

新一代天气雷达多观测模式的数据质量及切换策略评估研究

朱昕¹ 吴翀² 苏德斌¹ 刘黎平² 陈玉宝³ 吴蕾³ 李瑞义³

(1. 成都信息工程大学电子工程学院, 成都 610225;

2. 灾害天气科学与技术全国重点实验室, 中国气象科学研究院, 北京 100081;

3. 中国气象局气象探测中心, 北京, 100081)

摘要: 自2024年起,我国绝大部分新一代天气雷达业务运行采用降水模式1(VCP11D)、降水模式2(VCP21D)和晴空模式(VCP31D)三种观测模式,但其具体数据质量差异与自动切换策略的科学性尚缺乏系统评估。本文利用2024年4-7月全国117部双偏振业务雷达观测模式切换前后的11965组观测数据,从地物抑制能力、灵敏度、测量精度三个方面对比分析了不同观测模式的性能,并通过统计模式切换前后新增/缺失仰角层内有效降水回波的占比,定量评估了现行以组合反射率(CR)、回波高度(EH)和垂直液态含水量(VIL)等阈值为判据的观测模式自动切换策略的合理性。研究结果表明:数据质量方面,三种模式地物抑制能力相当,但晴空模式因脉冲宽度较长导致地物识别面积显著增大;晴空模式灵敏度最高,降水模式次之,但雷达型号差异及精细化改造会导致灵敏度下降;不同观测模式的脉冲累积数差异主要影响差分反射率因子(Z_{DR})和相关系数(ρ_{HV})的测量精度,累积数越少,二者的离散程度越大。切换策略方面,现行固定阈值策略未能有效反映降水的垂直结构化,导致仰角资源利用率偏低。以CINRAD/SAD型雷达为例,两种降水模式之间的切换阈值设置偏小,导致切换后VCP11新增的5.2°、7.5°、8.7°、12°、16.7°仰角层中,有效降水回波占比中值仅27.13%,未能充分发挥其垂直加密观测优势;而降水向晴空模式切换的阈值设置偏大,导致切换后VCP31缺失的6.0°、9.9°、14.6°、19.5°内仍遗留有中值为15.66%的降水回波。针对上述问题,考虑到雷达数据采集子系统(RDA)的有限算力,本文提出了一种基于共有仰角层回波空间占比的简易切换指标,对比验证表明该指标显著提升了模式切换的精准度与仰角资源利用率。本研究可为优化我国新一代天气雷达观测策略,提升灾害性天气监测预警能力提供科学依据。

关键词: 天气雷达, 观测模式, 数据质量, 监测能力

资助项目: 国家自然科学基金项目(42305156)、国家重点研发计划(2023YFC3007501)、灾害天气科学与技术全国重点实验室自主选题项目(2025QZA05)中、中国气象局-成都信息工程大学人工影响天气联合研究中心开放课题(2025RGYXTQ014)

作者简介: 朱昕, 主要从事大气探测技术研究. E-mail: 1979207848@qq.com

通讯作者: 吴翀, 主要从事雷达气象学研究. E-mail: wuchong@cma.gov.cn

Assessment of Data Quality and Switching Strategy for Multi-Observation Modes of New-Generation Weather Radars

