暴雨灾害
Torrential Rain and Disasters
中国科技核心期刊
中国科技论文统计源期刊

4次台风暴雨在泰山山顶和山底的雨滴谱特征对比分析

赵勇 马兆越 王瑜 尹祥坤

Comparison analysis of raindrop spectrum characteristics of four typhoon rainstorms at the top and foot of Mount Tai

ZHAO Yong，MA Zhaoyue，WANG Yu，YIN Xiangkun

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2024-170

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

“海葵”台风(1211号)暴雨雨滴谱特征分析

Analysis of raindrop spectrum characteristics for a heavy rain event caused by typhoon Haikui (No.1211) in Anhui

暴雨灾害. 2020, 39(2): 167-175 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2020.02.007

短时强降水和持续性强降水的雨滴谱特征对比

Comparative analysis on characteristics of raindrop spectrum of short-term and persistent heavy rain

暴雨灾害. 2023, 42(1): 1-12 https://doi.org/10.12406/byzh.2022-119

2018年三个华东登陆台风暴雨数值预报结果的空间检验

Spatial verification of multi-model forecast of three landing typhoons induced rainstorm in East China in 2018

暴雨灾害. 2022, 41(4): 365-374 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2022.04.001

基于贝叶斯模型平均法的“利奇马”台风暴雨预报订正研究

Calibration of prediction for rainstorm event caused by typhoon Lekima based on Bayesian Model Averaging

暴雨灾害. 2020, 39(5): 451-461 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2020.05.003

华南前汛期强降水过程雨滴谱特征研究

Research on raindrop size distributions of strong precipitation events during the South China pre-flood season

暴雨灾害. 2024, 43(6): 637-647 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-119

2020年梅雨期长江中下游地区雨滴谱垂直结构特征

Vertical structures of raindrop size distributions over the middle and lower reaches of Yangtze River during the Meiyu period in 2020

暴雨灾害. 2023, 42(4): 455-466 https://doi.org/10.12406/byzh.2022-244

关注微信公众号，获得更多资讯信息

赵勇,马兆越,王瑜,等.2025.4 次台风暴雨在泰山山顶和山底的雨滴谱特征对比分析[J].暴雨灾害,44(5):621−631. ZHAO Yong, MA Zhaoyue, WANG Yu, et al. 2025. Comparison analysis of raindrop spectrum characteristics of four typhoon rainstorms at the top and foot of Mount Tai [J]. Torrential Rain and Disasters,44(5):621−631 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024−170

4 次台风暴雨在泰山山顶和山底的雨滴谱特征对比分析

赵勇[1, 2], 马兆越[1, 2], 王瑜[1, 2], 尹祥坤[1, 3]

(1. 山东省气象防灾减灾重点实验室, 济南 250031; 2. 山东省枣庄市气象局, 枣庄 277800;
3. 山东省泰山气象站, 泰安 271000)

摘　要: 为了解台风暴雨在山顶和山底的微物理特征异同, 利用降水现象仪、自动气象站和热带气旋最佳路径数据集等资料, 以泰安观测站代表山底, 以泰山观测站代表山顶, 采用 Gamma 分布拟合方法对比分析“摩羯”、“温比亚”、“利奇马”、“烟花”4 次台风暴雨在泰山山顶和山底的雨滴谱特征, 结果表明: (1) “摩羯”和“温比亚” (“利奇马”和“烟花”) 台风暴雨雨滴在山顶蒸发作用较 (不) 明显, 从山顶高度降落到山底过程中, “摩羯”、“温比亚”台风暴雨雨滴的破碎作用较明显, “利奇马”台风暴雨雨滴的蒸发、破碎、碰并作用较明显, “烟花”台风暴雨雨滴的蒸发和破碎作用较明显。(2) “摩羯”、“温比亚”、“利奇马”台风暴雨在泰山山顶兼具大陆性和海洋性对流云降水雨滴谱特征, 形成机制以暖雨-冰相混合和冰相为主, 在山底以海洋性对流云降水为主, 形成机制以碰并增长暖云为主; 而“烟花”台风暴雨在山顶和山底均以海洋性对流云降水为主。(3) 4 次台风暴雨的雨滴谱参数形状因子 (μ)、斜率参数 (λ) 均随雨强 (R) 增大而减小, 而 μ-λ 关系的差异不大, 且移动路径相似的“摩羯”、“烟花”台风的 μ-λ 关系在山顶的差异明显小于山底; 4 次台风暴雨的质量加权平均直径 (D_m)、标准化截距参数对数 ($\lg N_w$) 均随 R 增大而增大,“摩羯”、“温比亚”、“利奇马”台风暴雨在山顶和山底 R 增大均主要受 D_m 增大、次要受 $\lg N_w$ 增大的影响; 而“烟花”台风暴雨在山底则不同, R 增大仅受 D_m 增大的影响。

关键词: 泰山; 台风暴雨; 雨滴谱; Gamma 分布

中图法分类号: P426　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2024−170

Comparison analysis of raindrop spectrum characteristics of four typhoon rainstorms at the top and foot of Mount Tai

ZHAO Yong[1, 2], MA Zhaoyue[1, 2], WANG Yu[1, 2], YIN Xiangkun[1, 3]

(1. *Key Laboratory for Meteorological Disaster Prevention and Mitigation of Shandong Province*, *Jinan* 250031; 2. *Zaozhuang Meteorological Bureau of Shandong Province*, *Zaozhuang* 277800; 3. *Taishan National Reference Climatological Station of Shandong Province*, *Taian* 271000)

Abstract: This study aims to understand the microphysical characteristics of typhoon rainstorms at the top and foot of Mount Tai, based on the data from precipitation phenomenon instruments, automatic weather stations and tropical cyclone optimal path dataset. The Gamma function fitting method was used to compare and analyze the raindrop size characteristics at the top and the foot of the Mount Tai during four typhoon rainstorms. The results show that. (1) The raindrop of "Yagi" and "Rumbia" ("Lekima" and "In-Fa") have obvious (unclear) evaporative effects at the top of the mountain, from the peak of the same height falling to the foot of the mountain, the raindrop of "Yagi" and "Rumbia" show more significant breakup effects, the raindrop of "Lekima" exhibits notable evaporation, breakup, and coalescence effects, and the raindrop of "In-Fa" demonstrates more pronounced evaporation and breakup effects. (2) Convective precipitation from "Yagi", "Rumbia", and "Lekima" at the summit includes both continental and maritime raindrop spectrum characteristics, primarily forming through warm rain-ice phase mixing and ice phase mechanisms. At the base, it is predominantly maritime, with the formation mechanism mainly involving coalescence growth in warm clouds. In contrast, "In-Fa" are predominantly maritime at the summit and base. (3) For the four typhoon rainfalls, form factor (μ) and slope parameters (λ) decrease with increasing rainfall intensity (R), the μ-λ

收稿日期: 2024−09−18; **定稿日期**: 2025−01−23

资助项目: 山东省气象局面上项目 (2019sdqxm16); 枣庄市气象局重点项目 (2020zzqxz01、2024zzqxz01)

第一作者: 赵勇, 主要从事人工影响天气技术研究。E-mail: 761491551@qq.com

通信作者: 马兆越, 主要从事天气预报方法研究。E-mail: mazy12121@163.com

© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY−NC−ND 4.0

relationship shows little difference, and the correlation of typhoon paths is stronger at the summit than at the base. The mass-weighted average diameter (D_m) and normalized intercept parameter logarithms ($\lg N_w$) of the four typhoon rainfalls increase with increasing R. The increase in R at both the summit and base for "Yagi", "Rumbia", and "Lekima" is mainly influenced by the increase in D_m, with $\lg N_w$ as a secondary factor. However, for "In-Fa" at the base, the increase in R is solely influenced by the increase in D_m.

