

张芹,赵海军,朱翠红.山东暖区暴雨对流特性和环境参量的统计分析[J].沙漠与绿洲气象,2023,17(3):71-77.

doi: 10.12057/j.issn.1002-0799.2023.03.010

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



# 山东暖区暴雨对流特性和环境参量的统计分析

张芹<sup>1</sup>,赵海军<sup>2\*</sup>,朱翠红<sup>1</sup>

(1.潍坊市气象局,山东 潍坊 261011;2.临沂市气象局,山东 临沂 276004)

**摘要:**利用2014—2018年5—9月山东省123个国家气象观测站的逐日降水资料、Micaps常规资料以及NCEP再分析资料等,将山东暖区暴雨分为锋前型、暖切变型、副热带高压(简称“副高”)边缘型和急流型4大类,并对山东暖区暴雨的垂直结构、对流特性以及环境参量特征进行统计。主要结论为:(1)山东暖区暴雨的低空风场主要以西南风或东南风为主,且整层风场随高度顺转;高湿区主要集中在对流层中低层;大气的自由对流高度和云底高度较低,湿层和暖云层深厚,其中急流型湿层和暖云层最为深厚。(2)山东暖区暴雨发生时, $K \geq 30.5 \text{ } ^\circ\text{C}$ ,  $-6.87 \leq SI \leq 0.72$ ,  $\theta_{se} \geq 334 \text{ K}$ ,垂直锋区的北界位于 $37^\circ \sim 39^\circ\text{N}$ ,暴雨落区位于锋区北界南侧2~3个纬距范围内。(3)暖区暴雨上空辐合中心平均值为 $-3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ,辐合中心均出现在700 hPa以下;垂直速度中心的平均值为 $-1.1 \times 10^{-5} \text{ hPa/s}$ ,大值中心出现在对流层中低层;涡度中心的平均值为 $5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ,正涡度主要在低层,且随高度的增加而减小;暖区暴雨的水汽输送主要集中在对流层低层。

**关键词:**暖区暴雨;对流特性;环境参量;垂直锋区**中图分类号:** P426.6**文献标识码:** A**文章编号:** 1002-0799(2023)03-0071-07

暖区暴雨具有突发性、局地性强,短时雨强大,且天气尺度扰动信号弱、数值预报的可预报性差等特点,在实际预报业务中难度非常大。气象工作者经过多年的研究和实践,针对华南暖区暴雨得出的一系列有参考价值的结论<sup>[1-11]</sup>。何立富等<sup>[12]</sup>回顾了近40年华南汛期暴雨的大部分研究成果,针对华南暖区暴雨的典型背景场、中尺度对流系统的形成与传播、触发机制等进行了系统梳理和分析;湛芸等<sup>[13]</sup>针对多地区暖区暴雨的天气学特征、暖区暴雨与低空急流的关系以及暖区暴雨的中尺度特征等问题进行了总结;万轶婧等<sup>[14]</sup>指出特强暖区暴雨事件在大气层结上具有更为充沛的对流层低层水汽条件,当850 hPa

的温度露点差 $\leq 2.0 \text{ } ^\circ\text{C}$ 时,特强暖区暴雨发生的概率更高;覃武等<sup>[15]</sup>对一次预报失误的暖区暴雨过程的可预报性进行探讨,发现中尺度辐合线有效组织了对流的发展,且雷达回波具有质心低、降水效率高的暖云降雨特征。近年来,华南以外的其他地区也频繁出现类似的暖区暴雨事件,给当地经济建设和人民生命财产安全带来重大损失。针对暖区发生的暴雨过程逐渐引起气象工作者的高度重视<sup>[16-18]</sup>。

山东暖区暴雨时常发生,并造成极大危害。目前针对山东暖区暴雨的研究大多是个例分析<sup>[19-21]</sup>,统计性研究尚少。本文利用2014—2018年5—9月山东省123个国家气象观测站逐日降水资料、Micaps常规资料以及NCEP再分析资料等,对山东暖区暴雨过程进行统计,分析了暖区暴雨的垂直结构、对流特性以及物理量参数等特征,为山东暖区暴雨的日常预报和服务提供参考。

## 1 资料说明

### 1.1 定义

收稿日期:2021-09-09;修回日期:2022-06-07

基金项目:山东省气象局科研项目(2018sdqxm16、2021sdqxm04);潍坊市气象局科研项目(2021wfpqk107)