ZHU Xin¹ WU Chong² SU Debin¹ LIU Liping² CHEN Yubao³ WU Lei³ LI Ruiyi³

¹ School of Electronic Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225

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

³ CMA Meteorological Observation Centre, Beijing 100081

Abstract: Since 2024, most operational new-generation weather radars in China have adopted three observation modes: precipitation mode 1 (VCP11D), precipitation mode 2 (VCP21D), and clear-air mode (VCP31D). However, systematic assessment of their specific data quality differences and the scientific validity of the automatic switching strategy is still lacking. Adopting 11,965 sets of observation data collected by 117 dual-polarization radars nationwide before and after mode switching from April to July 2024, this paper comparatively analyzes the performance of the three observation modes in terms of ground clutter suppression capability, sensitivity, and measurement accuracy. Furthermore, by statistically calculating the proportion of effective precipitation echoes in newly added/missing elevation layers before and after mode switching, we quantitatively assess the rationality of the existing automatic switching strategy that is based on thresholds of composite reflectivity (CR), echo top (ET), and vertically integrated liquid water content (VIL). The results show that, in terms of data quality, the three modes exhibit comparable ground clutter suppression capabilities, but the clear-air mode significantly increases the area of ground clutter identification due to its longer pulse width. The clear-air mode has the highest sensitivity, followed by the precipitation modes, but the difference in radar types and refined modifications can cause the reduction in sensitivity. The number difference of pulse accumulations in different observation modes primarily affects the measurement accuracy of differential reflectivity (Z_{DR}) and correlation coefficient (ρ_{hv}), and fewer accumulations lead to greater dispersion of these two parameters. Regarding the switching strategy, the current fixed-threshold strategy fails to effectively capture the vertical structural changes in precipitation, resulting in low utilization of elevation resources. Taking the CINRAD/SAD radar as an example, the switching threshold between the two precipitation modes is set at a lower level, resulting in a median effective precipitation echo proportion of only 27.13% in the newly added elevation layers of VCP11 (5.2°, 7.5°, 8.7°, 12°, and 16.7°). As a result, it fails to fully leverage the advantages of vertical high-frequency observations. Conversely, when the threshold for switching from precipitation to clear-air mode is set to be larger, there is a median of 15.66% of precipitation echoes remaining in the missing elevation layers (6.0°, 9.9°, 14.6°, 19.5°) of VCP31 after switching. To address the above problems, considering the limited computational capacity of the Radar Data Acquisition (RDA) subsystem, we propose a simple switching indicator based on the spatial proportion of echoes in common elevation layers. Comparative verification shows that this indicator can significantly improve the accuracy of mode switching and the utilization of elevation resources. In a word, the achievement of this study could be a scientific basis for optimizing the observation strategies of China's new-generation weather radars and enhancing the capability of severe weather monitoring and early warning.

66 **Key words:** weather radar, observation mode, data quality, monitoring capability

67 引言

68 中国是世界上受气象灾害影响最严重的国家之一,强对流、暴雨等灾害性天气频发,
69 对人民生命财产安全构成严重威胁(张强等, 2024; 竺夏英等, 2024)。天气雷
70 达作为监测这些中小尺度天气系统的主要手段,其探测能力与观测策略直接决定
71 了短临预报的精准度。自 1998 年起,中国开始部署新一代多普勒天气雷达网络
72 (李柏等, 2013),主要使用 VCP11 / 21 / 31 观测模式。自 2015 年起新一代天
73 气雷达启动了双偏振技术升级,对于已完成升级的雷达(截止 2025 年已升级 172 部),
74 其观测模式在原有 VCP11 / 21 / 31 基础上添加字母 D 以示区分。升级后的双偏振雷达能够
75 提供差分反射率(Z_{DR})、相关系数(ρ_{hv})以及差分传播相移率(K_{DP})等双偏振观测量,
76 为揭示降水粒子的相态、尺度和空间分布提供了前所未有的信息(Tyynel äand Chandrasekar,
77 2014)。国内外研究已充分证实,双偏振参量在冰雹识别(李芳等, 2024; 姚自伟等, 2025;
78 王文青等, 2026)、闪电活动关联分析(杜赛等, 2021; 阮悦等, 2022)以及定量降水估测
79 (荀爱萍等, 2019; 李佳慧等, 2025; 吴若婷等, 2026)等方面具有显著优势。

80 然而,硬件升级仅是提升探测能力的一个维度。天气雷达在业务运行中始终面临一个经
81 典的两难困境:波束驻留时间、时空分辨率与探测灵敏度之间的固有矛盾(李柏等, 2013)。
82 为在有限时间内获取尽可能丰富的三维结构信息,雷达必须采用多种观测模式以适应不同天
83 气场景的需求。美国 WSR-88D 雷达的观测模式演进历程为此提供了重要参考。自 1990 年
84 投入使用以来,WSR-88D 先后发展了适用于强对流的 VCP11、适用于稳定性降水的 VCP21
85 以及适用于晴空弱信号探测的 VCP31/32 (Brown et al, 2000)。近年来,为进一步提升观
86 测效率,美国雷达运行中心(Radar Operations Center, ROC)相继提出了自动体扫终止策略
87 (Automated Volume Scan Evaluation and Termination, AVSET)、自适应补充低层扫描策略
88 (Supplemental Adaptive Intra-Volume Low-Level Scan, SAILS) (Kurdzo et al, 2024)以及
89 中层重扫描策略(Mid-Volume Rescan of Low-Level Elevations, MRLE)。这些策略的核心理
90 念是根据回波的实时分布动态调整扫描方案,在不显著增加体扫时间的前提下,强化对关键
91 区域的采样。实践表明,综合运用这些策略显著提升了美国预报员对强对流天气的监测和预
92 警能力(Kingfield and LaDue, 2015; Kingfield and French, 2022)。