Key words: mount Tai; typhoon rainstorm; raindrop spectrum; Gamma distribution

引 言

雨滴谱是自然降水最基本的微物理特性, 不同气候区域、天气系统和地形地貌条件下雨滴谱存在很大差异 (Chen et al., 2012, 2013; He et al., 2021)。通过对比分析不同海拔高度、不同地形的雨滴谱特征, 可以深入研究雨滴降落过程中的演变发展规律。李山山等 (2020) 对比分析川西高原 4 个不同海拔站点的雨滴谱发现, 弱 (强) 降水随海拔的升高, 小雨滴数浓度增大 (减小), 中雨滴数浓度略有减小 (减小), 标准化截距 (N_w) 增大 (减小) 而质量加权平均直径 (D_m) 减小 (快速增大)。金祺等 (2023) 对比分析安徽黄山、大别山 (山区) 和平原 (非山区) 等 4 个站点的雨滴谱发现, 山区地形对对云流降水的雨滴谱影响较大, 对层云降水雨滴谱影响较小; 当雨强相同时, 山区对流云降水的雨滴数浓度比非山区高, 雨滴尺寸比非山区小。此外, 刘艳霞等 (2024) 对比分析了青藏高原和四川盆地、赵城城等 (2021) 对比分析了北京山区与平原地区的雨滴谱分布差异发现, 由于下垫面存在较大差别, 或者高原 (山区) 与降水天气系统相互作用的复杂性, 使得研究者对雨滴谱特征的影响尚未有统一的认识。

台风暴雨受强烈旋转气流、垂直风切变及海气相互作用的影响, 其云降水微物理过程和内在机制与上述分析存在本质差别。气象工作者为深入探究台风的云降水微物理过程及内在机制, 对其雨滴谱特征进行了细致分析, Chen 等 (2012) 分析登陆我国福建的台风“莫拉克” (0908) 不同雨区的雨滴谱特征发现, 外围雨带和眼壁区域的降水微物理特征有明显差异, 眼壁降水有更多的大雨滴, 并推测外围雨带和眼区的层状降水是由霰粒子或凇附冰粒融化形成。王俊等 (2023) 统计分析 2018—2021 年影响山东的 6 个台风共 13 个台站暴雨的雨滴谱特征发现, 不同台风的微物理特征不同, “安比” (1810)、“温比亚” (1818)、“巴威” (2008) 和“烟花” (2106) 偏海洋性, “摩羯”(1814) 和“利奇马” (1909)偏大陆性。目前诸多气象工作者主要对同一台风不同雨带或不同台风不同位置 (Chang et al., 2009; 朱红芳等, 2020; 王俊等, 2022) 的雨滴谱特征进行分析研究, 而雨滴在降落过程中受周围环境因素影响是不断变化的, 因此, 需要对多个台风暴雨过程不同高度雨滴谱进行统计分析, 以深入了解雨滴降落时的演变规律。

降水现象仪通过观测降水粒子的直径和速度关系计算反演降水雨滴谱特征, 是研究云降水物理特征的重要途径。随着我国气象台站大量布设降水现象仪, 对降水雨滴谱特征的研究有助于加深理解降水形成的微物理机制, 以及深化在模式微物理参数化、雷达定量估测降水和人工影响天气效果评估中的应用 (宫福久等, 2007; 张扬等, 2016; 江雨霏等, 2023)。泰山山顶和山底均布设了降水现象仪, 可用于分析比较不同高度降水的雨滴谱特征。

泰山位于山东省中部, 属于温带季风气候区, 方圆约 426 km^2, 有大小山峰 150 多座, 主峰 (玉皇顶) 海拔约 1 545 m; 具有平原地区高山独特的地形地貌、地理位置和气候特点, 对降水特征尤其是云降水微物理过程及内在机制有一定影响。多年来, 途径山东省的台风仅有“摩羯” (1814)、“温比亚” (1818)、“利奇马” (1909)、“烟花” (2106) 在泰山地区引发暴雨或大暴雨, 通过分析泰山山顶和山底这 4 次台风暴雨雨滴谱特征, 有助于提高平原地区高山地形台风暴雨雨滴谱和微物理特征的认识, 为台风暴雨精细化预报和临近预警服务提供参考依据。

1 资料与方法

1.1 站点和资料介绍

本文研究的站点泰山国家基准气候站 (以下简称泰山站) (117°06'20"E, 36°15'20"N) 位于泰山日观峰, 海拔 1 533.7 m; 泰安国家基本气象站 (以下简称泰安站) (117°08'58"E, 36°09'38"N) 位于泰山东南方向, 海拔 128.6 m (图 1); 选择这两站作为泰山山顶和山底代表站对 4 次台风暴雨雨滴谱特征分析。

本文所用资料为泰山站和泰安站 2018 年 8 月 12 日 21:00 (北京时, 下同) —16 日 20:00、8 月 17 日 21:00—20 日 20:00、2019 年 8 月 9 日 21:00—13 日 20:00、2021 年 7 月 27 日 21:00—30 日 20:00 降水现象仪和自动气象站观测数据, 包含降水粒子直径、速度、数量和降水量等, 时间分辨率为 1 min; 台风位置、强度等信息来自中国气象局热带气旋最佳路径数据集, 包含热带气旋的经度、纬度、强度等, 时间分

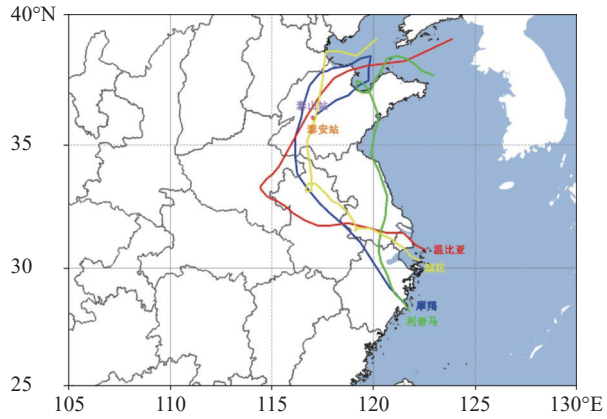


图 1 台风“摩羯”、“温比亚”、“利奇马”、“烟花”移动路径 (彩色线条) 及泰山站和泰安站 (圆点) 位置

Fig. 1 Movement paths (color lines) of typhoons "Yagi", "Rumbia", "Lekima", "In-Fa" and location (dots) of Taishan Station and Taian Station

辨率为 6 h, 在登陆前 24 h 加密为 3 h。

影响降水现象仪数据质量的主要因素有对非降水粒子 (如昆虫、沙尘等) 的误判、雨滴的飞溅、风和边缘效应等, 在使用数据前要对其进行质量控制: (1) 剔除前两个最小直径和直径大于 8 mm 特大粒子尺度通道的数据 (Chen et al., 2013); (2) 剔除粒子速度与 Atlas 等 (1973) 理论速度 (以下简称“Atlas 速度”) 相差大于 60% 的数据 (Jaffrain and Berne, 2011); (3) 剔除雨滴总数小于 10 且降水强度小于 0.1 mm·h^{-1} 的分钟数据 (Tokay et al., 2013)。

1.2 雨滴谱参数计算方法

本文分析台风暴雨雨滴谱特征采用 3 参数 (截距参数 N_0、形状因子 μ、斜率参数 λ) 的 Gamma 函数分布 (Ulbrich, 1983) 来拟合雨滴谱分布, 这 3 个参数可利用阶矩法求得, 本文采用二、四、六阶矩计算, 由于截距参数 N_0 不具有独立的物理意义, 常采用标准化截距参数 N_w (单位: mm^{-1}·m^{-3}); 以上参数及质量加权平均直径 D_m (单位: mm)、雨滴浓度 N_T (单位: m^{-3})、雨强 R (单位: mm·h^{-1}) 等计算方法详见王俊等 (2022) 的文献。

2 台风降水概况

2018 年第 14 号台风“摩羯” 8 月 7 日 08:00 在西太平洋生成后, 12 日 23:35 在浙江温岭沿海登陆后向西北方向移动, 14 日 05:00 以热带低压强度进入山东, 15 日 05:00 进入渤海后在莱州湾回旋, 于 15 日 20:00 再次登陆山东向西南方向移动, 16 日 05:00 在泰安南部减弱消失 (图 1)。受其影响, 8 月 12 日 21:00—16 日 20:00, 泰山站、泰安站累计降水量分别为 117.3 mm 和 44.1 mm, 最大小时雨强分别为 24.3 mm·h^{-1} 和 13.3 mm·h^{-1}。

台风“温比亚” (1818) 2018年 8 月 14 日 14:00 在我国台湾以东的东海生成, 17 日04:00 在上海浦东沿海登陆后向西偏北方向移动, 19 日 20:00 以热带低压强度进入山东, 20 日 05:00 进入渤海继续向东偏北方向移动, 21 日 02:00 减弱消失 (图 1)。受其影响, 8 月 17 日 21:00—20 日 20:00, 泰山站和泰安站累计降水量分别为 269.9 mm 和 173.7 mm, 最大小时雨强分别为 27.4 mm·h^{-1} 和 24.2 mm·h^{-1}。

