

周雪松, 吴炜, 孙兴池. 2014. 山东暴雨天气学预报指标的统计特征分析. 气象, 40(6): 744-753.

山东暴雨天气学预报指标的统计特征分析^{*}

周雪松¹ 吴 炜² 孙兴池²

1 山东省气象服务中心, 济南 250031

2 山东省气象台, 济南 250031

提 要: 采用山东省 2000—2011 年逐日、逐时降水资料和 NCEP 最终分析资料, 研究了山东省暴雨天气学指标物理量的时空分布, 获得了不同季节、区域和范围的暴雨预报指标特征。研究表明: 山东暴雨有明显的夜间增强趋势。业务中常用的暴雨指标物理量均有不同程度的季节性变化特征, 一方面表现在指标物理量的阈值有明显的季节性差异, 例如暴雨的 850 hPa 比湿指标在 4、5 月仅为 $10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 而 7 月则可达 $14 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$; 另一方面不同季节的水汽、动力和热力不稳定等因子对暴雨贡献也不尽相同, 通常盛夏季节暴雨的水汽因子较高, 而动力因子偏低, 而且对流不稳定性较强, 但斜压性减弱, 其他季节的暴雨则相反。山东暴雨指标物理量的区域性差异没有季节性差异明显, 同时各因子的区域差异也并不一致, 具体来说鲁南暴雨需要更强的水汽, 同时热力不稳定性因子也较高, K 指数比其他区域约高 $0.5 \text{ }^\circ\text{C}$, 而半岛地区暴雨动力因子更强。同时, 大范围暴雨和区域暴雨需要更好的水汽条件、更强的动力条件, 但对流不稳定条件较低, 而局地暴雨则与此相反。

关键词: 暴雨预报, 指标物理量, 季节性, 区域差异

中图分类号: P456

文献标志码: A

doi: 10. 7519/j. issn. 1000-0526. 2014. 06. 011

Statistics on Physical Indicators of Rainstorms in Shandong Province

ZHOU Xuesong¹ WU Wei² SUN Xingchi²

1 Shandong Provincial Meteorological Service Centre, Jinan 250031

2 Shandong Provincial Meteorological Observatory, Jinan 250031

Abstract: By using daily, hourly precipitation data of Shandong Province and NCEP FNL (Final) operational global analysis data from 2000 to 2011, and based on the spatial and temporal statistics of physical indicators of rainstorms in Shandong Province, the physical indicators characteristics of rainstorms in different seasons and regions were analyzed. The results show that rainstorms have obvious nighttime enhanced trend. The physical indicators of rainstorms in daily operations have different levels of seasonal change. On one hand, the thresholds of these indicators have significant seasonal differences, for example, the specific humidity indicator is $10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ in April and May but it is only $14 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ in July, and on the other hand, the effects of water vapor, dynamic and thermal instability factor on rainstorms are not the same in different seasons. The water vapor factor is usually high, and the dynamic and thermodynamic instability factors are low in summer. Furthermore, atmospheric convective instability can be stronger but baroclinicity gets weakened in summer. However it is contrary to the other seasons. Regional difference of the physical indicators of Shandong rainstorms is not the same as seasonal variations, but it is different among various factors. The rainstorms in the south of Shandong need stronger water vapor, and the thermal instability is also higher, the K index is about $0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ higher than other areas while the rainstorms of east part of Shandong Peninsula have higher dynamic factors. Meanwhile, a wide range rainstorms and

* 山东省气象局重点课题(2012sdqxz04)、国家自然科学基金项目(41175044)、山东省超级计算科技专项(2011YD01106)和公益性行业(气象)科研专项(GYHY201106006)共同资助

2013 年 3 月 13 日收稿; 2013 年 9 月 3 日收修定稿

第一作者: 周雪松, 主要从事中尺度动力灾害性天气预报与研究. Email: cedarzhou2005@163.com

regional rainstorm need better moisture conditions, stronger dynamic conditions, but lower convective instability conditions.

Key words: rainstorm forecast, physical indicators, seasonality, regional differences

引 言

多年来,暴雨一直是气象科研与预报业务工作者关注的重点,特别是 21 世纪以来,针对暴雨的大型观测试验和新理论、新方法的应用极大地推进了对暴雨的认识和预报水平的提高(苗爱梅等,2012;王德英,2008;俞小鼎等,2012;岳彩军等,2011)。在实际预报业务中,预报人员更侧重于暴雨天气个例的天气流型分析和物理量诊断,并从中总结了大量典型暴雨过程的预报指标,在实际业务中进行应用,如孙兴池等(2012)分析了纬向切变线暴雨中影响系统的结构及冷暖空气的相互作用,认为对暴雨落区的精细化预报至关重要;李俊等(2006)以及尹洁等(2004)分别对江西、湖北等地方的暴雨指标物理量进行了分析总结,这些研究为暴雨的精细化预报提供了很好的基础。但是,从各地暴雨指标的研究来看,不同的影响系统、不同的季节和区域,暴雨的预报指标往往不同,这在一定程度上阻碍了暴雨预报能力的进一步提高。因此,清楚地认识暴雨指标物理量的时空分布规律,对深入认识暴雨过程,提高暴雨精细化预报水平都至关重要。

近年来,在暴雨预报中配料法(Doswell et al, 1996)开始受到广泛关注(Nietfeld et al, 1998; Wetzel et al, 2001; 李俊等, 2006; 吴蓁等, 2011; 俞小鼎, 2011; 张萍萍等, 2012), 这为暴雨预报提供了一个很好的思路, 同时, 也对暴雨指标物理量的深入研究提出了迫切的需求。已经得到的盛夏暴雨预报指标是否可以在春季或秋季应用? 山东半岛暴雨指标是否与鲁西北一致? 不同类型暴雨中水汽因子和动力因子指标有何不同? 这些都是精细化暴雨预报迫切需要解决的问题。基于这些问题, 本文采用近 12 年的降水观测资料和 NCEP 最终分析资料, 针对山东暴雨的预报指标物理量开展较深入分析研究, 从季节变化、区域差异、暴雨范围等三个方面探索了暴雨预报指标物理量的分布特征以及造成这些特征的可能原因, 以便更好地认识暴雨, 并为暴雨精细化预报提供参考。

