. 中亚低涡研究若干进展及问题. *沙漠与绿洲气象*, 2015, 9(5): 1-8.
- [20] 杨莲梅, 李建刚, 刘晶, 等. 西北气流下乌鲁木齐短时强降水中小尺度特征个例分析. *暴雨灾害*, 2017(5): 369-396.
- [21] 张云惠, 于碧馨, 王智楷, 等. 伊犁河谷夏季两次极端暴雨过程的动力机制与水汽输送特征. *暴雨灾害*, 2018, 37(05): 45-54.
- [22] 曾勇, 杨莲梅. 南疆西部两次短时强降水天气中尺度特征对比分析. *暴雨灾害*, 2017, (5): 410-421.
- [23] 黄艳, 俞小鼎, 陈天宇, 等. 南疆短时强降水概念模型及环境参数分析. *气象*, 2018, (8): 1033-1041.
- [24] 庄晓翠, 赵江伟, 李健丽, 等. 新疆阿勒泰地区短时强降水流型及环境参数特征. *高原气象*, 2018, 37(3): 675-685.