大气科学
CHINESE JOURNAL OF ATMOSPHERIC SCIENCES

祁连山春季一次层状云降水的雨滴谱分布及地形影响特征

程鹏 常祎 刘琴 王研峰 李宝梓 陈祺 罗汉

A Case Study of Raindrop Size Distribution and Orographic Impact Characteristics in Spring Stratiform Precipitation over the Qilian Mountains

CHENG Peng CHANG Yi LIU Qin WANG Yanfeng LI Baozi CHEN Qi LUO Han

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2103.20231

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

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
Statistical Characteristics of Raindrop Size Distribution for Stratiform and Convective Precipitation at Different Altitudes in Mt. Huangshan
大气科学. 2018, 42(2): 268 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1705.16291

庐山一次积冰天气过程冻雨滴谱及下落末速度物理特征个例研究
Physical Characteristics of Freezing Raindrop Size Distribution and Terminal Velocity in Two Ice Weather Cases in Lushan Area
大气科学. 2018, 42(5): 1023 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1711.17158

利用微雨雷达研究一次冷锋云系降水的垂直结构分布及演变特征
Vertical Structure and Evolution of Precipitation Associated with Clouds along a Cold Front Based on Micro Rain Radar Observations
大气科学. 2019, 43(3): 618 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1804.17307

南京地区雨滴谱参数的详细统计分析及其在天气雷达探测中的应用
Comprehensive Statistical Analysis of Rain Drop Size Distribution Parameters and Their Application to Weather Radar Measurement in Nanjing
大气科学. 2019, 43(3): 691 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1805.18113

太行山东麓层状云微物理特征的飞机观测研究
Airborne Observations of Microphysical Characteristics of Stratiform Cloud Over Eastern Side of Taihang Mountains
大气科学. 2021, 45(1): 88 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2004.19202

一次梅雨暴雨的动能谱特征分析及收支诊断
大气科学. 2019, 43(5): 1143 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1812.18208

关注微信公众号，获得更多资讯信息

程鹏, 常祎, 刘琴, 等. 2021. 祁连山春季一次层状云降水的雨滴谱分布及地形影响特征 [J]. 大气科学, 45(6): 1232−1248. CHENG Peng, CHANG Yi, LIU Qin, et al. 2021. A Case Study of Raindrop Size Distribution and Orographic Impact Characteristics in Spring Stratiform Precipitation over the Qilian Mountains [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 45(6): 1232−1248. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2103.20231

祁连山春季一次层状云降水的雨滴谱分布及地形影响特征

程鹏[1,2,3]　常祎[1]　刘琴[4]　王研峰[2]　李宝梓[2]　陈祺[2]　罗汉[2]

1 中国气象局云雾物理环境重点开放实验室, 北京 100081
2 甘肃省人工影响天气办公室, 兰州 730020
3 兰州市气象局, 兰州 730020
4 兰州大学资源环境学院, 兰州 730020

摘　要　祁连山是青藏高原东北部重要的生态屏障和冰川与水源涵养生态功能区，是黄河流域重要水源产流地，但针对该地区的云和降水过程研究很少。本文利用祁连山地区 11 个 Parsivel2 雨滴谱仪的观测数据，研究了祁连山地区春季一次层状云降水过程的雨滴谱分布及地形影响特征。此次降水过程主要受短波槽影响，降水时空差异较大。雨滴谱观测数据表明，此次降水过程的雨滴等效直径（D_m）较小，雨滴谱数浓度（N_T）与 D_m 随海拔高度升高分别呈增加和减小的趋势，低海拔站点 $\log N_w$（N_w 为雨滴谱截断参数）和 D_m 分布有着明显的层状云降水特征，而整个祁连山地区在同样 D_m 下有着更低的 N_w。低海拔站点由于碰并和小雨滴的蒸发，有着更少的小雨滴（＜1 mm）和更多的大雨滴，而高海拔站点由于距离云底较近或位于云内，云滴尺度小且浓度大，D_m 随 R（R 为降水强度）增大变化趋势不明显。M-P 分布和 Gamma 分布在低海拔站点的拟合效果要优于高海拔站点，相较于 Gamma 分布，M-P 分布对高海拔站点的小雨滴和大雨滴浓度有一定的高估和低估，因此更适用于高海拔站点雨滴谱的描述。对比于低海拔站点，高海拔站点的 μ–Λ（μ、Λ 分别为 Gamma 分布的形状参数和斜率参数）关系与相关研究的结果较为接近，但在 Λ 较小（＜40 mm^{-1}）时拟合结果较为接近。受海拔高度与云底的相对位置和地形的影响，祁连山地区的 Z–R（Z 为雷达反射率因子）关系与其他地区或研究有着较大的区别。

关键词　祁连山　雨滴谱与降水特征　地形高度影响　雨滴谱仪观测
文章编号　1006-9895(2021)06-1232-17　　**中图分类号**　P426.62　　**文献标识码**　A
doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2103.20231

A Case Study of Raindrop Size Distribution and Orographic Impact Characteristics in Spring Stratiform Precipitation over the Qilian Mountains

CHENG Peng[1,2,3], CHANG Yi[1], LIU Qin[4], WANG Yanfeng[2], LI Baozi[2], CHEN Qi[2], and LUO Han[2]

收稿日期　2020-11-20；**网络预出版日期**　2021-05-03
作者简介　程鹏，男，1981 年出生，高级工程师，主要从事云降水物理研究。E-mail:tfreefish@163.com
通讯作者　常祎，E-mail: changyi1017@qq.com
资助项目　国家重点研发计划项目 2019YFC1510302，第二次青藏高原综合科学考察研究项目 2019QZKK0104，中国气象局云雾物理环境重点开放实验室开放课题 2018Z01603，国家自然基金青年科学基金项目 42005070，甘肃省自然科学基金项目 20JR10RA455
Funded by　The National Key R&D Program of China (Grant 2019YFC1510300), the Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research (STEP) Program (Grant 2019QZKK0104), Basic Research Fund of CAMS (Grant 2018Z01603), National Natural Science Foundation of China (Grant 42005070), and Natural Science Foundation of Gansu Province (Grant 20JR10RA455)

1 *Key Laboratory for Cloud Physics*, *Chinese Academy of Meteorological Sciences*, *Beijing* 100081
2 *Gansu Weather Modification Office*, *Lanzhou* 730020
3 *Lanzhou Meteorological Bureau*, *Lanzhou* 730020
4 *College of Earth and Environmental Sciences*, *Lanzhou University*, *Lanzhou* 730000

Abstract　Located northeast of the Tibetan Plateau, the Qilian Mountains is an important ecological protective screen and conservation zone, as well as a key water source for the Yellow River basin. However, studies on cloud and precipitation in this region are seriously lacking. Using the observations of 11 Parsivel2 disdrometers in the Qilian Mountains, this paper studied the raindrop size distribution characteristics and the orographic impact in a spring stratiform precipitation case over the Qilian Mountains. This precipitation process was initiated under the influence of a short-wave trough and had a significant temporal and spatial variation. Disdrometer observations show that the mass equivalent diameter (D_m) was small. The total number concentration of the raindrops (N_T) and D_m would increase and decrease as the elevation becomes higher. The relationship between $\log N_w$ (N_w is the intercept parameter of the rain drop size distribution) and D_m had featured stratiform precipitation characteristics. In the same D_m, there was a higher N_w in the Qilian Mountains. For lower elevation sites, there were fewer small raindrops (<1 mm) than the large raindrops because of the evaporation of small raindrops and the coalescence. Because the sites with a higher elevation were close to the cloud base or in the cloud, the size scale of raindrops became smaller and D_m varied little with the rain rate (R). The M-P and Gamma distribution fit better for sites with a lower altitude. For sites with a higher altitude, the Gamma distribution describes the spectrum better, while the M-P distribution will overestimate/underestimate the concentrations of smaller/larger raindrops. The μ–Λ (μ and Λ are shape and slope parameters of the rain drop size distribution) relationship for sites with a higher altitude are similar to those in related researches. However, when the Λ is small (<40 mm^{-1}), results will be better for all sites. Influenced by the topography and the relative position between the observational site and cloud base, the Z–R (Z is the radar reflectivity factor) relationship all showed quite different characteristics with other regions or researches.

Keywords　Qilian Mountains, Characteristics of precipitation and raindrop size distribution, Impact of orographic elevation, Disdrometer observation

1　引 言

雨滴谱观测是了解云和降水物理特征的重要途径之一，对了解自然降水形成过程、数值模式雨滴分布参数化和雷达定量估测降水等均有重要意义（金祺等, 2015）。雨滴谱是指单位体积内不同大小雨滴的数量随直径的分布，含有丰富的降水微物理特征信息（陈宝君等, 1998），通过分析降水的雨滴谱特征，既能研究降水演变发展过程，又能了解云内部微物理特征，对人工影响天气起到重要指导作用（宫福久等, 1997; 柳臣中等, 2015），因此，对于雨滴谱特征的研究一直是云微物理研究的重要方面。

近年来，很多学者对我国的雨滴谱特征进行了分析和研究，加深了我们对不同地区、不同类型降水的微物理过程的认识。房彬等（2010）利用雨滴谱建立的 Z–R 关系提高了降水估算的精度；牛生杰等（2002）的研究表明宁夏地区夏季平均雨滴数浓度为 285 m^{-3}，对流云降水雨强增加主要是由于降水粒子尺度和数浓度的增加（Niu et al., 2010）；Chen et al.（2011）对南京地区梅雨降水雨滴谱的研究表明，对流性降水雨滴谱$\log N_w$的偏度系数比层状云降水更大，梅雨期间对流性降水与层状云降水的$\log N_w - D_m$、μ–Λ 关系有着显著的区别，他们的研究还建立了$Z = 368R^{1.21}$的 Z–R 关系；李慧等（2018）对黄山不同高度的雨滴谱特征分析发现，层状云降水粒子谱随高度的变化较流云降水偏小，雨滴谱的演变较为稳定。

从众多的研究结果可以看出，雨滴谱特征随着地区、降水类型的不同存在显著的区别，即使同一次降水过程中雨滴谱也随着降水过程发生变化（周毓荃等, 2001; 阮征等, 2002; 李娟等, 2006; Cao et al., 2008; 贾星灿和牛生杰, 2008; Chakravarty and Raj, 2013; Calheiros and Machado, 2014）。特别是针对地形对雨滴谱分布特征的影响研究很少。对祁连山地区云和降水的研究主要利用卫星遥感资料开展地形云季节变化、日变化特征研究，并取得了一些重要结果，但卫星资料的分辨率相对偏低，无法获取云的垂直结构特征（张杰等, 2006; 史晋森等,

2008; 陈少勇等, 2010; 陈添宇等, 2010; 丁晓东等, 2012; 石光普等, 2012; 邵元亭等, 2013)。由于祁连山地区云降水的综合观测实验数据缺乏，相关的研究很少。

祁连山区是青藏高原东北部重要的生态屏障和冰川与水源涵养生态功能区，是黄河流域重要水源产流地，该地区的云和降水过程受地形的影响很大。对天气过程发生发展机理的理解仅从云降水物理学的角度难以深入，需要将天气—动力—云降水物理结合起来（许焕斌, 2012）。研究祁连山地区雨滴谱分布及地形影响特征，对于该地区卫星遥感反演、雷达估测降水和数值模拟技术的改进具有重要作用（傅云飞等, 2012; 陈磊等, 2013; 李典等, 2014; 潘晓和傅云飞, 2015）。依托于国家西北区域人工影响天气能力建设项目，在祁连山区已建成祁连山地形云外场试验场，试验区布设了包括云雷达、降水现象仪、微波辐射计、自动站等地基观测设备，从 2019 年开始开展了祁连山地形云人工增雨（雪）技术研究外场观测试验。本文对试验期间观测的 2020 年 5 月 5～6 日一次层状云降水过程的雨滴谱观测数据，分析了该地区春季层状云降水的地面雨滴谱分布及地形的影响，并针对雨滴谱分布参数化进行了检验研究。

