

陈超,刘黎平,罗聪,等,2023.两种雨滴谱仪观测对比及对雷达降水估测精度影响研究[J].气象,49(10):1157-1170. Chen C, Liu L P, Luo C, et al, 2023. Comparison of two kinds of disdrometers and their influence on the accuracy of radar quantitative precipitation estimation[J]. Meteor Mon, 49(10):1157-1170(in Chinese).

两种雨滴谱仪观测对比及对雷达降水 估测精度影响研究*

陈 超^{1,2} 刘黎平² 罗 聪¹ 刘显通³ 张阿思¹

1 广东省气象台,广州 510640

2 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室,北京 100081

3 中国气象局广州热带海洋气象研究所,广州 510640

提 要: 利用广东龙门、新丰和佛冈布设的二维视频雨滴谱仪(2D-video-disdrometer, 2DVD)和 HY-P1000 激光雨滴谱仪观测资料,分析了相同地点和相同时间两类雨滴谱仪降水滴谱观测和降水反演精度的差异。根据收集的 2018 年和 2019 年的雨滴谱观测数据,拟合了双偏振雷达定量降水估测基本关系式,并应用于 S 波段双偏振雷达(CINRAD/SAD)定量降水估测(quantitative precipitation estimation, QPE)优化组合方案中。结果表明:较 HY-P1000 雨滴谱仪而言,2DVD 可观测到更多的 1 mm 以下的小粒子降水,但观测到的大于 3.5 mm 的雨滴数明显少于 HY-P1000 雨滴谱仪;对比由 2DVD 和 HY-P1000 观测数据计算得到的双偏振参数与 CINRAD-SAD 0.5°仰角观测得到的双偏振参数,发现参数间均存在一定的差别,其中差分反射率因子差别相对较大;此外,利用 2DVD 观测数据可整体提升双偏振雷达 QPE 精度,对中雨及以下量级精度提升尤为明显。

关键词: 雨滴谱仪,双偏振雷达,定量降水估测(QPE)

中图分类号: P412

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2023.032002

Comparison of Two Kinds of Disdrometers and Their Influence on the Accuracy of Radar Quantitative Precipitation Estimation

CHEN Chao^{1,2} LIU Liping² LUO Cong¹ LIU Xiantong³ ZHANG Asi¹

1 Guangdong Meteorological Observatory, Guangzhou 510640

2 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

3 Institute of Tropical and Marine Meteorology, CMA, Guangzhou 510640

Abstract: A laser optical disdrometer (HY-P1000) and a two-dimensional video disdrometer (2DVD) were used to measure the raindrop size distribution (DSD) at the Longmen, Xinfeng and Fogang weather stations in Guangdong Province. Differences between the DSD measured by HY-P1000 and 2DVD and the accuracy of precipitation retrieval in the same place and same time were analyzed. The fundamental equations used for quantitative precipitation estimation (QPE) algorithm were fitted by the disdrometer data collected during 2018 and 2019, and then the optimization rainfall algorithm (HCA-QPE) based on the equations above was applied to Guangzhou S-band dual polarization weather radar to improve the accuracy of QPE in

* 国家自然科学基金项目(41975138)、广东省自然科学基金项目(2022A1515011814、2020A1515010602)、雷达应用及强对流短时临近预警技术创新团队(GRMCTD202002)、广东省气象局科学技术研究项目(GRMC2020Z03)和灾害天气国家重点实验室开放课题(2020LASW-B02、2022LASW-B15)共同资助

2022 年 5 月 9 日收稿; 2023 年 7 月 18 日收修定稿

第一作者:陈超,主要从事强对流预报预警技术研究. E-mail:chenchao@gd121.cn

Guangdong. The results showed that the 2DVD is more sensitive to small rain drops (<1 mm) while the HY-P1000 can measure much more rain drops larger than 3.5 mm. The polarization parameters retrieved from two types of disdrometers are different from those observed by S-band dual-polarization radar at 0.5° elevation, and the difference of differential reflectivity was relatively large. What's more, using 2DVD observation data can improve the QPE accuracy of S-band dual polarization radar, especially for light to moderate rainfall.

Key words: disdrometer, dual polarization radar, quantitative precipitation estimation (QPE)

引 言

雨滴谱(drop size distribution, DSD)是指降水单位体积内,直径单位区间内的雨滴数量,其会因降水类型、地点和地形等因素的不同而出现不同的变化(Ulbrich, 1983; Bringi et al, 2003; 李慧等, 2018; 黄兴友等, 2019; 朱红芳等, 2019)。开展雨滴谱的观测研究对提高数值模式中降水的预报精确度和提升雷达定量降水估测(quantitative precipitation estimation, QPE)精度等方面有重要作用(Zhang et al, 2006; Wen et al, 2016)。

传统的雨滴谱测量方法主要有斑迹法、照相法和浸润法等(余东升等, 2011), 这些方法存在着测量精度低、实时性差、工作量大等缺点, 测量效果不理想。为改善传统雨滴谱测量手段普遍存在的问题, Löffler-Mang and Joss(2000)将光电测量技术引入对雨滴谱的观测工作中, 开发出可实时、自动测量雨滴谱的激光雨滴谱仪。如德国 OTT 公司的 Parsivel 激光雨滴谱仪和我国华云升达公司的 HY-P1000 降水现象仪均属于激光雨滴谱仪。激光雨滴谱仪有一组平行激光束和光电管阵列, 当有降水粒子穿越采样空间时将自动记录遮挡物的宽度, 同时通过计算粒子穿越采样空间的时间, 计算降水粒子的尺度和下落速度。由于只从一个方向对降水粒子进行扫描, 所以在光束方向上有降水粒子重叠时, 上述两种雨滴谱仪无法准确识别降水粒子的数量。另一种雨滴谱仪称为二维视频雨滴谱仪(2D-video-disdrometer, 2DVD)(Kruger and Krajewski, 2002), 如德国莱比信公司生产的 2DVD, 其采用两个有一定高度差的高速摄像头, 从两个相互垂直的方向对降水粒子进行扫描, 通过雨滴在两个垂直方向上的平面投影图像反演出雨滴的等效直径、降落末速度。由于同时从两个方向对降水粒子进行扫描, 可对重叠降水粒子进行有效识别, 从而可相对准确识别降水

粒子的个数。

国内外已经有很多针对激光雨滴谱仪和 2DVD 的数据分析及应用研究(王俊等, 2016; Wu and Liu, 2017; Zhang et al, 2006; Raupach and Berne, 2015; Liu et al, 2019)。针对不同雨滴谱仪对降水雨滴谱的对比观测同样进行了广泛的研究(Campos and Zawadzki, 2000; Tokay et al, 2001; 2014)。Tokay et al(2014)研究结果表明, 即便是同为激光雨滴谱仪的观测结果也会有差别; 此外, 雨滴谱仪观测参数反演得到的偏振量之间也会有明显区别(Brandes et al, 2003); Campos and Zawadzki(2000)的研究结果表明不同仪器测量的差异甚至比不同气候特点的雨滴谱差异还要大。在激光雨滴谱仪和 2DVD 观测对比研究方面, Thurai et al(2011)通过观测分析表明当降水强度小于 $20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 时, 两种仪器的观测结果比较一致, 随着降水强度的增大, 特别是当降水强度大于 $30 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 时, 两种仪器的观测一致性变差; Thurai et al(2017)的观测结果表明当雨滴直径大于 0.7 mm 时, 2DVD 的精确度更好; Park et al(2017)对第二代 Parsivel 激光雨滴谱仪和 2DVD 进行了对比研究, 结果表明当降水强度小于 $10 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 和雨滴直径在 0.6~4.0 mm 时, 两者观测一致性较好, 而雨滴直径大于 4.0 mm 或者降水强度大于 $20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 时, 观测一致性较差; Wen et al(2017)的研究结果表明, 2DVD 可提供最好的雨滴谱观测结果; Liu et al(2019)的研究结果也表明仅在雨滴直径介于 0.8~3.25 mm 时, 这两类仪器的观测一致性才比较理想。以上研究均表明比对不同雨滴谱观测仪器的研究是很有必要的, 但是上述研究大多针对 Parsivel 激光雨滴谱仪间或者是与 2DVD 之间的对比研究, 没有针对国内业务化的 HY-P1000 和 2DVD 之间的对比观测研究。

为满足华南暴雨研究需求, 2017 年广东完成了 6 部 2DVD 的布设工作。因预报预警业务工作需求, 广东省 86 个国家基准站均布设了 HY-P1000 雨

滴谱仪并于 2018 年 1 月实现业务运行。与 2DVD 相比, HY-P1000 雨滴谱仪在小雨滴时分辨率更高, 可测粒径范围更广。此外, 灾害天气频发的广东省为了提高临近预报预警能力, 已于 2019 年完成了全省 12 部 S 波段双偏振雷达(CINRAD/SAD)的升级或建造工作。过去基于双偏振雷达和 Parsivel 激光雨滴谱仪开展了 QPE 方面的技术研究(Zhang et al, 2018; Chen et al, 2020), 而针对 HY-P1000 雨滴谱仪只是进行了观测资料的评估(杜传耀等, 2019)。Liu et al(2018)对布设在广东的 2DVD 雨滴谱仪器观测资料开展了一些应用研究, 但是与 HY-P1000 的观测对比研究尚未开展。此外, 由于双偏振雷达 QPE 精度依赖于雨滴谱的观测结果(汪