93 反观国内,我国天气雷达在观测模式方面的研究与应用长期处于相对滞后的状态。此前,
94 绝大多数雷达仅使用 9 层仰角的 VCP21 模式,其对快速演变的龙卷、下击暴流等强对流天

气的探测能力明显不足（刘应军等，2006；Zhang et al, 2021）。多位学者围绕观测模式的改进开展了先期探索，包括优化高山雷达的低层仰角来改善中远距离的探测能力（杨金红等，2013）、增加 VPPI 体扫与 RHI 高扫相结合的观测模式来提升垂直方向的采样分辨率（张沛源等，2008；陈大任等，2010）。依托上述经验与技术积累，中国气象局气象探测中心自 2022 年起开展了系统性的观测试验，主要包括两方面探索：一是多观测模式的自适应切换试验，尝试根据实时回波特征在 VCP11D、VCP21D 和 VCP31D 之间自动切换；二是超分辨率探测试验，将空间分辨率提升至 $0.5^{\circ} \times 62.5$ m，以捕捉致灾强对流的精细化结构（汪章维等，2020；肖艳姣等，2022；王睿等，2023）。基于典型个例的评估初步表明，新观测模式改善了雷达的时空分辨率，对快速演变的对流探测具备一定优势（张晶等，2024）。自 2024 年汛期起，全国绝大多数新一代天气雷达已正式采用 VCP11D、VCP21D 和 VCP31D 三种模式业务运行，浙江省的部分雷达则继续开展精细化模式的测试。

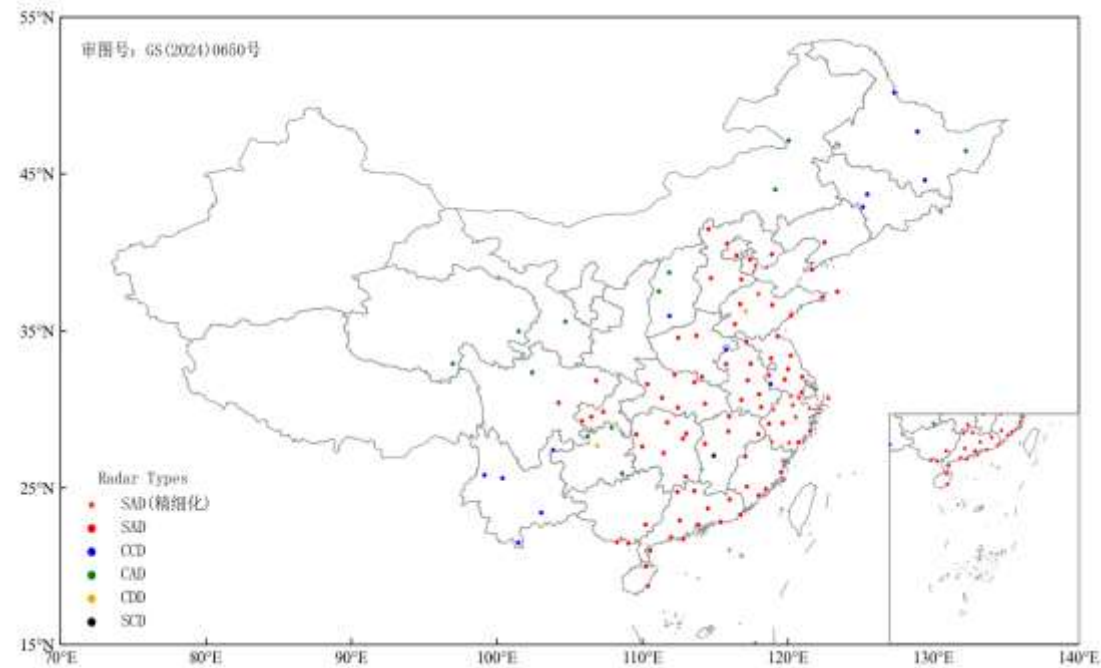
然而，这一重大业务调整背后，三个关键科学问题亟待解决。第一，不同观测数据的质量究竟如何？VCP11D 为追求高时空分辨率而减少了脉冲累积数，这对其 Z_{DR} 、 ρ_{hv} 等双偏振参量的测量精度产生了多大影响？VCP31D 为提升灵敏度而采用长脉冲，其对地物抑制能力有何副作用？精细化改造在提升空间分辨率的同时，付出了多大的灵敏度代价？目前尚缺乏系统、定量的评估。第二，现行基于固定阈值的自动切换策略是否科学？当前业务中采用的切换判据（组合反射率面积 A_{CR} 、回波顶高面积 A_{ET} 、垂直液态含水量面积 A_{VIL} ）本质上是对降水“强度”和“水平范围”的度量，但完全忽略了降水的垂直结构特征和与雷达的相对距离。一个在远处水平伸展广阔但垂直发展较弱的层状云降水，与一个在近处垂直发展旺盛的强对流单体，可能触发相同的切换决策，但其对加密仰角层的需求截然不同。这种“以偏概全”的阈值策略是否导致仰角资源的浪费或有效信息的遗漏？第三，如何兼顾雷达数据采集子系统（RDA）有限算力约束，设计更优的切换方案？RDA 的硬件资源极为有限，无法承载复杂的迭代算法或人工智能模型。因此，任何改进方案必须保持“简单、直接、可嵌入式”的特点。如何在这样的约束下，引入对降水垂直结构的有效表征？