台风“利奇马” (1909) 2019 年 8 月 4 日 02:00 在西太平洋生成, 10 日 01:45 在浙江温岭沿海首次登陆后向偏北方向移动, 11 日 20:00 以热带风暴强度在山东青岛沿海二次登陆, 随后继续向偏北方向移动, 12 日 04:00 进入渤海后徘徊, 14 日 20:00 减弱消失 (图 1)。受其影响, 8 月 9 日 21:00—13 日 20:00, 泰山站和泰安站累计降水量分别为 223.4 mm 和 103.4 mm, 最大小时雨强分别为 21.2 mm·h^{-1} 和12.1 mm·h^{-1}。

台风“烟花”(2106) 2021 年 7 月 16 日 20:00 在西太平洋生成, 25 日 12:30 和 26 日 09:50 分别在浙江舟山及平湖沿海两次登陆, 29 日 08:00 以热带低压强度进入山东后向偏北方向移动, 30 日 02:00 进入渤海, 31 日 08:00 在渤海北部减弱消失 (图 1)。受其影响, 7 月 27 日 21:00—30 日 20:00, 泰山站和泰安站累计降水量分别为 163.4 mm 和 96.9 mm, 最大小时雨强分别为 16.0 mm·h^{-1} 和 11.1 mm·h^{-1}。

3 雨滴谱特征分析

3.1 不同粒径雨滴浓度和降水量贡献

为了解不同粒径雨滴对总浓度和累计降水量的贡献, 参照 Seela 等 (2017) 分类方法, 将雨滴按其直径 D 分为小雨滴 (D<1 mm)、中雨滴 (1≤D<3 mm) 和大雨滴 (D≥3 mm), 并给出泰山站、泰安站 4 次台风暴雨小、中、大雨滴对总浓度和累计降水量贡献率 (图 2)。

图 2 可见, 4 次台风暴雨的小雨滴对总浓度贡献率最高, 均超过 65%; “利奇马”、“烟花”在泰山站的小雨滴浓度贡献率高于泰安站, 与李山山等 (2020) 和 He 等 (2021) 发现“高海拔小雨滴浓度贡献率高于低海拔”结论一致, 而“摩羯”、“温比亚”则相反。4 次台风暴雨的中雨滴对累计降水量贡献率最高, 均超过 64%; 泰山站中雨滴浓度贡献率都低于泰安站。

由图 2a、b 可见, “摩羯” (“温比亚”) 在泰山站的小和中雨滴对总浓度的贡献率为 99.86% (99.78%), 而中和大雨滴对累计降水量的贡献率为 90.27% (93.08%); “摩羯” (“温比亚”) 在泰安站的小和中雨滴

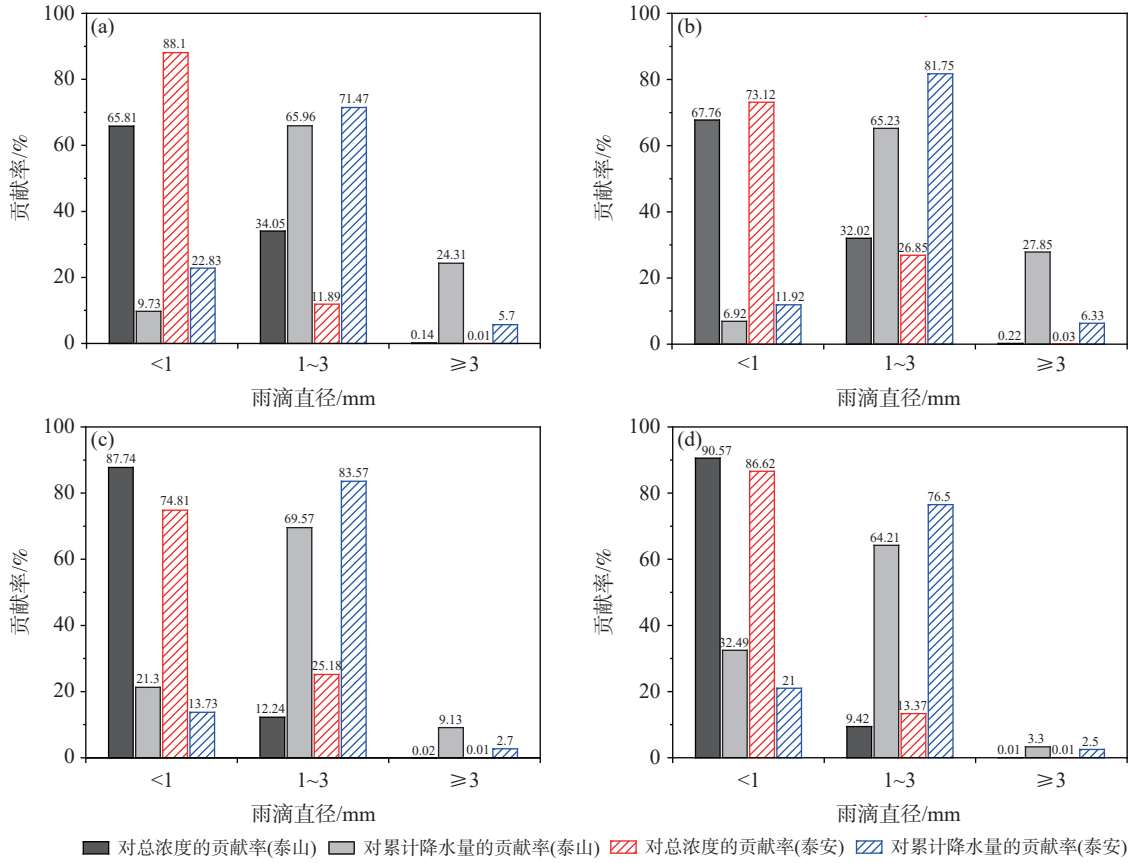


图 2 “摩羯” (a)、“温比亚” (b)、“利奇马” (c)、“烟花” (d) 台风暴雨在泰山站、泰安站的小、中、大雨滴对总浓度和累计降水量贡献率

Fig. 2 Contribution rates of small, medium, large raindrops to the total concentration and cumulative precipitation of typhoon rainstorms (a) "Yagi", (b) "Rumbia", (c) "Lekima", (d) "In-Fa" at Taishan Station and Taian Station

对总浓度、累计降水量的贡献率分别为 99.99% (99.97%)、94.30% (93.67%)。由图 2c、d 可见，“利奇马” (“烟花”) 在泰山站的小和中雨滴对总浓度、累计降水量的贡献率分别为 99.98% (99.99%)、90.87% (96.70%)；“利奇马” (“烟花”) 在泰安站的小和中雨滴对总浓度、累计降水量的贡献率分别为 99.99% (99.99%)、97.30% (97.50%)。

3.2 平均雨滴谱分布特征

雨滴谱 $N(D)$ 表征不同粒径的雨滴数密度分布特征，将 4 次台风暴雨影响泰山站和泰安站期间各粒径区间的非零值雨滴数密度平均计算后，给出其平均雨滴谱分布 (图 3)。

由图 3 可见，两站 4 次台风暴雨的平均雨滴谱分布均为单峰型结构，除“摩羯”和“温比亚”在泰山站峰值位于 0.812 mm 外，其余均位于 0.562 mm 处，与多位学者 (Chen et al., 2012; 朱红芳等, 2020; 王俊等, 2022) 发现的“台风暴雨平均雨滴谱呈单峰型结构、高雨滴数密度多出现在 0.5~0.7 mm 范围”等结论基本一致。泰山站 4 次台风暴雨的雨滴谱宽均大于泰安站，“摩羯”、“温比亚”、“利奇马”在两站的谱宽分别为 7.5 mm、5.5 mm，而“烟花”分别为 6.5 mm 和 4.75 mm。

研究表明 (Chen et al., 2012; 王俊等, 2022)，雨滴谱会随着雨滴在降落过程中受碰并、破碎、蒸发、上升 (下沉) 气流等微物理和动力过程影响而发生变化。Rosenfeld 和 Ulbrich(2003)研究发现，文献在假定其它物理过程不起作用的情况下，碰并会导致较大粒径粒子增多，小粒径粒子减少，粒子浓度降低，谱型上凸；破碎会导致大粒径粒子减少，小粒径粒子增多，粒子浓度增加，谱型上凸；碰并和破碎会导致大、小粒径粒子都减少，中等粒径粒子增加，谱型明显上凸；蒸发会导致降水粒子粒径减小，上升气流区小粒径粒子明显减少。Hu 和 Srivastava(1995) 研究发现，受上升气流和风切变的动力作用影响，大量小雨滴会被吹散而蒸发，使谱峰不明显或趋于消失。