2 研究区域、观测和数据处理

2.1 研究区域和观测

本文的研究区域为祁连山中东部及其与河西走廊的交界地带，图 1a 为研究区域地形情况以及雨滴谱仪分布情况，表 1 为对应观测站点编号、经纬度和海拔高度情况。这些观测站点依祁连山走势呈西北东南走向，其中 GS001、GS003、GS004、GS006 和 GS009 位于走廊内，其余站点均位于祁连山山区，其中 GS011 海拔高度最高，超过了 3000 m（3045.1 m），GS009 海拔最低，为 1453.7 m，高度差接近 1600 m。

此次观测的雨滴谱仪（图 1b）为 OTT 公司 Parsivel2 激光雨滴谱探测系统，雨滴直径测量范围为 0.062～24.5 mm（32 档），雨滴末速度测量范围为 0.050～20.80 m s^{-1}（32 档）。根据粒径和末速度可以区分 8 种降水类型，并区分多种天气现象。为了解此次降水过程的天气形势，本文还采用了欧洲中期数值预报中心（ECMWF）的 ERA5 再分析数据和 FY2G 卫星观测资料。

此外，在 W2129 观测点还设有云雷达一部，该雷达的波长为 8.97 mm，发射峰值功率为 80 W，最大探测距离为 30 km，但由于设备故障，其在主要天气过程中并未获得整体天气过程的观测数据，但在天气过程末期有观测数据，在本文中用于为降水过程中的云底、云顶、零度层判定提供参考。

2.2 数据处理方法

Parsivel2 雨滴谱仪观测数据的误差主要来自两个方面，一是大雨滴粒子在激光传感器探测范围边缘被识别为下落末速度较快的小雨滴（Yuter et al., 2006），二是雨滴撞击到滴谱仪及强风会产生下落

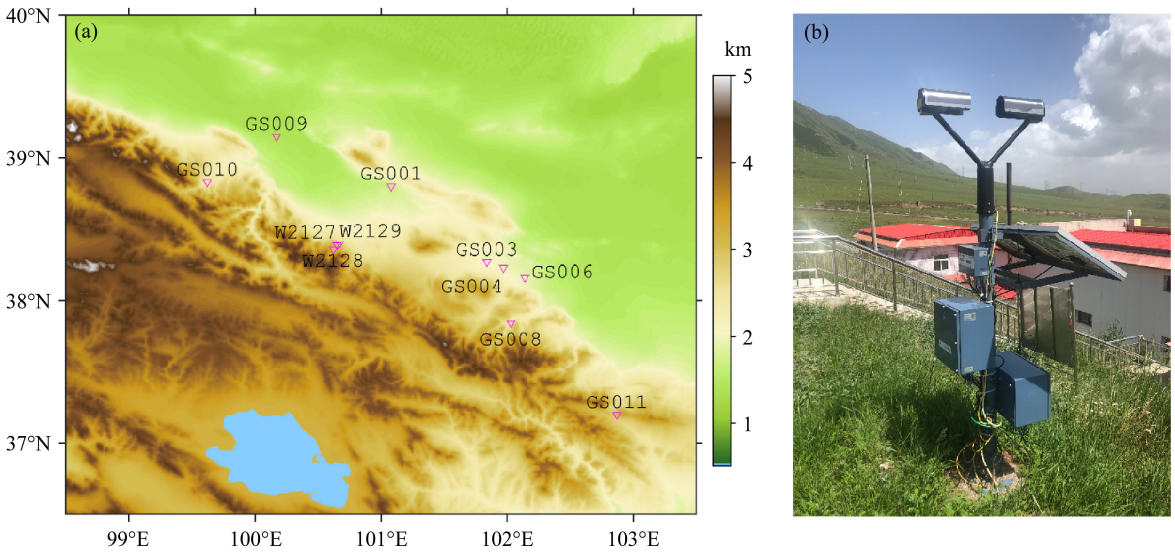

图 1 祁连山地形云试验场（a）雨滴谱仪观测站点分布及（b）雨滴谱仪，更详细的站点信息见表 1

Fig. 1 (a) Locations of observational sites, (b) the Parsivel2 disdrometer, more detailed information of all sites is shown by Table 1

表 1　祁连山地形云试验场雨滴谱仪观测站点编号、经纬度及海拔高度情况

Table 1　Site number, latitude, longitude, and altitude (above sea level) of each observational site in the experimental field of Qilian Mountains

编号	站名	市	县	经度	纬度	海拔高度/m
GS001	山丹	张掖	山丹	101.08°E	38.80°N	1765.5
GS003	焦家乡	金昌	永昌	101.84°E	38.27°N	2116.0
GS004	永昌	金昌	永昌	101.97°E	38.23°N	2093.9
GS006	六坝乡	金昌	永昌	102.14°E	38.16°N	1817.0
GS008	皇城水关	张掖	肃南	102.03°E	37.84°N	2357.0
GS009	临泽	张掖	临泽	100.17°E	39.15°N	1453.7
GS010	肃南	张掖	肃南	99.62°E	38.83°N	2311.8
GS011	乌鞘岭	武威	天祝	102.87°E	37.20°N	3045.1
W2127	海潮坝水库	张掖	民乐	100.65°E	38.39°N	2613.5
W2128	海潮音寺	张掖	民乐	100.62°E	38.36°N	2719.5
W2129	卜里沟	张掖	民乐	100.67°E	38.40°N	2454.5

末速度较慢的大雨滴粒子（Friedrich et al., 2013）。为了消除这些误差，常用的办法是利用雨滴降落末速度经验公式对±60% 末速度范围内的粒子进行剔除（Niu et al., 2010; Chen et al., 2017; Ji et al., 2019），本文利用 Atlas et al.（1973）的雨滴下落末速度经验公式，并根据站点气压、温度进行矫正后，对此次观测期间的数据进行了质量控制，图 2 为 GS001 观测站点的质控示意图。

雨滴谱分布函数$N(D_i)$计算公式如下：

$$N(D_i)=\sum_{j=1}^{32}\frac{n_{ij}}{A_i\cdot\Delta t\cdot V_j\cdot\Delta D_i},\qquad(1)$$

其中，D_i为第i档的体积等效直径，$A_i\left(m^2\right)$为每一粒子档的有效采集面积，$\Delta t(s)$为采样间隔，本文为 60 s，V_j为第j速度等级对应的平均速度，$\Delta D_i=D_{i+1}-D_i$。

利用雨滴谱仪观测数据，还计算了以下相关参量：

$$N_{\mathrm{T}}=\sum_{i=1}^{32}\sum_{j=1}^{32}\frac{n_{ij}}{A_i\cdot\Delta t\cdot V_j},\qquad(2)$$

$$q_w=\frac{\pi}{6}\times10^{-3}\cdot\rho_w\cdot\sum_{i=1}^{32}\sum_{j=1}^{32}\frac{n_{ij}}{A_i\cdot\Delta t\cdot V_j},\qquad(3)$$

$$R=6\pi\times10^{-4}\cdot\sum_{i=1}^{32}\sum_{j=1}^{32}D_i^3\frac{n_{ij}}{A_i\cdot\Delta t},\qquad(4)$$

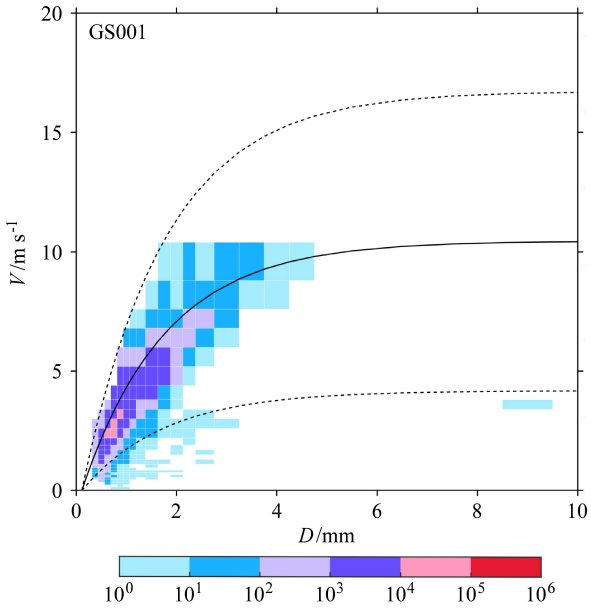

图 2　GS001 站点雨滴谱数据质量控制示意图，其中色块表示雨滴谱仪观测到的粒子数量，实线和虚线分别表示经验公式确定的曲线和经验公式±60% 确定的曲线范围，落在虚线范围之外的粒子将被剔除

Fig. 2　Quality control of the disdrometer data derived from GS001. The color blocks show the number of raindrops and the solid line and dotted lines respectively indicate the empirical equation between the diameter and the falling speed of raindrops and the range of ±60% around the empirical quotation. The raindrops that fall out of the dotted line region will be treated as error data and removed

$$Z=\sum_{i=1}^{32}\sum_{j=1}^{32}D_i^6\frac{n_{ij}}{A_i\cdot\Delta t\cdot V_j},\qquad(5)$$

其中，N_{T}、q_{w}、R、Z分别为雨滴谱数浓度（单位：$\mathrm{m^{-3}}$）、含水量（单位：$\mathrm{g\ m^{-3}}$）、降水强度（单位：$\mathrm{mm\ h^{-1}}$）和反射率因子（单位：$\mathrm{mm^6\ m^{-3}}$），ρ_{w}为水的密度（取值为 1 $\mathrm{g\ cm^{-3}}$）。

同时还利用以下公式计算了滴谱分布的质量等效直径和截断参数：

$$D_{\mathrm{m}}=\frac{\sum_{j=1}^{32}N(D_i)\cdot D_i^4\cdot\Delta D_i}{\sum_{i=1}^{32}N(D_i)\cdot D_i^3\cdot\Delta D_i},\qquad(6)$$

$$N_{\mathrm{w}}=\frac{4^4}{\pi\rho_{\mathrm{w}}}\left(\frac{10^3q_{\mathrm{w}}}{D_{\mathrm{m}}^4}\right).\qquad(7)$$

在研究过程中比较了两种常用的雨滴谱分布，即 M-P 分布（Marshall and Palmer, 1948）和 Gamma 分布（Ulbrich, 1983），其分布公式分别如下：

$$\text{M-P分布：}N(D)=N_0e^{(-\Lambda D)}, \tag{8}$$

$$\text{Gamma分布：}N(D)=N_0D^{\mu}e^{(-\Lambda D)}, \tag{9}$$

其中，N_0为截断参数，μ为形状参数，Λ为斜率参数。

3 天气形势和降水过程

图 3 为 2020 年 5 月 6 日 00:00（北京时，下同）的天气形势和卫星云图，可以看出，在 500 hPa（图 3b）高度层祁连山西北地区主要受柴达木低涡影响，低涡东南有一东南—西北走向短波槽，在 700 hPa（图 3a）高度层主要是在短波槽影响下形成的蒙古低涡，在祁连山中东部地区形成了相对较强的系统性降水天气过程。从卫星云图（图 3c）可以看出，此次天气过程的云系与 500 hPa 天气形势走向基本一致，短波槽影响下形成的云系沿西南—东北方向向东移动，主体云系于 2020 年 5 月 5 日中午至 5 月 6 日上午影响观测研究区域，降水时段主要集中在 5 月 5 日 18:00 至 5 月 6 日 06:00。

