

王俊,郑丽娜,王洪,等. 山东 6 次台风暴雨雨滴谱统计特征及区域差异. 应用气象学报,2023,34(4):475-488.

DOI: 10.11898/1001-7313.20230408

山东 6 次台风暴雨雨滴谱统计特征及区域差异

王 俊^{1)2)*} 郑丽娜³⁾ 王 洪²⁾ 刘 畅⁴⁾

¹⁾(山东省气象防灾减灾重点实验室, 济南 250031)

²⁾(山东省人民政府人工影响天气办公室, 济南 250031)

³⁾(山东省济南市气象局, 济南 250102)

⁴⁾(山东省气象台, 济南 250031)

摘 要

利用多普勒天气雷达产品、降水天气现象仪观测资料和热带气象最佳路径数据集, 针对 2018—2021 年 6 次影响山东的台风暴雨过程的降水特征, 分析台风影响代表站暴雨雨滴谱和积分参数的变化特征。结果表明: 不同台风进入山东之初的微物理特征不同, 台风安比(1810)、台风温比亚(1818)、台风巴威(2008)和台风烟花(2106)偏海洋性, 台风摩羯(1814)和台风利奇马(1909)偏大陆性。经过不同距离、受不同环境影响后, 台风暴雨的微物理特征出现变化。参数间的统计关系显示, 大陆性和海洋性对流云降水存在差异, 如 μ - λ 统计关系等。Z-R 关系较复杂, 大陆性和海洋性对流云降水过程, Z-R 关系无明显差异。平衡雨滴谱占比为 0.8%~29.3%, 较高占比(大于 7.0%)平衡雨滴谱既可出现在海洋性对流云降水过程, 也可以出现在大陆性对流云降水过程; 过渡雨滴谱占比为 22.8%~77.8%, 高比例(大于 50.0%)过渡谱主要出现在大陆性对流云降水过程。

关键词: 台风暴雨; 雨滴谱; 平衡雨滴谱

引 言

台风是我国沿海地区主要灾害性天气之一, 其引发的强降水常造成巨大的人员伤亡和经济损失。地面雨滴大小及分布是云中微物理过程与动力过程相互作用的最终产物, 也是台风降水的基本属性。通过雨滴谱特征分析可了解台风降水形成的微物理过程, 对改进台风数值预报的微物理参数化方案及定量降水预报和估算均具有重要意义。

统计表明: 台风降水的微物理特征在不同气候区域、海洋和陆地存在很大差异, Tokay 等^[1]分析大西洋 7 个台风的雨滴谱特征, 发现热带台风降水主要由高浓度的中小雨滴组成, 温带台风的雨滴谱与大陆性风暴类似, 存在较高浓度的大雨滴。澳大利亚达尔文地区雨滴谱特征随与台风中心的距离变

化, 靠近台风中心的雨滴具有较小直径和较大浓度^[2]。Chang 等^[3]分析 13 次登陆台湾岛的台风降水雨滴谱特征, 指出对流云降水雨滴谱既不是典型海洋性, 也不是典型大陆性, 而是介于二者之间的对流云降水分布。Wen 等^[4]利用广州和南京二维视频雨滴谱仪观测资料分析 7 个登陆台风的雨滴谱特征, 指出华南沿海和华东陆地台风的雨滴谱参数仅有微小差异, 相对于海洋性对流云降水^[5], 两地台风降水的雨滴浓度更高且雨滴直径较小。吕童^[6]分析福建沿海 4 个台风登陆前后雨滴谱特征差异, 发现多数台风登陆后大雨滴浓度减少, 中间尺度雨滴浓度基本不变, 少部分台风登陆前后雨滴谱变化不大。

许多研究对比分析台风不同雨带和不同位置降水的微物理特征。Chen 等^[7]利用 1 台 Parsivel 激光雨滴谱仪观测资料分析 2009 年台风莫拉克(0908)降水的微物理特征, 发现不同雨带的平均雨滴谱均

2023-02-26 收到, 2023-06-05 收到再改稿。

资助项目: 山东省自然科学基金项目(ZR2021MD012), 华东区域气象科技协同创新基金项目(QYHZ201812), 山东省气象局课题(2018sdqxm12)

* 邮箱: wangjun818@sohu.com

为单峰分布,符合 Gamma 分布,眼壁降水的雨滴谱具有最大谱宽。台风麦德姆(1410)右侧降水的雨滴谱谱宽由宽变窄,小滴数浓度先增后减,大滴数浓度逐渐减少,而移动路径中轴后侧的残留云系降水出现大滴数浓度和谱宽的突增^[8]。BaO 等^[9-10]发现 2018 年台风玛利亚(1808)随台风半径的增大,平均质量加权直径总体逐渐减小,但截距参数逐渐增大,2019 台风利奇马(1909)也具有该特征。台风利奇马(1909)眼壁降水雨滴谱在 2 mm 附近存在第 2 峰值^[10],表明眼壁对流云降水的碰并-破碎达到平衡状态,出现平衡雨滴谱。台风贝碧嘉(1816)的平均雨滴谱谱宽随雨强增大而拓宽,各尺度雨滴的数浓度增加,其中海口站直径大于 3 mm 的中大粒径雨滴端的增幅更明显^[11]。

对于台风降水雨滴谱演变特征也得到一些研究成果。Feng 等^[12]分析 2018 年台风山竹(1822)登陆前外围雨带、内核心及登陆后外围降水的雨滴谱参数分布特征,发现不同类型降水的雨滴谱特征明显不同,但不同地点同一类型降水的雨滴谱特征相似。冯婉悦等^[13]利用上海、浙江、江苏和安徽的降水现象仪资料,分析 2018 年台风温比亚(1818)降水的 Z-R 关系。王俊等^[14]分析热带气旋阶段台风温比亚(1818)在河南和山东的雨滴谱特征,发现雨滴谱和参数特征无明显变化,但台风减弱成温带气旋后,台风降水在辽宁沿海的微物理特征发生显著改变。

由于台风登陆北上过程受较高纬度大气环境场和下垫面等因素影响,台风结构发生显著变化,造成不同强度的暴雨降水。因此,台风登陆后的结构演变、强降雨分布特征一直是研究重点^[15-16],但目前对于登陆台风雨滴谱等微物理特征演变规律的研究报道较少。本文利用 2018—2021 年 6 次影响山东的台风暴雨降水雨滴谱观测资料,针对每次台风暴雨的不同降水特征,选取不同代表站分析台风暴雨雨滴谱和参数的演变特征,并对比不同台风雨滴谱特征的差异。

1 资料和方法

所用资料包括济南、滨州、青岛、临沂的 4 部 S 波段多普勒天气雷达产品资料,13 台 DSG1 型降水天气现象仪观测资料(时间分辨率为 1 min),台风强度、位置等信息来自中国气象局热带气旋最佳路

径数据集。图 1 是 S 波段多普勒天气雷达、降水天气现象仪位置和台风移动路径。由图 1 可见,2018 年第 10 号台风安比(1810)(简称安比)7 月 22 日在上海市崇明岛沿海登陆,经过江苏、山东和河北后在天津附近转向东北方向移动,7 月 24 日在内蒙古减弱为热带低压后消失^[17]。安比影响山东期间的强度为热带风暴级别,始终处于西伸西北太平洋副热带高压(简称副高)南侧,形势稳定,且无明显冷空气影响,安比从南到北穿过山东的降水强度逐渐减弱。安比影响下的五莲站(记为安比-五莲,下同)和滨州站(安比-滨州)的过程降水量分别为 172.9 mm 和 84.7 mm,因此选取这两个站为台风安比影响下山东南、北暴雨降水的代表站分析雨滴谱的变化特征。

2018 年第 14 号台风摩羯(1814)(简称摩羯)以强热带风暴强度登陆浙江温岭,8 月 13 日在安徽境内减弱为热带低压,之后转向偏北方向移动(图 1),14 日 05:00(北京时,下同)影响山东,15 日 05:00 在黄河入海口进入渤海^[18-19]。摩羯影响山东的前半段始终处于副高西侧边缘的偏南气流中,后半段冷空气自西北方向入侵,与台风在鲁西北结合,对流增强。山东台儿庄站(摩羯-台儿庄)位于山东南部,过程降水量为 220.1 mm。诸城站(摩羯-诸城)位于山东南部,累积降水量为 78.7 mm,降水云系主要是冷空气侵入后引发的强中尺度对流带。德州站(摩羯-德州)位于山东西北部,累积降水量为 177.2 mm,降水云系主要是台风中心附近北侧较强回波。3 个站处于台风不同发展阶段和不同位置降水云系影响,台儿庄站和诸城站位于台风右侧,德州站处于台风左侧,选择这 3 个站为摩羯影响的代表站。

2018 年第 18 号台风温比亚(1818)(简称温比亚)在上海登陆,台风中心向西北方向穿越上海、江苏、安徽、河南南部,在河南商丘附近转向东北方向移动(图 1),从山东北部出海并加强,在渤海南部变性为温带气旋^[20]。8 月 20 日 08:00 温比亚进入渤海,副高东退,较强冷空气沿西北气流进入台风内部,温比亚变性为温带气旋。广饶站(温比亚-广饶)累积降水量为 290.3 mm,属于热带气旋阶段降水;莱阳站(温比亚-莱阳)累积降水量为 171.2 mm,属于温带气旋阶段降水。选择广饶站和莱阳站为温比亚影响的代表站,两站均位于台风右侧。