舵等, 2017; Chen et al, 2017; Zhang et al, 2018; 陈超等, 2019), 这两种不同雨滴谱仪观测结果对双偏振雷达 QPE 精度影响也需要进一步研究, 该研究对于提升降水估测精度和强降水预报预警有重要意义。

1 研究资料

1.1 雨滴谱资料

本文使用的雨滴谱仪分别是我国华云升达公司的 HY-P1000 降水现象仪和德国莱比信公司的 2DVD。表 1 给出了两类雨滴谱仪的主要技术参数。

HY-P1000 每个等级降水粒子平均速度和平均

表 1 两类雨滴谱仪器主要技术参数

Table 1 Main specifications of the HY-P1000 and 2DVD disdrometers

参数类型	要素	性能指标	
		HY-P1000	2DVD
电气参数	电源	10.5~15 VDC 输入	100~240 VDC 输入
传感器参数	类型	激光发射源	激光发射源
	测量区域/cm ²	54	100
专业参数	粒径/mm	0.06~24.5	0.1~8.1
	时间间隔/s	60	60
	雨滴粒子分级	32×32	41×41
	速度/(m·s ⁻¹)	0.05~20.8	—
	降水强度/(mm·h ⁻¹)	0.001~999.999	—
	雷达反射率/dBz	(-9.9~99.0)±20%	—

尺寸见 Chen et al(2023)。对于 2DVD, 其观测的粒子直径范围为 0.1~8.1 mm, 间隔为 0.2 mm, 观测粒子的速度满足 Brandes et al(2002)提出的粒子末速度模型, 计算公式如下:

$$V(D) = -0.1021 + 4.932D - 0.9551D^2 + 0.07934D^3 - 0.002362D^4 \quad (1)$$

式中: D 为雨滴直径(单位: mm), $V(D)$ 为该直径对应的末速度(单位: $m \cdot s^{-1}$)。

2018 年 1 月起广东省共有 86 部 HY-P1000 投入业务运行, 2017 年完成布设的 6 部 2DVD 也正常运行。惠州龙门、韶关新丰和清远佛冈的观测站内同时布设这两类雨滴谱仪器, 且两种仪器的直线距离均在 10 m 以内, 这三个站点的地理位置如图 1 所示。本文所用雨滴谱资料来自上述三个站点 2018 年 6—9 月的观测资料, 具体天气过程如表 2 所示。

1.2 雷达资料

广州 CINRAD/SAD(以下简称广州雷达), 于

2016 年完成升级并在同年 5 月实现业务运行(雷达主要参数如表 3 所示)。在进行 QPE 评估时还使用了对应时次的广州雷达覆盖范围内的自动站小时降水量资料。

2 研究方法

本研究涉及的资料处理方法主要包括: 雨滴谱资料质量控制及处理、双偏振雷达数据质量控制和 QPE 优化组合等方法。

2.1 雨滴谱资料质量控制及处理方法

雨滴谱资料在参数反演前参考 Wang et al(2021)的方法进行质量控制处理。首先, 由于前两个粒径通道信噪比太低, 因此对该两档的粒径信息进行剔除。其次剔除粒径大于 8 mm 的降水粒子, 处理后粒径范围为 0.31~8 mm。为减少强风和粒子飞溅对计算的影响, 根据末速度和粒径关系对数

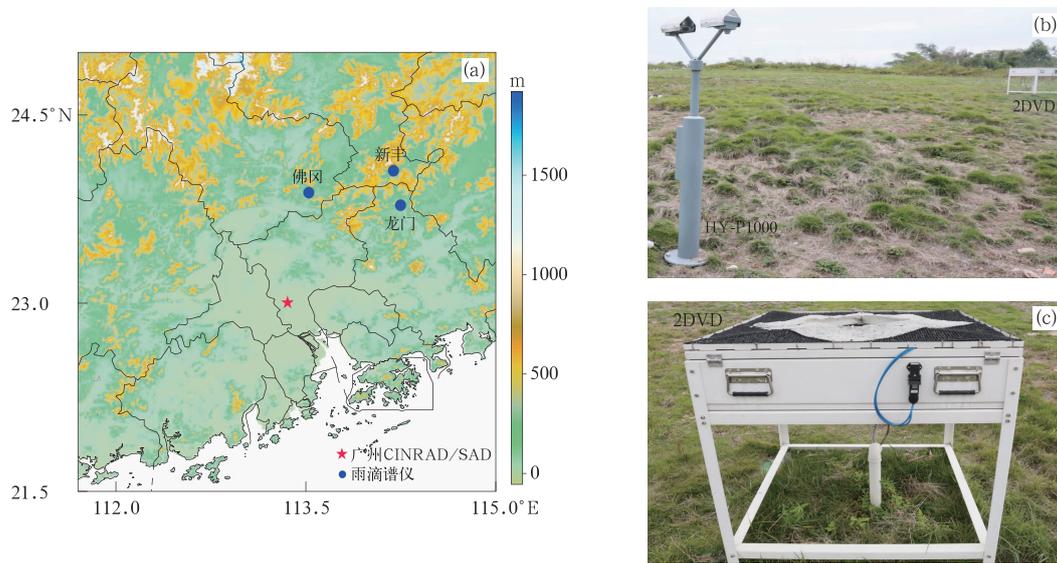


图 1 (a)广州 CINRAD/SAD 和(b,c)两种雨滴谱仪布设

Fig.1 Distribution of (a) Guangzhou CINRAD/SAD and (b, c) two kinds of disdrometers

表 2 降水过程

Table 2 Rainfall events

序号	过程时段/BT	降水持续时间/h	降水类型
1	2018 年 6 月 7 日 20 时至 9 日 05 时	33	层积混合云降水
2	2018 年 6 月 22 日 00 时至 24 日 00 时	48	层积混合云降水
3	2018 年 7 月 23 日 00 时至 24 日 00 时	24	层积混合云降水
4	2018 年 8 月 26 日 00 时至 9 月 1 日 23 时	167	层积混合云降水
5	2019 年 4 月 11 日 08 时至 16 日 08 时	120	层积混合云降水

表 3 广州雷达主要参数

Table 3 The main technique parameters of Guangzhou Radar

雷达构件和观测精度	主要参量	参数
天线	直径(双极化旋转抛物面)	≥8.5 m
	增益	≥44 dB
	波束宽度	≤1°
	工作频率	2700~3000 MHz
发射机	峰值功率(水平、垂直偏振)	≥325 kW
	脉冲宽度	1.57 μs, 4.5 μs
	脉冲重复频率	322~1304 Hz
接收机	工作模式	双发双收
	最小可测功率	≤-109 dBm(1.57 μs) ≤-114 dBm(4.5 μs)
	噪声系数	≤4 dB
	动态范围	≥85 dB
观测精度误差	距离分辨率	250~1000 m
	反射率因子(Z)	≤1 dBz
	速度(v)/谱宽(w)	≤1 m·s ⁻¹
	差分反射率因子(Z _{DR})	≤0.2 dB
	差分传播相移(Φ _{DP})	≤2°
	差分传播相移率(K _{DP})	≤0.2°·km ⁻¹
	相关系数(CC)	≤0.01

据进行质量控制。最后,剔除各通道内所有粒子数小于 10 个的资料数据(Wen et al,2016)。

对雨滴谱资料质量控制后,利用雨滴谱分布函数计算数密度 $N(D_i)$,如式(2)所示(Ulbrich,1983;冯婉悦等,2021):

$$N(D_i) = \sum_{j=1}^{32} \frac{n_{ij}}{A_i \Delta t V_j \Delta D_i} \quad (2)$$

式中: D_i 是第 i 档的等效体积直径(单位:mm); n_{ij} 为第 i 个直径通道、第 j 个速度通道的雨滴数(单位:个); A_i 为每一粒子档的有效采集面积(单位:m²); Δt 为采样时间间隔(单位:s),本文为 60 s; V_j 为第 j 个速度等级对应的平均速度(单位:m·s⁻¹); ΔD_i 为对应速度通道的直径间隔(单位:mm); $N(D_i)$ 是指单空间体积、直径介于 D_i 的单位区间内的雨滴数量(单位:m⁻³·mm⁻¹)。

得到 $N(D_i)$ 分布结果,即可计算雷达反射率因子(Z ,单位:mm⁶·mm⁻³)、降水强度(R ,单位:mm·h⁻¹)等参数,其计算公式如下(Wen et al,2016;Liu

et al, 2018):

$$Z = \sum_{i=1}^L N(D_i) D_i^6 \Delta D_i \quad (3)$$

$$R = \frac{6\pi}{10^4} \sum_{i=1}^L N(D_i) D_i^3 V_i \Delta D_i \quad (4)$$

式中: L 为粒子直径等级数(无量纲); D_i 是第 i 个尺寸等级的等效粒子直径(单位: mm); ΔD_i 是相应的直径间隔(单位: mm); V_i 是下降末速度(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)。