由图 3a 可见，“摩羯”在泰山站的雨滴谱峰呈“弧形”，其峰值和小雨滴明显小于泰安站，中、大雨滴略大于泰安站。统计可知，泰山站降水时段的最大风速均值为 12.6 $m\cdot s^{-1}$，6 级以上大风 (以下简称“大风”) 时次约占 83.3%，受泰山地形抬升作用的影响，长时间大风会引起山顶比山底更强的上升气流。大风和上升气流的共同作用，使泰山站的更多小雨滴被吹

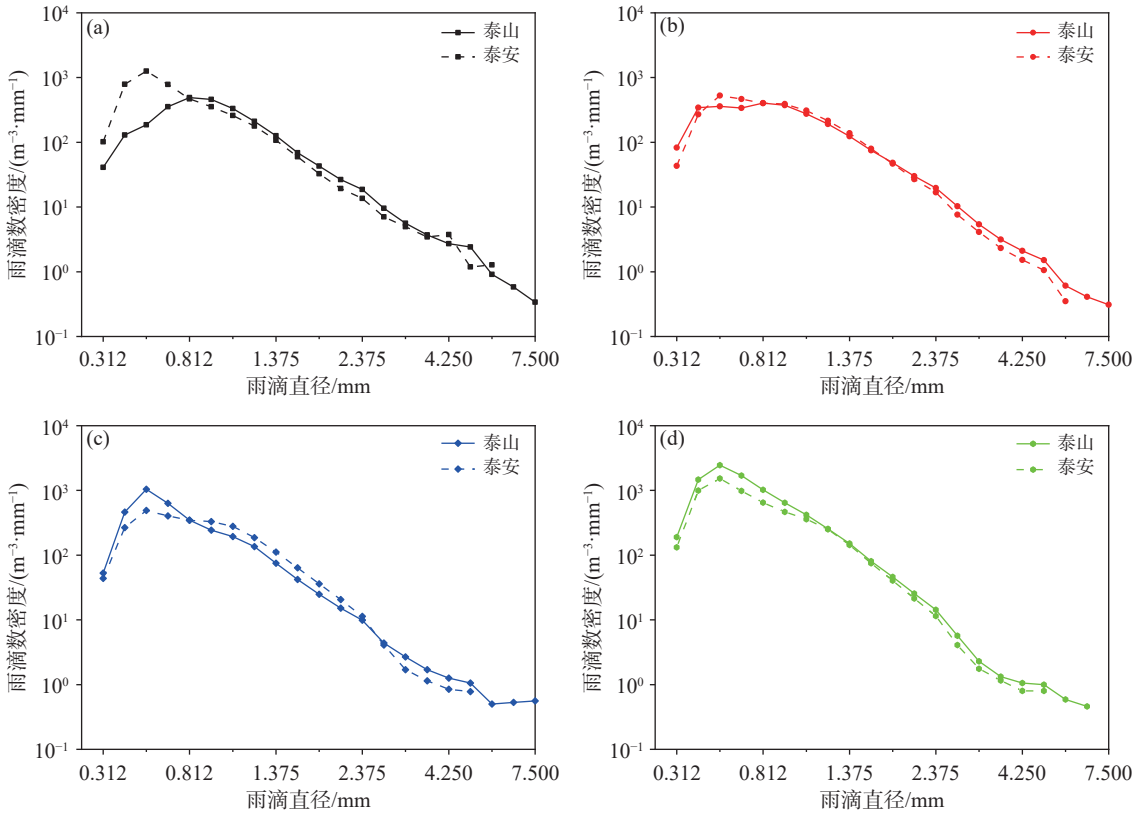


图 3 “摩羯” (a)、“温比亚” (b)、“利奇马” (c)、“烟花” (d) 台风暴雨在泰山站和泰安站的平均雨滴谱分布

Fig. 3 Average raindrop spectra distribution of typhoon rainstorms (a) "Yagi", (b) "Rumbia", (c) "Lekima", (d) "In-Fa" at Taishan station and Taian station

散蒸发, 使泰安站的更多中、大雨滴在比泰山站更长距离的降落中被吹散破碎成小雨滴, 因此泰山站谱峰呈“弧形”不明显, 而泰安站中、大雨滴较泰山站偏少。

由图 3b 可见, “温比亚”在两站的雨滴谱型基本相似, 各粒径数密度相差不大, 泰山站峰值不明显且略小于泰安站。泰山站降水时段的最大风速均值为 12.9 m·s^{-1}, 大风时次约占 76.5%, 山顶比山底更强的上升气流和大风的共同作用, 使泰山站更多小雨滴被吹散蒸发而造成谱峰不明显; 对比可知, “温比亚”较“摩羯”大风时次占比偏小近 7%, 使泰安站小端中雨滴被吹散破碎的可能性降低, 使大端中雨滴和大雨滴被吹散破碎成小、中雨滴的可能性增加, 完全破碎成小雨滴的可能性降低, 因此泰安站雨滴谱在小端中雨滴段稍微“上凸”、小雨滴较泰山站稍偏多。

由图 3c 可见, “利奇马”在两站的雨滴谱型差别较大, 泰山站峰值和大雨滴大于泰安站, 而泰安站中雨滴“上凸”大于泰山站。泰山站降水时段的最大风速均值为 14.5 m·s^{-1}, 大风时次约占 74%, 上升气流和大风的共同作用并没有使泰山站更多小雨滴被吹散蒸发, 初步分析可能原因是其多数为小的霰粒子或冰粒子, 在降落中没有完全融化成小雨滴; 与“摩羯”对比可知, “利奇马”大风时次占比偏小超 9%, 使泰安站中雨滴被吹散破碎的可能性降低, 使大雨滴被吹散破碎成小、中雨滴的可能性增加; 而泰安站更多的霰粒子或冰粒子在比泰山站更长距离的降落中完全融化成小雨滴, 加上破碎形成的小雨滴, 因浓度高且受大风和上升气流的共同作用, 使小雨滴被吹散蒸发、或碰并成中雨滴、或和中雨滴碰并成更大中雨滴的可能性较高, 因此泰安站中雨滴“上凸”大于泰山站, 而峰值和大雨滴小于泰安站。

由图 3d 可见, “烟花”在两站的雨滴谱型非常相似, 泰山站峰值和大雨滴略大于泰安站。泰山站降水时段最大风速均值为 14.4 m·s^{-1}, 大风时次约占 78.6%。泰山站小雨滴没有被吹散蒸发的可能原因与“利奇马”相同, 泰安站更多的霰粒子或冰粒子虽比泰山站有更长的降落距离, 但有可能没有完全融化成小雨滴; “烟花”大风时次占比与“摩羯”相比仅偏小 4.7%, 使泰安站大端中雨滴和大雨滴被吹散破碎成小雨滴的可能性增加; 受大风和上升气流的共同作用, 使完全融化的和破碎形成的小雨滴被吹散蒸发, 因此两站谱型非常相似, 泰安站小、大雨滴比泰山站偏少而造成中雨滴略“上凸”。

3.3 雨滴速度谱特征

雨滴速度谱表征不同粒径和不同速度的雨滴数量分布特征, 反映了大小和形态各异的雨滴在大气

中的微物理运动及演变规律，能够揭示雨滴的碰并、破碎、蒸发等微物理过程。将同一粒径区间和速度区间的粒子数量平均，并将同一粒径区间不同速度区间的粒子按数量做加权平均，给出泰山站和泰安站 4 次台风暴雨的雨滴直径与雨滴速度的分布及曲线图 (图 4)。