2019 年第 9 号台风利奇马(1909)(简称利奇马)8 月 10 日在浙江温岭市沿海登陆,向北穿过浙江、江苏移入黄海,于 8 月 11 日 20:50 在山东青岛

市沿海再次登陆(图1),此后北上移入渤海,回旋少动且强度不断减弱,8月13日14:00停止编号^[21-22]。利奇马影响山东时受冷空气影响发生变性,变性时段发生在10日20:00—11日08:00^[23]。兰陵站、临朐站、章丘站和高唐站均位于台风左侧,对应利奇马变性前后不同发展阶段的暴雨降水,可选为利奇马影响的代表站。

2020年第8号台风巴威(2008)(简称巴威)8月24日加强成为台风,在中国东部海上沿125°E北上(图1),27日17:00停止编号^[22]。巴威为近海北上台风,这类台风往往在山东半岛产生强降水^[24-25]。前期受台风倒槽影响,山东半岛降水回波呈两条线状中尺度对流带,后期台风中心逼近半岛东端,冷空气入侵致使对流增强,在青岛附近不断形成新的对流单体。诸城站(巴威-诸城)和平度站(巴威-平度)累积降水量分别为150.3 mm和149.7 mm,选择这两个站为巴威影响的代表站,其降水资料用于分析巴威从南到北移动过程中的雨滴谱演变特征。

2021年第6号台风烟花(2106)(简称烟花)先

后两次在浙江登陆,途经江苏、安徽、山东、河北等省市(图1),7月30日变性为温带气旋,30日20:00停止编号^[26-27]。随着台风北上,西侧有弱冷空气入侵,台风强度逐渐减弱,台儿庄站(烟花-台儿庄)和平原站(烟花-平原)分别位于台风中心的左右两侧,可作为分析台风暴雨降水雨滴谱演变特征的代表站。

降水天气现象仪观测资料的质量控制包括取样面积订正^[28],去除偏离雨滴落速-直径经验关系较大的粒子,去除直径大于8 mm的粒子和两个直径最小档资料,详细质量控制参见文献^[14]。目前,常用Gamma分布^[29]拟合雨滴谱分布,3个参数采用阶矩法计算,本文采用二、四、六阶矩计算^[30]。归一化Gamma分布的平均质量加权直径 D_m (单位:mm)和截距参数 N_w (单位: $m^{-3} \cdot mm^{-1}$),以及雨强 R (单位: $mm \cdot h^{-1}$)和雷达反射率因子 Z (单位: $mm^6 \cdot m^{-3}$)也是重点分析的参量,具体计算公式参见文献^[14]。

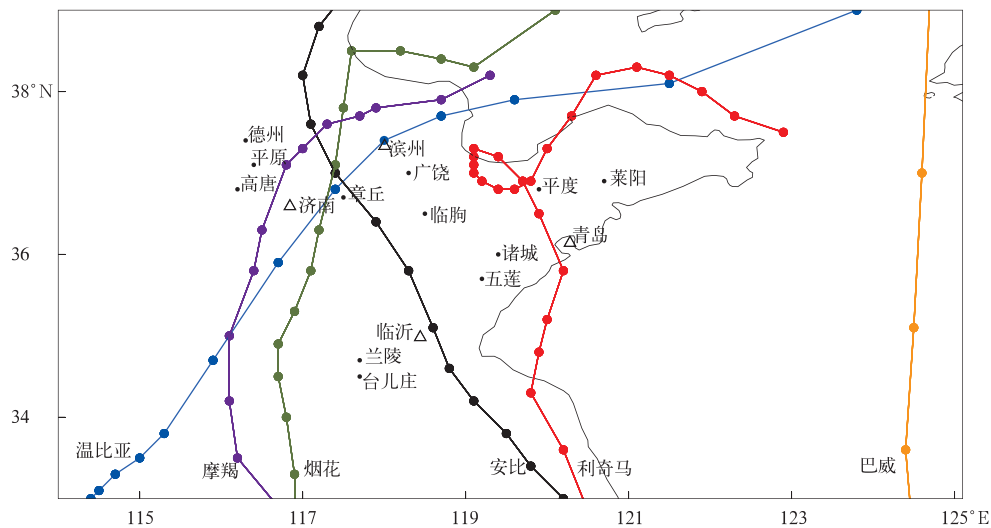


图1 S波段多普勒天气雷达(黑色空心三角)、降水天气现象仪(黑色实心圆点)和台风移动路径

Fig. 1 Locations of Doppler weather radars(black hollow triangles), precipitation phenomenon instruments(black solid dots) and typhoon tracks

2 雨滴谱和参数

2.1 不同雨强平均雨滴谱分布特征

根据雨强将雨滴谱资料分为7类,各站每类雨

强样本量见表1。由表1可见,3类层状云降水($R \leq 10.0 \text{ mm} \cdot h^{-1}$)样本较多,对流云降水($R > 10 \text{ mm} \cdot h^{-1}$)样本较层状降水明显偏少,第7类雨强的样本最少。

图2是台风影响下各代表站的平均雨滴谱分

表1 代表站7类雨强(R ,单位: $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)的样本量Table 1 Sample number of seven rain rate(R ,unit: $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$) categories for typical stations

台风	代表站	$0.5 < R \leq 2$	$2 < R \leq 5$	$5 < R \leq 10$	$10 < R \leq 20$	$20 < R \leq 50$	$50 < R \leq 100$	$100 < R \leq 200$
安比	五莲	394	257	196	126	100	4	0
	滨州	233	270	131	70	34	0	0
摩羯	台儿庄	444	299	160	142	90	45	5
	诸城	179	128	81	53	32	9	13
	德州	79	147	84	107	98	68	1
温比亚	广饶	343	185	128	107	186	89	0
	莱阳	165	223	151	88	61	40	5
利奇马	兰陵	295	243	259	234	144	25	0
	临朐	535	421	179	230	446	88	2
	章丘	1007	1136	816	707	145	0	0
	高唐	683	286	95	55	72	69	9
巴威	诸城	176	160	109	113	136	46	0
	平度	134	166	170	128	86	8	0
烟花	台儿庄	622	437	330	205	128	15	1
	平原	374	293	200	101	39	1	0

布特征。由图2可见,受安比影响,五莲站和滨州站的平均雨滴谱特征明显不同,五莲站直径小于1.5 mm的小粒子数浓度较高,而滨州站该尺度的粒子数浓度偏低;五莲站各类雨强间的平均粒子数浓度随直径增大而变大,尤其是直径大于2.0 mm的粒子数浓度变化较快,表明雨强增大主要由较大粒子的增加所致,滨州站2~5类雨强的平均雨滴谱直径大于2.0 mm的粒子数浓度随雨强增大而均匀增加;滨州站各类雨强的平均雨滴谱均在直径1.0 mm存在第2峰,而五莲站各类雨强的平均雨滴谱没有第2峰;两个站平均雨滴谱的最大谱宽均在5.0 mm左右。总体上,安比从南到北穿过山东期间的降水强度逐渐减弱,南北两个站的雨滴谱特征差异明显,滨州站雨滴谱的粒子数浓度较低。

由图2摩羯影响的3个代表站平均雨滴谱可见,3个站均包含7类雨强的平均雨滴谱,1~6类雨强的平均雨滴谱中较大粒子数浓度随雨强增加而增长较快,雨强增大主要由较大粒子的增加所致,但第7类雨强样本较少,直径大于4.0 mm的大粒子也偏少;台儿庄站和诸城站直径为1.0 mm的小粒子数浓度较德州站明显偏大,表明小粒子对德州站对流云降水的贡献不大;诸城站5~7类雨强的平均雨滴谱在2.0 mm直径处粒子数浓度减少较慢,具有平衡雨滴谱特征^[31]。摩羯在山东的降水云系较复杂,主要降水云系是位于台风中心附近北侧较强回波区,台儿庄站和德州站分别位于山东南北,因此两个站的雨滴谱特征差异显著,德州站雨滴谱显示小粒子数浓度较低和直径大于5 mm的特大粒子数浓

度较高。

由图2温比亚影响的两个代表站平均雨滴谱可见,两个站的平均雨滴谱差异较大,广饶站最大雨强较莱阳站小,但广饶站雨强为20.0~100.0 $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的样本明显比莱阳站多,即莱阳站强降水发生频次低;广饶站第6类雨强的平均雨滴谱存在直径为6.0~8.0 mm的特大粒子,莱阳站谱宽最大不超过6.0 mm;广饶站雨滴谱直径为1.0 mm的小粒子数浓度明显低于莱阳,且两个站在雨强较强时均存在平衡雨滴谱特征。由于温比亚在广饶站受冷空气侵入,台风中心附近降水回波发展加强,但在山东半岛减弱成温带气旋,因此两个站的降水雨滴谱特征差异显著,而且莱阳站雨滴谱与温带气旋北侧的辽宁长海等站^[14]的雨滴谱特征也明显不同。