对于 S 波段雷达, 波长在 10 cm 以上, 降水粒子满足瑞利散射, 可以使用式(5)~式(7)分别计算双偏振雷达水平/垂直反射率因子 (Z_H/Z_V , 单位: dBz)、差分反射率因子 (Z_{DR} , 单位: dB) 和差分传播相移 (K_{DP} , 单位: $^{\circ} \cdot \text{km}^{-1}$) (Wen et al, 2016; Liu et al, 2018):

$$Z_H = \frac{4\lambda^4}{\pi^4 |K_W|^2} \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} |f_H(\pi, D)|^2 N(D) dD \quad (5)$$

$$Z_{DR} = 10 \lg(Z_H/Z_V) \quad (6)$$

$$K_{DP} = \frac{180\lambda}{\pi} \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} [f_H(D) - f_V(D)] N(D) dD \quad (7)$$

式中: λ 为雷达波长(单位: cm); $|K_W|^2$ 是复折射因子项, 为常数; $f_H(\pi, D)/f_V(\pi, D)$ 是发射水平/垂直偏振波时雨滴的后向散射截面(单位: cm^{-2}); $f_H(D)/f_V(D)$ 是具有等效直径 D 的雨滴分别在发射水平/垂直偏振波时的后向散射系数, 分实部(单位: $^{\circ} \cdot \text{km}^{-1}$) 和虚部(单位: $\text{dB} \cdot \text{km}^{-1}$) (Adirosi et al, 2018); D_{\max} 和 D_{\min} 分别为雨滴的最大和最小直径(单位: mm); Z_V 计算方法同 Z_H 。

2.2 双偏振雷达数据处理方法

双偏振雷达较单偏振雷达多了垂直极化波束通道, 理论上要求双偏振雷达水平和垂直极化波束通道有很好的-致性, 而这一要求很难在业务运行雷达中得到满足; 此外, 由于广州雷达为机械扫描雷达, 还容易受到旋转因素的影响。因此双偏振雷达偏振参数存在不可靠数据和抖动现象(陈超等, 2018), 在和雨滴谱反演偏振参数进行对比及雷达 QPE 前需要对雷达数据进行质量控制。广州雷达数据质量控制如下:

(1) 在假设双偏振雷达水平和垂直通道噪声水

平一致的前提下对 CC 和 Z_{DR} 进行噪声订正(Liu et al, 2010);

(2) 基于微雨滴法对双偏振雷达 Z_{DR} 进行系统偏差订正(陈超等, 2018);

(3) 从实际观测结果看, 双偏振雷达基数据中保存的 K_{DP} 缺失和抖动现象明显, 为提升 K_{DP} 数据质量, 本文 QPE 所使用的 K_{DP} 不是雷达基数据中保存的 K_{DP} , 而是对 Φ_{DP} 进行五点滑动平滑去除噪声污染后, 使用变距离法(Wang and Chandrasekar, 2009)拟合得到的 K_{DP} ;

(4) 利用模糊逻辑识别方法对地物杂波进行了识别和剔除(Wu et al, 2018)。

此外, 对雷达回波进行了径向滤波和平滑等处理, 进一步消除噪声点和孤立点。

2.3 定量降水估测优化组合方法

本文双偏振雷达 QPE 基本关系式有以下六种:

$$R_1(Z_H) = a_1 Z^{b_1} \quad (8)$$

$$R_2(Z_H) = a_2 Z^{b_2} \quad (9)$$

$$R_1(K_{DP}) = a_3 K_{DP}^{b_3} \quad (10)$$

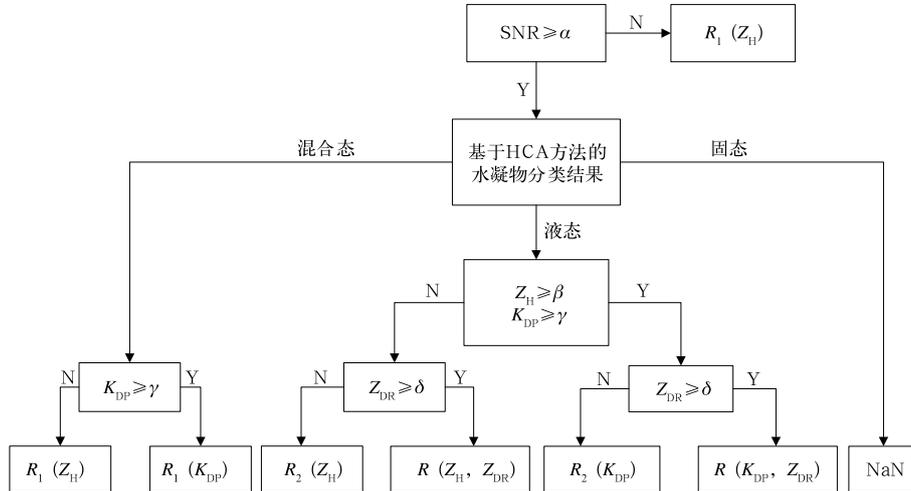
$$R_2(K_{DP}) = a_4 K_{DP}^{b_4} \quad (11)$$

$$R(Z_H, Z_{DR}) = a_5 Z^{b_5} 10^{c_5 Z_{DR}} \quad (12)$$

$$R(K_{DP}, Z_{DR}) = a_6 K_{DP}^{b_6} 10^{c_6 Z_{DR}} \quad (13)$$

式中: R 表示降水强度(单位: $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$); a 为系数, b 和 c 为指数; Z 为反射率因子(单位: $\text{mm}^6 \cdot \text{m}^{-3}$), 和 Z_H 的关系为 $Z_H = 10 \lg Z$; K_{DP} 为差分传播相移(单位: $^{\circ} \cdot \text{km}^{-1}$); Z_{DR} 为差分反射率因子(单位: dB)。

由于双偏振雷达不同 QPE 基本关系式有不同的误差特征, 目前双偏振雷达多基于优化组合方法进行 QPE(Ryzhkov et al, 2005; Zhang et al, 2018)。考虑到我国现有雷达技术水平和不同区域气候差异等因素, 国际上现有的优化组合方法在广东并不一定有较好的适用性, 且广东降水类型复杂, 近地面降水也常含有冰雹等非液态降水粒子, Chen et al (2020) 在已有研究工作的基础上结合广东省双偏振雷达的数据分析结果提出了一种水凝物分类基础上的双偏振雷达 QPE 算法(HCA-QPE), HCA-QPE 算法是基于更适合华南的水凝物分类技术(Wu et al, 2018)基础上的 QPE 优化组合方法, 在实际业务中有较好的应用。方法流程如图 2 所示。



注: α 、 β 、 γ 和 δ 为算法中各偏振量的阈值(阈值选取见 4.1 节);NaN 表示不进行计算,结果为无效值。

图 2 双偏振雷达 QPE 优化组合方法流程图

Fig. 2 Flowchart describing the HCA-QPE algorithm

2.4 评估方法

采用绝对误差(AE)、相对误差(RE)、比率偏差(Bias)和均方根误差(RMSE)对反演偏振参数做对比,并对雷达 QPE 结果进行评估,所有 QPE 误差都基于站点计算。

$$AE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Y_i - X_i| \quad (14)$$

$$RE = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Y_i - X_i|}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i} \times 100\% \quad (15)$$

$$Bias = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \right) / \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i \right) \quad (16)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - X_i)^2} \quad (17)$$

在进行 QPE 结果评估时, Y_i 是评估数据集中的第 i 个雨量计的 1 小时观测降水量(单位: mm); X_i 是相应的雷达 1 小时估测降水量(单位: mm); n 为有效数据对(雷达 QPE-雨量计)的数量。

在对雨滴谱观测结果进行评估时, X_i 和 Y_i 分别为 HY-P1000 和 2DVD 的观测结果(单位与参与评估的参数相同), n 为有效数据对(2DVD-HY-P1000)个数。

3 两种雨滴谱仪观测对比

龙门、新丰和佛冈三个站点不仅同时布设了

HY-P1000 和 2DVD 雨滴谱仪,而且均布设了业务化自动雨量计,三种仪器可实现同时同地对同一降水过程进行观测。2018 年 6 月 7—9 日 1804 号台风艾云尼登陆并影响广东(黄先香等, 2019), 8 日 17 时至 9 日 07 时是该过程降水相对集中时段,该时段内上述三个站点的两种雨滴谱仪均观测到了降水且数据连续性较好。虽然雨滴谱仪对降水粒子尺寸小于 0.3 mm 的观测的可信度降低(Tokay et al, 2013),但为了清晰反映两种雨滴谱仪的观测特点,该部分对观测数据在质量控制时未剔除前两个通道的观测粒子,其他质量控制同 2.1 小节所述方法。质量控制后三个站点获得的有效样本对数分别是 840、616 和 419 个。以下使用该时段样本数据对两种不同雨滴谱仪从数浓度、测得粒径、反演的偏振参数和降水强度等方面展开对比。

3.1 雨滴谱分布特征对比

数浓度反映的是单位体积中降水粒子的个数,它随着降水类型和气候条件的变化会有较大变化,但是对于布置在同一站点的不同雨滴谱观测仪器,由于其相同的降水过程、相同的气候背景,区别主要由仪器差别导致。