1 资料与分析方法

本研究中使用了山东省 123 个气象观测站 2000—2011 年逐日和逐时降水量资料以及 NCEP 最终分析资料, 其中的逐日降水资料日界为 20:00, 2000—2004 年逐时降水量资料使用降水自记纸电子化后的资料, 2005 年以后使用自动气象站逐小时降水资料。同时, 已有研究表明探空资料和 NCEP 资料中温度、相对湿度、水平风场等气象要素的绝对差值随地点、高度和季节变化较小(袁松等, 2012), 因此在该研究中使用更高分辨率的 NCEP 最终分析资料对暴雨发生时的指标物理量进行诊断分析, 以弥补常规探空资料时空分辨率不足的问题, 以便得到更加真实的暴雨指标。

Doswell 等(1996)等最早提出了“配料法”, 根据理论分析认为强降水的形成由降水效率、水汽含量、上升速度以及降水持续时间共同决定, 这为暴雨预报提供了一种新思路。在本研究中借鉴了“配料法”的思想, 选择分析的指标物理量能够反映产生暴雨的基本条件; 同时, 各指标物理量之间尽量相对独立(俞小鼎, 2011); 此外, 分析的物理量多是用于日常预报业务中的常用物理量, 可以方便地获取。

根据暴雨发生的机理, 参照全国和山东省暴雨研究和业务应用中常用的预报物理量(曹晓岗等, 2009; 李延香等, 1997; 梁生俊等, 2012; 刘爱鸣等, 2007; 吴蓁等, 2011; 周雪松等, 2012), 在本研究中共统计分析了以水汽因子、动力因子、热力不稳定因子等为主的 19 个暴雨预报指标物理量。其中, 在水汽因子方面, 重点分析了比湿、相对湿度和大气可降水量等物理量; 动力因子则包括垂直速度、低空急流、散度、涡度平流等; 热力不稳定因子主要包括 θ_{se} (假相当位温)、温度平流、 K 指数、CAPE(对流有效位能)、不同高度层 θ_{se} 差和温差等。需要说明的是, 在暴雨诊断分析中有关的物理量, 如露点和露点差等尽管也都能表示大气中水汽条件, 但他们分别与比湿和相对湿度有很强的相关性, 因此只选择了其一进行分析。具体选择的预报指标物理量见表 1。

在统计指标物理量时, 以往暴雨过程个例分析

表1 选择的暴雨预报物理量

Table 1 Selected forecast indicators of rainstorms in Shandong Province

项目	物理量	层次	单位
水汽因子	比湿	地面、700、850、925 hPa	$\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$
	相对湿度	700、850、925 hPa	%
	可降水量	—	mm
动力因子	850 hPa 以下低空急流	—	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
	垂直速度	500、700 hPa	$10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$
	涡度平流	500 hPa	10^{-10} s^{-2}
	散度	850 hPa	10^{-6} s^{-1}
热力因子	θ_{se}	850 hPa	$^{\circ}\text{C}$
	温度平流	850 hPa	$10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$
不稳定因子	500 和 850 hPa 的 θ_{se} 差	—	$^{\circ}\text{C}$
	500 和 850 hPa 温度差	—	$^{\circ}\text{C}$
	K 指数	—	$^{\circ}\text{C}$
	CAPE	—	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$

中指标物理量值较为主观,在时空上也较为模糊。因此在本研究中使用 IDW(反距离权重差值算法)将所有计算获得的预报指标物理量统一插值到站点位置;在 NCEP 最终分析资料的物理量与暴雨时间匹配上采用了客观的方法,首先使用逐小时降水量数据确定每次暴雨过程最强降水时段,并以这一时段为基准,向前、向后选择最近时间的 NCEP 最终分析资料作为研究对象,这样暴雨过程中最强的降水时段与对