受此次天气过程影响，研究区域内所有站点都有明显的降水过程，各个站点自 5 月 5 日 18:00 至 6 日 06:00 共 12 h 的累计降水量在 1.4～19.6 mm 之间，时空分布差异明显。表 2 为此次天气过程中各个站点累积降水量、最大降水强度和最大液态含水量的统计情况。可以看出，此次降水过程在区域东部的站点（GS003、GS004、GS006、GS008 和 GS011）的降水量较小，都在 10 mm 以下。GS003 和 GS011 最大降水强度分别达到 23.44 mm h^{-1} 和 54.69 mm h^{-1}，最大雨水含量达到 1.24 g m^{-3} 和 2.55 g m^{-3}，其它站点降水强度均小于 5 mm h^{-1}，最大雨水含量小于 0.4 g m^{-3}。观测区域偏西北方向站点（GS001、GS009、GS010、W2127、W2128 和 W2129）的降水量、最大雨强以及最大含水量的值都相对较大且较为接近。总体而言，此次降水过程在观测区域的祁连山中东部降水量较大，而在东南部的祁连山东部降水量较小，但东部地区存在降水强度较大站点，表明该地区存在短时阵性较强降水。

表 2 2020 年 5 月 5～6 日降水过程期间各个站点降水量统计情况

Table 2 Total precipitation of each disdrometer site during May 5–6, 2020

站号	P/mm	R_{max}/mm h^{-1}	R_{avg}/mm h^{-1}	Q_{max}/g m^{-3}	Q_{avg}/g m^{-3}
GS001	11.2	13.38	1.07	0.79	0.15
GS003	4.8	23.44	0.82	1.24	0.20
GS004	2.3	4.96	0.67	0.32	0.11
GS006	1.4	4.05	0.41	0.27	0.08
GS008	2.3	4.73	1.04	0.35	0.14
GS009	10.8	9.57	0.83	0.45	0.12
GS010	12.6	8.52	3.43	0.47	0.09
GS011	4.0	54.69	2.51	2.55	0.15
W2127	16.5	15.12	3.23	0.86	0.14
W2128	14.0	13.19	4.22	0.71	1.11
W2129	19.6	12.12	3.50	0.74	0.19

注：累积降水量P，单位：mm；最大雨强R_{max}，单位：mm h^{-1}；平均雨强R_{avg}，单位：mm h^{-1}；最大液态含水量Q_{max}，平均液态含水量Q_{avg}，单位：g m^{-3}。

4 结果与分析

4.1 地形对雨滴谱分布与降水强度影响

此次降水过程在不同区域的分布差异较大，为比较地形对地面雨滴分布的影响，根据这些站点的分布情况，结合降水随时间变化的情况，将站点分为三组，分别为位于低海拔的河西走廊中西部的两个站点 GS001、GS009（图 4a–b）、祁连山北部山区中西部四个站点 GS010、W2127、W2128、W2129（图 4c–f）和祁连山区东部五个站点 GS003、GS004、GS006、GS008、GS011（图 4g–k）。河西走廊中西部站点 GS009 位于 GS001 站点的上游方向，因此最先出现降水，但两个站点主体降水过程持续时间基本相同。对于 GS001 站点，降水强度在开始阶段存在一个峰值，而 5 月 6 日 00:00 之后降水强度持续较大；而对于 GS009 站点，降水强度在主体降水过程开始阶段平稳增长，但在 5 月 6 日 00:00 前存在明显降水峰值。相比于河西走廊中西部的两个低海拔站点，祁连山区四个站点（图 4c–f）的降水过程持续时间明显偏长；另一个显著的特征是，随着山区海拔高度的增加，降水粒子中直径小于 1 mm 的雨滴浓度明显升高，最终导致山区站点的D_m明显偏低而数浓度N_T明显偏高（表 3），这表明在祁连山海拔较高的地区，降水主要以毛毛雨为主。图 4g–k 中的祁连山东段五个站点的位置偏东南，相比于其他站点，位于天气过程的边缘地区，因此降水过程持续时间短，通过分析可以看出，与图 4c–f 类似，尽管这几个站点降水持续时间较短，但随着海拔高度的升高，雨滴中小于 1 mm 的粒子浓度也有着显著地提高，从而使

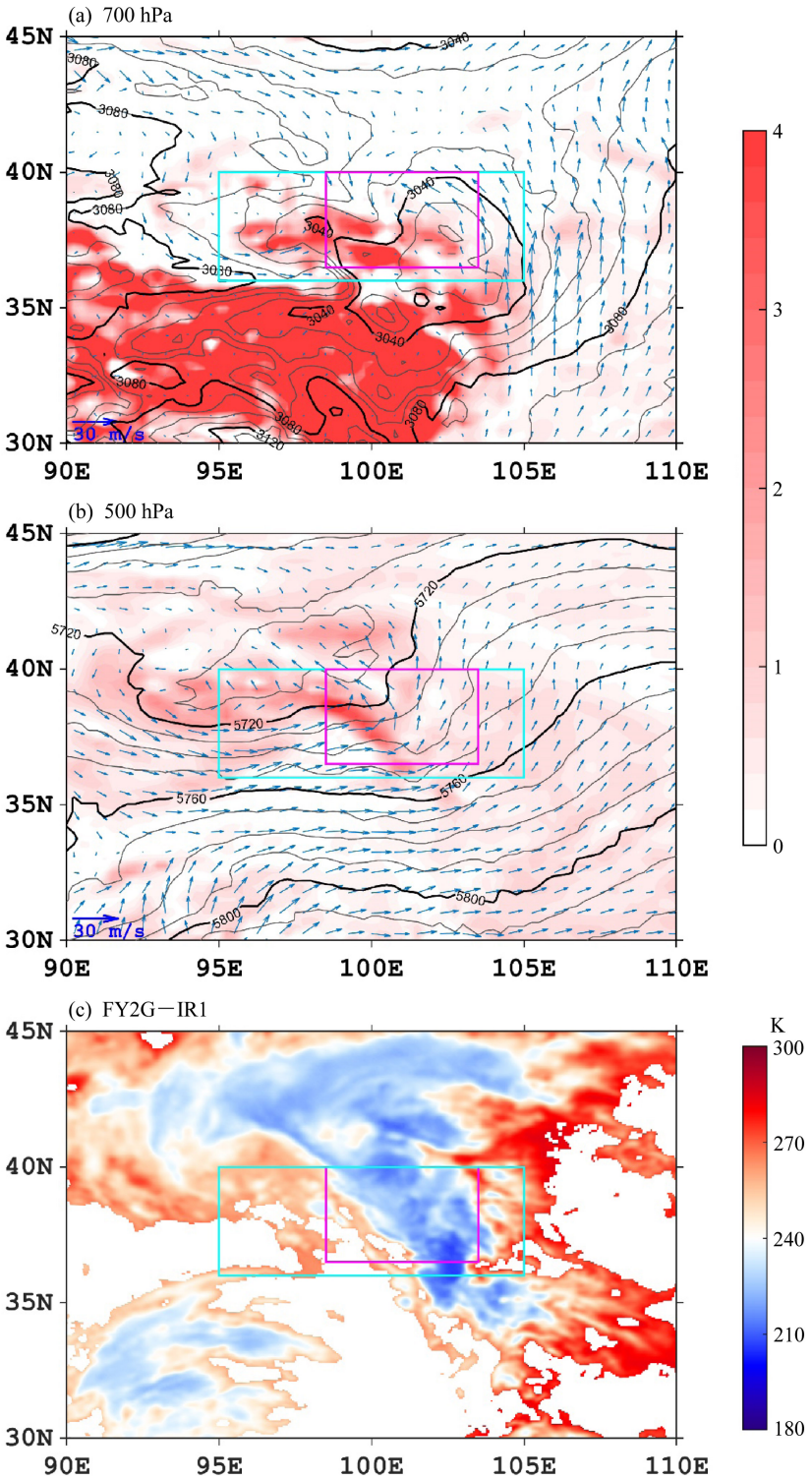

图 3　2020 年 5 月 6 日 00:00（北京时，下同）（a）700 hPa、（b）500 hPa 天气形势以及（c）FY2G 卫星红外云图，图中蓝绿框表示祁连山地区范围，洋红色框表示本文观测研究区域。（a、b）中等值线为位势高度（单位：gpm），箭头为水平风场（单位：m s^{-1}），填色表示位势涡度（单位：10^{-6} K m^2 kg^{-1} s^{-1}），（c）中填色表示黑体温度（单位：K）。

Fig. 3　Synoptic conditions of (a) 700 hPa, (b) 500 hPa, and (c) the infrared image of FY2G satellite at 0000 BJT (Beijing time) May 6, 2020. The solid lines, arrows, and color maps in (a) and (b) denote the geopotential height, horizontal wind, and geopotential vorticity, respectively. The color map in (c) shows the black body temperature (uints: K). The cyan and magenta rectangles denote the region of the Qilian Mountains and the research area.

表 3 2020 年 5 月 5～6 日降水过程期间各个站点海拔高度以及N_T、D_m的最大值、平均值及中位值

Table 3 Maximum, average, and median values of N_T and D_m of each site during May 5–6, 2020

站点编号	海拔高度/m	N_T/m^{-3}			D_m/mm		
		最大值	平均值	中位值	最大值	平均值	中位值
GS001	1765.5	1009	339	293	1.77	0.97	0.98
GS003	2116.0	1211	384	341	1.88	1.13	1.11
GS004	2093.9	617	273	239	2.79	1.17	1.09
GS006	1817.0	596	253	245	1.91	1.04	0.99
GS008	2357.0	1156	532	470	1.28	0.94	0.93
GS009	1453.7	738	251	244	2.46	1.18	1.17
GS010	2311.8	1268	303	300	2.17	1.02	0.91
GS011	3045.1	2264	313	195	2.38	1.10	1.00
W2127	2613.5	1760	594	454	1.75	0.87	0.85
W2128	2719.5	2181	513	409	2.88	0.86	0.85
W2129	2454.5	2304	771	584	2.01	0.91	0.88

得D_m偏低、数浓度N_T偏高（表 3）。

对于走廊低海拔的两个站点（图 5a、b），当雨强增大时，雨滴的 D_m、N_T、和 Q_w 变化趋势与降水强度变化趋势较为一致，表明这两个站点的降水强度增大时，雨滴谱的谱型未发生变化，是在原有滴谱基础上随着浓度增加发生了扩展。祁连山山区中西部四个站点与走廊内低海拔两个站点有着明显的区别，尤其是 W2127、W2128、和 W2129 三个站，在有些时段降水粒子的 D_m、N_T、和 Q_w 变化趋势并不一致，如 W2129 站 5 月 6 日 00:00～03:00 之间 N_T 较大，但与之相对的 D_m、N_T、和 Q_w 变化趋势并不一致，且降水粒子主要由＜1 mm 的雨滴贡献，对降水量和降水强度贡献较小。可以看出，祁连山中东部山区四个站点在降水开始阶段其降水谱型与走廊内两个站点类似，但随着降水系统主体部分开始作用后，小雨滴（＜1 mm）的浓度显著增加，因此其降水很多时候都表现为 N_T 较大，但相应的 D_m、R、和 Q_w 并不高。与祁连山山区和走廊地区站点对比情况类似，东部走廊内三个站点 GS003、GS004、GS006 与山区两个站点 GS008、GS011 相对比也有着类似的情况，但由于降水时间短，并不显著。