由图2利奇马影响的4个代表站可见,4个站的平均雨滴谱差别较大,章丘站最大雨强仅为46.6 $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$,平均雨滴谱仅有5类,临朐站和高唐站最大雨强超过100.0 $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$,均有7类平均雨滴谱。兰陵站平均雨滴谱的小粒子数浓度较低,第6类雨强的最大粒子数浓度也仅为974.9 $\text{m}^{-3} \cdot \text{mm}^{-1}$;临朐站的小粒子数浓度较高;章丘站第1类和第2类弱降水平均雨滴谱的小粒子数浓度较高,但第4类和第5类较强降水平均雨滴谱的小粒子数浓度偏低;高唐站小粒子数浓度总体也偏低,但第6类和第7类强降水平均雨滴谱的小粒子数浓度较高。高唐站平均雨滴谱具有最大谱宽,雨强超过10.0 $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的平均雨滴谱最大谱宽均为8.0 mm;临朐站谱宽较小,雨强大于100.0 $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的平均雨

滴谱(仅为 2 min)谱宽仅为 5.5 mm;与此相反,章丘站最大雨强较小,但第 4 类和第 5 类雨强的平均雨滴谱的谱宽较大。兰陵站降水主要出现在台风变性前,临朐站强降雨主要出现在台风变性过程和变性之后,两者雨滴谱特征的差异主要体现在小粒子端。章丘站降水主要出现在台风变性过程和变性之后,降水强度低、持续时间长,强降雨的小粒子和中等粒子的数浓度较低。

由图 2 巴威影响的两个代表站可见,诸城站和平度站平均雨滴谱的小粒子数浓度相差不大,诸城站第 6 类平均雨滴谱的谱宽较大,其他雨强的平均

雨滴谱谱宽比平度站的小;诸城站各类雨强平均雨滴谱间较大粒子数浓度随直径增大而快速增加;诸城站第 3 类和第 4 类雨强平均雨滴谱在 1.0~2.0 mm 存在第 2 峰,第 6 类雨强平均雨滴谱在 2.0 mm 附近斜率较小,表现为平衡雨滴谱的特点^[31]。

由图 2 烟花影响的两个代表站可见,台儿庄站和平原站的降水强度差别较大,平原站仅有 1 min 雨强大于 50.0 mm·h⁻¹,出现在台风外围云系很短暂的强降雨中,雨滴谱谱宽较大,小粒子数浓度较低,具有蒸发谱特征^[32]。台儿庄站第 3~5 类雨强平均雨滴谱直径大于 2.0 mm 的粒子数浓度随雨强

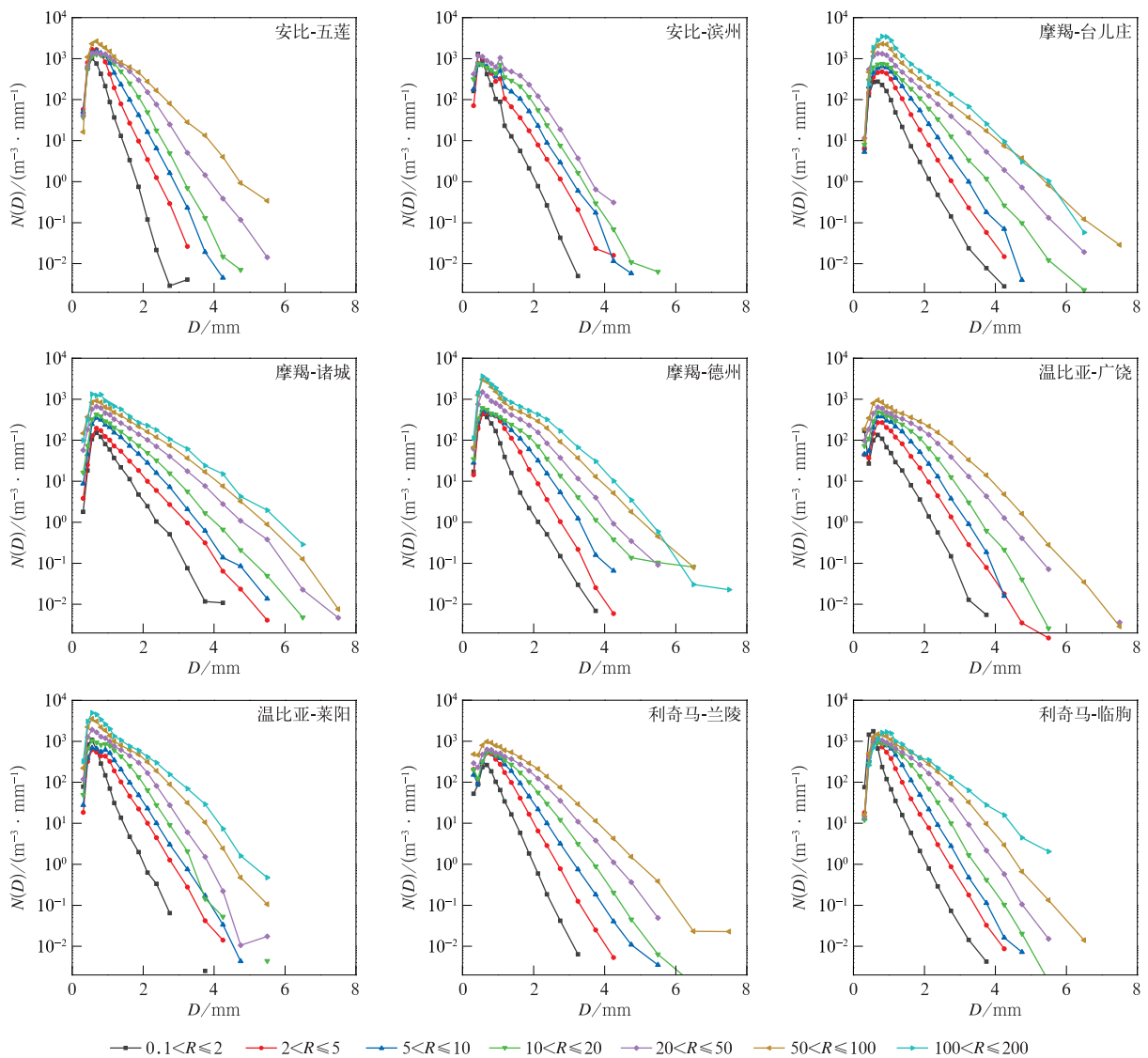
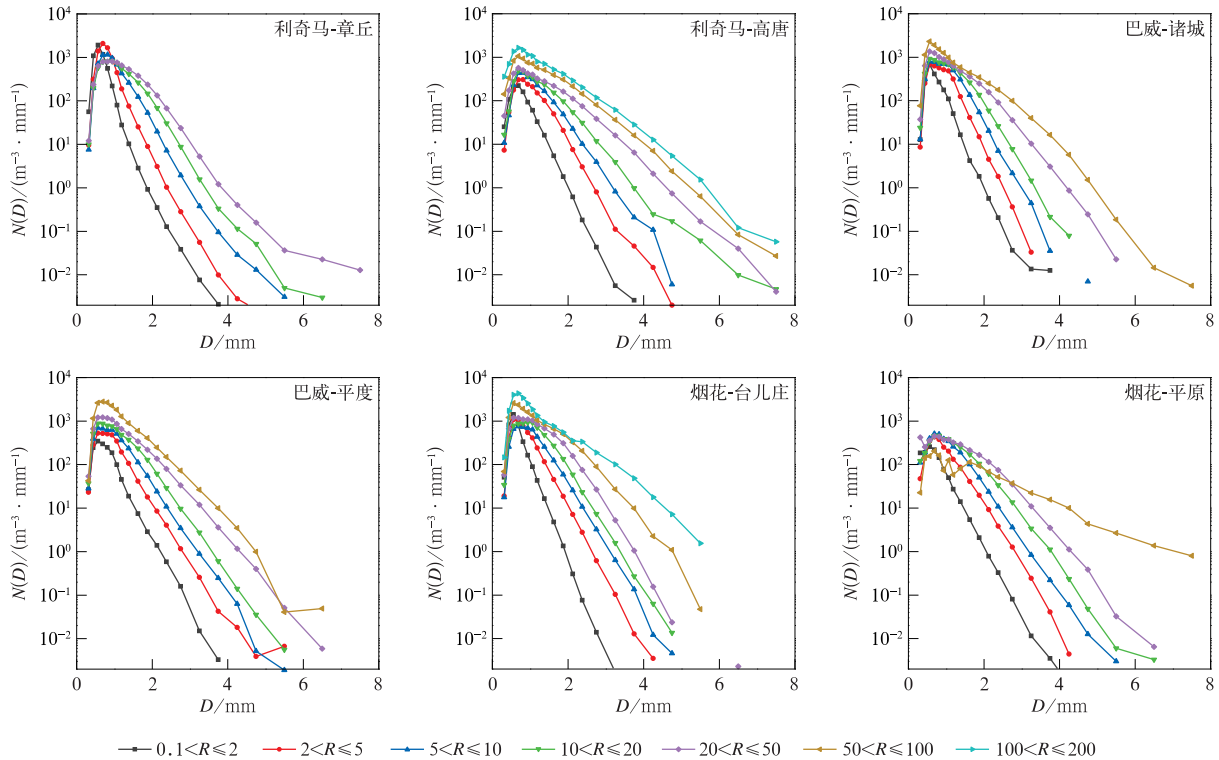


图 2 代表站不同雨强(R,单位:mm·h⁻¹)的平均雨滴谱(N(D))分布
 Fig. 2 Average raindrop size distributions(N(D)) of different rain rate (R,unit:mm·h⁻¹) categories for typical stations