应的物理量场的时间差将在 3 h 以内,从而使暴雨有关指标物理量更接近于暴雨发生时的状况。

2 山东暴雨概况

通过对 2000—2011 年山东 123 个观测站(包括基准站、基本站和一般站,不包括区域自动气象站,以下统称为观测站,图1a降水量统计,发现在这12

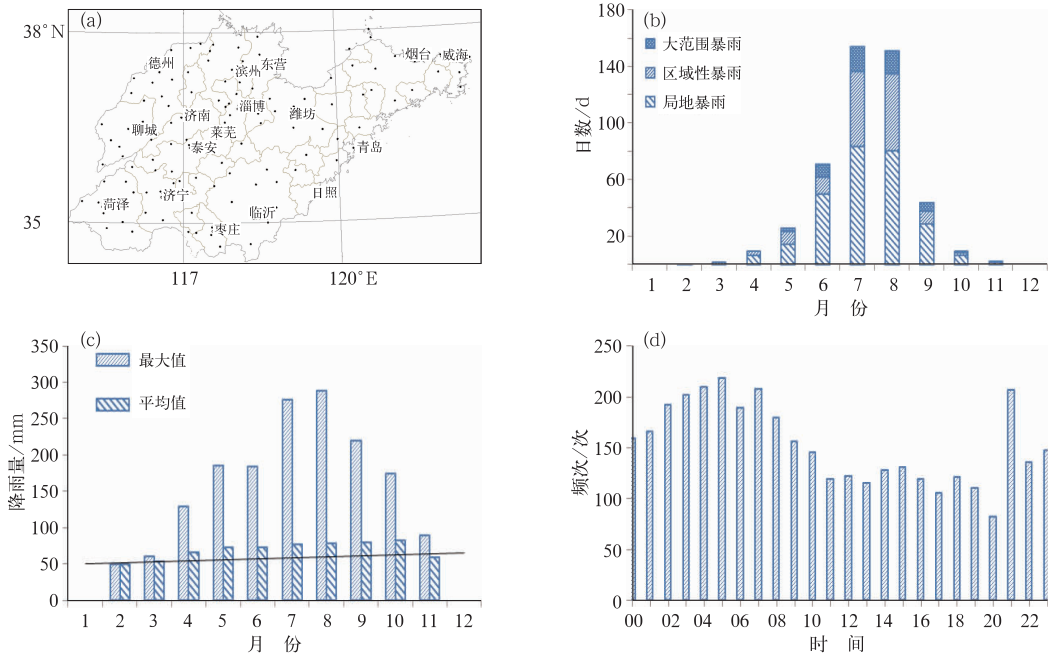


图1 山东观测站点分布及暴雨时间分布特征

(a) 山东观测站点分布, (b) 暴雨日数月变化, (c) 暴雨日降雨量月变化

(图中直线为暴雨站点平均降雨量的线性趋势), (d) 暴雨降雨强度的日变化

Fig. 1 Distribution of stations and temporal distribution characteristics of rainstorms in Shandong Province

(a) distribution of stations, (b) monthly variation of rainstorms days, (c) monthly variation of rainfall in rainstorm days (the line is linear trend of average rainfall), and (d) daily variation of rainfall intensity

年中,山东省暴雨最早出现在2月(2004年2月21日),最晚在11月(2004年11月10日),共出现472个暴雨日,其中7和8月暴雨发生最多,占全部暴雨日数的65%;而11月至次年3月暴雨发生极少,仅占1.3%;12和1月则没有暴雨出现(图1b)。这表明地处中国东部的山东省暴雨出现时间相对集中,呈单峰形态,这与山东明显的季风性气候(曹钢锋等,1988)是相一致的。

在实际业务中,可按照暴雨发生范围的大小将暴雨划分为:局地暴雨、区域性暴雨、大范围暴雨三类。山东省一般以1~5个观测站为局地暴雨,6~20个观测站为区域性暴雨, ≥ 21 个观测站为大范围暴雨。根据这一标准统计分析发现,山东暴雨以局地性暴雨为主(58.7%),其次是区域性暴雨(30.5%),大范围暴雨发生频次较低(10.8%)。可以看出,山东尽管局地暴雨较多,但区域性暴雨和大范围暴雨仍然经常出现。从时间上来看,山东区域性和大范围暴雨主要发生在5—10月,在2003年10月11日,出现一次55个站的大范围暴雨,是近年来规模最大的一次暴雨过程;而在春季和深秋尽管也可以出现暴雨,但主要为局地性暴雨为主,暴雨范围也很小。由此可见,山东暴雨的范围有明显的季节性。

从山东暴雨的日降水量极值来看,大暴雨级别以上的暴雨都出现在4—10月,超过250 mm的特大暴雨主要发生在7和8月,其中最强的一次暴雨过程出现在2009年8月18日的费县,达288.1 mm;其他月份没有大暴雨以上的降水出现。但是,每次暴雨过程暴雨站点平均降雨量有逐月缓慢递增的趋势,在10月达到最大,为82.4 mm(图1c)。另外,通过对山东暴雨强降水时段的频次日变

化(图1d)进行分析,发现山东省暴雨的强降水时段具有明显的日变化特征,大部分的暴雨过程强降水时段出现在21:00—09:00这一夜间时段,而白天时段相对较小,夜间出现强降水的频次比白天大52%,表明山东暴雨有较明显的夜间增强的特点。

3 指标物理量的总体特征

在对指标物理量的研究过程中,应用统计学方法计算了指标物理量的有关统计量,表2显示了19个暴雨指标物理量统计的平均值和标准差,同时还包括了可以表征指标离散程度的变异系数(离散系数),而较大的变异系数表明暴雨出现时该指标的离散程度很大,此时很难通过该指标对暴雨进行准确判断。

水汽因子的总体特征表明,暴雨发生时地面2 m比湿在 $16.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 左右,而925、850和700 hPa比湿分别为14.4、12.9和 $9.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,因此应注意不同位势高度层的比湿指标差异(见图2a)。然而,表征大气饱和程度的相对湿度,暴雨发生时各层差异较小,均值在84.9%~87.3%。另外从水汽因子各物理量的变异系数来看,均在0.2以下,这表明暴雨发生时,指标物理量相对比较集中,对暴雨有相对很好的指示意义。

从动力因子来看,暴雨发生时500和700 hPa垂直速度平均值分别为 -5×10^{-3} 和 $-4 \times 10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$;而在分布上基本在对角线附近,表明暴雨发生时垂直速度中心并不是在一个固定高度(图2b)。另外,研究表明山东61.4%的暴雨发生时都存在低空急流,其水平风速平均值为 $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,且变异系

表2 暴雨指标物理量总体特征

Table 2 Physical indicators of rainstorms in Shandong Province

项目	物理量指标	均值	标准差	变异系数	项目	物理量指标	均值	标准差	变异系数	
水汽因子	700 hPa 比湿	9.1	1.6	0.2	动力因子	低空急流	14.0	5.2	0.4	
	850 hPa 比湿	12.9	2.2	0.2		500 hPa 垂直速度	-5	4	-0.9	
	925 hPa 比湿	14.4	2.8	0.2		700 hPa 垂直速度	-4	4	-1.0	
	地面 2 m 比湿	16.4	3.4	0.2		500 hPa 涡度平流	0.1	1.5	11.6	
	700 hPa 相对湿度	87.3	11.6	0.1		850 hPa 散度	-8.9	11.7	-1.3	
	850 hPa 相对湿度	86.9	9.7	0.1		不稳定	CAPE	512.6	822.7	1.6
	925 hPa 相对湿度	84.9	11.5	0.1			K 指数	35.3	4.1	0.1
大气可降水量	57.4	9.5	0.2	500、850 hPa 的 θ_{se} 差	-2.7		8.0	-3.0		
热力因子	850 hPa 温度平流	5.7	7.0	1.2	500、850 hPa 温差	-22.5	2.4	-0.1		
	850 hPa 的 θ_{se}	69.4	9.4	0.1						

注:单位见表1。

Note: units of physical indicators are same as Table 1.