作者简介:张芹(1981—),女,高级工程师,主要从事中短期预报及气象服务研究。E-mail:751202564@qq.com

通信作者:赵海军(1984—),男,正高级工程师,主要从事强对流天气与天气雷达应用研究。E-mail:weazhj@163.com

山东暖区暴雨过程定义为发生在距离地面冷锋或850 hPa暖切变线以南100~300 km暖区范围内、副高边缘、或者是强盛低空850或700 hPa西南暖湿气流里,并且低层没有明显冷空气的入侵,山东有≥1个站出现暴雨的天气过程。其中登陆台风或者残留低压系统所造成的暴雨作为一种独特的暴雨类型,不包含在本研究之列。

根据定义,按照暖区暴雨的天气背景系统进行分类,合成天气环流型分为锋前型、暖切变型、副高边缘型和急流型4类(图1)。

(1)锋前型:山东北部有冷锋活动,冷锋在南下的过程中,除锋面本身造成的降水外,在锋前暖区中产生的暴雨,称为锋前型暖区暴雨。

(2)暖切变型:低层850或700 hPa有暖式切变线(西南风与东南风、南风与东风形成的中尺度暖切变),暴雨点位于暖切变线南侧100~300 km的暖湿气流内。

(3)副高边缘型:副热带高压边缘区域,偏南暖湿气流里产生的暴雨,暴雨点位于超低空925 hPa辐合线或地面辐合线附近。

(4)急流型:低层850或700 hPa有强盛的西南暖湿气流,山东暖区暴雨发生时,风速≥16 m·s<sup>-1</sup>,并且没有明显切变线配合,暴雨点常出现在低空急流传播方向的中尺度风速脉动区域。

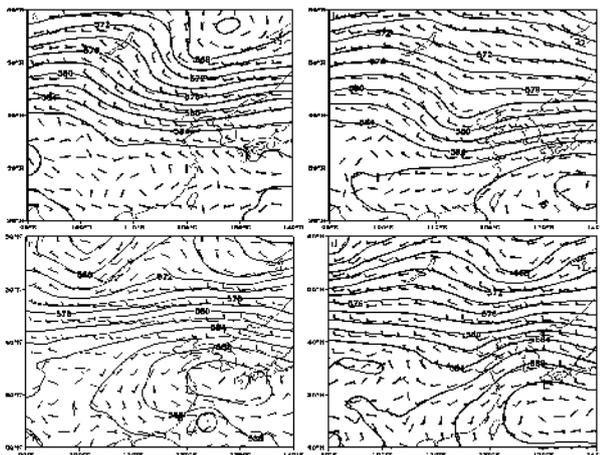


图1 500 hPa合成高度场(实线,单位:dagpm)和风向(风向标)  
(a为锋前型,b为暖切变型,c为副高边缘型,d为急流型)

### 1.2 资料和方法

由于常规探空资料只有08、20时,时空分辨率不足,因此在本研究中,使用了高分辨率的NCEP/NCAR再分析资料(1°×1°,逐6时)对暴雨发生时的大尺度环流背景、物理量指标进行天气诊断分析。通

过统计分析,对物理量指标主要包括水汽因子、动力因子和不稳定因子的12个物理量进行分析。其中水汽因子主要包括比湿、水汽通量以及水汽通量散度;动力因子主要分析了垂直速度、垂直风切变、散度和涡度;不稳定因子分析了假相当位温( $\theta_w$ )、对流有效位能(CAPE)、对流抑制能量(CIN)、K指数和SI指数等。

### 1.3 暖区暴雨个例挑选

根据山东暖区暴雨的定义,筛选出山东暖区暴雨四种类型的典型个例。为了避免影响每类暖区暴雨的统计特征,分类过程中剔除了类型交叉的特殊情况。根据以上标准选定各类型暖区暴雨个例,其中锋前型10例,暖切变型15例,急流型8例和副高边缘型5例(表1)。