续图 2

增大均匀增加,而第 6 类和第 7 类雨强平均雨滴谱较大粒子数浓度随雨强增大快速增加;平原站第 3~5 类雨强平均雨滴谱在 2.0~5.0 mm 直径的粒子数浓度也均匀增加,但直径大于 5.0 mm 的特大粒子数浓度增大较快。烟花从南向北降水减弱,较强降水回波在平原站附近一直处于减弱状态,导致平原站雨滴谱的小粒子数浓度最低且谱宽较大。

2.2 $\lg N_w - D_m$ 分布特征

图 3 是台风影响下代表站的平均 $\lg N_w - D_m$ 分布。由图 3 可见,安比影响的两个站 $\lg N_w - D_m$ 均为海洋性^[5,33]对流云降水雨滴谱特征,五莲站对流云降水具有典型的海洋性对流云降水雨滴谱特征,滨州站平均 $\lg N_w$ 较低,平均 $\lg N_w - D_m$ 位于海洋性对流云降水分布区域(图 3 绿色矩形框)之下,安比对流云降水雨滴谱特征属于海洋性,北移过程的微物理特征变化较小。摩羯影响的 3 个站的 $\lg N_w - D_m$ 均为大陆性对流云降水雨滴谱特征,但 3 个站也存在差别:德州站对流云降水雨滴谱为典型大陆性,台儿庄站和诸城站的平均 $\lg N_w - D_m$ 位于大陆性分布区域之上, $\lg N_w$ 较大,摩羯向北移动后对流云降水雨滴谱特征发生明显改变,从偏大陆性变为典型大陆性,后期受冷空气影响产生强对流带降水的雨滴谱特征更接近大陆性。温比亚影响的广饶站和莱阳

站 $\lg N_w - D_m$ 区别显著,莱阳站的平均 $\lg N_w$ 较大, D_m 较小,靠近海洋性对流云降水区域,而广饶站完全相反,平均 $\lg N_w$ 较低和 D_m 较大,靠近大陆性对流云降水区域,即莱阳站雨滴谱特征偏海洋性,广饶站对流云降水雨滴谱特征偏大陆性,温比亚在河南商丘、山东肥城的对流云降水雨滴谱特征偏海洋性^[12],在山东广饶站受冷空气影响转变为大陆性,东移后在莱阳站又转变为海洋性,即对流云降水微物理特征出现多次转变。利奇马影响的 4 个站可分为两类:临朐站和章丘站具有较高的 $\lg N_w$ 和较小的 D_m ,靠近海洋性对流区域的右下侧,即台风变性过程和变性后对流云降水具有海洋性对流云降水雨滴谱特征;兰陵站和高唐站的 $\lg N_w$ 较低, D_m 较大,位于大陆性对流区域的上方,即台风变性前和西风槽强对流云降水偏向于大陆性对流云降水雨滴谱特征。巴威影响的两个站对流云降水的平均 $\lg N_w - D_m$ 类似:诸城站的 $\lg N_w$ 和 D_m 较大,均位于海洋性和大陆性对流云降水间且更靠近海洋性区域,由于诸城站降水回波处于对流发展加强阶段,因此 D_m 略大。烟花影响的两个站对流云降水的平均 $\lg N_w - D_m$ 差异较大,台儿庄站具有典型的海洋性对流云降水雨滴谱特征, $\lg N_w$ 较高,而平原站 $\lg N_w$ 较低,平均 $\lg N_w - D_m$ 位于大陆性对流降水区域之上,具有

大陆性对流云降水雨滴谱特征,主要原因是烟花北移过程中受弱冷空气影响,降水明显减弱且降水回波处于消散阶段,雨滴谱中小粒子数浓度很低,因此 $\lg N_w$ 较小。

以上分析可知,各台风进入山东之初具有不同的微物理特征,安比、温比亚、巴威和烟花偏海洋性,摩羯和利奇马偏大陆性。台风移动不同的距离后,受到不同环境的影响,其微物理特征可能发生不同变化:安比和巴威变化不明显,摩羯明显变化,温比亚、利奇马和烟花变化显著。另外,层状云降水的平均 $\lg N_w - D_m$ 较文献[5]偏大(图 3 中黑色虚线),可能原因是本文层状云降水的雨强上限为 $10.0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,远大于文献[5]的层状云降水雨强上限 $5.0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,所以本文的 $\lg N_w$ 和 D_m 均偏大。

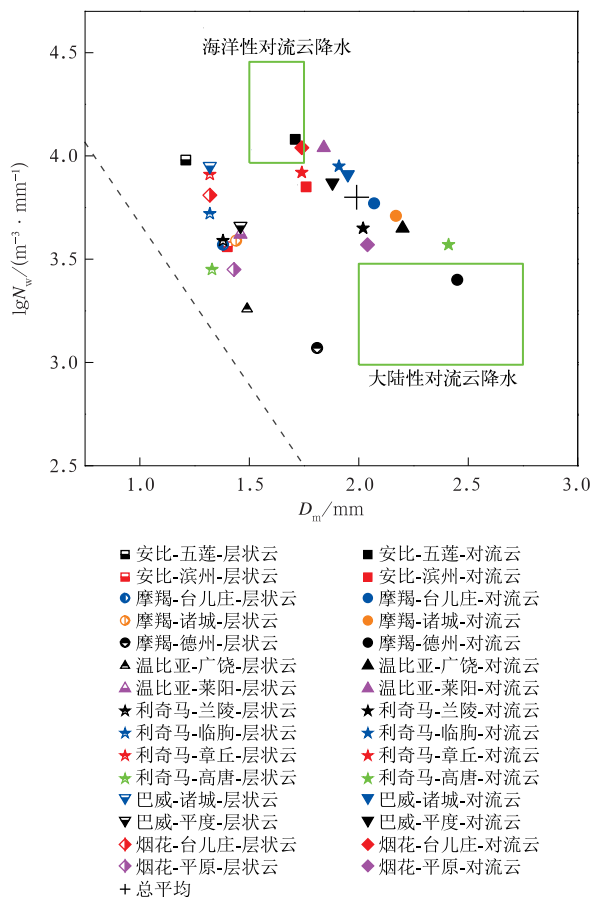


图 3 代表站平均 $\lg N_w - D_m$ 分布
(绿色矩形框分别为海洋性和大陆性对流云降水分布区域,黑色虚线是层状云降水的平均分布)

Fig. 3 Average $\lg N_w - D_m$ for typical stations (green rectangles denote maritime and continental convective clusters, the black dashed line denotes the average stratiform precipitation)

2.3 Z-R 关系

图 4 是代表站层状云和对流云降水 $Z-R$ 关系 ($Z=AR^b$) 的系数 A 和指数 b 。由图 4 可见,安比影响的两个代表站层状云降水和对流云降水的 $Z-R$ 关系存在差异:对层状云降水,滨州站的系数 A 和指数 b 较五莲站的大;对对流云降水,滨州站的系数 $A(490.6)$ 比五莲站大,但指数 $b(1.1)$ 比五莲站小。摩羯影响的台儿庄站、诸城站和德州站层状降水的指数 b 为 $1.33 \sim 1.47$,系数 A 为 $300 \sim 400$;3 个站对流云降水的 $Z-R$ 关系差别较大,台儿庄站的系数 A 和指数 b 分别为 224.1 和 1.52 ,诸城站的系数 A 和指数 b 分别为 541.7 和 1.24 ,德州站的系数 A 和指数 b 分别为 425.2 和 1.39 。温比亚影响的两个代表站层状云降水和对流云降水的 $Z-R$ 接近,与广饶站相比,莱阳站两类降水的系数 A 均稍大,指数 b 均稍小。利奇马影响的 4 个代表站,对层状云降水,高唐站的指数 b 较大;对对流云降水,兰陵站、临朐站、章丘站的系数 A 和指数 b 接近,高唐站的系数 A 略偏大。巴威影响的两个站,平度站层状云降水的系数 A 和指数 b 较大,但平度站对流云降水系数 A 较大,指数 b 较小。烟花影响的两个代表站,对对流云降水,台儿庄站的系数 A 为 320.9 ,指数 b 为 1.28 ,平原站的系数 A 为 127.1 ,是所有代表站最小的,指数 b 为 1.70 ,是所有代表站最大的;层状云降水的情况相反,平原站的系数 A 较大,但指数 b 较小。

不同降水过程雨滴谱的差异是 $Z-R$ 关系中的系数 A 和指数 b 变化范围较大的原因,云中雨滴蒸发、碰并、破碎、以及粒子筛选和上升、下沉气流等微物理和动力过程均影响系数 A 和指数 b [34-35]。根据指数可以将对流云降水雨滴谱分为 3 类 [36-37]: $b = 1.0$,为典型平衡雨滴谱或者浓度控制的雨滴谱特征,本文将 b 为 $1.0 \sim 1.2$ 归为浓度控制的雨滴谱; $b \approx 1.6$,为典型直径控制的雨滴谱特征,本文将 $b > 1.5$ 归为直径控制, b 为 $1.2 \sim 1.5$ 归为浓度-直径混合控制的雨滴谱。由图 4 可知,仅有安比影响的滨州站的对流云降水为平衡雨滴谱,烟花影响的平原站的对流云降水为典型直径控制的雨滴谱特征,摩羯影响的台儿庄站和巴威影响的诸城站的对流云降水指数 b 略大于 1.5 ,为非典型直径控制的雨滴谱特征。大部分对流降水为浓度-直径混合控制的雨滴谱特征。