可以看出，尽管此次天气过程自西向东移动，但随着海拔高度和地理位置的不同，研究区域各个观测点的降水演变特征有着明显的区别。根据云雷达在 5 月 6 日 11:00 的观测（图略），在 W2129 观测点云处于接地状态，这很可能直接导致了山区的小雨滴由于缺乏碰并和蒸发过程而浓度较高。陈添宇等（2010）通过分析 2007 年祁连山地形云观测试验期间的资料指出，祁连山区水汽丰沛，凝结高度和自由对流高度较低，有利于降水的形成，配合有鲜明特点的山谷风，使得祁连山北坡更容易产生降水，此次的观测中发现祁连山山区的降水持续时间更长，且山区云系接地的情况印证了这一点。从此次雨滴谱随时间的演变特征来看，与郑国光等（2011）在祁连山区的观测类似，即随着海拔高度的增加，小雨滴的浓度升高，且浓度较大。

本文对各个站点的 N_T、D_m 进行了统计，结果如表 3。可以看出，此次天气过程中雨滴数浓度 N_T 最大值除 GS004、GS006 和 GS009 外均大于 1000 m^{-3}，平均数浓度和中值数浓度都在 10^2 m^{-3} 量级。此外，从表中可以明显看出，海拔较高的几个站点如 W2127、W2128、W2129 的最大、平均、中位数浓度都要显著偏高，而在同一区域内，如中东部五个站点，GS008 由于海拔高于 GS003、GS004、GS006，其平均、中值数浓度均高于另外三个站点。相应地，W2127、W2128、W2129 的浓度也显著高于走廊内的 GS001、GS009 两个站点。

此外，表 3 还统计了各个站点 D_m 的最大值、平均值和中位值，可以看出，此次降水过程的最大 D_m 出现在 W2128 站点，为 2.88 mm，而最大平均和中值 D_m 分别为 1.18 mm 和 1.17 mm，都出现在 GS009 站点。对比西部祁连山区和走廊内的站点，可以明显看出走廊内的 GS001、GS009 的平均 D_m（0.97 mm、1.18 mm）和中值 D_m（0.98 mm、1.17 mm）都要显著高于山区站点 W2127、W2128、W2129（0.87 mm、0.86 mm、0.91 mm 和 0.85 mm、0.85 mm、0.88 mm）。与此同时，距离较近的四个东部站点 GS003、GS004、GS006、GS008 也可以看出类似的趋势，GS008 的平均、中值 D_m（0.94 mm、0.93 mm）也要低于 GS003、GS004、GS006（1.13 mm、1.17 mm、1.04 mm，1.11 mm、1.09 mm、0.99 mm）。整体而言，随着海拔高度的增加，雨滴谱的数浓度增加、等效直径减小。

选取 GS009（1453.7 m）和 W2128（2719.5 m）两个站点作为不同海拔高度的代表站点，对 logN_w 和 D_m 进行统计分析，结果如图 6。可以看出，GS009 和 W2128 的 logN_w 都呈“双峰”分布，两个站点在 3.2～3.3 有一共同的峰值，但该峰值在

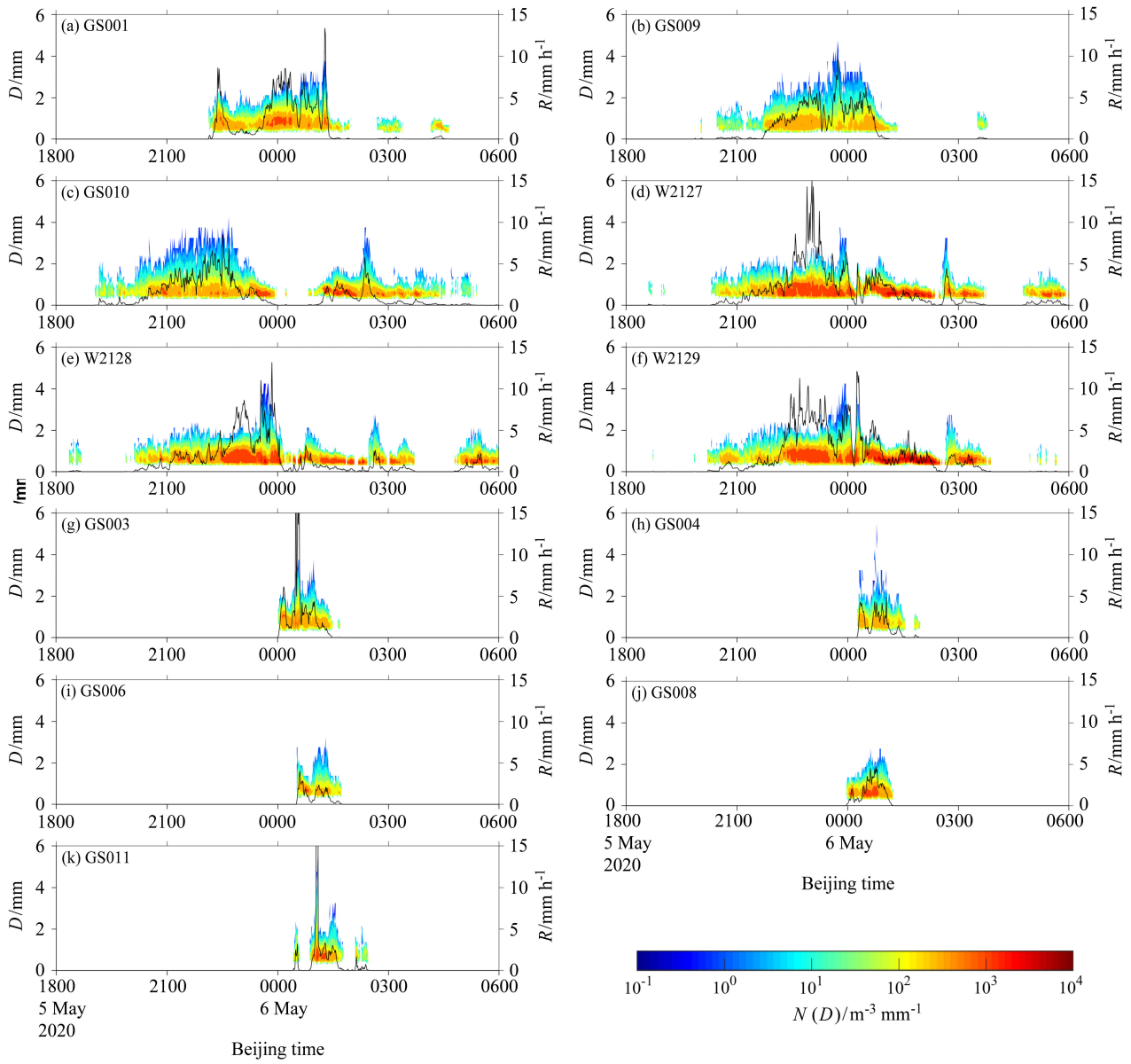

图 4　2020 年 5 月 5 日 18:00 至 6 日 06:00 期间雨滴谱（填色）和降水强度（黑实线）的时间变化。其中（a、b）为中西部走廊内 GS001、GS009 两个站点，（c–f）为中西部祁连山区 GS010、W2127、W2128、W2129 四个站点，（g–k）为中东部 GS003、GS004、GS006、GS008、GS011 五个站点

Fig. 4　Temporal variation of raindrop size distribution and rain rate from 1800 BJT May 5 to 0600 BJT on May 6, 2020. The color map and solid line denote the raindrop size distribution and rain rate, respectively. The two sites (GS001, GS009) in the corridor, the four sites (GS010, W2127, W2128, W2129) in the central-western Qilian Mountains, and the five sites (GS003, GS004, GS006, GS008, GS011) in the central-eastern Qilian Mountains are shown by (a, b）, (c–f) , and (g–k), respectively

GS009 站点的占比明显偏高，对于 GS009 站点，$\log N_w$ 的第二个峰值位于 3.8～3.9，超过 5% 的数据分布在 3.6～4.1，而对于 W2128，第二峰值区超过 5% 的数据分布在 3.7～4.6，其中最大峰值位于 4.0～4.1，从整体分布看，W2128 的 $\log N_w$ 要明显高于 GS009。D_m 在两个站点的分布情况与 $\log N_w$ 截然相反，W2128 站点的 D_m 集中分布在 0.5～1.1 mm 之间，而对于 GS009，D_m 则在 0.5～2.5 mm 之间都有相对较高的占比，其中两个峰值分别位于 0.8～0.9 和 1.2～1.3 mm，整体而言，GS009 的 D_m 要明显大于 W2128。对比之前的结果（Chen et al., 2013; Ji et al., 2019），GS009 站点的 $\log N_w$ 和 D_m 分布情况基本符合层状云的统计结果，而 W2128 与之前无论层状云还是对流云的观测结果

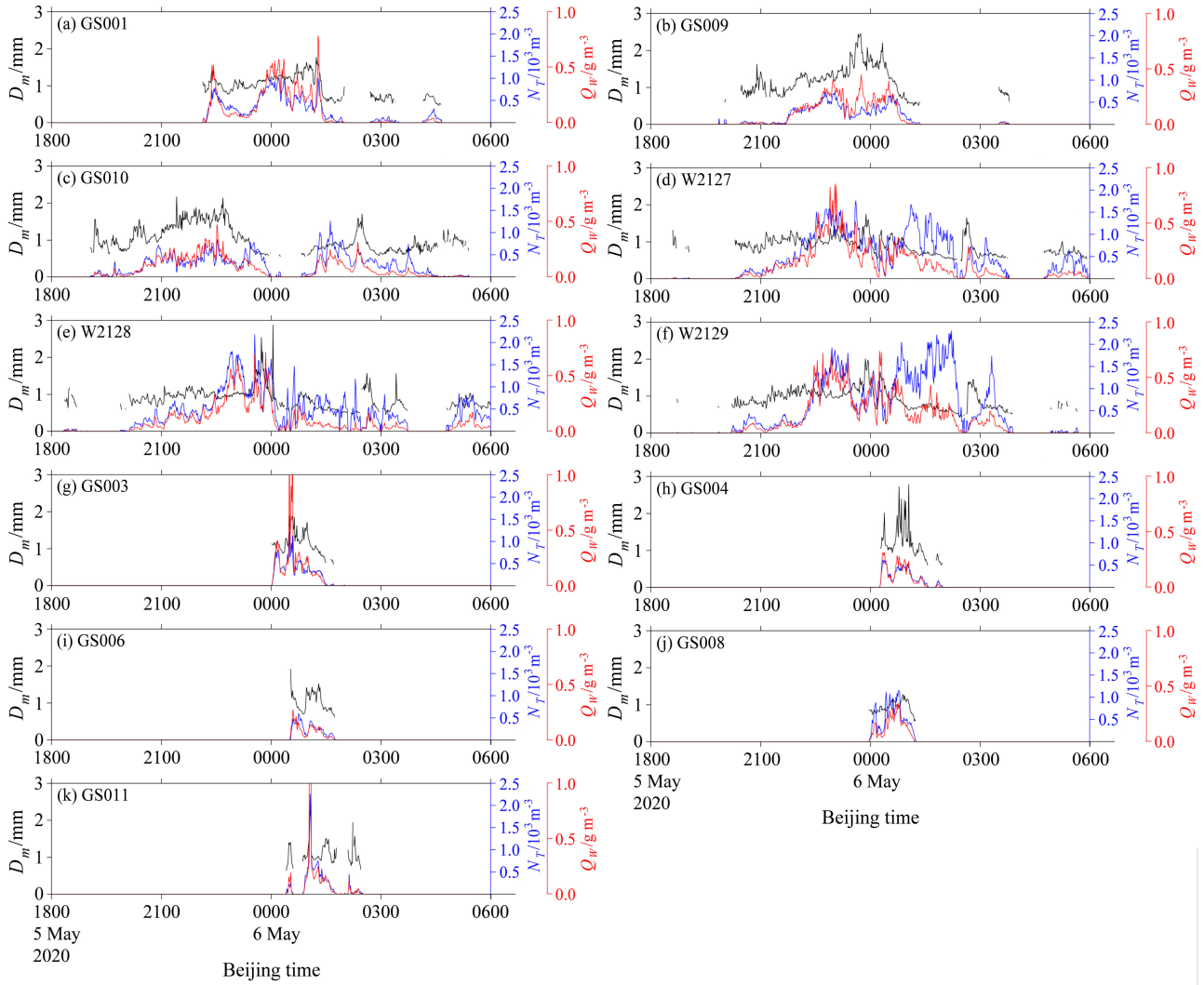

图 5 2020 年 5 月 5 日 18 时至 5 月 6 日 06:00 期间质量等效直径D_m（黑色实线）、雨滴谱数浓度N_T（蓝色实线）和雨水含量q_w（红色实线）的时间变化。其中（a）和（b）为中西部走廊内 GS001、GS009 两个站点，（c）至（f）为中西部祁连山区 GS010、W2127、W2128、W2129 四个站点，（g）至（k）为中东部 GS003、GS004、GS006、GS008、GS011 五个站点