表1 暖区暴雨个例

	锋前型	暖切变型
个例时间	2015-07-21—2015-07-24	2014-06-19—2014-06-20
	2016-06-13—2016-06-14	2014-07-01—2014-07-02
	2016-07-26—2016-07-28	2014-07-14—2014-07-15
	2016-07-31—2016-08-02	2014-07-29—2014-07-30
	2016-08-06—2016-08-08	2015-07-18—2015-07-19
	2016-08-24—2016-08-25	2015-07-29—2015-07-30
	2016-09-07—2016-09-08	2015-08-31—2015-09-01
	2017-07-26—2017-07-27	2016-06-23—2016-06-24
	2017-08-06—2017-08-07	2016-07-12—2016-07-13
	2018-08-08—2018-08-09	2016-08-19—2016-08-20
		2017-06-23—2017-06-24
		2017-07-17—2017-07-18
		2017-07-29—2017-07-30
		2017-08-18—2017-08-19
		2018-07-09—2018-07-10
	急流型	副高边缘型
个例时间	2015-07-30—2015-07-31	2014-07-17—2014-07-18
	2015-08-02—2015-08-07	2014-07-20—2014-07-21
	2016-06-30—2016-07-01	2018-07-10—2018-07-11
	2016-07-21—2016-07-23	2018-07-15—2018-07-16
	2017-07-01—2017-07-02	2018-08-07—2018-08-08
	2017-07-06—2017-07-07	
	2017-07-18—2017-07-20	
	2018-07-14—2018-07-15	

## 2 山东暖区暴雨的垂直结构特征

### 2.1 垂直锋面结构

### 2.1.1 锋前型

锋前型暖区暴雨,水平能量锋区均在 700 hPa 以下,其中 75% 的个例水平能量锋区在 800 hPa 以下,表明锋前型暖区暴雨的水平能量锋区主要出现在对流层低层;锋区以下至近地面层是假相当位温的高值区,中心为 350~365 K,自南向北伸展,在其北侧形成一条垂直锋区,北界位于 38°~40°N。暴雨中心出现在垂直锋区北界的南侧,大约 2~3 个纬距范围内(表 2)。

表 2 锋前型暖区暴雨假相当位温的垂直结构分布特征

个例	水平锋区 上下界 /hPa	垂直锋 区北界 /°N	暴雨区假 相当位温 最大值/K	暴雨点距 离锋区 北界/(°)
2015-07-29T20:00	800	38.5	363	1.0
2016-06-13T20:00	700	38	342	2.5
2016-07-26T20:00	700	38	364	1.3
2016-07-31T20:00	800	40	360	2.7
2016-08-06T20:00	900	39	360	2.7
2016-08-24T20:00	800	40	357	2.3
2016-09-07T20:00	700	39	357	4
2017-07-26T20:00	800	39.5	354	2
2017-08-06T20:00	800	39.5	360	3.5
2018-08-08T20:00	800	39	363	2.7

### 2.1.2 暖切变型

由表 3 可知,暖切变型暖区暴雨,86.7% 的个例存在水平能量锋区,水平能量锋区均在 700 hPa 以下,其中 61.5% 的个例,水平能量锋区在 800 hPa 以下,说明暖切变型暖区暴雨的水平能量锋区也主要集中在对流层低层;水平能量锋区以下至近地面层为假相当位温的高值区,暴雨区上空假相当位温介于 334~360 K,自南向北伸展,在其北侧形成一条垂直锋区,北界位于 35°~40°N,暴雨中心出现在垂直锋区北界的南侧,其中 60% 的个例,暴雨区位于其南侧 2~3 个纬距范围内,40% 的个例位于锋区上或其南侧 1 个纬距范围内。

### 2.1.3 副高边缘型

副高边缘型暖区暴雨,所有个例的水平能量锋区在 700 hPa 以下,其中个别个例的水平能量锋区不明显,说明副高边缘型暖区暴雨的水平能量锋区也主要集中在对流层低层。水平能量锋区以下至近地面层是假相当位温的高值区,中心值介于 345~

366 K,且自南向北伸展,在其北侧形成一条垂直锋区,垂直锋区的北界在 39°N 以南,暴雨中心位于垂直锋区北界的南侧大约 2 个纬距附近(表 4)。

### 2.1.4 急流型

急流型暖区暴雨所有个例的水平能量锋区均在 600 hPa 以下,75% 的个例在 800 hPa 以下的对流层低层。水平能量锋区以下至近地面层是中心位于 350~364 K 的假相当位温的高值区,且自南向北伸展,在其北侧形成一条垂直锋区,其中 87.5% 的个例垂直锋区北界位于 39°N 附近。暴雨中心出现在垂直锋区北界的南侧大约 2~3 个纬距范围内(表 5)。