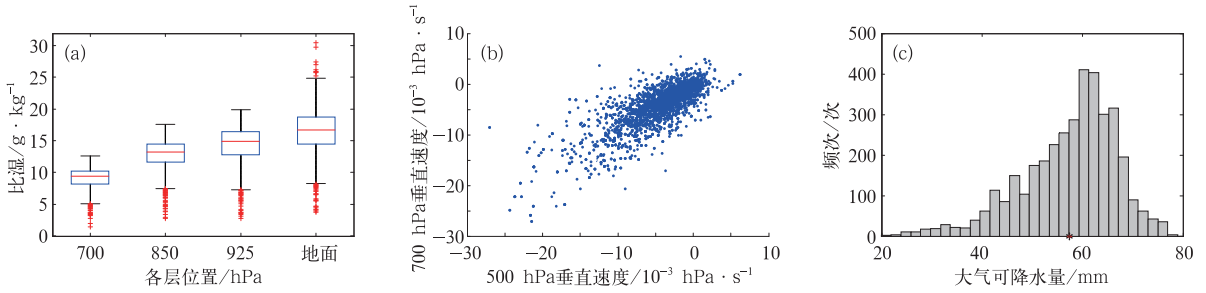


图2 有关暴雨指标物理量分布特征

(a)各高度层比湿分布,(b)500和700 hPa垂直速度关系,(c)大气可降水量频次分布
(图中“*”为平均值位置)

Fig. 2 Distribution characteristics of physical indicators for rainstorms

(a) specific humidity distribution, (b) relation of vertical velocity between 500 and 700 hPa,
(c) frequency distribution of atmospheric precipitable water
(“*” is the position of average values)

数也较小。但是,可以发现500 hPa涡度平流的变异系数很大,达11.6,这表明山东暴雨过程中500 hPa的涡度平流的数值非常分散,因此很难确定500 hPa涡度平流的具体数值是多少时可能发生暴雨。

对于热力不稳定因子,850 hPa假相当位温和K指数两个因子均表现出较好的稳定性,暴雨发生时,分别为59.4和35.3℃。而CAPE的变异系数很大,这一方面是因为CAPE对抬升气团温、湿状况非常敏感,而NCEP资料在中低层的湿度误差也相对较大(王秀明等,2012),因此CAPE计算误差相对较大;另一方面,暴雨发生过程也是对流有效位能释放的过程,CAPE随时间变化较大。因此尽管CAPE有明确的物理意义,但对暴雨的指示意义还相对有限。

图2c为山东暴雨中的大气可降水量频次分布。从中可以发现,大气可降水量并不是典型的正态分布,而是有偏分布,这意味着大气可降水量的平均值并不是出现在最大概率时,而是比大气可降水量最大可能出现值偏小,山东暴雨的其他指标物理量也存在类似情况。因此在本文季节变化、区域差异等的分析中,使用了更接近最大概率的中位数以及25%、75%分位数来描述暴雨中有关指标物理量的特征。

4 暴雨指标物理量的季节特征

尽管在所有的暴雨过程中,有关指标物理量对暴雨的形成都比较重要,但事实证明,由于气候背景

的不同,各种指标物理量的相对重要性和阈值都有所不同(张萍萍等,2012)。因此首先需要分析暴雨指标物理量的季节变化特征。

4.1 水汽因子分析

水汽是暴雨发生的必要条件之一。通过对山东暴雨指标物理量的统计分析,发现山东暴雨指标物理量均有较明显的季节性变化,特别是水汽因子。因NCEP资料在边界层中湿度误差较大(王秀明等,2012),因此在水汽分析中重点分析了位于边界层之上的850 hPa比湿。

比湿是表征大气水汽因子的重要指标。850 hPa比湿的分布表明(图3a):在2和3月发生暴雨时,比湿很小,75%以上的暴雨个例比湿都小于 $7.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。此后几个月,比湿迅速增加,特别是山东进入雨季后(黎清才等,2003)的7月暴雨发生时的比湿达到最高,其中75%以上的暴雨中比湿都大于 $12.9 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,此时比湿中值为 $14.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。8月,比湿略有下降,但仍有75%以上的暴雨比湿大于 $12.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。此后随着东亚季风的逐渐减弱,山东雨季逐渐结束(张少林等,2004),输送到山东的水汽减弱,暴雨对应的比湿也逐渐减小,11月已非常小,其中75%的暴雨比湿都在 $7.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以下。其他各层次比湿也有类似的季节性变化(表3),即在春季和秋季暴雨比湿阈值偏小,而盛夏比湿阈值增大。尽管已有研究认为850 hPa比湿达到 $14 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 是暴雨预报的重要指标(朱乾根等,2000),但这主要是在7—8月,而在山东其他月份,产生暴雨时比湿并不需要达到这一数值(表3)。

大气可降水量同样呈现出与比湿类似的季节变化特征。在 2、3 和 11 月,75%的暴雨发生时大气可降水量都不超过 30.7 mm,而 7 和 8 月,大气可降水量数值却超过 55.5 mm,这表明夏季发生暴雨时,需要更高的大气可降水量才能形成暴雨(图略)。与此相反,表征大气饱和程度水汽因子——相对湿度的季节性变化则呈现出与比湿截然不同特征,在整个夏季都不高,而 6 月相对湿度最小,其中值仅为 84.8%;而其他月份大部分都在 90%以上,其中 10 月发生的暴雨相对湿度中值最大达 97%(图 3b)。这主要因为在夏半年,尽管水汽含量较高,但由于较