Fig. 5 Temporal variation of equivalent mass diameter (D_m, black lines), total raindrop concentration (N_T, blue lines), and liquid water content (q_w, red lines) from 1800 May 5 to 0600 May 6. The two sites (GS001, GS009) in the corridor, the four sites (GS010, W2127, W2128, W2129) in the central-western Qilian Mountains, and the five sites (GS003, GS004, GS006, GS008, GS011) in the central-eastern Qilian Mountains are shown by (a, b), (c–f), and (g–k), respectively

都有明显的区别，表现为较高的 logN_w 和集中分布且较低的 D_m，这种现象很可能是该站点海拔较高，在降水过程中站点与云底距离较近或已经位于云内，雨滴未经过充分的碰并过程。

图 7 为此次降水过程期间各个站点平均 logN_w 和 D_m 的分布情况，可以看出，所有站点都分布在 Bringi et al.（2003）观测确定的层状云降水虚线下方，且也呈负线性相关分布。从图 7 中可以看出，W2127、W2128、W2129、GS008 四个邻站点明显更偏左上，即拥有更高的 logN_w 和更低的 D_m，比 Chang et al.（2009）研究的弱平流降水在同样 logN_w 下 D_m 更小，这些站点的海拔都在 2000 m 以上，这很可能与其所在位置距离云底较近或位于云内有关；其它站点则相对偏右下分布，但各个站点在图 7 中的相对位置无明显规律，这一方面是由于此次降水过程在各个站点降水的持续时间相差较大，另一方面则是由于祁连山地区地形复杂，这些分布特征很可能受到复杂地形的影响。从对 11 个站点的拟合结果来看，此次的降水过程的拟合曲线与 Bringi et al.（2003）层状云的拟合结果坡度接近，

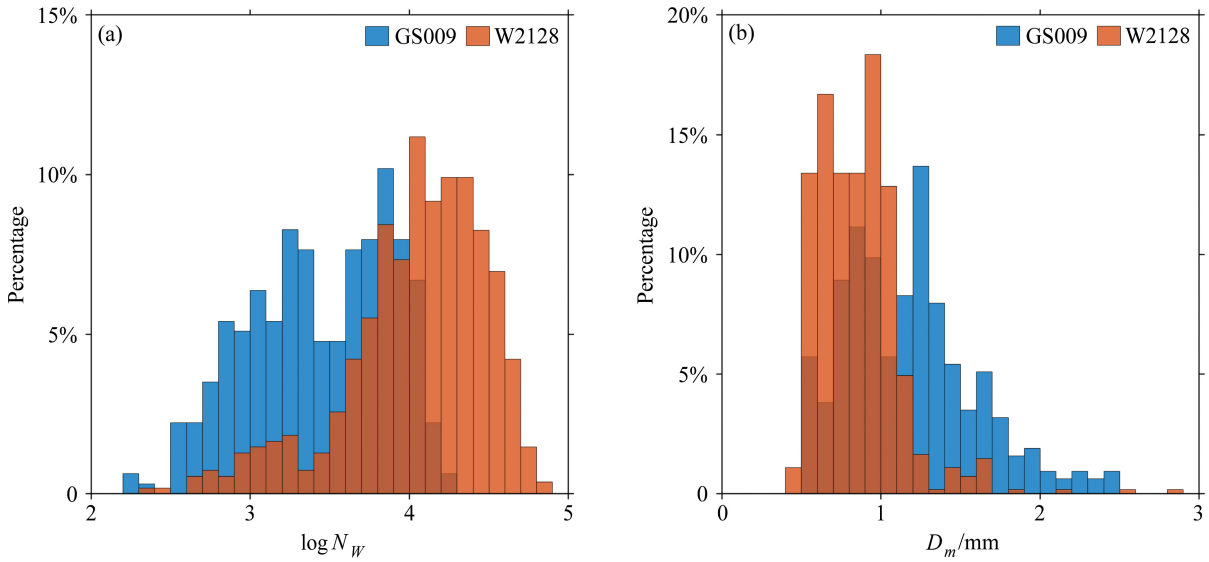

图 6　2020 年 5 月 5～6 日降水过程期间 GS009 和 W2128 站点 logN_w、D_m 的分布情况

Fig. 6　Histograms of logN_w and D_m of site GS009 and W2128 during May 5–6, 2020

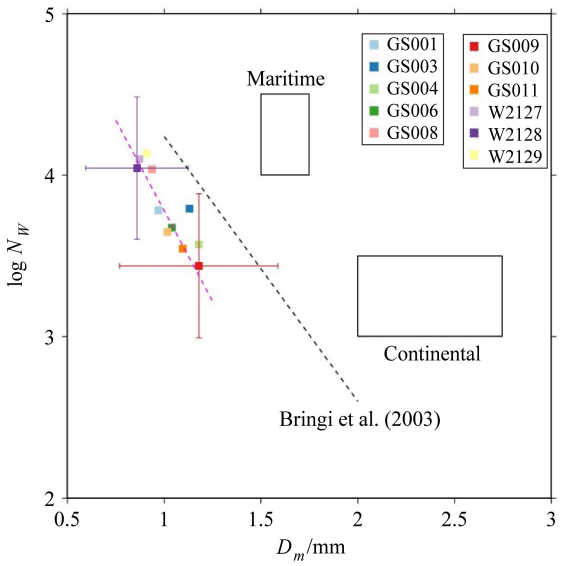

图 7　2020 年 5 月 5～6 日降水过程期间，观测区域内站点平均 logN_w 和 D_m 的分布情况。GS009 和 W2128 站点对应点的水平、垂直线分别为 D_m、logN_w 的标准差；洋红色虚线为此次所有站点平均 D_m 与 logN_w 的线性拟合曲线，拟合结果为logN_w = −2.242D_m+6.021；图中黑色斜虚线为 Bringi et al.（2003）观测确定的层状云平均 logN_w 和 D_m 分布位置；上下灰色方框区域分别为海洋性和大陆性对流云的平均 logN_w 和 D_m 分布位置

Fig. 7　Scatter plot of logN_w and D_m of all sites during May 5–6, 2020. The standard deviations (±σ) of logN_w and D_m for GS009 and W2128 are also presented by solid lines, and the liner fitting result of all sites is shown by the magenta dotted line. The outlined rectangles correspond to the maritime and continental convective clusters reported by Bringi et al. (2003), and the dotted line is for their stratiform cases

但在坐标系中更偏左侧，即祁连山地区通常有着较低的 D_m 和 N_w 值。

4.2　雨滴谱与降水强度拟合关系

为了进一步研究降水强度 R 对雨滴谱的参数 D_m、N_w 的影响，本文还对 D_m、N_w 与 R 进行了幂次方拟合，拟合公式分别为$D_m = aR^b$、$N_w = aR^b$，拟合结果如图 8。从 D_m 与 R 的拟合结果可以看出，在降水持续时间较长的几个站点中，海拔相对较高的 W2127（0.88）、W2128（0.89）、W2129（0.88）的拟合参数 a 明显要小于 GS001（1.00）、GS009（1.19）、GS010（1.08），其它海拔较高的站点如 GS008 也有这偏小的趋势（0.91），整体而言，拟合结果的参数 a 随海拔的增加有着明显的降低趋势。这主要是由于在降水强度较低时，低海拔地区通常有更宽的滴谱，D_m 更大，因此拟合的a也偏大。而幂次方拟合参数b随海拔高度的变化情况与 a 类似，都呈随高度增加降低的趋势，海拔较高的站点如 GS008（0.13）、GS011（0.13）、W2127（0.13）、W2129（0.12）都低于其他站点，这是由于高海拔战站点 D_m 随降水强度增大的趋势并不明显（图 4b、图 5b）。

对于 N_w 和 R 的关系而言，整体上随着海拔高度的增加，拟合参数 a 显著提高，11 个站点中，GS008、W2127、W2128、W2129 四个海拔较高站点的拟合参数 a 都超过了 10000，这主要是由于高海拔地区在降水强度较低时就有着更高的 N_w。另

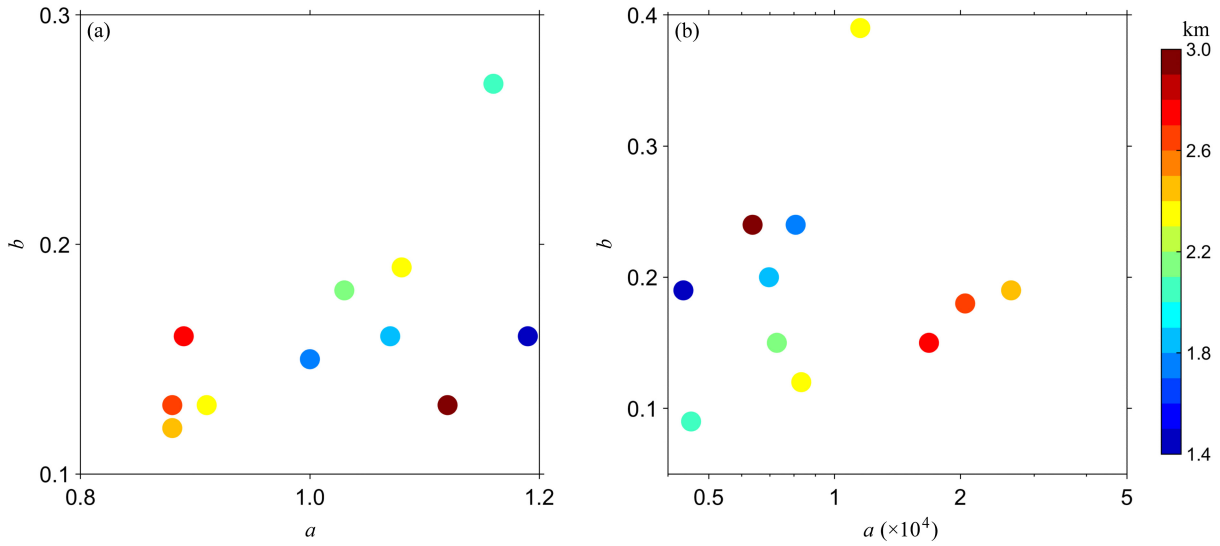

图 8 （a）D_m、（b）N_w 与 R 的幂次拟合结果，拟合公式分别为$D_m = aR^b$和$N_w = aR^b$，其中a、b分别为拟合结果的两个参数。图中颜色表示各个站点的海拔高度