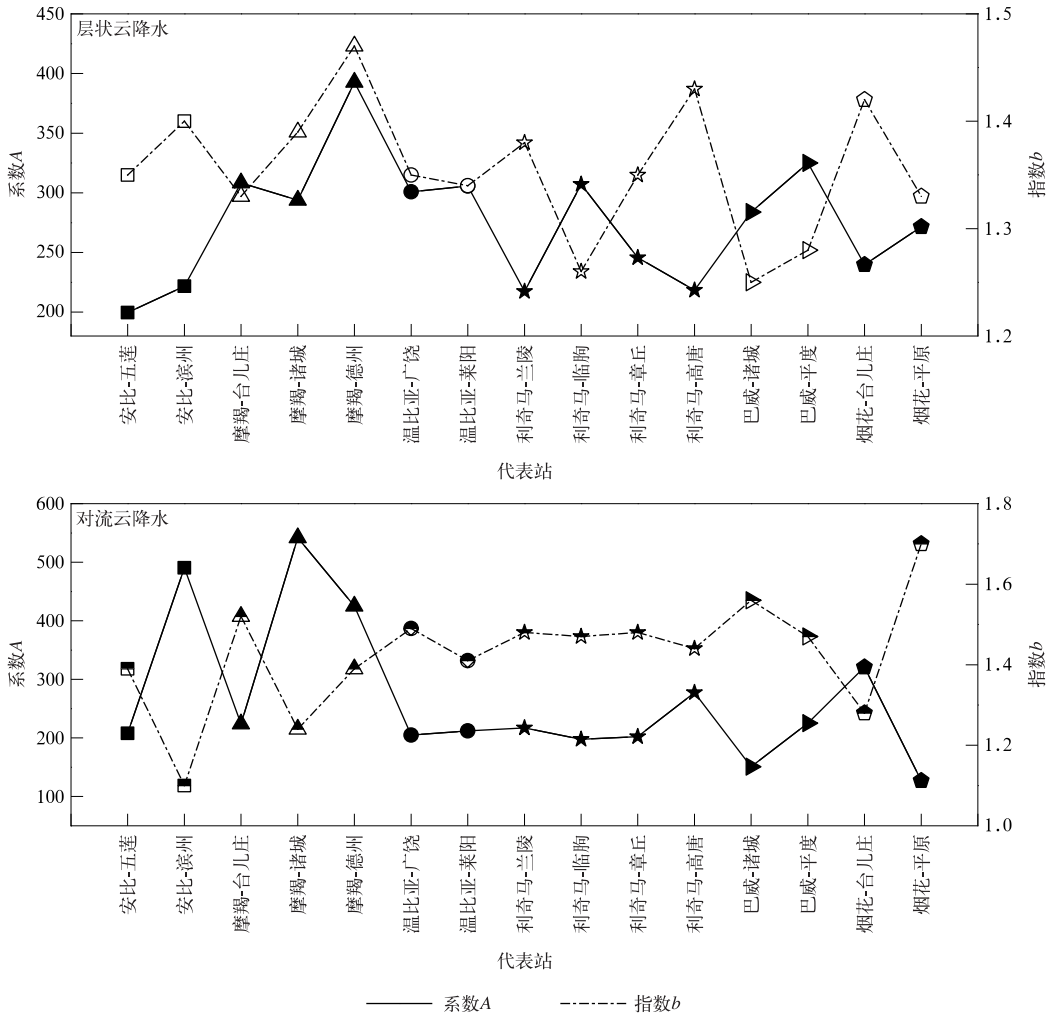


图 4 代表站层状云降水和对流云降水 Z-R 关系的系数 A 和指数 b
 Fig. 4 Coefficient A and index b of Z-R relationship for stratiform and convective precipitation for typical stations

以上代表站的 Z-R 关系与我国台湾、广东和南京、福建等地台风降水的 Z-R 关系接近^[3,4,6],与多普勒天气雷达的非热带地区典型关系^[38] ($Z = 300R^{1.4}$)存在差异,不同台风及同一台风不同位置的 Z-R 关系也可能存在较大差别。因此,采用固定 Z-R 关系估测台风暴雨降水会导致较大误差。另外,系数 A 和指数 b 成反比,这在对流云降水更明显。Atlas 等^[39]在分析热带海洋降水时指出过这一现象,且认为合理地区分降雨类型有利于出现这一反比现象。

2.4 μ - λ 关系

另一个应用雨滴谱资料的重要方面是联合双偏振雷达观测资料反演雨滴谱参数。雨滴谱 Gamma 分布包括 3 个参数,Zhang 等^[40]认为形状参数 μ 和斜率参数 λ 存在二次多项式关系,即 $\lambda = a_2\mu^2 + a_1\mu +$

a_0 ,提出利用该 μ - λ 统计关系约束 Gamma 分布,将雨滴谱模型简化为两个参数,称为 C-G 模型,利用双偏振雷达观测的水平反射率因子和差分反射率因子计算 C-G 模型参数。该方法已用于反演台风降水的雨滴谱参数^[41]。参考 Zhang 等^[40]资料处理方法,分析 $R > 5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 时的 μ - λ 关系。不考虑雨滴浓度限制而增加谱宽限制(雨滴谱宽大于 2.7 mm),主要原因是 Zhang 等^[40]使用的二维视频雨滴谱仪较 OTT 型雨滴谱仪能观测到更多的小雨滴^[42],OTT 型降水现象仪的雨滴浓度偏小。

图 5 是代表站的 μ - λ 拟合分布。由图 5 可见,安比影响的两个站当 $\lambda < 6.0 \text{ mm}^{-1}$ 时拟合线接近,当 $\lambda > 6.0 \text{ mm}^{-1}$ 时拟合线分离,滨州站的拟合线向上凹,这是因为滨州站的多项式系数 a_2 为负值。摩羯影响的 3 个站,台儿庄站和诸城站的拟合类似,系

数 a_2 均为负值,而德州站的 a_2 为正值, λ 较大时(如大于 5.0 mm^{-1}),3 个站的拟合线明显分离,当 λ 相同时,诸城站雨滴谱的 μ 较大,德州站的 μ 较小。温比亚影响的两个站的拟合线差别明显,当 $\lambda > 5.0 \text{ mm}^{-1}$ 时,两条拟合线明显分离,广饶站的 μ 较大。利奇马影响的 4 个站,当 $2.0 \text{ mm}^{-1} < \lambda <$

7.0 mm^{-1} 时,兰陵站和临朐站的拟合线接近,其余情况拟合线明显分离;高唐站和兰陵站的拟合线在 $\lambda > 3.0 \text{ mm}^{-1}$ 时几乎重合,章丘站在 $\lambda < 8.0 \text{ mm}^{-1}$ 时, μ 较低。巴威影响的两个站的拟合拟合线分离不大,诸城站的 μ 值较大。台风烟花影响的两个站拟合线分离明显,平原站的 μ 较大。

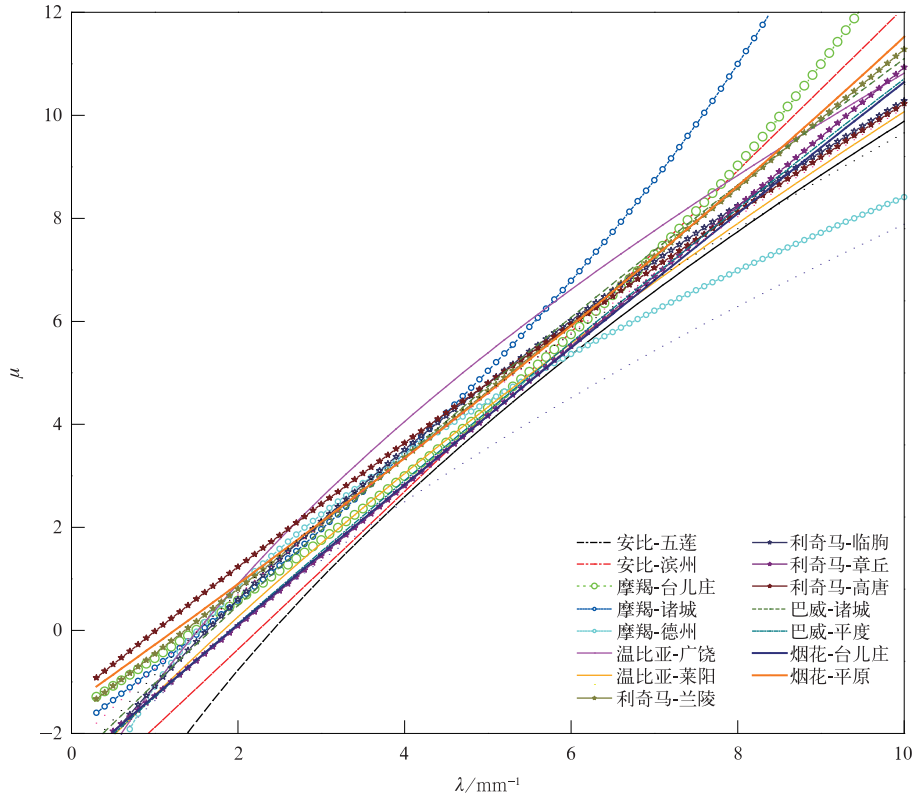


图 5 代表站的 μ - λ 拟合线

Fig. 5 Fitting curves of μ - λ polynomial relation for typical stations

μ - λ 统计关系表明:大陆性降水的常数项较小,海洋性降水的常数项较大;除了摩羯影响的德州站外,大陆性降水的一次项较大,二次项较小,海洋性降水一次项稍小,二次项较大。由拟合线对比可知,除了安比影响的滨州站和摩羯影响的诸城站外,大陆性对流降水的形状参数 μ 较大。与 Zhang 等^[40] 的 μ - λ 关系不同,山东台风暴雨的 μ 更大,大部分代表站的 μ - λ 关系与我国台湾^[3]、福建沿海^[7] 台风降水的类似。