高的环境温度,空气更难达到饱和,因此相对湿度较小。

4.2 动力因子分析

分析各月山东省暴雨发生时 700 hPa 垂直速度,发现暴雨过程的垂直速度也有明显的季节性变化。从图 3c 可以看到在山东暴雨多发的 6—8 月,暴雨发生时 700 hPa 垂直速度反而较低,其中值在 $-2.7 \times 10^{-3} \sim -3 \times 10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$;而其他的月份,700 hPa 垂直速度明显偏大,中值一般在 $-9 \times 10^{-3} \sim -5 \times 10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

表 3 比湿各位势高度的逐月变化

Table 3 Monthly variation of geopotential heights of specific humidity in Shandong Province

指标物理量/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	百分数/%	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月
700 hPa 比湿	75	4.3	5.7	7.5	8.5	10.6	10.6	10.2	9.6	8.2	5.7
	50	4.3	5.7	7.1	7.9	9.3	9.9	9.5	8.9	7.5	5.3
	25	4.3	5.4	6.5	6.5	7.1	9.0	8.7	8.4	6.4	4.8
850 hPa 比湿	75	7.2	7.5	11.5	11.5	13.9	15.1	14.4	13.1	11.0	7.3
	50	7.2	6.4	10.3	10.5	12.8	14.1	13.6	12.3	10.5	6.5
	25	7.2	6.0	9.5	9.0	11.3	12.9	12.4	11.0	9.6	3.9
925 hPa 比湿	75	8.1	6.5	13.0	11.8	15.5	17.2	16.6	14.6	12.0	9.0
	50	8.1	6.0	11.0	9.9	13.9	16.0	15.6	13.2	11.4	4.8
	25	8.1	4.8	9.8	8.5	12.7	14.3	14.1	11.5	10.1	3.3
地面 2 m 比湿	75	9.2	6.6	15.0	11.9	17.0	19.4	19.5	15.5	13.2	10.4
	50	9.2	5.6	10.6	9.8	15.4	17.7	18.0	14.4	12.6	5.5
	25	9.2	5.3	9.4	8.7	13.8	15.9	16.2	12.7	11.5	4.3

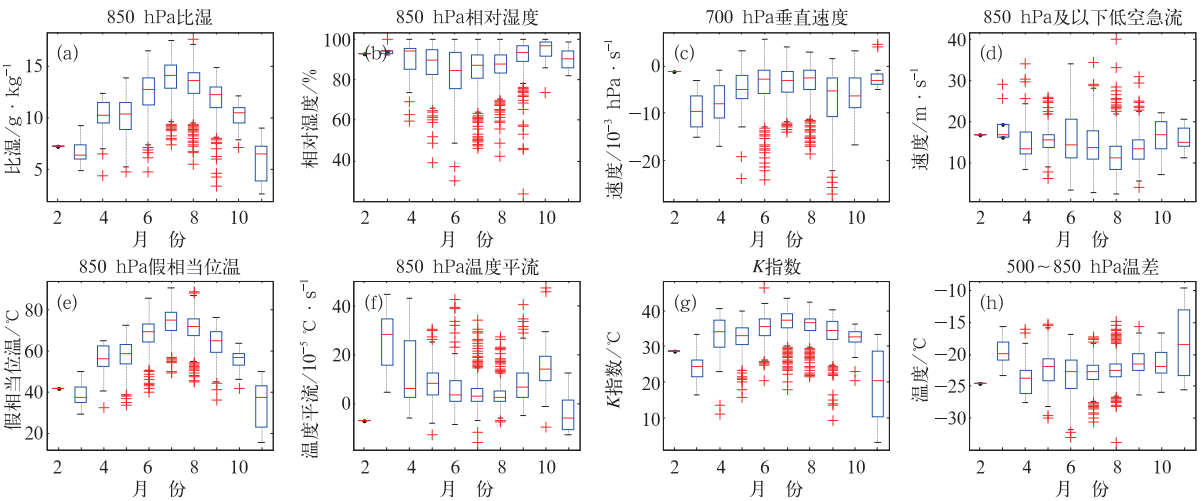


图 3 暴雨指标物理量的逐月变化

Fig. 3 Monthly variation of physical indicators for rainstorms

与此对应,在山东当暴雨发生时对流层低层基本都存在速度大于 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的低空急流;且低空急流也有较明显的季节性差异,其季节变化趋势与

垂直速度基本对应,在夏季暴雨发生时低空急流速度偏低,而在其他季节需要较强的低空急流才能造成暴雨(图 3d)。这主要是因为根据 Doswell 等

(1996)计算雨强的公式,降雨强度为降水效率、比湿和上升速度的乘积,因此当比湿较大时,较小的垂直速度同样可以造成较强的降水,而在盛夏季节发生暴雨时湿度条件一般较好,因此较小的垂直运动就可以造成较强的降水,这就造成了盛夏季节偏低动力因子指标。

4.3 热力不稳定分析

假相当位温是一个能够同时表征大气水汽和热力状况的指标物理量(施望芝等,2007),而对流层低层假相当位温的显著增加可以造成对流不稳定,因此,850 hPa 假相当位温作为一个暴雨指标被广泛应用于日常暴雨预报业务的诊断分析中。对山东暴雨 850 hPa 假相当位温的统计分析表明,其同样具有很强的季节性差异(图 3e)。2、3 月的 850 hPa 假相当位温都很低,有 75% 的暴雨发生时 850 hPa 假相当位温小于 43℃;4、5 月的暴雨发生时假相当位温有了很大的增加,75% 超过 52.6℃;而 6、7 两个月更有明显的提高,850 hPa 假相当位温比 5 月分别提高 10.3℃和 21℃;而 500 和 850 hPa 假相当位温差也达到最大(图略),表明暴雨需要的对流不稳定显著增强;8 月后 850 hPa 假相当位温开始下降。由此可见,盛夏季节对流层低层假相当位温季节变化显著增加大气低层的能量,但需要更高阈值的假相当位温才能发生。同时,850 hPa 温度平流在盛夏的 6—8 月相对于其他月处于较低的水平(图 3f),这在一定程度上说明了盛夏暴雨的斜压性有所降低。