暖区暴雨发生时,暴雨区的北侧存在一条明显

表 3 暖切变型暖区暴雨假相当位温的垂直结构分布特征

个例	水平锋区 上下界 /hPa	垂直锋 区北界 /°N	暴雨区假 相当位温 最大值/K	暴雨点距 离锋区 北界/(°)
2014-06-19T20:00	700~800	39	340	2.2
2014-07-01T20:00	800~900	40	345	2.2
2014-07-14T20:00	800~900	36	345	1.0
2014-07-29T20:00	700~800	39	358	3.7
2015-07-18T20:00	700~900	40	343	2.8
2015-07-21T20:00	800~900	37.5	342	-0.3
2015-08-31T20:00	800~900	37.5	334	0.6
2016-06-23T20:00	不明显	35	334	0.1
2016-07-12T20:00	800~900	38	354	3.2
2016-08-19T20:00	900~1000	40	360	3.2
2017-06-23T20:00	750~800	40	336	2.3
2017-07-17T20:00	750~800	40	351	3.6
2017-07-29T20:00	900~1 000	35	336	-0.9
2017-08-18T20:00	900~1 000	38	348	3.4
2018-07-09T20:00	不明显	38	343	0.8

表 4 副高边缘型暖区暴雨假相当位温的垂直结构分布特征

个例	水平锋区 上下界 /hPa	垂直锋 区北界 /°N	暴雨区假 相当位温 最大值/K	暴雨点距 离锋区 北界/(°)
2014-07-17T20:00	800~900	39	345	1.6
2014-07-20T20:00	800~900	38	360	1.6
2018-07-10T20:00	不明显	37	336	0.3
2018-07-15T20:00	750~900	39	360	2.1
2018-08-07T20:00	700~900	39	366	1.6

表5 急流型暖区暴雨假相当位温的垂直结构分布特征

个例	水平锋区 上下界 /hPa	垂直锋 区北界 /°N	暴雨区假 相当位温 最大值/K	暴雨点距 离锋区 北界/(°)
2015-07-30T20:00	600~800	39	360	2.6
2015-08-02T20:00	800~900	40	364	2.8
2016-06-30T20:00	700~800	38	354	2.7
2016-07-21T20:00	800~1000	38	362	1.8
2017-07-01T20:00	600~800	37.5	348	2.2
2017-07-06T20:00	800~1 000	39	354	4
2017-07-18T20:00	800~1 000	38	360	2.5
2018-0-714T20:00	700~900	38.7	360	1.0

的能量锋区。暖区暴雨发生在大范围的假相当位温高值区内，且距离垂直锋区南侧2~3个纬距的位置。这与大多数的系统性暴雨都发生在高能舌的前部、能量锋区的南缘靠近能量锋区和低空西南急流左前方三者叠加的区域有所不同。西南急流是热能、动能和水汽的高度集中带，可为暴雨发生提供热能、动能，也是暖区暴雨发生不可缺少的重要条件。

### 2.1.5 对比分析

从不同类型暖区暴雨假相当位温的垂直结构对比分析来看(表6)，暖区暴雨过程都存在水平能量锋区，且其上界基本出现在700 hPa以下，其中锋前型100%的个例满足此条件，急流型最少75%。垂直锋区的北界大部分位于37°~39°N，暖切变型在35°N也会出现暖区暴雨。暴雨区假相当位温介于334~366 K，暖切变型略偏小。暖区暴雨位于锋区北界的南侧2~3个纬距范围内，其中副高型暖区暴雨距离锋区更近一些，在1~2个纬距范围内。

表6 不同类型暖区暴雨假相当位温的垂直结构分布特征

个例	水平锋区 上界百分比 /%	垂直锋 区北界 /°N	暴雨区假 相当位温 最大值/K	暴雨点距 离锋区 北界/(°)
锋前型	100	38~40	350~365	2~3
副高边缘型	80	37~39	345~366	1~2
暖切变型	86.7	35~40	334~360	2~3
急流型	75	37~40	350~364	2~3

### 2.2 垂直风切变

从4种类型暖区暴雨的垂直风切变量级的分布(表7)来看：4种类型暖区暴雨的垂直风切变量

级70%以上个例都属于较弱垂直风切变，中等以上垂直风切变出现的个例较少，仅占10%~20%；强垂直切变个例出现得更少，其中锋前型最多，占20%，副高边缘型没有出现强垂直风切变，说明山东暖区暴雨发生时并不需要强的垂直风切变。