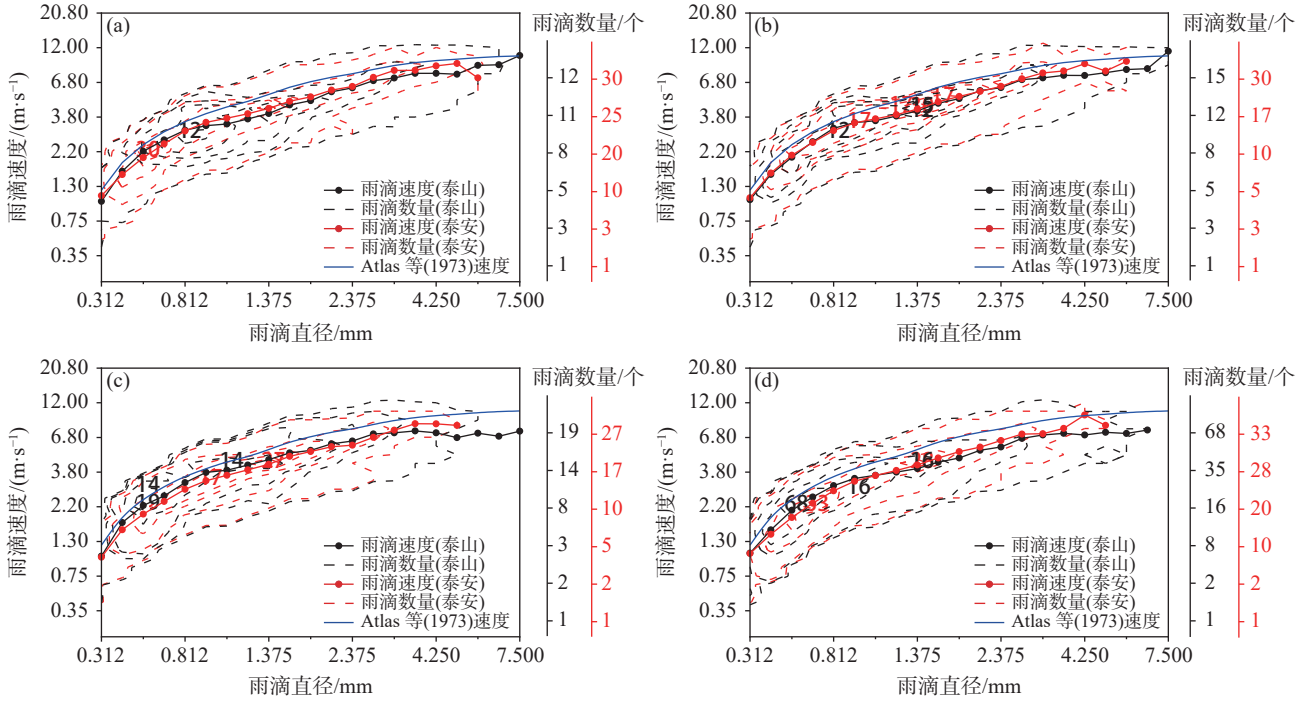


图 4 “摩羯” (a)、“温比亚” (b)、“利奇马” (c)、“烟花” (d) 台风暴雨在泰山站 (黑色) 和泰安站 (红色) 雨滴速度谱分布及 Atlas 速度曲线

Fig. 4 Raindrop velocity spectral distribution of typhoon rainstorms (a) "Yagi", (b) " Rumbia", (c) "Lekima", (d) "In-Fa" at Taishan station (black) and Taian station (red), and Atlas speed curve

由图 4 可见，4 次台风雨滴速度谱特征稍有不同，雨滴数量密集大值中心区虽均有 2 个，但中心位置和最大值略有差异，等值线疏密程度也不同。同一粒径区间雨滴速度并非固定的数值，而是一个数值范围，小雨滴速度范围基本相同，中雨滴随直径增大差别越明显，大雨滴差别较大。其雨滴速度曲线均位于 Atlas 速度曲线下方，变化趋势也基本相同，随着雨滴直径的增大曲线逐渐变缓而速度逐渐增大。所有雨滴的速度在 0.45~12 $m·s^{-1}$ 之间，小雨滴最小速度为 0.45 $m·s^{-1}$，大雨滴的最大速度为 12 $m·s^{-1}$，但雨滴数量略有不同。

雨滴速度偏离 Atlas 速度曲线的主要原因，一是测量仪器误差，二是空气垂直和湍流运动，三是雨滴碰并、破碎、蒸发等微物理过程。Kim 和 Song (2018) 分析研究 Parsivel 雨滴谱仪和超声波风温仪数据发现，可以利用粒径平均速度与 Atlas 速度差值来估算周围环境垂直风速。

参考 Kim 和 Song (2018) 研究结论，对粒径速度与 Atlas 速度差值平均计算可知，“摩羯”在泰山站、泰安站周围引起的环境垂直风均为上升气流，风速分别约为 1.16 $m·s^{-1}$ 和 0.83 $m·s^{-1}$；与分别利用小、中、大雨滴速度与 Atlas 速度差值平均计算的垂直风速相比，两站均大于小雨滴估算的垂直风速，泰山站接近大雨滴、小于中雨滴，而泰安站接近中雨滴、大于大雨滴。结合 3.2 节分析可知，两站小雨滴估算垂直风速偏小的原因可能是中、大雨滴在降落中破碎成小雨滴而落速不变造成平均速度偏大，泰山站中雨滴估算偏大的原因可能是小雨滴碰并成中雨滴而造成平均速度偏小，泰安站大雨滴估算偏小的原因可能是更大的大雨滴在降落中破碎成较小的大雨滴而造成平均速度偏大。

“温比亚”在两站引发的垂直风及与利用小、中、大雨滴估算比较的结果与“摩羯”类似，只是垂直风速稍有差别，分别约为 1.18 $m·s^{-1}$ 和 0.89 $m·s^{-1}$。

由图 4c、d 可见，“利奇马”和“烟花”在泰山站的雨滴速度曲线基本类似，雨滴直径越大越偏离 Atlas 速度曲线；经计算分析可知，两台风在泰山站引发的上升气流垂直风速分别约为 1.31 $m·s^{-1}$ 和 1.33 $m·s^{-1}$，均接近中雨滴估算的垂直风速，且均大于小雨滴和小于大雨滴。结合 3.1 节和 3.2 节分析可知，两台风

小雨滴估算垂直风速偏小的原因: 一可能是小雨滴数量和浓度过高, 降水现象仪出现测量误差, 二可能是中、大雨滴在降落中破碎成小雨滴而落速不变造成平均速度偏大; 大雨滴估算偏大的原因可能是小、中雨滴在降落中碰并成大雨滴而造成平均速度偏小。

“利奇马”和“烟花”在泰安站小、中雨滴区间的速度曲线几乎与 Atlas 速度曲线平行, 在大雨滴区间接近 Atlas 速度曲线; 两台风在泰安站引发的上升气流垂直风速分别约为 1.0 m·s^{-1} 和 1.1 m·s^{-1}, 均接近大雨滴估算的垂直风速, 且大于小雨滴的差值和小于中雨滴的差值几乎相当。结合 3.2 节分析可知, 两台风小雨滴估算垂直风速偏小的原因可能是中、大雨滴在降落中破碎成小雨滴而落速不变造成平均速度偏大, 中雨滴估算偏大的原因可能是小雨滴在降落中碰并成中雨滴而造成平均速度偏小。

3.4 lgN_w-D_m 分布特征

不同区域、天气系统发生的降水其 lgN_w 和 D_m 存在差异, 为研究 lgN_w-D_m 的分布特征, 参照 Bringi 等 (2003) 和 Chen 等 (2013) 的分类方法将降水分为层状云和对流云降水并绘制 lgN_w-D_m 分布图 (图 5), 根据 Bringi 等 (2003) 的方法将对流云降水分为海洋性和大陆性对流降水, 并标识出 Bringi 等 (2009) 和 You 等 (2016) 的方法给出的对流-层状降水分离线。

由图 5a、c、e 可见, “摩羯”、“温比亚”、“利奇马”在泰山站的对流云降水大部分数据点位于海洋性和大陆性对流云降水分布区域之间, 有少部分数据点位于海洋性对流区域以内和左侧及大陆性对流区域以内与右侧, 说明其对流云降水兼具大陆性和海洋性雨滴谱特征。参考 Dolan 等 (2018) 的研究结果, 由此推测这 3 次台风暴雨在泰山站对流云降水形成机制主要以暖雨-冰相混合和冰相两类为主; 其对流-层状降水分离线斜率比 Bringi 等 (2009) 给出的南半球澳大利亚地区分离线斜率偏大, 更加接近 You 等 (2016) 给出的北半球韩国地区分离线斜率。

由图 5b、d、f 可见, “摩羯”、“温比亚”、“利奇马”在泰安站的对流云降水大部分数据点位于海洋性对流区域以内、左右两侧和右下方, 说明其对流云降水以海洋性为主, 推测其形成机制主要以碰并增长暖云为主, 还有少部分暖雨-冰相混合; 其对流-层状降水分离线斜率比 You 等 (2016) 给出的偏小, 更加接近 Bringi 等 (2009) 的研究结果。