针对上述问题，本研究利用 2024 年 4-7 月汛期全国 117 部双偏振业务雷达的 11965 组切换数据，从以下三个方面展开系统评估：首先，从地物抑制能力、灵敏度和观测量精度三个维度，定量对比分析不同观测模式的数据质量差异；其次，基于模式切换前后新增/缺失仰角层内有效降水回波的占比，诊断现行切换策略的合理性及其失效原因；最后，在 RDA 算力约束下，提出一种能够反映降水垂直结构的新切换指标方法。本研究有望为我国新一代天气雷达观测策略的优化提供科学依据，进而提升雷达网对灾害性天气的监测预警能力。

1 资料与方法

1.1 雷达站点和观测模式

本研究选取 2024 年汛期完成双偏振升级的 117 部新一代天气雷达，其站点分布如图 1 所示。这些雷达涵盖了多种型号，包括 92 部 SAD 型、12 部 CAD 型、13 部 CCD 型、2 部 CDD 型与 1 部 SCD 型，共同参与了本次扫描模式切换观测试验，共获得 11 965 组有效切换数据。



注：红、蓝、绿、橙、黑分别代表 SAD 型、CCD 型、CAD 型、CDD 型、SCD 型号。圆形代表只使用常规观测模式的天气雷达，星型代表使用精细化观测模式的雷达。

图 1 全国新一代双偏振雷达站点分布图(截至 2024 年 4 月)

Fig. 1 Distribution of China's new-generation dual-polarization radar stations (as of April 2024)

试验主要涉及业务运行中的三种标准观测模式：降水模式 VCP11D 和 VCP21D，以及晴空模式 VCP31D。三种模式的关键参数对比如表 1 所示。其中，降水模式 VCP11D 与 VCP21D 的时间、方位和距离分辨率分别均为 6 min、1°和 250 m。两者的核心差异在于扫描策略：相比 VCP21D，VCP11D 在中高层增加了 5.2°、7.5°、8.7°、12°和 16.7°共 5 个仰角层的扫描，以优化观测数据垂直分辨率。然而，这种优化是以降低采样质量为代价的：相较于 VCP21D，VCP11D 各仰角层的脉冲累积数减少了 18.75%~47.22%，尤其在 2.4°~4.3°的中低层，脉冲累积数从 72 个锐减至 38 个，这可能会影响数据质量。晴空模式 VCP31D 则侧重于高灵敏度

探测。与降水模式 VCP21D 相比，其脉冲累积数增加了 23.61%~39.06%，但体扫周期延长到 10 min，且仰角层数缩减至 5 层。尽管其脉冲宽度增加至 4.7 μs 以增强探测能力，但通过信号处理，最终输出的数据距离分辨率仍保持在 250 m。

表 1. 新一代天气雷达 SAD 型三种观测模式的参数配置表

Table 1 Parameter configuration table for three observation modes of the new-generation SAD-type weather radars