表7 不同类型暖区暴雨的垂直风切变量级分布

垂直风切变 /(m/s)	$v < 15$ 百分比/%	$15 \leq v < 20$ 百分比/%	$v \geq 20$ 百分比/%
锋前型	70	10	20
副高边缘型	80	20	0
暖切变型	80	13.3	6.7
急流型	75	12.5	12.5

## 3 山东暖区暴雨的对流特性

### 3.1 CAPE 和 CIN

由表8可知，暖区暴雨发生时，除暖切变型暖区暴雨CAPE在1 000 J/Kg以下，其它3类CAPE均在1 000 J/Kg以上，其中急流型暖区暴雨的CAPE值最大。对流抑制能量急流型最小，平均值在23 J/Kg以下，而副高边缘型最大，平均值为79 J/Kg。四类暖区暴雨的CIN值远小于CAPE值，说明暖区暴雨发生时大气是真潜在不稳定的。

表8 不同类型暖区暴雨的对流有效位能和  
对流抑制能量分布范围

能量分布	CAPE/(J/kg)	CIN/(J/kg)
锋前型	1 067~1 444	24~39
副高边缘型	1 100~1 375	71~86
暖切变型	658~792	20~36
急流型	1 250~1 625	15~30

### 3.2 T-lnP 图

选取离暴雨点较近的济南站或者青岛站探空资料进行分析(表9)。四种类型的暖区暴雨的对流指数K指数、SI指数都较高，满足强对流发生的指标；低空风场主要以西南风或东南风为主，且整层风场随高度顺转，有暖平流，基本没有冷空气参与。 $T-T_d \leq 4$  °C的层次主要集中在中低层，上界位于500 hPa，说明暖区暴雨发生时湿层深厚，有利于产生强的降水效率，其中急流型湿层最为深厚，锋前型湿层主要集中在对流层低层。自由对流高度LFC出现在783 hPa以下，抬升凝结高度LCL在913 hPa以下，0 °C层在5 000 m上下。大气自由对流高度和云底高度较低，暖云层厚度较厚，有利于产生高效率的强

降水,尤其是急流型暖区暴雨的云底高度最低,云层厚度最厚。

表9 不同类型暖区暴雨的  $T$ - $\ln P$  分布特征

$T$ - $\ln P$ 要素	$K/^\circ\text{C}$	$SI$	低层风场	$LCL$ /hPa	$LFC$ /hPa	$0^\circ\text{C}$ /m	$T-T_d$ $\leq 4^\circ\text{C}$
锋前型	37	-2.0	东南或西南	924	783	5 091	700 hPa
副高边缘型	38	-2.3	东南	913	855	5 253	500 hPa
暖切变型	37	-1.2	东南或西南	939	783	4 660	500 hPa
急流型	39	-3.2	西南	940	841	5 041	400 hPa

#### 4 山东暖区暴雨的物理量判别指标

##### 4.1 不稳定条件判别指标

###### 4.1.1 $K$ 指数

$K$  指数代表中低层大气的温湿特征, $K$  指数越高表明中低层大气越暖湿。 $K$  指数  $\geq 30^\circ\text{C}$  可作为山东产生强降水的临界值。

经统计(表9),山东暖区暴雨  $K$  指数介于  $30.5\sim 44^\circ\text{C}$ ,平均值为  $37.5^\circ\text{C}$ ,超过山东暴雨  $K$  指数( $7.5^\circ\text{C}$ ),说明暖区暴雨发生时中低层大气暖湿程度要远远高于一般暴雨。

###### 4.1.2 沙氏指数( $SI$ )

沙氏指数代表大气层结稳定度,若  $SI < 0$ ,大气层结不稳定;若  $SI = 0$ ,大气为中性层结;若  $SI > 0$ ,大气为稳定层结。

山东暖区暴雨发生时  $SI$  介于  $0.72\sim -6.87$ ,平均值为  $-2.0$ ,沙氏指数  $< 0$ ,说明暖区暴雨发生时大气层结是不稳定的,有利于产生对流性天气(表9)。

###### 4.1.3 假相当位温

假相当位温( $\theta_{sc}$ )反映了大气的温湿特征, $\theta_{sc}$  越高则大气越暖湿。强降水期间  $925\sim 850$  hPa 的  $\theta_{sc}$  较高,大气暖湿,而  $700\sim 500$  hPa 的  $\theta_{sc}$  较低,说明中层为相对干冷层,大气对流不稳定。