图 3 给出了 6 月 8 日 17 时至 9 日 07 时(其中佛冈站为 6 月 8 日 19 时至 9 日 03 时)降水集中期内佛冈、新丰和龙门 1 分钟分辨率的两种雨滴谱观测结果时间序列图。总体上看,这两种雨滴谱仪器观测到的雨滴数浓度基本为较一致的演变趋势,且

呈现多峰的特点。三个站点在降水集中期的雨滴观测结果最大区别是:2DVD 对于降水粒子直径小于 1 mm 的数浓度持续明显大于 HY-P1000,且 2DVD 的雨滴数浓度起伏相对剧烈。

为更细致分析两种仪器的雨滴谱观测特征,给出了两种观测仪器三个站点的滴谱平均分布曲线及各尺寸粒子数浓度所占比率曲线图(图 4)。由于 HY-P1000 为激光雨滴谱仪,仅有两个探头,当雨滴出现重叠时,HY-P1000 只能观测到较大的粒子,无法观测到被遮挡的小粒子,而 2DVD 可以从相互垂直的两个方向对降水粒子进行扫描,理论上可以分辨出更多小粒子。从实际观测结果看(图 4),两种仪器观测结果都呈单峰型分布,2DVD 测得粒子数最多为 0.3 mm 粒径粒子,所占比例达 41.5%,其次为 0.1 mm 和 0.5 mm 粒径粒子,所占比例分别为 21%和 18.3%。而 HY-P1000 仪器测得的粒子数最多为 0.1875 mm 粒径的粒子,比例为 27.4%,

其次为 0.315 mm 和 0.4375 mm 粒径粒子,所占比例分别为 18.5%和 14.1%;从图 4a 还可以看出,2DVD 测得的 3.5 mm 以下的粒子数明显多于 HY-P1000,而 HY-P1000 测得的粒径大于 3.5 mm 的粒子数则明显多于 2DVD,且 2DVD 测得的大粒子数呈快速下降趋势。此外,由于 HY-P1000 雨滴谱仪测量范围为 0.0625~24.5 mm,而 2DVD 测量范围为 0.1~8.1 mm,导致这两种仪器测得的最大和最小粒径也有区别,本次过程中 2DVD 测得的最大粒径为 6.1 mm,最小为 0.1 mm,而 HY-P1000 测得的最大粒径为 8.0 mm,最小为 0.0625 mm。最大粒径实际为质量控制后的最大粒径,未经质量控制的实际最大观测粒径为 19.0 mm。可见,由 HY-P1000 所得的降水谱较宽。

3.2 偏振参数和降水强度对比分析

按照 2.1 小节的雨滴谱数据质量控制方法对三

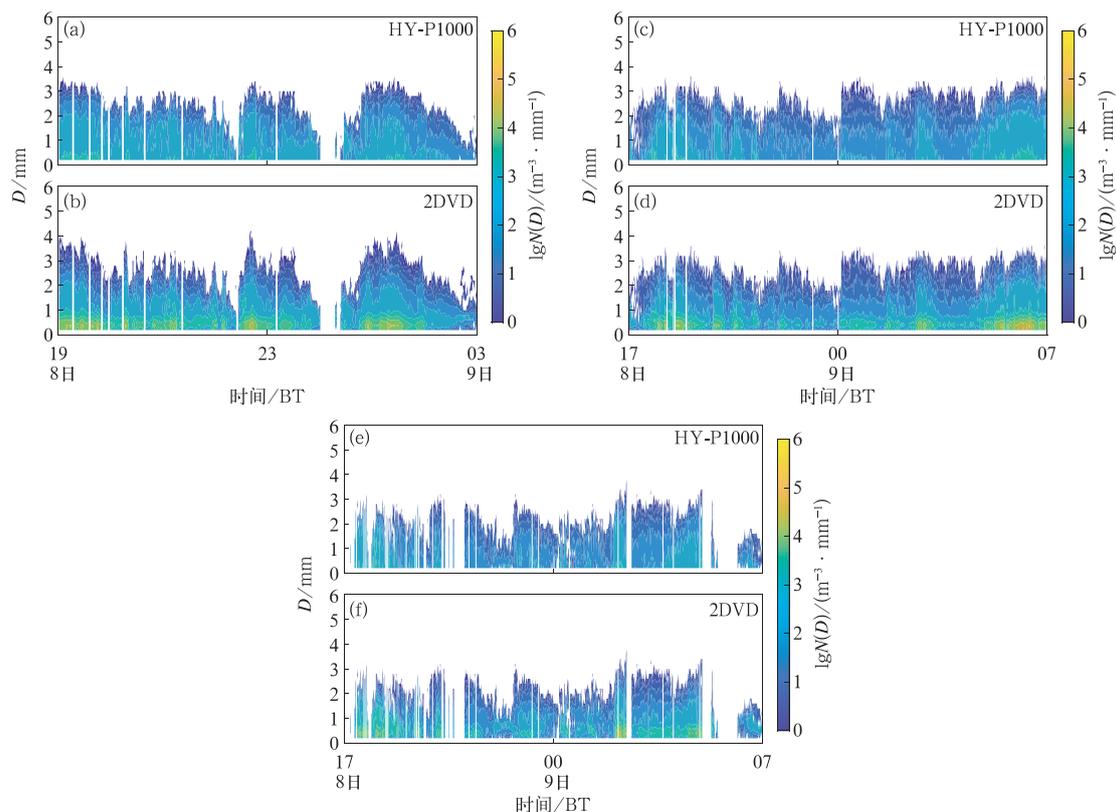


图 3 2018 年 6 月 8—9 日(a,b)佛冈站,(c,d)新丰站和(e,f)龙门站
(a,c,e)HY-P1000 和(b,d,f)2DVD 观测的不同直径粒子数浓度随时间演变序列
Fig. 3 Time series of number concentration of different drop sizes observed by
(a, c, e) HY-P1000 and (b, d, f) 2DVD at (a, b) Fogang, (c, d) Xinfeng,
and (e, f) Longmen stations from 8 to 9 June 2018

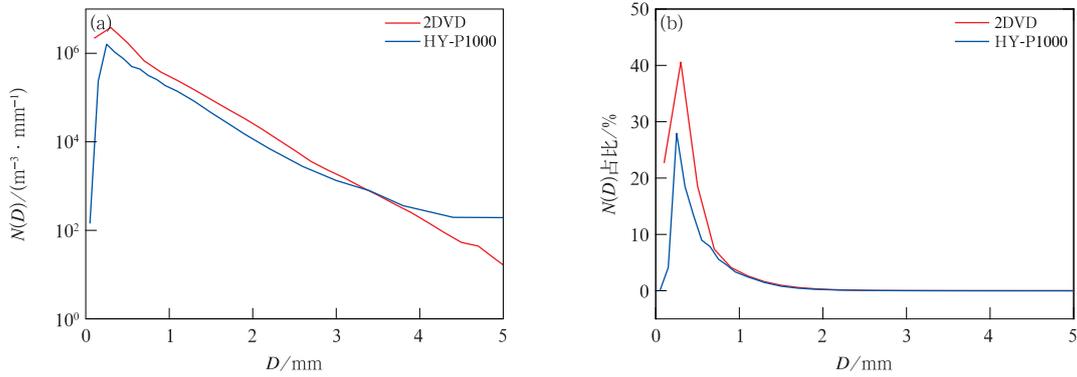


图 4 HY-P1000 和 2DVD(a)观测不同尺寸粒子总数及(b)所占百分比

Fig. 4 (a) Total number and (b) percentage of particles with different sizes observed by HY-P1000 and 2DVD

个站点雨滴谱观测资料进行质量控制,利用式(3)~式(7),计算得到 Z_H 、 Z_{DR} 、 K_{DP} 和 R 。图 5a,5c,5e 对比了佛冈、新丰和龙门三个站点 HY-P1000 和 2DVD 反演的各个偏振参数和雷达 0.5° 仰角实际观测偏振参数,图 5b,5d,5f 对比了三个站点 HY-P1000 和 2DVD 雨滴谱仪反演的 5 分钟累计降水量。

由图 5 可见,这三种仪器相关参数整体趋势比较一致,均可反映出降水变化。由于雷达观测时间分辨率仅为 6 分钟,且雷达观测数据受平滑等质量控制和仰角及各站点径向距离差异等因素影响,三个站点 0.5° 仰角上的各双偏振雷达参数的演变与两个雨滴谱的反演参数差别相对较大,而三个站点两种雨滴谱仪的偏振参数起伏的一致性相对较好。具体来看,三个站点 Z_H 的差别相对较小,与雷达观测结果相比,佛冈、新丰和龙门三个站点 2DVD 的 Z_H 平均分别比雷达观测大 3.28、3.10 和 1.21 dBz, Z_{DR} 平均分别小 0.02、0.24 和 0.07 dB, K_{DP} 平均分别大 0.2、0.07 和 $0.001^\circ \cdot \text{km}^{-1}$ 。HY-P1000 的 Z_H 平均比雷达观测平均分别大 2.59、3.00 和 1.27 dBz, Z_{DR} 平均分别大 0.26、0.02 和 0.13 dB, K_{DP} 平均分别大 0.15、0.08 和 $0.02^\circ \cdot \text{km}^{-1}$ 。从 5 分钟累计降水量对比来看, HY-P1000 的 R 反演结果明显小于 2DVD,三个站点 Bias 分别为 0.82、0.87 和 0.84。