Fig. 8 Power fitting results of D_mR (a) and N_wR (b) using the equations of $D_m = aR^b$ and $N_w = aR^b$. The colors of each site indicate the altitude above the sea level

一方面，拟合参数 b 随海拔高度的变化并不明显，这主要是对所有站点，N_w 都会随着降水强度的增强而增大。对比其他研究，此次祁连山地区降水过程 D_m、N_w 与 R 的拟合参数与其他地区都有着明显的区别，这与祁连山地区平均海拔高度较高，地形复杂关系密切。

为了更进一步地研究不同海拔高度对云微物理过程的影响，我们选取 GS009 和 W2128 两个站点进行了更深入的讨论，图 9 为两个站点 D_m、N_w 与 R 的分布及拟合结果。整体而言，在同等降水强度下，低海拔站点 GS009 相比于高海拔站点 W2128 有着更大的 D_m 和更小的 N_w，GS009 站点在 0.2～1 mm h^{-1} 之间有着明显的不连续现象。在 D_m 较小（＜1 mm）时，GS009 的降水强度R要明显低于 W2128，结合两个站点的高度差异，这可能是由小雨滴在降落过程中的蒸发过程所导致。此外，GS009 站点 D_m、N_w 与 R 的分布在 R>1 mm h^{-1} 和＜0.2 mm h^{-1} 时有着明显的区别，这与 Chen et al.（2013）研究中梅雨对流性降水降水强度较大（＞90 mm h^{-1}）时的情况类似，在 Chen et al.（2013）的研究中当降水强度较大时，雨滴的破碎和碰并过程达到平衡从而使得 D_m 随 R 的变化趋势放缓，而本文的研究中 GS009 降水强度较小，因此具体的形成原因需要更多的观测个例进行验证和研究。

表 4 11 个站点平均雨滴谱 Gamma 分布与 M-P 分布的拟合结果

Table 4 Fitting results of the Gamma distribution and M-P distribution for 11 sites

站号	Gamma分布			M-P分布	
	N_0/	μ	Λ/mm^{-1}	N_0/m^{-3} mm^{-1}	Λ/mm^{-1}
GS001	60347	2.81	5.48	5448	3.26
GS003	8367	0.95	3.52	4567	2.92
GS004	280	−1.85	1.25	2088	2.75
GS006	21837	1.76	5.07	4330	3.60
GS008	281730	3.05	6.96	11065	4.00
GS009	3101	0.54	3.07	2339	2.77
GS010	1927	−0.30	2.86	3049	3.21
GS011	871	−0.90	1.88	2038	2.56
W2127	98851	2.09	5.93	11459	3.97
W2128	3658	−0.44	3.22	8540	3.92
W2129	42120	1.17	4.93	14262	3.94

为了研究此次降水过程的滴谱分布特征，我们对所有站点的平均雨滴谱分别针对 Gamma 分布和 M-P 分布进行了拟合，拟合结果如表 4，就 Gamma 分布而言，对比其他地区（Chen et al., 2011, 2013, 2017; Ji et al., 2019），祁连山地区此次层状云降水过程的拟合结果最突出的特征是三个参数的数值明显偏大，只有在低海拔的 GS009 站点，Gamma 分

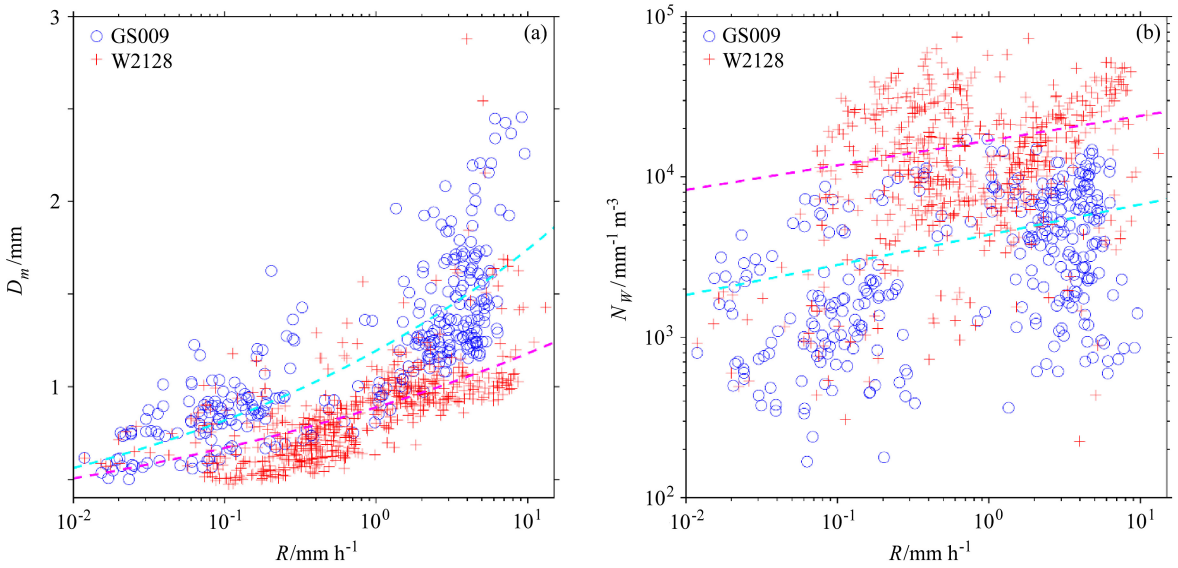

图 9　（a）D_m、（b）N_w 与 R 的分布及拟合结果。图中蓝色‘○’与红色‘+’分别表示 GS009 与 W2128 站点的观测结果，蓝绿色和洋红色虚线分别为两个站点的拟合结果曲线

Fig. 9　Observations (scatter plots) and fitting results (dotted lines) of D_m–R and N_w–R for GS009 (blue circles for observations, dotted cyan line for fitting result) and W2128 (red crosses for observations, dotted red line for fitting result), respectively

布的拟合情况才与一些降水强度较低或层状云降水的拟合结果较为接近（Chen et al., 2017），其它站点如 W2127、W2128、W2129 拟合结果的 N_0 相比于其他观测有着几个数量级的差异。另一方面，M-P 分布的拟合结果 N_0、Λ 都有着明显的随高度增加的趋势，祁连山地区 M-P 分布拟合的 N_0 也要明显高于其他地区（陈宝君等, 1998）。

为了分析海拔高度对雨滴谱分布特征的影响，我们对 GS009 与 W2128 两个站点的平均滴谱及其 Gamma、M-P 分布的拟合情况进行了分析，分析结果如图 10。从两个站点的平均谱对比来看，海拔高度较高的 W2128 站点的滴谱在小粒子端（D＜1 mm）有着更高的浓度，而在 1～4 mm 之间，GS009 则有着较高的浓度，主要的原因可能是由于 GS009 海拔高度较低，碰并增长过程消耗了小雨滴，并增加了大雨滴的浓度，另一方面，W2128 位于云内，在饱和状态下雨滴缺少了蒸发作用，因此小雨滴浓度较高。从拟合结果来看，GS009 两种分布的拟合效果都相对较好，但在都无法较好的描述较小（＜0.5 mm）的雨滴，Gamma 分布比 M-P 分布在小雨滴端拟合更好。对于 W2128 站点，M-P 分布在＜3 mm 粒子段拟合相对较好，而在大粒子端有着显著的低估，而 Gamma 分布在 1～3 mm 段有一定的高估，而在＞3 mm 有一定的低估，总体而言，Gamma 分布拟合效果更好。W2128 站点与 GS009 拟合结果的差异很可能是由于 W2128 站点位于云内，其微物理过程（如蒸发、碰并）与常规雨滴谱的观测并不相同导致。

表 5　11 个站点 $\mu-\Lambda$ 关系拟合结果

Table 5　Fitting results for the $\mu-\Lambda$ relationship of 11 sites

站号	$\Lambda=a\mu^2+b\mu+c$		
	a	b	c
GS001	0.0057	1.565	−0.028
GS003	0.0105	1.037	2.070
GS004	0.0138	1.021	2.796
GS006	0.0110	1.171	2.491
GS008	−0.0088	1.543	1.910
GS009	0.0023	1.327	1.237
GS010	0.0035	1.548	1.923
GS011	0.0060	1.169	2.418
W2127	0.0177	1.279	2.329
W2128	0.0268	1.179	2.855
W2129	0.0268	1.054	2.897

Zhang et al.（2003）曾指出，Gamma 分布拟合参数 μ–Λ 关系会随着气候特征和降水类型的变化而变化，为了进一步研究祁连山地区此次层状云降水的雨滴谱特征，本文对所有站点的滴谱进行了 Gamma 分布拟合，并对拟合结果的 μ–Λ 关系进行了拟合，拟合结果如表 5。可以看出，祁连山地

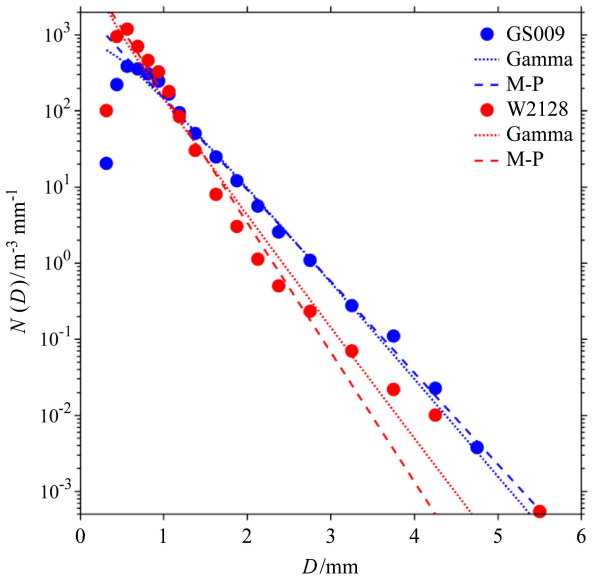

图 10 GS009 与 W2128 站点此次天气过程的平均雨滴谱（实心圆点）及由 Gamma 分布（点线）、M-P 分布（虚线）的拟合结果

Fig. 10 Average raindrop size distributions (solid circles), results of Gamma distribution (dotted lines), and M-P distribution (dash lines) for site GS009 (blue) and W2128 (red)

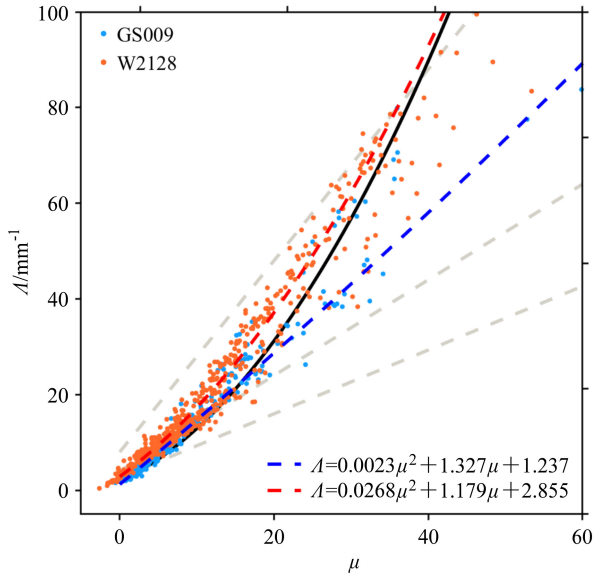

图 11 GS009 与 W2128 两个站点 μ–Λ 分布（散点）与拟合（虚线）情况，其中 GS009 站点为淡蓝色点与蓝绿色虚线，W2128 站点为橙色点与洋红色虚线。图中黑色实线为由$\Lambda = 0.0365\mu^2 + 0.735\mu + 1.935$确定的 μ–Λ 关系；灰色虚线为由$\Lambda D_m = 4 + \mu$确定的 μ–Λ 关系（Ulbrich, 1983），从上到下依次为$D_m = 0.5$ mm、1 mm 和 1.5 mm