由图 5g、h 可见, “烟花”在泰山站和泰安站的对流云降水大部分数据点位于海洋性对流区域以内、左右两侧和右下方, 说明其对流云降水以海洋性为主, 推测其形成机制主要以碰并增长暖云为主, 还有少部分暖雨-冰相混合。“烟花”在泰山站和泰安站的对流-层状降水分离线斜率均比 You 等 (2016) 给出的偏小, 更加接近 Bringi 等 (2009) 的研究结果。

Chen 等 (2012) 指出, 台风对流云降水的雨滴通常来自于雨滴的碰并增长过程, 而层状云降水的雨滴通常由霰粒子和冰粒子的融化形成。Bringi 等 (2003) 研究认为 N_w-D_m 值的变化可以反映出层云降水中不同微物理过程的差异, 即具有小 D_m 值和大 N_w 值的粒子可能来自小的霰粒子或冰粒子的融化。由图 5e、g、h 可见, “利奇马”在泰山站、“烟花”在泰山站和泰安站的层状云降水分别约有 9.6%、29.8%、25.1% 的数据点具有高 lgN_w (大于 4.5 mm^{-1}·m^{-3}) 和小 D_m (小于 1.2 mm) 的特征, 说明这部分粒子是由小的霰粒子或冰粒子融化而成, 因此推测降水中仍含有尚未完全融化的霰粒子或冰粒子, 这和 3.2 节“大风和上升气流没有使更多小雨滴被吹散蒸发, 可能是因为霰粒子或冰粒子在降落中没有完全融化成小雨滴”的推论一致。

3.5 雨滴谱特征参数与雨强关系

为了解雨滴谱参数随雨强的变化, 利用最小二乘法对 D_m、lgN_w、μ、λ 与 R 进行幂次方拟合 (公式为 $A=aB^b$) 并给出泰山站和泰安站 4 次台风暴雨特征参数与雨强 R 拟合关系 (表 1)。分析可知, D_m、lgN_w 与 R 关系的指数均为正数, 说明 D_m、lgN_w 均随 R 增大而增大; μ、λ 与 R 关系的指数均为负数, 说明 μ、λ 均随 R 增大而减小。

D_m 和 lgN_w 作为两个独立的物理量, 常用来表示雨滴平均直径和数浓度的变化情况。如表 1 所示, 由 D_m-R 拟合关系可知, “摩羯”和“温比亚”在泰山站系数 (指数) 大于 (小于) 泰安站, 泰山站拟合曲线高于泰安站, 说明相同 R 时泰山站雨滴平均直径大于泰安站; 由此, “利奇马”在两站相同 R 时雨滴平均直径几乎相等, “烟花”在 R 小于 (大于)1.10 mm·h^{-1} 时泰山站雨滴平均直径略大于 (小于) 泰安站。由 lgN_w-R 拟合关系可知, “摩羯”和“温比亚”在泰山站系数 (指数) 小于 (大于) 泰安站, 泰山站拟合曲线低于泰安站, 说明相同 R 时泰山站雨滴平均数浓度小于泰安站; 由此, “利奇马”在两站相同 R 时雨滴平均数浓度相差无几, “烟花”在 R 小于 (大于) 1.06 mm·h^{-1} 时泰山站雨滴平均数浓度小于 (大于) 泰安站。。

由表 1 对比可知, “摩羯”、“温比亚”、“利奇马”在泰山站和泰安站 D_m-R 指数明显大于 lgN_w-R 指数, 说明 R 增大主要受 D_m 增大、其次受 lgN_w 增大的影响; “烟花”在泰山站 D_m-R 指数也明显大于 lgN_w-R 指数, 但在泰安站 lgN_w-R 指数为负, 说明在泰山站 R 增

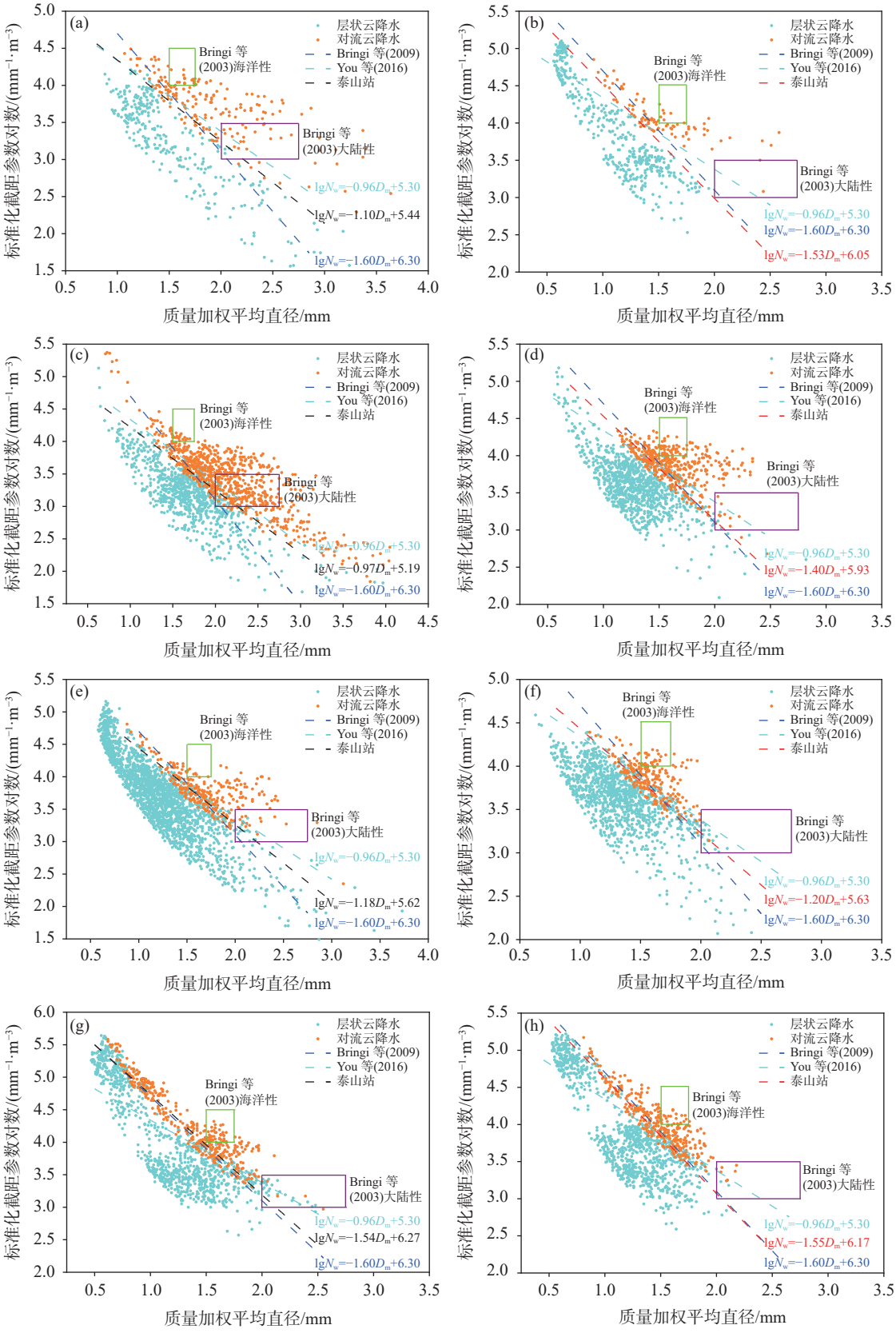


图 5 “摩羯”(a、b)、“温比亚”(c、d)、“利奇马”(e、f)、“烟花”(g、h) 台风暴雨在泰山站 (a、c、e、g)、泰安站 (b、d、f、h) 质量加权平均直径与标准化截距参数对数散点分布及本站、Bringi 等 (2009) 和 You 等 (2016) 对流-层状降水分离线 (虚线)

Fig. 5 Scatter distribution of mass weighted average diameter and normalized intercept parameter logarithm of typhoon rainstorms (a, b) "Yagi", (c, d) " Rumbia", (e, f) " Lekima", (g, h) "In-Fa" at Taishan station (a, c, e, g) and Taian station (b, d, f, h), and the convection-layered rain separate lines of this station, Bringi et al. (2009) and You et al. (2016)

表 1 泰山站和泰安站 4 次台风暴雨雨滴谱特征参数 D_m、$\lg N_w$、μ、λ 与 R 拟合关系

Table 1 Fitting relationship between raindrop spectrum characteristic parameters D_m, $\lg N_w$, μ, λ and rainfall intensity of four typhoon storms at Taishan Station and Taian Station