2.5 平衡雨滴谱特征

D'Adderio 等^[43] 开发了计算直径为 $1.0 \sim 2.6 \text{ mm}$ 雨滴谱分布曲线的最大斜率 H_s 的自动算法,并据此定义 6 类雨滴谱: $H_s > 0.0 \text{ m}^{-3} \cdot \text{mm}^{-2}$ 是第 1 类,为平衡雨滴谱(简称平衡谱)。 $H_s \leq -2.0 \text{ m}^{-3} \cdot$

mm^{-2} 是第 6 类, $-2.0 \text{ m}^{-3} \cdot \text{mm}^{-2} \sim 0$ 之间间隔 $-0.5 \text{ m}^{-3} \cdot \text{mm}^{-2}$ 分别为第 2~5 类。第 2 类 ($-0.5 < H_s \leq 0.0 \text{ m}^{-3} \cdot \text{mm}^{-2}$) 为过渡谱,第 3~6 类属于非平衡谱。

图 6 是不同雨强的平衡雨滴谱。由图 6 利奇马影响的高唐站雨强大于 $70.0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的 3 min 平衡雨滴谱可见,直径接近 1.0 mm 处为第 1 峰值,粒子数浓度最大,直径 $1.0 \sim 2.0 \text{ mm}$ 处为第 2 峰值,这类雨滴谱不适合 Gamma 分布拟合雨滴谱^[44]。由图 6 摩羯影响的台儿庄站雨强为 $2.0 \sim 5.0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的平衡谱可见,粒子数浓度偏小(一般小于 $100.0 \text{ m}^{-3} \cdot \text{mm}^{-1}$),分钟谱型大多呈多峰分布,直径为 $1.0 \sim 2.6 \text{ mm}$ 的峰值难以判断是否为雨滴破碎形成。由图 6 利奇马影响的高唐站雨强为 $0.5 \sim 2.0 \text{ mm} \cdot$

h^{-1} 的平衡谱可见,雨滴谱曲线呈多峰分布,粒子数浓度随雨强减弱明显减小,如直径为2.0 mm的粒子数浓度较图6摩羯影响的台儿庄站的粒子数浓度明显偏小,直径为2.0 mm的雨滴谱分布曲线甚至

出现不连续。雨强较小时,直径为1.0~2.6 mm的峰值不能作为平衡雨滴谱的依据,因此不再分析雨强小于 $5 \text{ mm} \cdot h^{-1}$ 的平衡雨滴谱特征。

表2是代表站6类雨滴谱的占比。由表2可见,

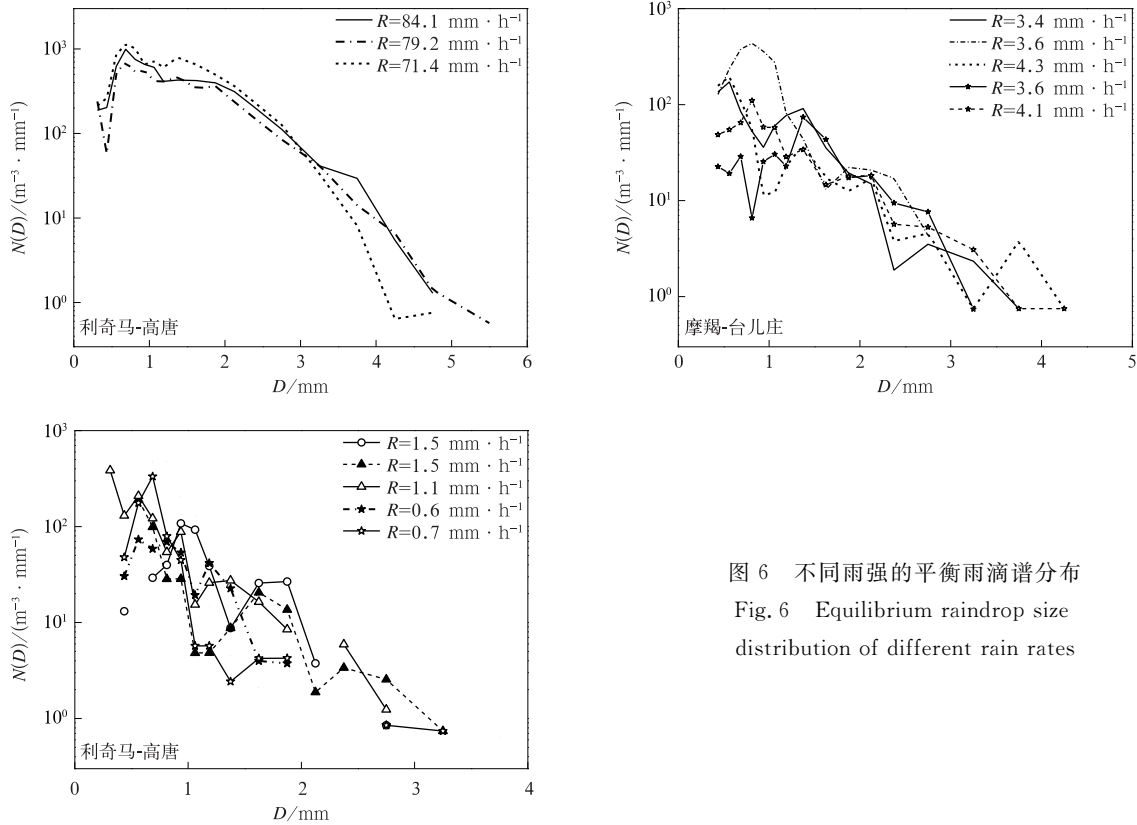


图6 不同雨强的平衡雨滴谱分布
Fig. 6 Equilibrium raindrop size distribution of different rain rates

表2 代表站不同最大斜率(H_s ,单位: $m^{-3} \cdot mm^{-2}$)的雨滴谱占比(单位:%)

Table 2 Percentage of raindrop size based on different maximum slopes(H_s , unit: $m^{-3} \cdot mm^{-2}$) for typical stations(unit: %)		$H_s > 0.0$	$-0.5 < H_s \leq 0.0$	$-1.0 < H_s \leq -0.5$	$-1.5 < H_s \leq -1.0$	$-2.0 < H_s \leq -1.5$	$H_s \leq -2.0$	
台风	代表站							
	安比	五莲	3.9	38.0	43.2	11.7	2.9	0.3
		滨州	8.8	50.5	35.3	4.9	0.5	0.0
摩羯		台儿庄	2.4	22.8	67.3	7.5	0.0	0.0
		诸城	29.3	44.8	23.6	2.3	0.0	0.0
		德州	2.0	77.8	19.9	0.3	0.0	0.0
温比亚		广饶	6.7	75.3	17.8	0.2	0.0	0.0
		莱阳	3.3	45.1	45.4	5.9	0.3	0.0
利奇马		兰陵	4.1	52.8	37.6	5.1	0.4	0.0
		临朐	0.8	54.6	41.6	2.9	0.1	0.0
		章丘	7.8	36.5	43.6	11.7	0.5	0.0
		高唐	15.6	62.7	20.3	1.5	0.0	0.0
巴威		诸城	10.3	49.1	37.1	3.2	0.3	0.0
		平度	7.1	35.6	47.2	10.2	0.0	0.0
烟花		台儿庄	4.9	26.2	56.6	11.0	1.2	0.0
		平原	9.2	51.8	35.1	3.6	0.3	0.0

各代表站的雨滴谱差异明显。安比影响的滨州站平衡谱占比明显高于五莲站,滨州站过渡谱的占比也

较大,但五莲站的第3类和第4类非平衡谱比滨州站高,而且五莲站还有少量第6类非平衡谱。摩羯

影响的3个站各类雨滴谱的占比差异偏大,台儿庄站和德州站平衡谱的占比低于3.0%,诸城站高达29.3%,在所有代表站的平衡谱占比最高;过渡谱特征则不同,德州站过渡谱的比例高达77.8%,台儿庄站过渡谱仅占22.8%,且台儿庄站的平衡谱和过渡谱累计仅有25.2%,在代表站中占比最低。温比亚影响的广饶站平衡谱占比为6.7%,较莱阳站的3.3%稍大,但广饶站过渡谱为75.3%,远大于莱阳站的45.1%;莱阳站非平衡雨滴谱的占比(51.6%)远大于广饶站(18.0%)。利奇马影响的临朐站平衡谱的占比仅为0.8%,且仅出现7 min,所有代表站中最少。高唐站平衡谱的占比为15.6%(位列所有代表站第二),高唐站的过渡谱占比也较高,为62.7%,高唐站平衡谱和过渡谱的累计占比为78.3%,远高于兰陵站(56.9%)、临朐站(55.4%)和章丘站(44.3%)。巴威影响的诸城站平衡谱占比为10.3%,过渡谱占比为49.1%,均高于平度站。烟花影响的平原站平衡谱和过渡谱占比分别为9.2%和51.8%,台儿庄站平衡谱和过渡谱的占比仅为4.9%和26.2%,累计占比为30.1%,仅比摩羯影响的台儿庄略高。