从上面的分析可以看出,两种雨滴谱反演的 Z_H 和 K_{DP} 之间差别相对较小且演变趋势比较一致, Z_H 平均两者相差仅 0.2 dBz, K_{DP} 仅相差 $0.01^\circ \cdot \text{km}^{-1}$,与雷达观测结果差别相对较大, Z_H 平均分别大 2.5 dBz 和 2.3 dBz, K_{DP} 分别大 $0.09^\circ \cdot \text{km}^{-1}$ 和 $0.08^\circ \cdot \text{km}^{-1}$ 。由于 HY-P1000 观测到的大粒子多于 2DVD,导致反演的 Z_{DR} 差别相对较大,三个站点平均后两者相差 0.25 dB,且与雷达观测结果相比,

三个站点的 2DVD 反演的 Z_{DR} 平均值均小于雷达观测结果,而 HY-P1000 反演的 Z_{DR} 平均值均大于雷达观测结果。对于降水反演结果来说, HY-P1000 反演的 5 分钟累计降水量小于 2DVD,平均 Bias 为 0.84。从本次过程分析可以看出,雨滴谱仪测得的大粒子的数量可以影响反演的偏振参数,特别是表现粒子形变的 Z_{DR} ,而测得的大粒子并没有直接改变降水量结果。

此外,佛冈、新丰和龙门三个站点均布设了雨量计可获取实时降水量资料。将 HY-P1000 和 2DVD 反演的分钟降水强度转成小时降水量,和自动站小时降水量进行对比,本次过程三个站点共计获取了 14 小时的样本。图 6 给出了两种雨滴谱仪反演的小时降水量和自动站实测小时降水量散点图。从图中可以看出 2DVD 反演的小时降水量结果要大于 HY-P1000 的反演结果,这与图 5 的 5 分钟累计降水量对比一致;同时 2DVD 反演的小时降水量结果更接近实况观测值,2DVD 和 HY-P1000 的均方根误差分别为 1.02 mm 和 3.04 mm, Bias 分别为 0.97 和 0.80,相对误差分别为 5.15% 和 19.71%,且降水量较大时, HY-P1000 反演降水量偏小明显。造成这种现象的主要原因是 HY-P1000 对小于 1 mm 的降水粒子的低估。该分析结果和 Tokay et al(2001)和 Wen et al(2017)的分析结果有很好的 consistency。

4 对 QPE 优化组合方法估测精度影响分析

从上文分析中可以看出,不同类型的雨滴谱仪观测资料反演的偏振参数和降水强度结果存在差

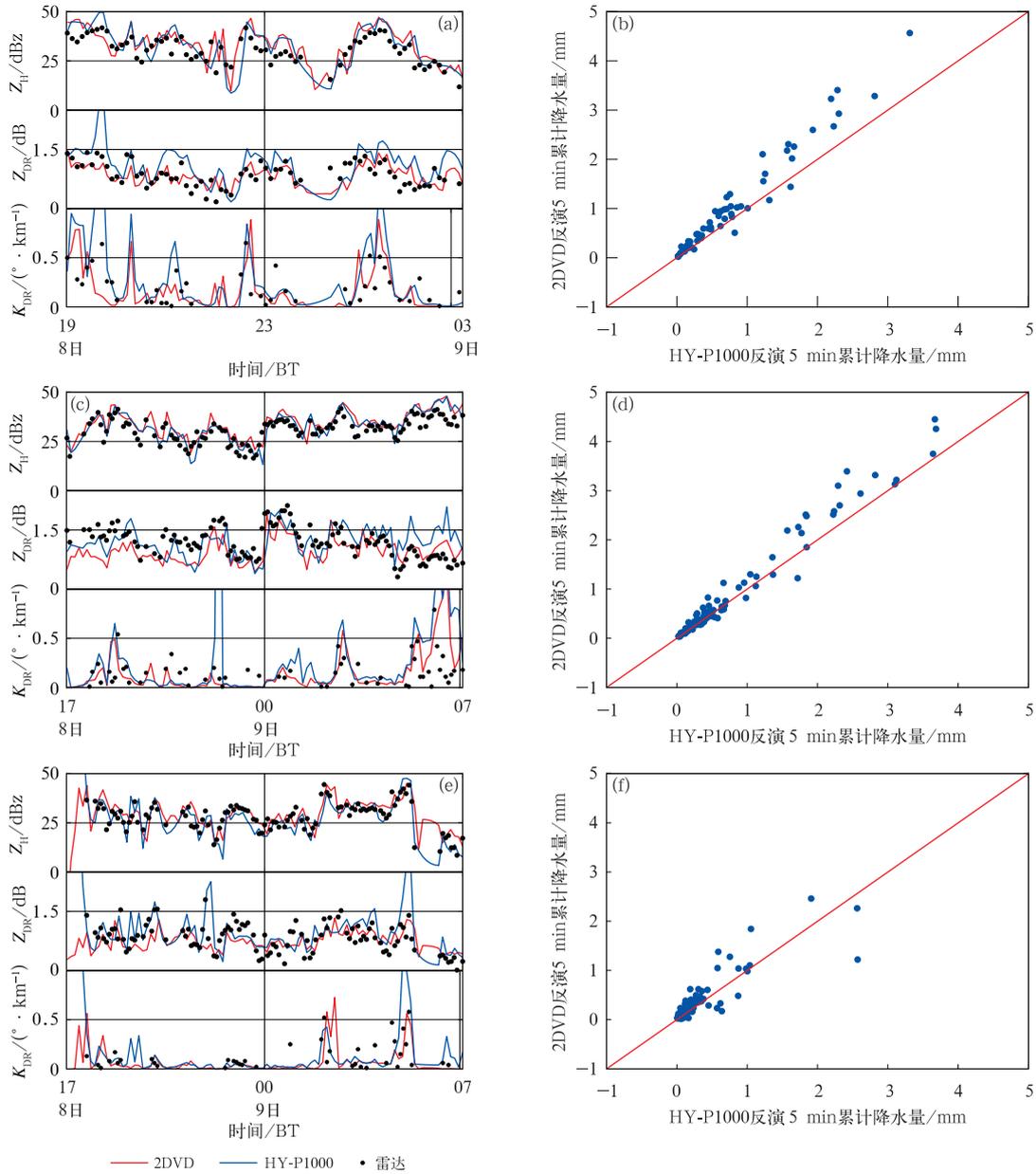


图 5 2018 年 6 月 8—9 日 (a,b)佛冈站、(c,d)新丰站和 (e,f)龙门站 HY-P1000 和 2DVD 雨滴谱 (a,c,e)反演参数和雷达实测参数对比,以及 (b,d,f)反演的 5 min 累计降水量
 Fig. 5 Comparison of HY-P1000 and 2DVD inversion parameters to (a, c, e) radar measured parameters, and (b, d, f) 5 min cumulative precipitation at (a, b) Fogang, (c, d) Xinfeng, (e, f) Longmen stations in 8—9 June 2018

别。由于双偏振雷达 QPE 基本关系式由雨滴谱资料反演参数拟合而得,而且优化组合方法中的阈值方案也受雨滴谱资料反演参数影响,这些因素都直接影响双偏振雷达 QPE 优化组合方法的精度。本节主要针对 2DVD 和 HY-P1000 观测资料对双偏振雷达优化组合方法 (HCA-QPE) 的影响进行分析。

4.1 阈值方案和基本关系式的拟合

Bringi et al(1996)和 Petersen et al(1999)通过观测,并考虑了降水强度特征和雷达噪声因素将图 2 中的 β 、 γ 和 δ 分别确定为 38.0 dBz、 $0.3^\circ \cdot \text{km}^{-1}$ 和 0.5 dB。国内外双偏振雷达在 QPE 优化组合方法研究中沿用了这一阈值方案(Cifelli et al,

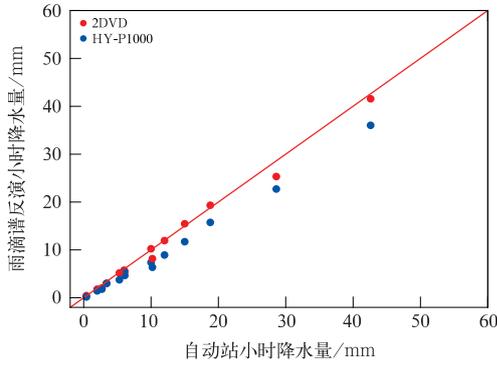


图 6 HY-P1000 和 2DVD 反演
小时降水量与实况对比

Fig. 6 Comparison of hourly precipitation
totals from rain gauge and 2DVD, HY-P1000

2011; 吴亚昊等, 2016)。我国在业务中应用双偏振雷达时, 受硬件和其他因素影响, 这一阈值方案 QPE 效果并不理想。Zhang et al (2018) 和 Chen et al (2020) 经过多次试验, 并基于噪声对业务双偏振雷达的数据影响分析结果 (陈超等, 2018), 将 β 、 γ 和 δ 分别确定为 38.0 dBz 、 $1.0^\circ \cdot \text{km}^{-1}$ 和 1.0 dB , 同时加入了判断双偏振雷达偏振参数是否可信的信噪比阈值 (α), 根据陈超等 (2018) 的分析结果, 广州雷达 α 定为 20.0 dB 。