台 风	站点	$D_m = aR^b$		$\lg N_w = aR^b$		$\mu = aR^b$		$\lambda = aR^b$	
		a	b	a	b	a	b	a	b
摩 羯	泰山	1.444	0.106	3.154	0.068	6.627	−0.310	8.671	−0.308
	泰安	1.011	0.179	3.881	0.018	13.095	−0.298	21.033	−0.338
温比亚	泰山	1.559	0.125	3.038	0.049	5.587	−0.425	7.749	−0.408
	泰安	1.142	0.153	3.594	0.027	9.663	−0.362	13.473	−0.461
利奇马	泰山	1.150	0.168	3.654	0.018	5.494	−0.302	10.556	−0.367
	泰安	1.147	0.160	3.602	0.021	10.189	−0.426	13.455	−0.481
烟 花	泰山	0.999	0.155	3.981	0.030	15.783	−0.203	26.659	−0.262
	泰安	0.996	0.186	3.988	−0.002	14.142	−0.421	23.469	−0.543

大主要受 D_m 增大、其次受 $\lg N_w$ 增大的影响, 而在泰安站 R 增大仅受 D_m 增大的影响。

3.6 μ-λ 关系

研究表明 (Chang et al., 2009; Chen et al., 2012), 雨滴谱 Gamma 分布参数并不相互独立, 而是存在一定关系, 这一关系在双偏振雷达反演雨滴谱、定量降水估测和数值模式参数化等方面有重要应用。Zhang 等 (2003) 认为形状因子 (μ) 和斜率参数 (λ) 存在二次多项式关系, 即 $\lambda=a_2\mu^2+a_1\mu+a_0$, 按照其分析方法, 选择 4 次台风暴雨在泰山站和泰安站雨强大于 5 mm·h^{-1} 且粒子数大于 1 000 的分钟数据, 采用最小二乘法拟合给出其 μ-λ 关系曲线图 (图 6)。

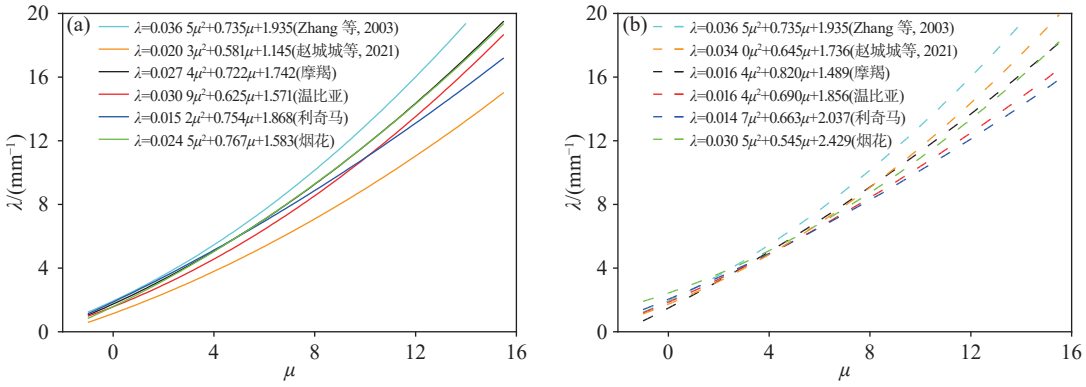


图 6 泰山站 (a)、泰安站 (b) 4 次台风暴雨及 Zhang 等 (2003) 和赵城城等 (2021) 的形状因子 (μ) 与斜率参数 (λ) 拟合曲线图

Fig. 6 Fitting curves between shape factor μ and slope parameter λ of four typhoon rainstorms at Taishan station (a), Taian station (b) and by Zhang et al. (2003) and Zhao et al. (2021)

由图 6a 可见, 4 次台风在泰山站的 μ-λ 关系曲线相距较近, 其中“摩羯”和“烟花”几乎重合, 且均位于 Zhang 等 (2003) 拟合的美国佛罗里达州 μ-λ 关系曲线下方, 而位于赵城城等 (2021) 拟合的北京山区 μ-λ 关系曲线上方。由图 6b 可见, 4 次台风在泰安站的 μ-λ 关系曲线也相距较近, 其中“温比亚”和“利奇马”相距最近, 且也均位于 Zhang 等 (2003) 的下方, 而接近赵城城等 (2021) 拟合的北京平原地区 μ-λ 关系曲线。

对比图 6a、b 可知, 4 次台风在泰山站和泰安站的 μ-λ 关系曲线相距都较近, 且同一台风在泰山站的 μ-λ 关系曲线均位于泰安站上方, 这与李慧等 (2018) 分析的黄山山顶 μ-λ 关系曲线位于山底上方且相距较近相同, 而与赵城城等 (2021) 分析北京山区的 μ-λ 关系曲线位于北京平原地区下方且相距较远相反, 初步分析可能与选择的山区和平原代表站 (延庆站、大兴站) 距离太远有关, 也与我国福建 (Chen et al., 2012)、台湾 (Chang et al., 2009) 等台风的 μ-λ 关系也不同, 符合诸多学者提出的“μ-λ 关系在不同降水类型和气候条件下有较大差异”的研究结论。

对比泰山站和泰安站 4 次台风 μ-λ 关系曲线可知, 随着 μ 增大 λ 也增大且差距也越明显。μ 是平均体积直径偏差离散度的函数, μ 越小雨滴谱宽越大, 反之越小; 相同 λ 时, 同一台风在泰山站的 μ 比泰安

站小，说明泰山站雨滴谱宽比泰安站大，这和 3.2 节分析一致，也与李慧等 (2018) 发现的 λ 相同时黄山山顶的 μ 小于山底相同。此外，Ulbrich (1983) 发现 μ-λ 关系可以定义为 $\lambda=(4+\mu)/D_m$，相同 μ 时，同一台风在泰山站的 D_m 比泰安站小，说明泰山站雨滴平均直径小于泰安站。

4 结论与讨论

利用泰山站 (山顶)、泰安站 (山底) 降水现象仪、自动气象站和热带气旋最佳路径数据集等资料，分析了台风“摩羯” (1814)、“温比亚” (1818)、“利奇马” (1909)、“烟花” (2106)引发的 4 次暴雨在泰山山顶和山底的雨滴谱特征及 Gamma 分布参数之间的关系，结论如下：

(1) 山顶和山底 4 次台风暴雨雨滴谱均为单峰型结构，山顶的雨滴谱宽均大于山底；泰山地形引起上升气流和大风共同作用造成的微物理过程不同，“摩羯”、“温比亚” (“利奇马”、“烟花”) 台风暴雨雨滴在山顶蒸发作用较 (不) 明显，从山顶高度降落到山底过程中，“摩羯”、“温比亚”破碎作用较明显，“利奇马”蒸发、破碎和碰并作用较明显，“烟花”蒸发和破碎作用较明显。

(2) 4 次台风暴雨在山顶和山底的对流云降水形成机制不同，“摩羯”、“温比亚”、“利奇马”的对流云降水在山顶兼具大陆性和海洋性雨滴谱分布特征，形成机制主要以暖雨-冰相混合和冰相两类为主，在山底却以海洋性为主，形成机制主要以碰并增长暖云为主，还有少部分暖雨-冰相混合；而“烟花”则不同，在山顶和山底均以海洋性为主。

(3) 山顶和山底 4 次台风暴雨的 μ、λ 均随 R 增大而减小，而 μ-λ 关系的差异不大，且移动路径相似的“摩羯”、“烟花”台风 μ-λ 关系在山顶的差异明显小于山底；D_m、$\lg N_w$ 均随 R 增大而增大，“摩羯”、“温比亚”、“利奇马”在山顶和山底 R 增大都主要受 D_m 增大、次要受 $\lg N_w$ 增大的影响；“烟花”在山顶 R 增大也主要受 D_m 增大、次要受 $\lg N_w$ 增大的影响，而在山底 R 增大仅受 D_m 增大的影响。

本文对泰山山顶和山底 4 次台风暴雨的雨滴谱特征及 Gamma 分布参数之间的关系分析所得到的结论，有助于提升台风降水微物理特征的认识，但需要说明的是，文中的分析仅基于泰山站和泰安站的 4 次台风暴雨过程，其相关结论的可靠性还有待于后期积累更多台风个例、选择更多不同海拔站点的统计分析来验证。