通过对假相当位温(表6)可知:山东暖区暴雨发生时,暴雨区假相当位温介于  $334\sim 366$  K,水平能量锋区上界在  $700$  hPa 以下,垂直锋区的北界大部分位于  $37^\circ\sim 39^\circ\text{N}$ ;暖区暴雨出现在锋区南侧  $2\sim 3$  个纬距范围内。

##### 4.2 动力条件判别指标

###### 4.2.1 涡度

由表10可知,暖区暴雨发生时,暴雨区上空几次过程的涡度最大值的平均值为  $5\times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$ ,其中急流型涡度最大,其次是暖切变型和锋前型,副高边缘型最小;涡度垂直分布除暖切变型近地面层有弱的负涡度外,其他3种类型低层均为正涡度,说明产生

强降水的涡度在对流层低层较大,正涡度主要在低层,且随高度的增加而减小。

表10 不同类型暖区暴雨上空涡度、散度和垂直速度分布

动力物理量	涡度/ ( $\times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$ )	散度/ ( $\times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$ )	垂直速度/ ( $\times 10^{-5}\text{ hPa/s}$ )
锋前型	5	-4	-2.1
副高边缘型	4	-2	-0.5
暖切变型	5	-3	-0.8
急流型	6	-4	-0.8

###### 4.2.2 散度

由表10可知,暖区暴雨上空辐合中心最大值为  $-3\times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$ ,其中急流型和锋前型最大,均为  $-4\times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$ ,其次是暖切变型,副高边缘型辐合中心最小为  $-2\times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$ ;辐合中心均出现在  $700$  hPa 以下,说明辐合主要在低层且随高度的增加而减小。

###### 4.2.3 垂直速度

统计强降水前和强降水期间暴雨中心上空垂直速度分布(表10),发现锋前型、暖切变型、副高边缘型和急流型暖区暴雨上空垂直速度中心值分别为  $-2.1\times 10^{-5}$ 、 $-0.8\times 10^{-5}$ 、 $-0.5\times 10^{-5}$ 、 $-0.8\times 10^{-5}\text{ hPa/s}$ 。4类暖区暴雨上空垂直速度中心值的平均值为  $-1.1\times 10^{-5}\text{ hPa/s}$ ,其中冷锋型最大,副高边缘型最小;上升运动中心均出现在  $500$  hPa 以下的对流层中低层,其中暖切变型最高,出现在  $500$  hPa 附近,副高边缘型最低,在  $900$  hPa 附近。

##### 4.3 水汽条件判别指标

###### 4.3.1 比湿

不同类型暖区暴雨上空各层比湿分布特征见表11。 $q_{925} \geq 16\text{ g/kg}$ , $q_{850} \geq 12\text{ g/kg}$ , $q_{700} \geq 9\text{ g/kg}$ ,比山东夏季强降水的各层比湿值  $q_{925} \geq 14\text{ g/kg}$ , $q_{850} \geq 12.2\text{ g/kg}$ , $q_{700} \geq 7.1\text{ g/kg}$ ,要明显,尤其是近地面层暖区暴雨的  $q$  值更大一些,也就是说暖区暴雨对空气湿度的要求更高。其中  $925$  hPa 的  $q$  值,急流型  $>$  副高边缘型  $>$  锋前型  $>$  暖切变型;  $850$  hPa 的  $q$  值,副高边缘

表11 不同类型暖区暴雨上空比湿( $q$ )分布特征

比湿	$q_{700}/(\text{g/kg})$	$q_{850}/(\text{g/kg})$	$q_{925}/(\text{g/kg})$
锋前型	$\geq 7$	$\geq 12$	$\geq 16$
副高边缘型	$\geq 10$	$\geq 14$	$\geq 17$
暖切变型	$\geq 8$	$\geq 11$	$\geq 13$
急流型	$\geq 10$	$\geq 12$	$\geq 18$
平均值	$\geq 9$	$\geq 12$	$\geq 16$