Fig. 11 Scatter plots and fitting results of the μ–Λ relationship of GS009 (blue dots and cyan line) and W2128 (orange dots and magenta line). The solid black line denotes the μ–Λ relationship of $\Lambda = 0.0365\mu^2 + 0.735\mu + 1.935$ and the gray dotted lines represent the relationships determined by the equation of $\Lambda D_m = 4 + \mu$ when $D_m = 0.5$ mm, 1 mm, and 1.5 mm (Ulbrich, 1983)

区的 μ–Λ 拟合结果与 Zhang et al.（2003）建议的经验公式$\Lambda = 0.0365\mu^2 + 0.735\mu + 1.935$在模拟结果系数上有一定的差异，与国内的很多观测拟合结果也有着一定的差异（Chen et al., 2011, 2013, 2017），但 W2127、W2128 和 W2129 三个站点的拟合结果与 Chen et al.（2017）对青藏高原夏季雨滴谱 μ–Λ 关系的拟合结果较为接近。图 11 为 GS009 与 W2128 两个站点 μ–Λ 的分布及拟合情况，可以看出，W2128 的拟合结果比 GS009 更接近 Zhang et al.（2003）的拟合结果，主要是由于 GS009 有更多的大雨滴，而大雨滴会影响 μ–Λ 的分布情况（Zhang et al., 2003; Chen et al., 2017），但在 Λ 较小（<40 mm^{-1}）时，拟合结果相差不大。

4.3 $Z-R$关系拟合与比较

经验 Z–R 关系在雷达定量化估算降水过程中有重要的作用，而由$Z = aR^b$确定的拟合参数a和b会随地区区、大气状况、降水类型发生变化（Rosenfeld and Ulbrich, 2003）。表 6 为此次降水过程所有站点 Z–R 关系的拟合结果，在拟合过程中，为了减少误差，只对观测到粒子数量大于 100 的时刻进行了拟合。从表 6 可以看出，除 GS006 和 GS009 两个海拔高度较低（1817.0 m 和 1453.7 m）的站点外，其他站点的拟合参数a要明显偏小、参数b明显偏大，而 GS009 的拟合结果与 Chen et al.（2013）梅雨期间对流性降水的拟合结果（$Z = 368R^{1.21}$）类似。图 12 位 GS009 与 W2128 两个站点的 Z–R 分布及拟合情况，大陆性层状云

表 6 11 个站点$Z-R$关系拟合结果

Table 6 Fitting results of $Z-R$ relationship for 11 sites

站号	$Z = aR^b$	
	a	b
GS001	189	1.26
GS003	178	1.56
GS004	168	2.55
GS006	286	1.03
GS008	186	1.08
GS009	366	1.19
GS010	110	2.14
GS011	157	1.63
W2127	101	1.46
W2128	132	1.37
W2129	88	1.43

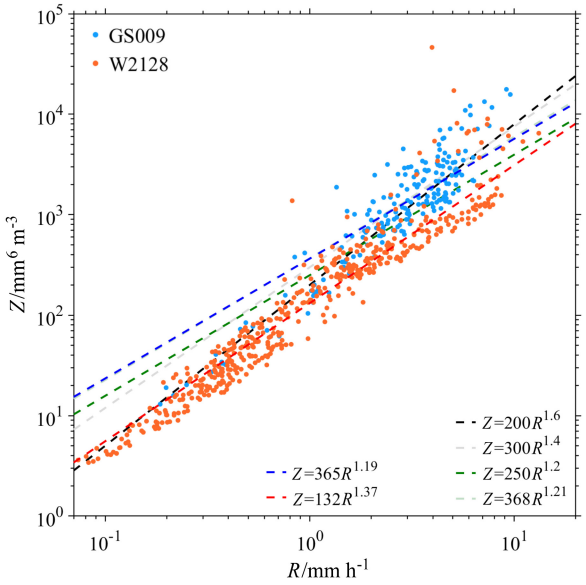

图 12　GS009 与 W2128 两个站点 Z–R 关系分布（散点）与拟合（虚线）情况，其中 GS009 站点为淡蓝色点与蓝绿色虚线，W2128 站点为橙色点与洋红色虚线；图中红、蓝、绿、黄色虚线分别代表大陆性层状云（Marshall and Palmer, 1948; $Z = 200R^{1.6}$）、业务天气雷达中应用（Fulton et al., 1998; $Z = 300R^{1.4}$）、热带天气系统（Rosenfeld et al., 1993; $Z = 250R^{1.2}$）以及梅雨期间对流云（Chen et al., 2013; $Z = 368R^{1.21}$）对应的 Z–R 关系

Fig. 12　Scatter plots and fitting results for Z–R relationship of site GS009 (blue dots and cyan line) and W2128 (orange dots and magenta line). The red, blue, green, and yellow lines denote the Z–R relationships for continental stratiform precipitation (Marshall and Palmer, 1948; $Z = 200R^{1.6}$), application in the operational synoptic radar system (Fulton et al., 1998; $Z = 300R^{1.4}$), tropical synoptic weather system (Rosenfeld et al., 1993; $Z = 250R^{1.2}$), and convective precipitation during the Meiyu season (Chen et al., 2013; $Z = 368R^{1.21}$), respectively

（Marshall and Palmer, 1948; $Z = 200R^{1.6}$）、业务天气雷达中应用（Fulton et al., 1998; $Z = 300R^{1.4}$）、热带天气系统（Rosenfeld et al., 1993; $Z = 250R^{1.2}$）以及梅雨期间对流云（Chen et al., 2013; $Z = 368R^{1.21}$）也作为对比在图中予以显示。从图中可以看出，两个站点最显著的区别在于当 R 在 0.1～1 mm h^{-1} 之间时，GS009 的反射率因子要明显高于 W2128，这主要是由于 W2128 站点粒子谱宽较窄，D_m偏小所导致。另一方面，对比业务雷达中常用的$Z = 300R^{1.4}$关系，对于 GS009 和 W2128 站点的降水在实际应用中，当降水强度较低时，对降水的估计都会明显偏高，而且随着海拔的升高，W2128 站点的高估会更为明显。因此，在实际应用中，在利用雷达数据进行降水定量估算时，对于祁连山地区高度较高的区域，其 Z–R 关系也应该进行相应的调整，而更准确、具有代表性的 Z–R 关系需要进一步大量的数据进行深入的讨论。

5　结果

利用 2020 年 5 月 5～6 日期间祁连山地区 11 个雨滴谱的观测点数据，从天气形势、降水演变过程、滴谱分布及其参数关系、Z–R 关系等方面研究了祁连山地区此次云降水过程的雨滴谱分布和地形影响特征，主要结论如下：

（1）此次降水过程主要受短波槽影响，祁连山中西部地区降水时间长、降水总量较大，东南部地区降水持续时间较短，由于祁连山地形的影响，研究区内不同海拔高度降水演变特征有着明显的区别。

（2）整体而言，此次降水过程各个站点的等效直径偏小，且随着海拔高度的增加，雨滴谱的数浓度 N_T 和等效直径 D_m 随海拔高度升高分别呈增加和减小的趋势。低海拔站点的 logN_w 和 D_m 分布有着明显的层状云降水特征，而较高海拔高度的站点，由于距离云底较近或位于云内，雨滴碰并过程不充分使得 D_m 较小、logN_w 偏大。综合所有站点的拟合结果，祁连山地区的降水与 Bringi et al.（2003）层状云的结果类似，但有着较低的 D_m 和 N_w。

（3）D_m、N_w 与 R 的拟合系数参数 a 都随高度升高而增加；D_m 与 R 的拟合关系，指数参数 b 随高度有显著降低的趋势，表明降水强度 R 的增加对 D_m 的影响并不明显；N_w 与 R 的拟合指数参数 b 随高度变化趋势并不明显。由于小雨滴在降落中的蒸发过程，祁连山地区海拔较低的站点在 D_m 较小时有着较大的降水强度。

（4）祁连山地区高海拔站点雨滴谱有着更高的小雨滴（＜1 mm）浓度和较低的大雨滴浓度（1～4 mm）；M-P 分布和 Gamma 分布对低海拔高度站点的拟合效果较好，两种分布对小雨滴都有高估；对高海拔站点，Gamma 分布在 1～3 mm 段有一定的高估，而在＞3 mm 有一定的低估，而 M-P 分布则对小雨滴和大雨滴分别有着明显的高估和低估，总体而言，Gamma 分布拟合效果更好。祁连山地区雨滴谱的 μ–Λ 关系分布在 Λ 较小（＜40 mm^{-1}）时与其他地区差异较小，高海拔站点由于有更多小

雨滴，μ–Λ 关系拟合结果更接近 Zhang et al.（2003）的结果。

（5）对拟合的 Z–R 关系，海拔高度较大的站点拟合参数a明显偏小，不同站点的拟合结果相差较大，高海拔站点有更多的时刻降水强度较低（R＜1 mm h^{-1}），同样降水强度下由于粒子谱宽较窄、等效直径较小，高海拔山区站点的反射率因子要显著低于低海拔走廊地区。

致谢 十分感谢中国气象科学研究院陈宝君研究员和中国科学院大气物理研究所郭学良研究员在研究过程中提供的指导和帮助以及审稿专家提供的意见和建议。

参考文献（References）

Atlas D, Srivastava R C, Sekhon R S. 1973. Doppler radar characteristics of precipitation at vertical incidence [J]. Rev. Geophys., 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]. J. Atmos. Sci., 60(2): 354−365. doi:10.1175/1520-0469(2003)060<0354:RSDIDC>2.0.CO;2

Calheiros A J P, Machado L A T. 2014. Cloud and rain liquid water statistics in the CHUVA campaign [J]. Atmospheric Research, 144: 126−140. doi:10.1016/j.atmosres.2014.03.006

Cao Q, Zhang G F, Brandes E, et al. 2008. Analysis of video disdrometer and polarimetric radar data to characterize rain microphysics in Oklahoma [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 47(8): 2238−2255. doi:10.1175/2008JAMC1732.1

Chakravarty K, Raj P E. 2013. Raindrop size distributions and their association with characteristics of clouds and precipitation during monsoon and post-monsoon periods over a tropical Indian station [J]. Atmospheric Research, 124: 181−189. doi:10.1016/j.atmosres.2013.01.005

Chang W Y, Wang TC 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]. J. Atmos. Oceanic Technol., 26(10): 1973−1993. doi:10.1175/2009JTECHA1236.1

陈宝君, 李子华, 刘吉成, 等. 1998. 三类降水云雨滴谱分布模式 [J]. 气象学报, 56(4): 506−512. Chen Baojun, Li Zihua, Liu Jicheng, et al. 1998. Model of raindrop size distribution in three types of precipitation [J]. Acta Meteorologica Sinica, 56(4): 506−512. doi:10.11676/qxxb1998.046

Chen B J, Hu W, Pu J P. 2011. Characteristics of the raindrop size distribution for freezing precipitation observed in southern China [J]. J. Geophys. Res. :Atmos., 116: D06201. doi:10.1029/2010JD015305

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

Chen B J, Hu Z Q, Liu L P, et al. 2017. Raindrop size distribution measurements at 4, 500 m on the Tibetan Plateau during TIPEX-III [J]. J. Geophys. Res.: Atmos., 122(20): 11092−11106. doi:10.1002/2017JD027233

陈磊, 陈宝君, 杨军, 等. 2013. 2009–2010 年梅雨锋暴雨雨滴谱特征 [J]. 大气科学学报, 36(4): 481−488. Chen Lei, Chen Baojun, Yang Jun, et al. 2013. Characteristics of raindrop size distribution of rainstorm on Meiyu front during 2009–2010 [J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 36(4): 481−488. doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2013.04.011

陈少勇, 徐科展, 董安祥, 等. 2010. 祁连山积雨云的时空分布及其环流特征 [J]. 干旱区研究, 27(1): 114−120. Chen Shaoyong, Xu Kezhan, Dong Anxiang, et al. 2010. Analysis on spatial distribution of cumulonimbus and its circulation characteristics over the Qilian Mountains [J]. Arid Zone Research, 27(1): 114−120. doi:10.13866/j.azr.2010.01.005

陈添宇, 郑国光, 陈跃, 等. 2010. 祁连山夏季西南气流背景下地形云形成和演化的观测研究 [J]. 高原气象, 29(1): 152−163. Chen Tianyu, Zheng Guoguang, Chen Yue, et al. 2010. Observational experiment on generation and development of summer orographic cloud during the southwest air current pattern in Qilian Mountain [J]. Plateau Meteorology, 29(1): 152−163.