参考文献 (References)：

宫福久,何友江,王吉宏,等.2007.东北冷涡天气系统的雨滴谱特征[J].气象科学,(4):365−373. Gong F J, He Y J, Wang J H, et al. 2007. Characteristics of raindrop size distributions of northeast cold vortex precipitation in China [J]. Journal of the Meteorological Sciences, (4):365−373 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1009−0827.2007.04.002

金祺,石春娥,高金兰,等.2023.江淮地区山区和非山区夏季降水雨滴谱特征[J].气象学报,81(5):815−826. Jin Q, Shi C E, Gao J L, et al. 2023. Characteristics of summer rainfall droplet spectra in mountainous and nonmountainous areas of the Jianghuai region [J]. Acta Meteorologica Sinica,81(5):815−826 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2023.20220200

江雨霏,杨莲梅,曾勇,等.2023.昭苏夏季层状云和对流云降水的雨滴谱特征[J].沙漠与绿洲气象,17(3):8−16. Jiang Y F, Yang L M, Zeng Y, et al. 2023. Characteristics of raindrop size distribution for stratiform and convective precipitation in summer in Zhaosu [J]. Desert and Oasis Meteorology,17(3):8−16 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002−0799.2023.03.002

李慧,银燕,单云鹏,等.2018.黄山层状云和对流云降水不同高度的雨滴谱统计特征分析[J].大气科学,42(2):268−280. Li H, Yin Y, Shan Y P, et al. 2018. Statistical characteristics of raindrop size distribution for stratiform and convective precipitation at different altitudes in Mt. Huangshan [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,42(2):268−280 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.1705.16291

李山山,王晓芳,万蓉,等.2020.青藏高原东坡不同海拔区域的雨滴谱特征[J].高原气象,39(5):899−911. Li S S, Wang X F, Wan R, et al. 2020. The characteristics of raindrop spectrum in different altitude region on the eastern slope of Qinghai-Xizang Plateau [J]. Plateau Meteorology,39(5):899−911 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000−0534.2019.00086

刘艳霞,文军,谢晓林.2024.青藏高原中东部和四川盆地的夏季雨滴谱对比分析研究[J].高原气象,43(1):28−41. Liu Y X, Wen J, Xie X L. 2024. A comparative study on the summer raindrop size distribution among areas over the central and eastern Qinghai-Xizang (Tibetan) plateau and the Western Sichuan basin [J]. Plateau Meteorology, 43(1):28−41 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000−0534.2023.00033

王俊,丛春华,王洪,等.2022.台风温比亚 (2018) 登陆后雨滴谱演变特征研究[J].气象,48(11):1449−1459. Wang J, Cong C H, Wang H, et al. 2022. Evolution characteristics of raindrop size distribution of landfalling typhoon Rumbia(2018) [J]. Meteorological Monthly,48(11):1449−1459 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2022.050901

王俊,郑丽娜,王洪,等.2023.山东 6 次台风暴雨雨滴谱统计特征及区域差异[J].应用气象学报,34(4):475−488. Wang J, Zheng L N, Wang H, et al. 2023. Statistical characteristics and regional differences of raindrop size distribution during 6 typhoon rainstorms in Shandong [J]. Journal of Applied Meteorological Science,34(4):475−488 (in Chinese). doi:10.11898/1001−7313.20230408

张扬,刘黎平,何建新,等.2016.雨滴谱仪网数据在雷达定量降水估测中的应用[J].暴雨灾害,35(2):173−181. Zhang Y, Liu L P, He J X, et al. 2016. Application of raindrop size distribution data from a disdrometer network to quantitative precipitation estimation [J]. Torrential Rain and Disasters,35(2):173−181 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2016.02.010

赵城城,张乐坚,梁海河,等.2021.北京山区和平原地区夏季雨滴谱特征分析[J].气象,47(7):830−842. Zhao C C, Zhang L J, Liang H H, et al. 2021. Microphypical characteristics of the raindrop size distribution between mountain and plain areas over Beijing in summer [J]. Meteorological Monthly,47(7):830−842 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2021.07.006

朱红芳,王东勇,杨祖祥,等.2020."海葵"台风 (1211 号) 暴雨雨滴谱特征分析[J].暴雨灾害,39(2):167−175. Zhu H F, Wang D Y, Yang Z X, et al. 2020. Analysis of raindrop spectrum characteristics for a heavy rain event caused by typhoon Haikui (No. 1211) in Anhui [J]. Torrential Rain and Disasters,39(2):167−175 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2022.02.007

Atlas D, Srivastava R C, Sekhon R S. 1973. Doppler radar characteristics of precipitation at vertical incidence [J]. Reviews of Geophysics, 11(1):1−35. doi:10.1029/rg011i001p00001

Bringi V N, Chandrasekar V, Hubbert J, et al. 2003. Raindrop size distribution in different climatic regimes from disdrometer and dual-polarized radar analysis [J]. Journal of the Atmospheric Sciences,60(2): 354−365. doi:10.1175/1520−0469(2003)0602.0.CO;2

Bringi V N, Williams C R, Thurai M, et al. 2009. Using dual-polarized radar and dual-frequency profiler for DSD characterization: a case study from Darwin, Australia [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology,26(10):2107−2122. doi:10.1175/2009jtecha1258.1

Chang W Y, Wang T C, Lin P L. 2009. 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]. Journal of Atmospheric & Oceanic Technology,26: 1973−1993. doi:10.1175/2009jtecha1236.1

Chen B J, Wang Y, MING J. 2012. Microphysical characteristics of the raindrop size distribution in typhoon Morakot (2009) [J]. Journal of Tropical Meteorology,18(2):162−171. doi:10.3969/j.issn.1006−8775.2012.02.006

Chen B J, Yang J, Pu J P. 2013. Statistical characteristics of raindrop size distribution in the Meiyu season observed in Eastern China [J]. Journal of the Meteorological Society of Japan,91(2):215−227. doi:10.2151/jmsj.2013−208

Dolan B, Fuchs B, Rutledge S A, et al. 2018. Primary modes of global drop size distributions [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 75(5):1453−1476. doi:10.1175/jas−d−17−0242.1

He J S, Zheng J F, Zeng Z M, et al. 2021. A comparative study on the vertical structures and microphysical properties of stratiform precipitation over South China and the Tibetan Plateau [J]. Remote Sensing,13(15):2897. doi:10.3390/rs13152897

Hu Z, Srivastava R C. 1995. Evolution of raindrop size distribution by coalescence, breakup, and evaporation: theory and observation [J]. Journal of the Atmospheric Sciences,52(10):1761−1783. doi:10.1175/1520−0469(1995)0522.0.CO;2

Jaffrain J, Berne A. 2011. Experimental quantification of the sampling uncertainty associated with measurements from Parsivel disdrometers [J]. Journal of Hydrometeorology,12(3):352−370. doi:10.1175/2010jhm1244.1

Kim D K, Song C K. 2018. Characteristics of vertical velocities estimated from drop size and fall velocity spectra of Parsivel disdrometer [J]. Atmospheric Measurement Techniques,11(6):3851−3860. doi:10.5194/amt−11−3851−2018

Rosenfeld D, Ulbrich C W. 2003. Cloud microphysical properties, processes, and rainfall estimation opportunities [J]. Meteorological Monographs,30(52):237−258. doi:10.1175/0065−9401(2003)0302.0.CO;2

Seela B K, Janapati J, Lin P L, et al. 2017. A comparison study of summer season raindrop size distribution between Palau and Taiwan, two islands in Western Pacific [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres,122(21):11787−11805. doi:10.1002/2017jd026816

Tokay A, Petersen W A, Gatlin P, et al. 2013. Comparison of raindrop size distribution measurements by collocated disdrometers [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology,30(8):1672−1690. doi:10.1175/jtech−d−12−00163.1

Ulbrich C W. 1983. Natural variations in the analytical form of the raindrop size distribution [J]. Journal of Climate and Applied Meteorology,22(10):1764−1775. doi:10.1175/1520−0450(1983)0222.0.co;2

You C H, Lee D I, Kang M Y, et al. 2016. Classification of rain types using drop size distributions and polarimetric radar: case study of a 2014 flooding event in Korea [J]. Atmospheric Research,181: 211−219. doi:10.1016/j.atmosres.2016.06.024

Zhang G F, Vivekanandan J, Brandes E A, et al. 2003. The shape-slope relation in observed gamma raindrop size distributions: statistical error or useful inlormation? [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology,20(8):1106−1119. doi:10.1175/1520−0426(2003)0202.0.CO;2

(责任编辑　张 文)