型最大,暖切变型最小;700 hPa上,急流型和副高边缘型最大,锋前型最小。

#### 4.3.2 水汽通量和水汽通量散度

暖区暴雨发生时水汽主要集中在对流层中低层,因此对暖区暴雨上空850~700 hPa的水汽通量和水汽通量散度进行统计分析(表12)。850 hPa水汽通量平均值为1.8 g/(cm·hPa·s),700 hPa为0.9 g/(cm·hPa·s),由此可见850 hPa水汽通量大于700 hPa水汽通量,说明暖区暴雨的水汽输送主要集中在对流层低层。850 hPa水汽通量散度平均值为 $-2.3 \times 10^{-6}$  g/(cm·hPa<sup>2</sup>·s),700 hPa是 $-1.2 \times 10^{-6}$  g/(cm·hPa<sup>2</sup>·s),表明850~700 hPa有明显的水汽辐合,且850 hPa的水汽辐合要大于700 hPa。

表12 不同类型暖区暴雨上空水汽通量和水汽通量散度分布特征

水汽物理量	水汽通量/(g/(cm·hPa·s))		水汽通量散度/( $\times 10^{-6}$ g/(cm·hPa <sup>2</sup> ·s))	
	700 hPa	850 hPa	700 hPa	850 hPa
锋前型	1.0	2.3	-1.2	-3.0
副高边缘型	0.8	1.5	-0.8	-1.5
暖切变型	0.9	1.5	-1.6	-2.2
急流型	1.0	1.9	-1.0	-2.6
平均值	0.9	1.8	-1.2	-2.3

## 5 结论

(1)山东暖区暴雨的低空风场主要以西南风或东南风为主,且整层风场随高度顺转,有暖平流,没有明显冷空气参与。 $T-T_0 \leq 4$  °C的层次主要集中在中低层,上界位于500 hPa,湿层深厚,其中急流型湿层最深厚,而锋前型湿层主要集中在对流层低层。大气的自由对流高度和云底高度较低,暖云层厚度较厚,尤其是急流型暖区暴雨的云底高度最低。

(2)山东暖区暴雨发生时,K指数介于30.5~44 °C,SI介于-6.87~0.72,暖区暴雨发生时中低层大气暖湿程度要远远高于普通锋面暴雨。暖区暴雨区上空假相当位温介于334~366 K,水平能量锋区上界基本出现在700 hPa以下,垂直锋区的北界大部分位于37°~39°N,暴雨落区位于锋区北界的南侧2~3个纬距范围内,其中副高型暖区暴雨距离锋区更近一些,在1~2个纬距范围内。

(3)暖区暴雨上空辐合中心平均值为 $-3 \times 10^{-5}$  s<sup>-1</sup>,且辐合中心均出现在700 hPa以下,其中急流型和锋前型最大。垂直速度中心的平均值为 $-1.1 \times 10^{-5}$

hPa/s,出现在对流层中低层。涡度中心的平均值为 $5 \times 10^{-5}$  s<sup>-1</sup>,正涡度主要在对流层低层。

(4)暖区暴雨对空气湿度的要求更高、湿层深厚, $q_{925} \geq 16$  g/kg, $q_{850} \geq 12$  g/kg, $q_{700} \geq 9$  g/kg。暖区暴雨的水汽输送主要集中在对流层低层,850~700 hPa有明显的水汽辐合,且850 hPa的水汽辐合明显大于700 hPa。