丁晓东, 黄建平, 李积明, 等. 2012. 基于主动卫星遥感研究西北地区云层垂直结构特征及其对人工增雨的影响 [J]. 干旱气象, 30(4): 529−538. Ding Xiaodong, Huang Jianping, Li Jiming, et al. 2012. Study on cloud vertical structure feature over Northwest China based on active satellite remote sensing and its influence on precipitation enhancement [J]. Journal of Arid Meteorology, 30(4): 529−538.

房彬, 班显秀, 郭学良, 等. 2010. 雷达—雨量计—粒子激光探测仪联合估算降水量 [J]. 大气科学, 2010, 34(3): 513−519. Fang Bin, Ban Xianxiu, Guo Xueliang, et al. 2010. Area rainfall estimation by using radar, raingauge, and particle laser-based optical measurement instrument [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2010, 34(3): 513−519. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2010.03.05

Friedrich K, Higgins S, Masters F J, et al. 2013. Articulating and stationary PARSIVEL disdrometer measurements in conditions with strong winds and heavy rainfall [J]. J. Atmos. Oceanic Technol., 30(9): 2063−2080. doi:10.1175/JTECH-D-12-00254.1

傅云飞, 曹爱琴, 李天奕, 等. 2012. 星载测雨雷达探测的夏季亚洲对流与层云降水雨顶高度气候特征 [J]. 气象学报, 70(3): 436−451. Fu Yunfei, Cao Aiqin, Li Tianyi, et al. 2012. Climatic characteristics of the storm top altitude for the convective and stratiform precipitation in summer Asia based on measurements of the TRMM Precipitation Radar [J]. Acta Meteorologica Sinica, 70(3): 436−451. doi:10.11676/qxxb2012.037

Fulton R A, Breidenbach J P, Seo D J, et al. 1998. The WSR-88D rainfall algorithm [J]. Wea. Forecasting, 13(2): 377−395. doi:10.1175/1520-0434(1998)013<0377:TWRA>2.0.CO;2

宫福久, 刘吉成, 李子华. 1997. 三类降水云雨滴谱特征研究 [J]. 大气科学, 21(5): 607−614. Gong Fujiu, Liu Jicheng, Li Zihua. 1997. Study of the raindrop size distributions for three types of precipitation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 21(5): 607−614.

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1997.05.12

Ji L, Chen H N, Li L, et al. 2019. Raindrop size distributions and rain characteristics observed by a PARSIVEL disdrometer in Beijing, northern China [J]. Remote Sensing, 11(12): 1479. doi:10.3390/rs11121479

贾星灿, 牛生杰. 2008. 空中、地面雨滴谱特征的观测分析 [J]. 南京气象学院学报, 31(6): 865−870. Jia Xingcan, Niu Shengjie. 2008. Observational analysis of raindrop size distributions measured at surface and cloud [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 31(6): 865−870. doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2008.06.015

金祺, 袁野, 刘慧娟, 等. 2015. 江淮之间夏季雨滴谱特征分析 [J]. 气象学报, 73(4): 778−788. Jin Qi, Yuan Ye, Liu Huijuan, et al. 2015. Analysis of microphysical characteristics of the raindrop spectrum over the area between the Yangtze River and the Huaihe River during summer [J]. Acta Meteorologica Sinica, 73(4): 778−788. doi:10.11676/qxxb2015.036

李典, 白爱娟, 薛羽君, 等. 2014. 青藏高原和四川盆地夏季对流性降水特征的对比分析 [J]. 气象, 40(3): 280−289. Li Dian, Bai Aijuan, Xue Yujun, et al. 2014. Comparative analysis on characteristics of summer convective precipitation over Tibetan Plateau and Sichuan Basin [J]. Meteorological Monthly, 40(3): 280−289. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2014.03.003

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 Hui, Yin Yan, Shan Yunpeng, 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. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1705.16291

李娟, 游来光, 胡志晋, 等. 2006. 黄河上游玛曲地区雨滴谱特征的观测研究 [J]. 高原气象, 25(5): 942−949. Li Juan, You Laiguang, Hu Zhijin, et al. 2006. Analysis on raindrop-size distribution characteristics of Maqu region in upper reach of Yellow River [J]. Plateau Meteorology, 25(5): 942−949. doi:10.3321/j.issn:1000-0534.2006.05.023

柳臣中, 周筠珺, 谷娟, 等. 2015. 成都地区雨滴谱特征 [J]. 应用气象学报, 26(1): 112−121. Liu Chenzhong, Zhou Yunjun, Gu Juan, et al. 2015. Characteristics of raindrop size distribution in Chengdu [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 26(1): 112−121. doi:10.11898/1001-7313.20150112

Marshall J S, Palmer W M K. 1948. The distribution of raindrops with size [J]. J. Atmos. Sci., 5(4): 165−166. doi:10.1175/1520-0469(1948)005<0165:TDORWS>2.0.CO;2

牛生杰, 安夏兰, 桑建人. 2002. 不同天气系统宁夏夏季降雨谱分布参量特征的观测研究 [J]. 高原气象, 21(1): 37−44. Niu Shengji, An Xialan, Sang Jianren. 2002. Observational research on physical feature of summer rain dropsize distribution under synoptic systems in Ningxia [J]. Plateau Meteorology, 21(1): 37−44. doi:10.3321/j.issn:1000-0534.2002.01.007

Niu S J, Jia X C, Sang J R, et al. 2010. Distributions of raindrop sizes and fall velocities in a semiarid plateau climate: Convective versus stratiform rains [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 49(4): 632−645. doi:10.1175/2009JAMC2208.1

潘晓, 傅云飞. 2015. 夏季青藏高原深厚及浅薄降水云气候特征分析 [J]. 高原气象, 34(5): 1191−1203. Pan Xiao, Fu Yunfei. 2015. Analysis on climatological characteristics of deep and shallow precipitation cloud in summer over Qinghai–Xizang Plateau [J]. Plateau Meteorology, 34(5): 1191−1203. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2014.00112

Rosenfeld D, Wolff D B, Atlas D. 1993. General probability-matched relations between radar reflectivity and rain rate [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 32(1): 50−72. doi:10.1175/1520-0450(1993)032<0050:GPMRBR>2.0.CO;2

Rosenfeld D, Ulbrich C W. 2003. Cloud microphysical properties, processes, and rainfall estimation opportunities [J]. Meteor. Monogr., 30(52): 237−258. doi:10.1175/0065-9401(2003)030<0237:CMPPAR>2.0.CO;2

阮征, 葛润生, 吴志根. 2002. 风廓线仪探测降水云体结构方法的研究 [J]. 应用气象学报, 13(3): 330−338. Ruan Zheng, Ge Runsheng, Wu Zhigen. 2002. Method for detecting rain cloud structure with wind profilers [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 13(3): 330−338. doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2002.03.008

邵元亭, 刘奇俊, 荆志娟. 2013. 祁连山夏季地形云和降水宏微观结构的数值模拟 [J]. 干旱气象, 31(1): 18−23. Shao Yuanting, Liu Qijun, Jing Zhijuan. 2013. Numerical simulation on macrophysics and microphysics structure of the orographic cloud and precipitation in summer of the Qilian Mountains [J]. Journal of Arid Meteorology, 31(1): 18−23. doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2013)-01-0018

石光普, 石圆圆, 郭玉珍, 等. 2012. 气候变暖背景下祁连山区秋季层状云变化特征 [J]. 地理科学进展, 31(5): 609−616. Shi Guangpu, Shi Yuanyuan, Guo Yuzhen, et al. 2012. The changes of autumn stratiform clouds in the Qilian Mts. region under the background of global warming [J]. Progress in Geography, 31(5): 609−616. doi:10.11820/dlkxjz.2012.05.009

史晋森, 张武, 陈添宇, 等. 2008. 2006 年夏季祁连山北坡雨滴谱特征 [J]. 兰州大学学报 (自然科学版), 44(4): 55−61. Shi Jinsen, Zhang Wu, Chen Tianyu, et al. 2008. Raindrop-size distribution characteristics of the northern face of Qilian Mountains in the summer of 2006 [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 44(4): 55−61. doi:10.3321/j.issn:0455-2059.2008.04.011

Ulbrich C W. 1983. Natural variations in the analytical form of the raindrop size distribution [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 22(10): 1764−1775. doi:10.1175/1520-0450(1983)022<1764:NVITAF>2.0.CO;2

许焕斌. 2012. 强对流云物理及其应用 [M]. 北京: 气象出版社. Xu Huanbin. 2012. The Physics of Severe Convective Storms and its Application (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press.

Yuter S E, Kingsmill D E, Nance L B, et al. 2006. Observations of precipitation size and fall speed characteristics within coexisting rain and wet snow [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 45(10): 1450−1464. doi:10.1175/JAM2406.1

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 information? [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic

Technology, 20(8): 1106−1119. doi:10.1175/1520-0426(2003)020<1106:TSRIOG>2.0.CO;2

张杰, 张强, 田文寿, 等. 2006. 祁连山区云光学特征的遥感反演与云水资源的分布特征分析 [J]. 冰川冻土, 28(5): 722−727. Zhang Jie, Zhang Qiang, Tian Wenshou, et al. 2006. Remote sensing retrieval and analysis of optical character of cloud in Qilian Mountains [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 28(5): 722−727. doi:10.3969/j.issn.1000-0240.2006.05.015

郑国光, 陈跃, 陈添宇, 等. 2011. 祁连山夏季地形云综合探测试验 [J]. 地球科学进展, 26(10): 1057−1070. Zheng Guoguang, Chen Yue, Chen Tianyu, et al. 2011. The observational study of summer orographic clouds structures of Qilian Mountains [J]. Advances in Earth Science, 26(10): 1057−1070. doi:10.11867/j.issn.1001-8166.2011.10.1057

周毓荃, 刘晓天, 周非非, 等. 2001. 河南干旱年地面雨滴谱特征 [J]. 应用气象学报, 12(Z1): 39−47. Zhou Yuquan, Liu Xiaotian, Zhou Feifei, et al. 2001. Characteristics of surface raindrop spectra in drought years in Henan Province [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 12(Z1): 39−47. doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2001.z1.006