平衡谱表征碰并和破碎过程达到平衡状态,过渡谱指示存在明显的破碎过程,改变了雨滴谱的谱型,但尚未达到平衡状态^[43]。由以上分析可知,平衡谱所占比例不高,但过渡谱占比较高,摩羯影响的德州站和诸城站、温比亚影响的广饶站和利奇马影响的高唐站平衡谱和过渡谱累计均超过70.0%,表明雨滴破碎对雨滴谱的形成有显著作用。摩羯和烟花影响台儿庄站的较强降水中,两类谱累计分别为25.2%和31.2%,表明雨滴破碎对雨滴谱的形成影响较小。其他代表站两类谱累计占比为41.0%~61.0%,表明雨滴破碎在雨滴谱形成过程广泛存在并起重要作用。

3 小 结

2018—2021年有5次台风登陆山东和1次近海台风影响山东,本文利用多普勒天气雷达产品、降水天气现象仪观测资料和热带气旋最佳路径数据集,针对每次台风暴雨过程的降水特征,选取不同代表站分析台风暴雨的雨滴谱和积分参数的演变特征。

1) $\lg N_w - D_m$ 分布特征显示不同台风进入山东

之初的降水微物理特征不同,安比、温比亚、巴威和烟花偏海洋性,摩羯和利奇马偏大陆性。经过不同的距离移动、受不同环境影响后,台风降水的微物理特征出现不同变化,安比、巴威变化较小,摩羯从南到北由偏大陆性转为典型大陆性,温比亚由大陆性转为海洋性,利奇马由变性前的大陆性(兰陵站和高唐站)转为变性过程和变性后的海洋性(临朐站和章丘站),烟花从南到北由海洋性转变为大陆性。

2) 大陆性和海洋性对流云降水的参数统计关系存在差异。 $\mu - \lambda$ 的二次多项式统计关系显示大陆性降水的常数项较小,海洋性降水的常数项较大;除摩羯影响的德州站外,大陆性降水的一次项稍大,二次项较小,海洋性降水的一次项稍小,二次项较大。 $Z-R$ 关系比较复杂,大陆性和海洋性对流云降水的 $Z-R$ 关系无明显差异,但大陆性降水过程的指数 b 多较大,海洋性降水过程指数 b 多较小。

3) 总体上平衡雨滴谱的占比较低,较高占比的平衡雨滴谱既可以出现在海洋性降水过程(安比影响的滨州站、利奇马影响的章丘站、巴威影响的诸城站),也可以出现在大陆性降水过程(摩羯影响的诸城站、温比亚影响的诸城站、利奇马影响的高唐站、烟花影响的平原站);过渡雨滴谱的占比较高,高占比的过渡谱更易出现在大陆性对流云降水(摩羯影响的德州站、温比亚影响的广饶站、利奇马影响的高唐站)。

本文主要分析影响山东的台风降雨过程的雨滴谱和参数的变化特征,影响因素(如冷空气及中纬度天气系统、地形、台风的变化、观测台站与台风的相对位置等)及其微物理过程需要深入研究。

参 考 文 献

- [1] Tokay A, Bashor P G, Habib E, et al. Raindrop size distribution measurements in tropical cyclones. *Mon Wea Rev*, 2008, 136:1669-1685.
- [2] Deo A, Walsh K J E. Contrasting tropical cyclone and non-tropical cyclone related rainfall drop size distribution at Darwin, Australia. *Atmos Res*, 2006, 181:81-94.
- [3] Chang W Y, Wang T C, Lin P L. Characteristics of the raindrop size distribution and drop shape relation in typhoon systems in the western Pacific from the 2D video disdrometer and NCU C-band polarimetric radar. *J Atmos Oceanic Technol*, 2009, 26:1973-1993.
- [4] Wen L, Zhao K, Chen G, et al. Drop size distribution characteristics of seven typhoons in China. *J Geophys Res Atmos*, 2018, 123:6529-6548.

- [5] Bringi V N, Chandrasekar V, Hubbert J, et al. Raindrop size distribution in different climatic regimes from disdrometer and dual-polarized radar analysis. *J Atmos Sci*, 2003, 60: 354-365.
- [6] 吕童. 登陆台风雨滴谱特征观测研究. 南京: 南京大学, 2018.
Lyu T. Observational Study of the Characteristics of Raindrop Size Distribution of Landfalling Typhons. Nanjing: Nanjing University, 2018.
- [7] Chen B J, Wang Y, Ming J. Microphysical characteristics of the raindrop size distribution in Typhoon Morakot(2009). *J Trop Meteor*, 2012, 18: 162-171.
- [8] 林文, 林长城, 李白良, 等. 登陆台风麦德姆不同部位降水强度及谱特征. 应用气象学报, 2016, 27(2): 239-248.
Lin W, Lin C C, Li B L, et al. Rainfall intensity and raindrop spectrum for different parts in landing Typhoon Matmo. *J Appl Meteor Sci*, 2016, 27(2): 239-248.
- [9] Bao X, Wu L, Zhang S, et al. Distinct raindrop size distributions of convective inner- and outer- rainband rain in Typhoon Maria (2018). *J Geophys Res Atmos*, 2020, 125 (14): e2020JD032482.
- [10] Bao X, Wu L, Zhang S, et al. A comparison of convective raindrop size distributions in the eyewall and spiral rainbands of Typhoon Lekima (2019). *Geophys Res Lett*, 2020, 47 (23): e2020GL090729.
- [11] 毛志远, 付丹红, 黄彦彬, 等. 台风贝碧嘉(1816)外围云系结构与降水特征. 应用气象学报, 2022, 33(5): 604-616.
Mao Z Y, Fu D H, Huang Y B, et al. Peripheral cloud system structure and precipitation characteristics of Typhoon Bebinca (1816). *J Appl Meteor Sci*, 2022, 33(5): 604-616.
- [12] Feng L, Hu S, Liu X, et al. Precipitation microphysical characteristics of Typhoon Mangkhut in southern China using 2D video disdrometers. *Atmosphere*, 2020, 11(9). DOI: 10.3390/atmos11090975.
- [13] 冯婉悦, 施丽娟, 王智敏, 等. 雨滴谱仪资料在“温比亚”台风降水估测中的应用探究. 气象, 2021, 47(4): 389-397.
Feng W Y, Shi L J, Wang Z M, et al. Application of raindrop disdrometer data in rainfall estimation of Typhoon Rumbia. *Meteor Mon*, 2021, 47(4): 389-397.
- [14] 王俊, 丛春华, 王洪, 等. 台风温比亚(2018)登陆后雨滴谱演变特征研究. 气象, 2022, 48(11): 1449-1459.
Wang J, Cong C H, Wang H, et al. Evolution characteristics of raindrop size distribution of landfalling Typhoon Rumbia (2018). *Meteor Mon*, 2022, 48(11): 1449-1459.
- [15] 何立富, 陈双, 郭云谦. 台风利奇马(1909)极端强降雨观测特征及成因. 应用气象学报, 2020, 31(5): 513-526.
He L F, Chen S, Guo Y Q. Observation characteristics and synoptic mechanisms of Typhoon Lekima extreme rainfall in 2019. *J Appl Meteor Sci*, 2020, 31(5): 513-526.
- [16] 覃皓, 郑风琴, 伍丽泉. 台风威马逊(1409)强度与降水变化的相互作用. 应用气象学报, 2022, 33(4): 477-488.
Qin H, Zheng F Q, Wu L Q. The interaction between intensity and rainfall of Typhoon Rammasun(1409). *J Appl Meteor Sci*, 2022, 33(4): 477-488.
- [17] 陈宏, 杨晓君, 易笑园, 等. 北上台风“安比”后期两个阶段暴雨落区分布的差异性分析. 高原气象, 2021, 40(5): 1087-1100.
Chen H, Yang X J, Yi X Y, et al. Analysis of difference in distribution of rainstorms in the later two stages of northward-moving Typhoon Ampil. *Plateau Meteor*, 2021, 40(5): 1087-1100.
- [18] 李瑞芬, 郭卫华, 丛春华, 等. 两个相似路径台风途经鲁西南时降水差异的成因分析. 海洋预报, 2022, 39(2): 40-49.
Li R F, Guo W H, Cong C H, et al. Cause analysis of the precipitation difference between Typhoon “Yagi” and “Rumbia” passing through southwest of Shandong Province with similar tracks. *Marine Forecasts*, 2022, 39(2): 40-49.
- [19] 郑倩, 毛程燕, 丁丽华, 等. 台风利奇马(1909)与台风摩羯(1814)云特征对比. 应用气象学报, 2022, 33(1): 43-55.
Zheng Q, Mao C Y, Ding L H, et al. Comparison of cloud characteristics between Typhoon Lekima(1909) and Typhoon Yagi(1814). *J Appl Meteor Sci*, 2022, 33(1): 43-55.
- [20] 杨舒楠, 端义宏. 台风温比亚(1818)降水及环境场极端性分析. 应用气象学报, 2020, 31(3): 290-302.
Yang S N, Duan Y H. Extremity analysis on the precipitation and environmental field of Typhoon Rumbia in 2018. *J Appl Meteor Sci*, 2020, 31(3): 290-302.
- [21] 刘涛, 端义宏, 冯佳宁, 等. 台风利奇马(1909)双眼墙特征及长时间维持机制. 应用气象学报, 2021, 32(3): 289-301.
Liu T, Duan Y H, Feng J N, et al. Characteristics and mechanisms of long-lived concentric eyewalls in Typhoon Lekima in 2019. *J Appl Meteor Sci*, 2021, 32(3): 289-301.
- [22] 李欣, 张璐. 北上台风强降雨形成机制及微物理特征. 应用气象学报, 2022, 33(1): 29-42.
Li X, Zhang L. Formation mechanism and microphysics characteristics of heavy rainfall caused by northward-moving typhoons. *J Appl Meteor Sci*, 2022, 33(1): 29-42.
- [23] 郑丽娜, 王媛, 张子涵. 2019年台风利奇马引发山东特大暴雨成因分析. 气象科技, 2021, 49(3): 437-445.
Zheng L N, Wang Y, Zhang Z H. Causal analysis of extra-tormentous rain of Typhoon Lekima in Shandong in 2019. *Meteor Sci Technol*, 2021, 49(3): 437-445.
- [24] 曹晓岗, 王慧, 傅洁, 等. 近海北上热带气旋特征及对华东沿海地区影响分析. 热带气象学报, 2014, 30(5): 861-870.
Cao X G, Wang H, Fu J, et al. Analyses of features of coastal northbound tropical cyclones and the impact on coastal East China. *J Trop Meteor*, 2014, 30(5): 861-870.
- [25] 丛春华, 吴炜, 孙莎莎. 1949—2012年影响山东地区热带气旋的特征. 气象与环境学报, 2016, 32(5): 67-73.
Cong C H, Wu W, Sun S S. Characteristics of tropical cyclones influencing Shandong Province from 1949 to 2012. *Meteor Environ Sci*, 2016, 32(5): 67-73.
- [26] 唐飞, 陈凤娇, 诸葛小勇, 等. 利用卫星遥感资料分析台风“烟花”(202106)的影响过程. 大气科学学报, 2021, 44(5): 703-716.