#### 参考文献:

- [1] 赵玉春,李泽椿,肖子牛.华南锋面与暖区暴雨个例对比分析[J].气象科技,2008,36(1):47-54.
- [2] 张晓美,蒙伟光,张艳霞,等.华南暖区暴雨中尺度对流系统的分析[J].热带气象学报,2009,25(5):551-560.
- [3] 叶朗明,苗峻峰.华南一次典型回流暖区暴雨过程的中尺度分析[J].暴雨灾害,2014,33(4):342-350.
- [4] 赵金彪,罗建英,高安宁,等.2008年6月广西锋前暖区暴雨过程分析[J].热带地理,2010,30(2):145-150.
- [5] 翟丽萍,农孟松,赖珍权,等.广西“4·20”暖区飚线的形成及结构[J].高原气象,2018,37(2):568-576.
- [6] 郭弘,林永辉,周森,等.华南暖区暴雨中一次飚线的中尺度分析[J].暴雨灾害,2014,33(2):171-180.
- [7] 伍志方,蔡景就,林良助,等.2017年广州“57”暖区特大暴雨的中尺度系统和可预报性[J].气象,2018,44(4):485-499.
- [8] 刘瑞鑫,孙建华,陈鲍发.华南暖区暴雨事件的筛选与分类研究[J].大气科学,2019,43(1):119-130.
- [9] 赵玉春,王叶红.近30年华南前汛期暴雨研究概述[J].暴雨灾害,2009,28(3):193-202.
- [10] 陈涛,陈博宇,于超,等.华南前汛期锋面对流系统和暖区对流系统的多尺度特征和集合预报敏感性对比分析[J].气象,2020,46(9):1129-1142.
- [11] 周明飞,杜小玲,熊伟.贵州初夏两次暖区暴雨的对比分析[J].气象,2014,40(2):186-195.
- [12] 何立富,陈涛,孔期.华南暖区暴雨研究进展[J].应用气象学报,2016,27(5):559-569.
- [13] 湛芸,陈涛,汪玲瑶,等.中国暖区暴雨的研究进展[J].暴雨灾害,2019,38(5):483-493.
- [14] 万轶婧,王东海,梁钊明,等.华南暖区暴雨环境参量的统计分析[J].中山大学学报(自然科学版),2020,59(6):51-63.
- [15] 覃武,刘国忠,赖珍权,等.华南暖区暴雨预报误差及可预报性探讨[J].气象,2020,46(8):1039-1052.
- [16] 徐玥,孟莹莹,张桂华,等.黑龙江省一次伴有龙卷的暖区暴雨成因分析[J].沙漠与绿洲气象,2020,14(1):40-48.
- [17] 金晓青,李江波,于雷,等.河北中部一次具有后向传播特征的副高外围暖区暴雨过程分析[J].沙漠与绿洲气象,2018,12(4):7-14.
- [18] 梁钰,乔春贵,董俊玲.近34年河南首场暴雨时空分布

- 特征及环流背景分析[J].气象与环境科学,2020,43(2):26-32.
- [19] 张芹,苏莉莉,张秀珍,等.山东一次暖区暴雨的环境场特征和触发机制[J].干旱气象,2019,37(6):933-943.
- [20] 侯淑梅,孙兴池,范苏丹,等.切变线冷区和暖区暴雨落区分析[J].大气科学学报,2014,37(3):333-343.
- [21] 张芹,王恬茹,张秀珍,等.一次副热带高压边缘切变线暖区暴雨特征分析[J].海洋气象学报,2020,40(3):102-110.

## Statistical Analysis of the Convection Characteristics and Environment Parameters of Warm-sector Heavy Rain in Shandong

ZHANG Qin<sup>1</sup>, ZHAO Haijun<sup>2</sup>, ZHU Cuihong<sup>1</sup>  
(1. Weifang Meteorological Bureau, Weifang 261011, China;  
2. Linyi Meteorological Bureau, Linyi 276004, China)

**Abstract** Based on the daily precipitation data from national automatic weather station, conventional sounding data and NCEP reanalysis from May to September during 2014–2018, the warm-sector heavy rainfall are divided into 4 types: cold-front, warm shear-line, edge of subtropical high and jet. The vertical structure, convection characteristics and environmental parameters of the heavy rainfall are further analyzed. It shows that: (1) Majority of the low level wind of warm-sector heavy rainfall are southwesterly wind or southeasterly wind with a clockwise rotation with increasing of altitude. The high humidity area is mainly concentrated in the middle and lower troposphere in the rainstorm duration. With a relatively low atmospheric free convection height and cloud base height, a deep wet layer and warm cloud layer, and the most deep jet wet layer and warm cloud layer. (2) During the occurrence of warm-area rainstorm in Shandong, the Kelvin index  $K$  is greater than  $30.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , the Showalter Index  $SI$  is between  $-6.87$  and  $0.72$ , the pseudo-equivalent potential temperature  $\theta_{se}$  is greater than  $334\text{ K}$ , the northern boundary of the vertical frontal zone is between  $37^{\circ}$  and  $39^{\circ}\text{N}$ , the north edge of the rainstorm area is within  $2\sim 3$  latitudes on the south side of the northern boundary of the frontal zone. (3) The convergence center of the heavy rainfall is under  $700\text{ hPa}$  with mean value  $-3\times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$ . The vertical velocity center appears in the middle and lower troposphere with mean value  $-1.1\times 10^{-5}\text{ hPa/s}$ . The positive vorticity is mainly in the low layer with average vorticity  $5\times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$ , which decreases with altitude. The water vapor transport of the warm-area rainstorm is mainly concentrated in the lower troposphere.

**Key words** warm-sector heavy rainfall; convection characteristics; environment parameters; vertical frontal