本文首先给定 α 、 β 、 γ 和 δ 分别为 20.0 dB 、 38.0 dBz 、 $1.0^\circ \cdot \text{km}^{-1}$ 和 1.0 dB 这一阈值方案, 结合 HCA-QPE 算法流程 (图 2), 采用分段拟合方法拟合各基本关系式。所谓分段拟合是指本文的 $R_2(Z_H)$ 、 $R_1(K_{DP})$ 、 $R_2(K_{DP})$ 、 $R(Z_H, Z_{DR})$ 和 $R(K_{DP}, Z_{DR})$ 在进行基本关系式拟合时并不是选取所有的雨滴谱样本, 而是根据 HCA-QPE 的阈值方案选取满足各关系式条件的雨滴谱资料进行拟合。

对于混合态降水而言, 由于 K_{DP} 表征的是液态降水对雷达波束传播相位随距离的变率, 受介电常数因素影响, 非液态降水粒子对其影响较弱, 因此这种相态的降水可以使用 $R_1(K_{DP})$ 进行估测, 考虑到当降水中含有冰雹等非液态降水时, 其 Z_H 和 K_{DP} 值一般较大, 同时 K_{DP} 值较小时相对不稳定, 给出了 $Z_H \geq 50.0 \text{ dBz}$ 、 $K_{DP} \geq 1.0^\circ \cdot \text{km}^{-1}$ 的限制条件 (此处偏振量为雨滴谱拟合值, 下同)。

对于液态降水, 分两种情况估测。首先针对强降水情况, 此时偏振量 Z_H 、 K_{DP} 的值都比较大, 若此时的雨滴较大, 雨滴在下落过程中的形变明显, Z_{DR}

的值比较大, 此时 K_{DP} 和 Z_{DR} 值比较稳定可信, 使用 $R(K_{DP}, Z_{DR})$ 进行降水估测, 在进行系数拟合时需加上 $Z_H \geq 38.0 \text{ dBz}$ 、 $K_{DP} \geq 1.0^\circ \cdot \text{km}^{-1}$ 且 $Z_{DR} \geq 1.0 \text{ dB}$ 的条件进行限制; 当雨滴较小时 Z_{DR} 值较小, 存在不稳定现象, 此时用 $R_2(K_{DP})$ 进行降水估测, 与 $R_1(K_{DP})$ 相比, $R_2(K_{DP})$ 在进行系数拟合时加入了 $Z_H \geq 38.0 \text{ dBz}$ 、 $K_{DP} \geq 1.0^\circ \cdot \text{km}^{-1}$ 且 $Z_{DR} < 1.0 \text{ dB}$ 的条件限制。另一种情况是降水强度相对较弱时, 此时 K_{DP} 的值相对较小、变得不稳定, 若此时雨滴较大, 则 Z_{DR} 的值仍相对较大, 此时用 $R(Z_H, Z_{DR})$ 进行降水估测, 对 $R(Z_H, Z_{DR})$ 进行拟合时要加上 $Z_H < 38.0 \text{ dBz}$ 、 $K_{DP} < 1.0^\circ \cdot \text{km}^{-1}$ 且 $Z_{DR} \geq 1.0 \text{ dB}$ 的条件限制; 若此时的雨滴较小, 则 Z_{DR} 值较小, 并也变得不稳定, 此时用 $R_2(Z_H)$ 进行降水估测, 对 $R_2(Z_H)$ 拟合时加入 $Z_H < 38.0 \text{ dBz}$ 、 $K_{DP} < 1.0^\circ \cdot \text{km}^{-1}$ 和 $Z_{DR} < 1.0 \text{ dB}$ 的条件限制。

基于上述拟合方案, 利用 2018 年和 2019 年三个站点 HY-P1000 和 2DVD 两种不同雨滴谱仪收集到的 15067 个有效样本拟合得到基本关系式系数 (表 4 和表 5)。

表 4 基于 HY-P1000 观测结果的拟合公式系数

基本关系式	系数 a	指数 b	指数 c
$R_1(Z_H)$	0.106	0.518	
$R_2(Z_H)$	0.0327	0.6436	
$R_1(K_{DP})$	34.074	0.818	
$R_2(K_{DP})$	36.342	0.951	
$R(Z_H, Z_{DR})$	0.00795	0.9372	-0.4127
$R(K_{DP}, Z_{DR})$	67.528	0.9835	-0.1436

表 5 基于 2DVD 观测结果的拟合公式系数

基本关系式	系数 a	指数 b	指数 c
$R_1(Z_H)$	0.1428	0.5161	
$R_2(Z_H)$	0.0281	0.6639	
$R_1(K_{DP})$	42.86	0.7407	
$R_2(K_{DP})$	59.31	0.8347	
$R(Z_H, Z_{DR})$	0.002545	0.9841	-0.3372
$R(K_{DP}, Z_{DR})$	81.864	1.024	-0.1629

4.2 误差分析

对降水过程 (表 2) 分别使用由 HY-P1000 和 2DVD 观测资料拟合的基本关系式系数 (表 4, 表 5), 基于 HCA-QPE 算法计算 QPE, 并累加同 1 小时内

的逐 6 分钟降水量得到 1 小时降水量。为方便表述,本文将使用这两种观测资料拟合的基本关系式的优化组合方法分别称为 HCA-QPE_2DVD 和 HCA-QPE_HY-P1000 方案。

利用广州雷达 100 km 范围内降水过程(表 2)对应时次的自动站逐时降水数据,参照寿绍文等

(2006)小时降水强度分级方法,在评估时将降水分成中雨及以下、大雨、暴雨、大暴雨和特大暴雨 5 个级别(表 6)进行评估。表 6 列出了 HCA-QPE_2DVD 和 HCA-QPE_HY-P1000 方案 5 个降水强度等级,共计 9097 个样本对应的误差统计结果。

表 6 HCA-QPE_2DVD 和 HCA-QPE_HY-P1000 方案 QPE 误差统计结果

Table 6 The statistical results of QPE errors for the HCA-QPE_2DVD and HCA-QPE_HY-P1000 schemes

雨滴谱仪	评估方法	降水强度/(mm·h ⁻¹)					平均值
		[0.1,5]	[5.1,10]	[10.1,20]	[20.1,40]	>40	
2DVD	RE/%	45.5	39.16	35.1	35.48	18.64	42.62
	AE/mm	1.02	2.73	5.47	10.01	10.61	2.18
	RMSE/mm	1.50	3.37	5.83	11.77	13.98	3.77
	Bias	0.92	0.76	0.80	0.76	0.89	0.82
HY-P1000	RE/%	67.83	44.69	36.75	31.98	20.13	58.32
	AE/mm	1.48	3.01	4.88	9.14	11.71	2.53
	RMSE/mm	2.24	4.16	6.67	11.37	14.39	4.24
	Bias	1.36	1.15	1.10	0.89	1.00	1.13

Loh et al(2020)研究表明,无论是弱降水还是 40 mm·h⁻¹ 以上的强降水,小粒径(小于 1 mm)粒子的数浓度均为最高。从上文分析可见,对于相同站点,相同时刻 2DVD 雨滴谱观测仪器对小粒子的观测数浓度和所占比例均高于 HY-P1000 观测结果,从雨滴谱观测资料反演降水的对比中可以看出,小粒径粒子观测精度的提高,可以提高降水反演精度。这种观测结果对双偏振雷达 QPE 精度的影响,从表 6 中可以看出,HCA-QPE_2DVD 估测精度平均要好于 HCA-QPE_HY-P1000,其中 RE 平均减少了 15.7%,AE 平均减少了 13.8%(0.35 mm),RMSE 平均减少了 11.1%(0.47 mm)。具体来看,HCA-QPE_2DVD 方案在中雨和大雨以下时较 HCA-QPE_HY-P1000 方案估测精度提升明显,在中雨以下时,RE 平均减少了 22.3%,AE 平均减少了 31.1%(0.46 mm),RMSE 平均减少了 33.1%(0.74 mm)。随着降水强度的增大,HCA-QPE_2DVD 方案的降水估测精度优势不明显,甚至在大暴雨时,精度不如 HCA-QPE_HY-P1000 方案高。此外,HCA-QPE_2DVD 方案各个量级的 Bias 均小于 1.0,整体呈现出估计偏弱的情况。

此外,统计了 HCA-QPE_2DVD 和 HCA-QPE_HY-P1000 方案 1.0 mm·h⁻¹ 以上的 9097 个样本中各基本关系式的使用频率(图略),其中使用频率最高的是公式 $R_2(Z_H)$,为 68.4%,其余使用频率相对较高的依次为 $R(K_{DP}, Z_{DR})$ (16.6%)、 $R_1(Z_H)$ (11.7%)和 $R(Z_H, Z_{DR})$ (2.8%)。从 HCA-QPE 算