- Tang F, Chen F J, Zhuge X Y, et al. Analysis of influence process of Typhoon In-fa(202106) based on satellite remote sensing data. *Trans Atmos Sci*, 2021, 44(5): 703-716.
- [27] 王海平,董林,许映龙,等.台风“烟花”的主要特点和路径预报难点分析. *海洋气象学报*, 2022, 42(1): 83-91.
Wang H P, Dong L, Xu Y L, et al. Analysis on main characteristics of Typhoon In-fa and difficulties in its track forecast. *J Marine Meteor*, 2022, 42(1): 83-91.
- [28] Jaffrain J, Berne A. Experimental quantification of the sampling uncertainty associated with measurements from PAR-SIVEL disdrometers. *J Hydrometeor*, 2011, 12: 352-370.
- [29] Ulbrich C W. Natural variations in the analytical form of the raindrop size distribution. *J Climate Appl Meteor*, 1983, 22(10): 1764-1775.
- [30] Ulbrich C W, Atlas D. Rainfall microphysics and radar properties; Analysis methods for drop size spectra. *J Climate Appl Meteor*, 1998, 37(9): 912-923.
- [31] McFarquhar G M. A new representation of collision-induced breakup of raindrops and its implications for the shapes of raindrop size distributions. *J Atmos Sci*, 2004, 61(7): 777-794.
- [32] 王俊,王文青,王洪,等.山东北部一次夏末雹暴地面降水粒子谱特征. *应用气象学报*, 2021, 32(3): 370-384.
Wang J, Wang W Q, Wang H, et al. Hydrometeor particle characteristics during a late summer hailstorm in northern Shandong. *J Appl Meteor Sci*, 2021, 32(3): 370-384.
- [33] Bringi V N, Williams C R, Thurai M, et al. Using dual-polarized radar and dual-frequency profiler for DSD characterization: A case study from Darwin, Australia. *J Atmos Ocean Technol*, 2009, 26: 2107-2122.
- [34] Wilson J W, Brandes E A. Radar measurement of rainfall-A summary. *Bull Amer Meteor Soc*, 1979, 60(9): 1048-1060.
- [35] Rosenfeld D, Ulbrich C W. Cloud microphysical properties, processes, and rainfall estimation opportunities. *Meteorological Monographs*, 2003, 30(52): 237-258.
- [36] Uijlenhoet R, Smith J A, Steiner M. The microphysical structure of extreme precipitation as inferred from ground-based raindrop spectra. *J Atmos Sci*, 2003, 60: 1220-1238.
- [37] Steiner M, Smith J A, Uijlenhoet R. A microphysical interpretation of radar reflectivity-rain rate relationships. *J Atmos Sci*, 2004, 61: 1114-1131.
- [38] Fulton R A, Breidenbach J P, Seo D J, et al. The WSR-88D rainfall algorithm. *Wea Forecasting*, 1998, 13(2): 377-395.
- [39] Atlas D, Ulbrich C W, Marks F D, et al. Systematic variation of drop size and radar-rainfall relations. *J Geophys Res Atmos*, 1999, 104(D6): 6155-6169.
- [40] Zhang G F, Vivekanandan J, Brandes E A, et al. The shape-slope relation in observed gamma raindrop size distributions: Statistical error or useful information. *J Atmos Ocean Technol*, 2003, 20(8): 1106-1119.
- [41] Zhang S, Bao X, Wu L, et al. Dual-polarization radar retrieval during Typhoon Lekima(2019): Seeking the best-fitting shape-slope relationship depending on the differential-horizontal reflectivity relationship. *Atmos Res*, 2022, 267(1). DOI: 10.1016/j.atmosres.2021.105978.
- [42] Wen L, Zhao K, Zhang G, et al. Impacts of instrument limitations on estimated raindrop size distribution, radar parameters, and model microphysics during Mei-yu season in East China. *J Atmos Oceanic Technol*, 2017, 34(5): 1021-1037.
- [43] D'Adderio L P, Porcù F, Tokay A. Identification and analysis of collisional break-up in natural rain. *J Atmos Sci*, 2015, 72(9): 3404-3416.
- [44] D'Adderio L P, Porcù F, Tokay A. Evolution of drop size distribution in natural rain. *Atmos Res*, 2018, 200(1): 70-76.

Statistical Characteristics and Regional Differences of Raindrop Size Distribution During 6 Typhoon Rainstorms in Shandong

Wang Jun¹⁾²⁾ Zheng Lina³⁾ Wang Hong²⁾ Liu Chang⁴⁾

¹⁾ (Key Laboratory for Meteorological Disaster Prevention and Mitigation of Shandong, Jinan 250031)

²⁾ (Shandong Weather Modification Office, Jinan 250031)

³⁾ (Jinan Meteorological Bureau of Shandong, Jinan 250102)

⁴⁾ (Shandong Meteorological Observatory, Jinan 250031)

Abstract

Based on disdrometers, Doppler radar products and conventional meteorological observation, precipitation characteristics of typhoon rainstorms affecting Shandong from 2018 to 2021 are explored, and evolution characteristics of raindrop size distribution and integral parameters of typhoon raindrops are analyzed. $\lg N_w-D_m$ distribution shows that microphysical characteristics of different typhoons are different when entering Shandong. Ampil(1810), Rumbia(1818), Bavi(2008) and In-Fa(2106) are more maritime-like, while Yagi(1814) and Lekima(1909) are more continental-like. Microphysical characteristics of these typhoons are quite different after passing different distance and affected by the environment. Microphysical characteristics of Ampil and Bavi at two observation sites in north and south Shandong are similar, and rain drop size distribution (DSD) characteristics of their convective precipitation are maritime. Microphysical characteristics of Yagi are more continental when it enters Shandong. After moving northward, its DSD changes into a typical continental convective precipitation in northwest Shandong. DSD characteristics of Rumbia convective precipitation in Feicheng, Shandong Province are maritime, and change to continental near Guangrao under the influence of cold air, and then changes to maritime type over Laiyang after moving eastward. Microphysical characteristics of convective precipitation change several times. DSD characteristics of convective precipitation before Lekima denaturation are continental type (Lanling and Gaotang), while the spectral characteristics of convective precipitation DSD change to maritime (Lingu and Zhangqiu) during and after denaturation. In the process of In-Fa moving northward, the precipitation weakens obviously, and the microphysical characteristics of convective precipitation change significantly, from maritime in the south to continental in the north. The statistical relationships of various parameters between continental and maritime convective precipitation are different. The $\mu-\lambda$ statistical relation of the quadratic polynomial show that continental (maritime) precipitation generally has smaller (larger) constant terms except for Capricorn Texas, during which continental (maritime) precipitation generally has a slightly larger (slightly smaller) primary term and a smaller (larger) secondary term. However, $Z-R$ relationship is complicated, and there are no significant differences between continental and maritime convective precipitation processes. Large index b is more likely to appear in continental precipitation processes, while small index b is more likely to appear in maritime precipitation processes. In addition, the proportion of equilibrium DSD is low, which can appear in both maritime and continental convective precipitation process, while the transition DSD with high proportion is more in continental convective precipitation processes.

Key words: typhoon torrential rain; raindrop size distribution; equilibrium raindrop size distribution