由于大气水汽和热力状况的季节性变化,暴雨发生时 K 指数也具有明显的季节变化特征。相对来说主要有两个集中的状态,其中 2、3 和 11 月为低 K 指数月份,其中值在 20.3~28.5℃;而其他月份 K 指数都比较高,其中 75% 以上的暴雨中 K 指数都超过了 32.7℃,其中 7 月 K 指数中值最高为 37.4℃(图 3g),表明大气非常不稳定。而表征温度垂直递减率的 500 和 850 hPa 温度差也表现出类似的特征,但是与 K 指数呈反位相(图 3h)。

4.4 小结

以上统计分析表明,暴雨指标物理量具有明显的季节性变化,这主要表现在两个方面:一是水汽、动力、热力不稳定指标的分布特征和阈值随季节有较大不同;二是造成强降水的水汽、动力因子在不同

季节表现出对暴雨影响程度的不同,春季和秋季暴雨发生时,水汽因子较弱,动力因子则比较强,此时暴雨大部分为局地暴雨;而盛夏季节,水汽条件可以更容易达到暴雨要求,而动力因子指标有所降低。同时,指标物理量的分析也表明,盛夏季节暴雨发生时大气对流不稳定性增强,而斜压性减弱。因此在需要考虑暴雨预报指标时,更需要关注指标的季节性差异。

5 暴雨指标的区域特征

山东东面临海,中部为鲁中山区,环境较为复杂,各地的天气以及影响系统等也都有较大区别(曹钢锋等,1988),影响暴雨的因子较为复杂。研究中把全省分为 4 个大区,分别为鲁西北、鲁中、鲁南和半岛(图 4a),以此为基础对各指标物理量进行统计分析。分析发现,相对于山东暴雨指标物理量的季节差异,山东暴雨指标物理量的区域差异尽管也比较明显,但并不非常显著,同时不同区域的水汽因子、动力因子和热力不稳定因子的差异并不一致。其中,对于水汽因子来说,鲁南地区比其他地区明显偏大,其大气可降水量比其他 3 个区域大 2~3 mm(图 4b);而动力因子则半岛地区与其他 3 个区域有较大不同,暴雨发生时低空急流比其他区域大 2~3 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,而 700 hPa 垂直速度也偏强 $1.3 \times 10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 4c 和 4d)。同时,鲁南的热力不稳定因子也比较大,850 hPa 假相当位温和 K 指数都比其他区域高约 0.5℃(图 4e 和 4f)。这可能与山东自南向北的水汽输送通道有关,同时也与鲁南和半岛地区易受热带气旋影响关系密切。

6 不同范围暴雨指标特征

不同范围的暴雨产生的环境也有所不同,研究中将山东暴雨划分为局地暴雨、区域性暴雨和大范围暴雨,并对山东境内三类不同范围的暴雨过程指标物理量进行分别统计分析。结果发现水汽、动力和热力不稳定因子有比较明显的差异。

首先,在水汽条件方面。局地暴雨水汽条件需求相对较小,850 hPa 比湿的中值为 $12.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$;随着暴雨范围的增大,水汽条件要求越来越高,其中大范围暴雨需要的 850 hPa 比湿最高,其中值达 $13.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 5a)。另一方面,从 700 和 850 hPa

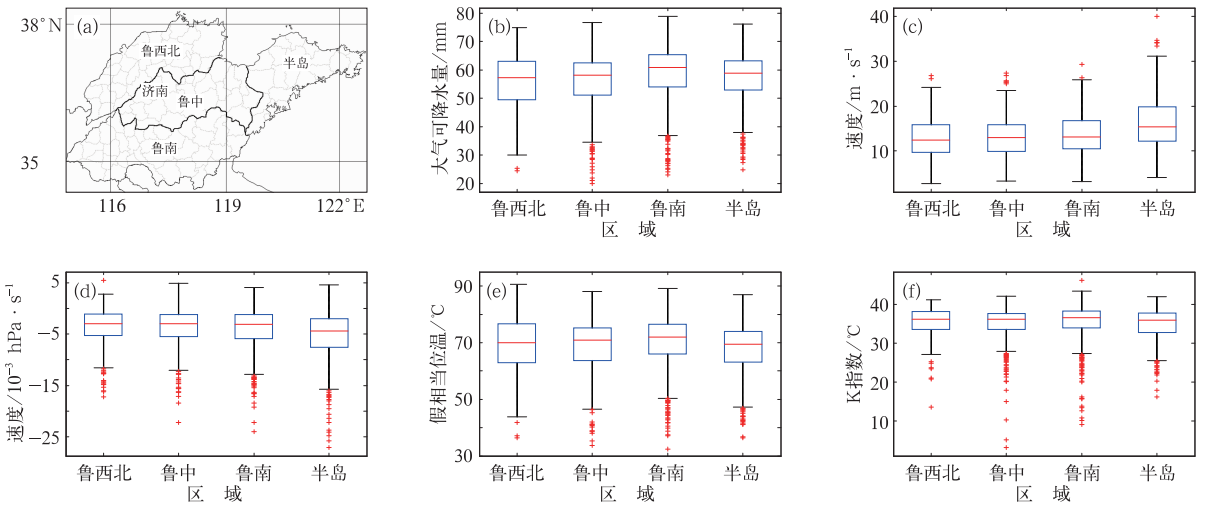


图 4 不同区域暴雨指标物理量分布特征

(a) 山东分区, (b) 大气可降水量, (c) 850 hPa 及以下低空急流, (d) 700 hPa 垂直速度, (e) 850 hPa 假相当位温, (f) K 指数