法流程(图 2)和阈值方案可见,公式 $R_2(Z_H)$ 、 $R_1(Z_H)$ 和 $R(Z_H, Z_{DR})$ 主要的使用对象是回波强度在阈值 38.0 dBz 以下的非对流性降水,小时降水量一般在 10.0 mm 以下。 $R_2(Z_H)$ 、 $R_1(Z_H)$ 和 $R(Z_H, Z_{DR})$ 如此高的使用率说明本文所选样本中强对流降水所占比例相对较低,同时也可以看出,要提高大雨以下量级的降水估测精度,主要是靠提升 $R_2(Z_H)$ 、 $R_1(Z_H)$ 和 $R(Z_H, Z_{DR})$ 的估测精度。从实际计算结果来看,HCA-QPE_2DVD 和 HCA-QPE_HY-P1000 两种方案中基本关系式 $R_1(Z_H)$ 估测误差区别不大(图略),误差区别最大的为 $R(Z_H, Z_{DR})$ 和 $R_2(Z_H)$ 这两个基本关系式(如图 7 所示),HCA-QPE_2DVD 中 $R_2(Z_H)$ 估测结果的均方根误差比 HCA-QPE_HY-P1000 减少了约 0.95 mm, $R(Z_H, Z_{DR})$ 均方根误差减少了约 4.3 mm。由此可见,对于小时降水量为大雨以下量级的降水,基于 2DVD 观测资料拟合的 $R_2(Z_H)$ 和 $R(Z_H, Z_{DR})$ 有更高的 QPE 精度,这在提升 HCA-QPE_2DVD 降水反演精度中发挥了重要作用,特别是针对中雨及以下量级的降水。

综上所述,2DVD 对 1 mm 以下的降水粒子较 HY-P1000 有更高的观测精度,反演的降水更接近实况,同时,可提升针对非对流性降水的 $R_2(Z_H)$ 和 $R(Z_H, Z_{DR})$ 这两个基本关系式的 QPE 精度,最终使得 HCA-QPE_2DVD 方案的 QPE 估测精度好于 HCA-QPE_HY-P1000 方案,特别是在中雨及以下量级时的优势更明显。

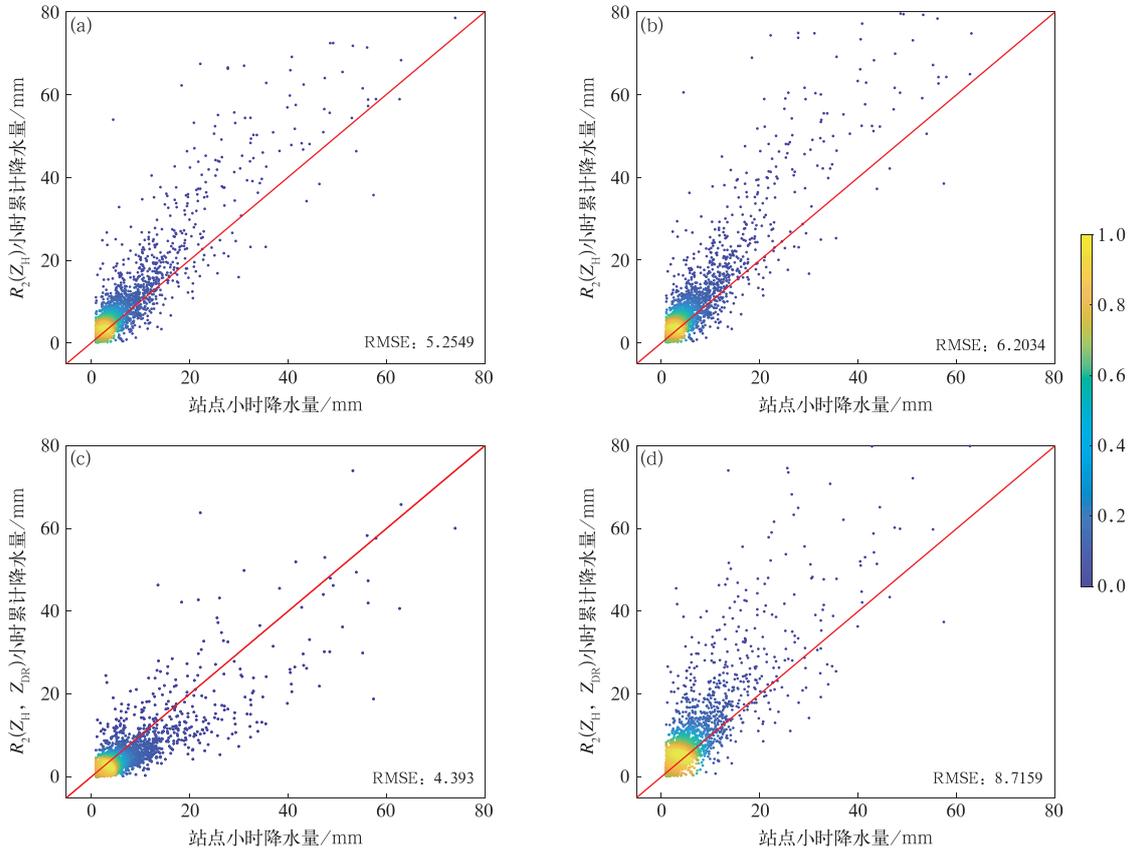


图 7 利用(a,c)2DVD和(b,d)HY-P1000资料拟合得到的
(a,b) $R_2(Z_H)$ 和(c,d) $R_2(Z_H, Z_{DR})$ 公式的 QPE 估测误差

Fig. 7 QPE errors of the formula (a, b) $R_2(Z_H)$ and
(c, d) $R_2(Z_H, Z_{DR})$ fitted by (a, c) 2DVD and (b, d) HY-P1000

5 结论和讨论

本研究首先对 2DVD 和 HY-P1000 两种雨滴谱观测资料进行了对比分析,并分别基于观测资料反演的偏振参数和降水量进行了双偏振雷达 QPE 基本关系式的拟合,将这两组不同基本关系式拟合结果应用于 HCA-QPE 优化组合方法中,分别称为 HCA-QPE_2DVD 和 HCA-QPE_HY-P1000 方案。利用这两种方案和广州雷达观测资料及自动站降水资料进行了 QPE 的计算和评估,结果表明:(1) 2DVD 可以观测到更多 1 mm 以下的降水粒子,而 HY-P1000 测得的粒径大于 3.5 mm 的粒子数则明显多于 2DVD;(2) 从 2DVD 和 HY-P1000 两种雨滴谱资料反演的偏振参数与雷达实测偏振参数对比来看, Z_H 和 K_{DP} 大小相差不大,整体趋势一致,但 2DVD 反演的 Z_{DR} 明显小于 HY-P1000 反演的 Z_{DR} ,同时也小于雷达 0.5° 仰角的 Z_{DR} 实测结果;(3) 使用

2DVD 观测数据拟合的基本关系式可整体提升双偏振雷达 QPE 精度,对中雨及以下量级的 QPE 精度提升尤为明显。

本研究从提升业务 QPE 精度角度出发,对布设在广东的龙门、新丰和佛冈三个站点的 2DVD 和 HY-P1000 的观测结果和反演参数进行了对比分析,并对这两种雨滴谱观测资料在双偏振雷达 QPE 优化组合方法中的应用进行了分析。仍存在一些问题,如 HCA-QPE_2DVD 和 HCA-QPE_HY-P1000 这两种方案针对不同类型降水的 QPE 估测差异及这两种方案是否存在更好的阈值方案等,这些问题将在未来工作中深入研究。

参考文献

- 陈超,胡志群,胡胜,等,2018. 广州 S 波段双偏振雷达数据质量初步分析[J]. 热带气象学报,34(1):59-67. Chen C, Hu Z Q, Hu S, et al, 2018. Preliminary analysis of data quality of Guangzhou S-band polarimetric weather radar[J]. J Trop Meteor, 34(1): 59-67(in Chinese).