Fig. 4 Physical indicators distribution characteristics of different regional rainstorms

(a) climate regions of Shandong, (b) atmospheric precipitable water, (c) LLJ at 850 hPa and the lower, (d) vertical velocity at 700 hPa, (e) θ_{se} at 850 hPa, and (f) K index

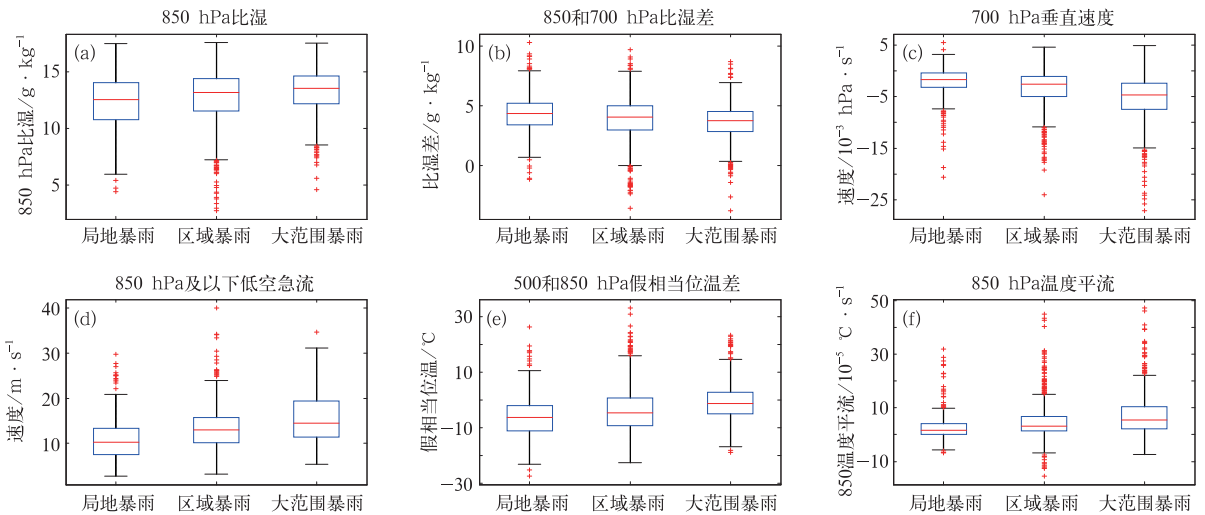


图 5 不同范围暴雨指标物理量分布特征

Fig. 5 Physical indicators distribution characteristics of rainstorms in different scopes

比湿的差值(图 5b)来看,大范围暴雨比局地暴雨小 $0.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,这意味着暴雨范围越大,高层湿度越大。因此,我们不难看出大范围暴雨的发生除了需要低层更高的水汽含量外,另一个显著特征是需要有更加深厚的湿层。

从动力角度来看,大范围的暴雨上升运动更强,这可以从不同范围的暴雨 700 hPa 垂直速度的差异上进行分析。局地暴雨 700 hPa 垂直速度中值仅为 $-1.7 \times 10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$,而大范围暴雨 700 hPa 垂

直速度的中值为 $-4.7 \times 10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$,接近局地暴雨的 3 倍(图 5c)。于此同时,相应的低空急流也明显更强(图 5d)。

通过对 500 和 850 hPa 的假相当位温差分析,发现平均来讲局地暴雨发生时,500 和 850 hPa 假相当位温差为 -6.2°C ,而大范围暴雨中 500 和 850 hPa 假相当位温差仅为 -1.3°C ,这说明大范围暴雨过程中对流不稳定较弱(图 5e)。尽管这样,在对流层低层往往有更强的温度平流,大范围暴雨中

850 hPa 温度平流可达局地暴雨的 3 倍,达 $5.5 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 5f)。

由此可见,相对于规模较小的暴雨过程来说,大范围暴雨需要更好的水汽条件,更强的动力条件,但对流不稳定条件较低。

7 结论和讨论

山东暴雨有很强的季节性特征,同时其指标物理量也具有显著的时空差异。本文通过对山东省近 12 年的暴雨过程和相关的指标物理量进行统计分析,从季节变化、区域差异、暴雨范围等三个方面分析并揭示了山东暴雨发生时指标物理量的分布特征,这在一定程度上反映了不同环境中水汽、动力、热力不稳定因子对暴雨影响的复杂性。

(1) 山东暴雨具有明显的季节性变化特征;尽管各季节均有较多的局地暴雨,但大范围暴雨主要发生在盛夏和秋季;同时,山东暴雨还具有明显的夜间增强趋势。

(2) 各指标物理量对于暴雨预报的指示意义不尽相同。比湿等一些简单的水汽、动力和热力不稳定因子对暴雨预报有较好的可用性。然而,CAPE、涡度平流等因子尽管物理意义较为明确,但是在各暴雨过程中差异很大,因此并不能很好地作为暴雨的预报指标。

(3) 业务中经常使用的暴雨指标物理量均有不同程度的季节性变化,这主要表现在这些指标物理量的阈值季节性差异,同时也表现在水汽、动力、热力不稳定因子在不同季节相对重要性上。通常是盛夏季节水汽因子较高,而动力因子较低,而且盛夏季节大气对流不稳定性增强,而斜压性减弱;其他季节相反。这些都是在日常预报中使用暴雨指标时需要考虑的问题。

(4) 山东暴雨指标物理量的区域性差异没有季节性差异明显,且各因子的区域特征并不一致。总体来说,鲁南暴雨需要更强的水汽条件,同时热力不稳定因子也要求较高,而半岛地区暴雨动力因子需要更强,这与山东暴雨的影响系统和自南向北的水汽输送通道等有关。

(5) 对于不同范围的暴雨来说,大范围暴雨和区域性暴雨需要更好的水汽条件,更强的动力条件,但对流不稳定条件要求较低,局地性暴雨则与此相反。

通过以上研究发现,发生暴雨时其指标物理量并不是一成不变,而是具有较明显的季节性和区域性差异,另外不同范围的暴雨指标物理量也不尽相同。目前一些地方在预报业务中通过个例分析总结了较多的暴雨物理量指标,尽管能够对当地暴雨预报有较好的促进作用,但并不完善。在实际业务中需根据季节、区域等差异建立更为细致的暴雨预报指标体系。值得肯定的是,目前一些研究已经开始分季节制定有关指标阈值(张萍萍等,2012),并取得了很好的效果。本研究在分析暴雨指标物理量总体特征的情况下,也给出了山东省各季节暴雨预报指标物理量的可能范围,以期在实际业务中能够让预报人员更好地把握暴雨发生的环境条件。

与此同时,大量的研究认为不同影响天气系统(王令等,2012)、位于影响系统不同位置的暴雨(孙兴池等,2006),甚至影响天气系统的细微差异(孙兴池等,2012)都可能具有不同的物理量,这可能造成很大的降水差异。因此,针对暴雨预报指标的统计研究还有很多方面需要继续开展,如针对不同影响系统造成的暴雨,不同天气系统位置暴雨、不同量级暴雨等的指标物理量分布特征还不太清晰。相信这些研究的开展将进一步加深预报人员对暴雨的认识,提高对暴雨的精细化预报能力和水平。

致谢:感谢山东省气象台杨成芳在研究方法、南京大学大气科学系苏翔在绘图技术上的支持和帮助。

参考文献

- 曹钢锋,张善君,朱官忠,等. 1988. 山东天气分析与预报. 北京:气象出版社,292-298.
- 曹晓岗,张吉,王慧,等. 2009. “080825”上海大暴雨综合分析. 气象,35(4):51-58.
- 李俊,李武阶,廖穆山. 2006. 基于“配料”的梅雨锋强降水预报方法. 气象,32(9):3-8.
- 黎清才,邹树峰,张少林,等. 2003. 山东省雨季开始标准的研究. 山东气象,23(1):17-19.
- 李延香,徐传玉,滕俏斌. 1997. 华北地区区域性暴雨综合预报技术. 气象,23(11):22-26.
- 梁生俊,马晓华. 2012. 西北地区东部两次典型大暴雨个例对比分析. 气象,38(7):804-813.
- 刘爱鸣,林毅,刘铭,等. 2007. “碧利斯”和“格美”登陆后暴雨强度不同的天气学对比分析. 气象,33(5):36-41.
- 苗爱梅,郝振荣,贾利冬,等. 2012. 精细化监测资料在山西暴雨预报模型改进中的应用. 气象,38(7):786-794.
- 施望芝,高琦,张萍萍. 2007. 基于 T213 的 6—8 月湖北省暴雨落区(点)预报模型和指标研究. 暴雨灾害,26(3):217-222.
- 孙兴池,王西磊,周雪松. 2012. 纬向切变线暴雨落区的精细化分析.

- 气象,38(7):779-785.
- 孙兴池,王业宏,迟竹萍. 2006. 气旋冷暖区暴雨对比分析. 气象,32(6):59-65.
- 王德英. 2008. 2008年我国南方暴雨野外科学试验(SCHeREX). 中国气象科学研究院年报,(1):20-23.
- 王令,王国荣,孙秀忠,等. 2012. 应用多种探测资料对比分析两次突发性局地强降水. 气象,38(3):281-290.
- 王秀明,俞小鼎,朱禾. 2012. NCEP再分析资料在强对流环境分析中的应用. 应用气象学报,23(02):139-146.
- 吴蔡,俞小鼎,席世平,等. 2011. 基于配料法的“08.6.3”河南强对流天气分析和短时预报. 气象,37(1):48-58.
- 尹洁,陈双溪,刘献耀. 2004. 江西汛期连续暴雨形势特征与中期预报模型. 气象,30(5):16-20.
- 俞小鼎. 2011. 基于构成要素的预报方法——配料法. 气象,37(8):913-918.
- 俞小鼎,周小刚,王秀明. 2012. 雷暴与强对流临近天气预报技术进展. 气象学报,70(3):311-337.
- 袁松,程华,王东勇,等. 2012. 模式再分析与实际探空资料的对比分析. 气象科学,32(1):62-67.
- 岳彩军,郭煜,寿绍文,等. 2011. 螺旋度在我国多种灾害性天气研究中的应用进展. 暴雨灾害,30(2):107-116.
- 张萍萍,龙利民,张宁,等. 2012. “分型配料法”在湖北省暴雨预报中的应用研究. 热带气象学报,28(5):771-776.
- 张少林,邹树峰,黎清才,等. 2004. 山东省雨季结束标准研究. 山东气象,24(1):10-12.
- 周雪松,阎丽凤,孙兴池,等. 2012. “2007.8.17”山东大暴雨的数值模拟和诊断分析. 气象,38(08):960-070.
- 朱乾根,林锦瑞,寿邵文,等. 2000. 天气学原理和方法. 北京:气象出版社,454.
- Doswell C A, Brooks H E, Maddox R A. 1996. Flash flood forecasting: An ingredients-based methodology. Wea Forecast,11(4):560-581.
- Nietfeld D D, Kennedy D A. 1998. Forecasting snowfall amounts: An ingredients based methodology supporting the Garcia Method. 16th Conference on Weather Analysis and Forecasting/Symposium on the Research Focul of the U. S. Weather Research Program;385-387.
- Wetzel S W, Martin J E. 2001. An operational ingredients-based methodology for forecasting midlatitude winter season precipitation. Wea Forceas,16(1):156-167.