- 陈超,胡志群,胡胜,等,2019. CINRAD-SA 双偏振雷达资料在降水估测中的应用初探[J]. 气象,45(1):113-125. Chen C, Hu Z Q, Hu S, et al, 2019. Preliminary application of CINRAD-SA dual polarization radar data in rainfall estimation[J]. Meteor Mon, 45(1):113-125(in Chinese).
- 杜传耀,尹佳莉,李林,等,2019. 降水现象仪观测应用评估[J]. 气象,45(5):730-737. Du C Y, Yin J L, Li L, et al, 2019. Application evaluation of precipitation phenomenon instrument observation [J]. Meteor Mon, 45(5):730-737(in Chinese).
- 冯婉悦,施丽娟,王智敏,等,2021. 雨滴谱仪资料在“温比亚”台风降水估测中的应用探究[J]. 气象,47(4):389-397. Feng W Y, Shi L J, Wang Z M, et al, 2021. Application of raindrop disdrometer data in rainfall estimation of Typhoon Rumbia[J]. Meteor Mon, 47(4):389-397(in Chinese).
- 黄先香,俞小鼎,炎利军,等,2019. 1804 号台风艾云尼龙卷分析[J]. 气象学报,77(4):645-661. Huang X X, Yu X D, Yan L J, et al, 2019. An analysis on tornadoes in Typhoon Ewinari[J]. Acta Meteor Sin, 77(4):645-661(in Chinese).
- 黄兴友,印佳楠,马雷,等,2019. 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[J]. 大气科学,43(3):691-704. Huang X Y, Yin J N, Ma L, et al, 2019. Comprehensive statistical analysis of rain drop size distribution parameters and their application to weather radar measurement in Nanjing[J]. Chin J Atmos Sci, 43(3):691-704(in Chinese).
- 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]. Chin J Atmos Sci, 42(2):268-280(in Chinese).
- 寿绍文,励申申,王善华,等,2006. 天气学分析:第 2 版[M]. 北京:气象出版社:333. Shou S W, Li S S, Wang S H, et al, 2006. Synoptic Analysis[M]. 2nd ed. Beijing: China Meteorological Press: 333(in Chinese).
- 汪舵,刘黎平,吴翀,2017. 基于相态识别的 S 波段双线偏振雷达最优化定量降水估测方法研究[J]. 气象,43(9):1041-1051. Wang D, Liu L P, Wu C, 2017. An optimization rainfall algorithm of S-band dual-polarization radar based on hydrometeor identification[J]. Meteor Mon, 43(9):1041-1051(in Chinese).
- 王俊,姚展予,侯淑梅,等,2016. 一次飑线过程的雨滴谱特征研究[J]. 气象学报,74(3):450-464. Wang J, Yao Z Y, Hou S M, et al, 2016. Characteristics of the raindrop size distribution in a squall line measured by thies optical disdrometers[J]. Acta Meteor Sin, 74(3):450-464(in Chinese).
- 吴亚昊,刘黎平,周筠珺,等,2016. 雨滴谱的变化对降水估测的影响研究[J]. 高原气象,35(1):220-230. Wu Y H, Liu L P, Zhou Y J, et al, 2016. Study of raindrop influence of spectrum change on precipitation estimation[J]. Plateau Meteor, 35(1):220-230(in Chinese).
- 余东升,徐青山,徐赤东,等,2011. 雨滴谱测量技术研究进展[J]. 大气与环境光学学报,6(6):403-408. Yu D S, Xu Q S, Xu C D, et al, 2011. Progress of measurement of raindrop size distribution[J]. J Atmos Environ Opt, 6(6):403-408(in Chinese).
- 朱红芳,杨祖祥,王东勇,等,2019. 进入内陆的两个台风降水特征对比分析[J]. 气象学报,77(2):268-281. Zhu H F, Yang Z X, Wang D Y, et al, 2019. Comparative analysis of the rainstorms caused by two typhoons in inland China[J]. Acta Meteor Sin, 77(2):268-281(in Chinese).
- Adirosi E, Roberto N, Montopoli M, et al, 2018. Influence of disdrometer type on weather radar algorithms from measured DSD: application to Italian climatology[J]. Atmosphere, 9(9):360.
- Brandes E A, Zhang G F, Vivekanandan J, 2002. Experiments in rainfall estimation with a polarimetric radar in a subtropical environment[J]. J Appl Meteor Climatol, 41(6):674-685.
- Brandes E A, Zhang G F, Vivekanandan J, 2003. An evaluation of a drop distribution-based polarimetric radar rainfall estimator[J]. J Appl Meteor, 42(5):652-660.
- 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.
- Bringi V N, Liu L, Kennedy P C, et al, 1996. Dual multiparameter radar observations of intense convective storms: the 24 June 1992 case study[J]. Meteor Atmos Phys, 59(1/2):3-31.
- Campos E, Zawadzki I, 2000. Instrumental uncertainties in Z-R relations[J]. J Appl Meteor, 39(7):1088-1102.
- Chen C, Liu L P, Hu S, et al, 2020. Operational evaluation of the quantitative precipitation estimation by a CINRAD-SA dual polarization radar system[J]. J Trop Meteor, 26(2):176-187.
- Chen C, Zhang A S, Wu N G, et al, 2023. Statistical characteristics of raindrop size distribution in the South China monsoon region (Guangdong Province)[J]. J Trop Meteor, 29(1):55-67.
- Chen G, Zhao K, Zhang G F, et al, 2017. Improving polarimetric C-band radar rainfall estimation with two-dimensional video disdrometer observations in Eastern China[J]. J Hydrometeorol, 18(5):1375-1391.
- Cifelli R, Chandrasekar V, Lim S, et al, 2011. A new dual-polarization radar rainfall algorithm: application in colorado precipitation events[J]. J Atmos Oceanic Technol, 28(3):352-364.
- Kruger A, Krajewski W F, 2002. Two-dimensional video disdrometer: a description[J]. J Atmos Oceanic Technol, 19(5):602-617.
- Liu L P, Hu Z Q, Fang W G, et al, 2010. Calibration and data quality analysis with mobile C-band polarimetric radar [J]. J Meteor Res, 24(4):501-509.
- Liu X C, He B S, Zhao S J, et al, 2019. Comparative measurement of rainfall with a precipitation micro-physical characteristics sensor, a 2D video disdrometer, an OTT PARSIVEL disdrometer, and a rain gauge[J]. Atmos Res, 229:100-114.
- Liu X T, Wan Q L, Wang H, et al, 2018. Raindrop size distribution parameters retrieved from Guangzhou S-band polarimetric radar observations[J]. J Meteor Res, 32(4):571-583.
- Löffler-Mang M, Joss J, 2000. An optical disdrometer for measuring

- size and velocity of hydrometeors[J]. *J Atmos Oceanic Technol*, 17(2):130-139.
- Loh J L, Lee D I, Kang M Y, et al, 2020. Classification of rainfall types using parsivel disdrometer and S-band polarimetric radar in central Korea[J]. *Remote Sens*, 12(4):642.
- Park S G, Kim H L, Ham Y W, et al, 2017. Comparative evaluation of the OTT PARSIVEL2 using a collocated two-dimensional video disdrometer[J]. *J Atmos Oceanic Technol*, 34(9):2059-2082.
- Petersen W A, Carey L D, Rutledge S A, et al, 1999. Mesoscale and radar observations of the Fort Collins Flash Flood of 28 July 1997[J]. *Bull Am Meteor Soc*, 80(2):191-216.
- Raupach T H, Berne A, 2015. Correction of raindrop size distributions measured by parsivel disdrometers, using a two-dimensional video disdrometer as a reference[J]. *Atmos Meas Tech*, 8(1):343-365.
- Ryzhkov A V, Giangrande S E, Schuur T J, 2005. Rainfall estimation with a polarimetric prototype of WSR-88D[J]. *J Appl Meteor*, 44(4):502-515.
- Thurai M, Gatlin P, Bringi V N, et al, 2017. Toward completing the raindrop size spectrum: case studies involving 2D-video disdrometer, droplet spectrometer, and polarimetric radar measurements[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 56(4):877-896.
- Thurai M, Petersen W A, Tokay A, et al, 2011. Drop size distribution comparisons between parsivel and 2-D video disdrometers[J]. *Adv Geosci*, 30:3-9.
- Tokay A, Kruger A, Krajewski W F, 2001. Comparison of drop size distribution measurements by impact and optical disdrometers [J]. *J Appl Meteor*, 40(11):2083-2097.
- Tokay A, Petersen W A, Gatlin P, et al, 2013. Comparison of raindrop size distribution measurements by collocated disdrometers [J]. *J Atmos Oceanic Technol*, 30(8):1672-1690.
- Tokay A, Wolff D B, Petersen W A, 2014. Evaluation of the new version of the laser-optical disdrometer, OTT parsivel2 [J]. *J Atmos Oceanic Technol*, 31(6):1276-1288.
- Ulbrich C W, 1983. Natural variations in the analytical form of the raindrop size distribution[J]. *J Climate Appl Meteor*, 22(10):1764-1775.
- Wang G L, Zhang D L, Sun J S, 2021. A multiscale analysis of a nocturnal extreme rainfall event of 14 July 2017 in Northeast China [J]. *Mon Wea Rev*, 149(1):173-187.
- Wang Y T, Chandrasekar V, 2009. Algorithm for estimation of the specific differential phase[J]. *J Atmos Oceanic Technol*, 26(12):2565-2578.
- Wen L, Zhao K, Zhang G F, et al, 2016. Statistical characteristics of raindrop size distributions observed in east china during the Asian summer monsoon season using 2-D video disdrometer and micro rain radar data[J]. *J Geophys Res Atmos*, 121(5):2265-2282.
- Wen L, Zhao K, Zhang G F, et al, 2017. Impacts of instrument limitations on estimated raindrop size distribution, radar parameters, and model microphysics during Mei-Yu Season in East China [J]. *J Atmos Oceanic Technol*, 34(5):1021-1037.
- Wu C, Liu L P, Wei M, et al, 2018. Statistics-based optimization of the polarimetric radar hydrometeor classification algorithm and its application for a squall line in South China[J]. *Adv Atmos Sci*, 35(3):296-316.
- Wu Y H, Liu L P, 2017. Statistical characteristics of raindrop size distribution in the Tibetan Plateau and Southern China[J]. *Adv Atmos Sci*, 34(6):727-736.
- Zhang G F, Sun J Z, Brandes E A, 2006. Improving parameterization of rain microphysics with disdrometer and radar observations [J]. *J Atmos Sci*, 63(4):1273-1290.
- Zhang Y, Liu L P, Wen H, et al, 2018. Evaluation of the polarimetric-radar quantitative precipitation estimates of an extremely heavy rainfall event and nine common rainfall events in Guangzhou [J]. *Atmosphere*, 9(9):330.

(本文责编:王蕾 何晓欢)