降水模式 1 (脉冲宽度: 1.57 μs)			降水模式 2 (脉冲宽度: 1.57 μs)			晴空模式 (脉冲宽度: 4.7 μs)		
仰角 ($^{\circ}$)	脉冲累积数	波束模式	仰角 ($^{\circ}$)	脉冲累积数	波束模式	仰角 ($^{\circ}$)	脉冲累积数	波束模式
0.5	17	CS	0.5	28	CS	0.48	64	CS
0.5	52	CD	0.5	64	CD	0.48	89	CD
1.5	16	CS	1.5	28	CS	1.49	64	CS
1.5	52	CD	1.5	64	CD	1.49	89	CD
2.4	38	BATCH	2.4	72	BATCH	2.50	64	CS
3.4	38	BATCH	3.4	72	BATCH	2.50	89	CD
4.3	38	BATCH	4.3	72	BATCH	3.52	89	CDX
5.2	45	BATCH	6.0	78	BATCH	4.48	89	CDX
6.2	45	BATCH	9.9	65	CDX			
7.5	46	CDX	14.6	65	CDX			
8.7	46	CDX	19.5	65	CDX			
10.0	46	CDX						
12.0	46	CDX						
14.0	46	CDX						
16.7	46	CDX						
19.5	46	CDX						

此外，为探索更高精度的观测能力，浙江省的 12 部 SAD 型雷达还开展了精细化模式切换试验，主要测试了 VCP215D、VCP216D 与 VCP32D。

(1) VCP215D: 在 VCP21D 基础上进行了全面升级。距离分辨率由 250 m 提升至 125 m (脉冲宽度相应从 1.57 μs 降至 0.833 μs)；低层 (0.5 $^{\circ}$ ~1.5 $^{\circ}$) 方位分辨率由 1 $^{\circ}$ 提升至 0.5 $^{\circ}$ ；仰角层由 9 层增加至 12 层，新增了采用不同技术的 0.97 $^{\circ}$ (CS/CD 模式)、5.2 $^{\circ}$ (BATCH 模式) 和 7.5 $^{\circ}$ (CDX 模式) 仰角层。作为权衡，各层脉冲累积数降低了 26.97%~46.15%，其中 6 $^{\circ}$ 仰角层降幅最大 (由 78 个降至 42 个)。

(2) VCP216D: 在 VCP215D 基础上追求极限距离分辨率。距离分辨率进一步提升至 62.5 m (脉冲宽度降至 0.416 μs)，并继续增加高层扫描，新增了 CDX 模式的 8.7 $^{\circ}$ 、12 $^{\circ}$ 与 16.7 $^{\circ}$ 三个仰角层。同时，各层脉冲累积数再次降低 11.91%~16.66%，其中 2.4 $^{\circ}$ 与 3.4 $^{\circ}$ 层降幅最大 (由 48 个降至 40 个)。

(3) VCP32D: 作为 VCP31D 的增强版, 旨在提升晴空模式下的数据质量。其脉冲宽度由 $4.7\ \mu\text{s}$ 降至 $1.57\ \mu\text{s}$ (距离分辨率保持 $250\ \text{m}$ 不变), 但通过大幅增加采样, 各层脉冲累积数提升了 $10.11\%\sim 106.74\%$, 尤其在 2.5° 至 4.48° 关键层, 脉冲累积数从 89 个大幅提升至 184 个, 显著增强了弱回波的探测能力。

综上所述, 这些多样化的观测模式构成了本研究的试验基础, 通过对比不同模式下的数据质量与探测能力, 为后续分析扫描策略对双偏振雷达数据应用的影响提供了支撑。

1.2 观测模式性能及切换策略的评估方法

为量化不同观测模式对数据质量的影响, 本文通过地物抑制能力、灵敏度以及观测测量精度三个方面来评估各观测模式的性能。

(1) 地物抑制能力评估: 利用晴空条件下低层 ($0.5^\circ\sim 1.5^\circ$) 仰角的反射率因子数据, 通过对比地物滤波前 (Z_T)、后 (Z_H) 的差值 (ΔZ) 来量化抑制效果。统计 $\Delta Z > 3\ \text{dB}$ 的像元占比, 该值越大, 表明地物抑制能力越强。

(2) 灵敏度评估: 基于雷达气象方程, 结合各模式的脉冲宽度、脉冲累积数等发射波形参数, 理论计算其最小可测反射率因子, 作为灵敏度指标进行对比。

(3) 测量精度评估: 选取模式切换前后 6 min 内的降水数据, 绘制双偏振量的概率密度分布 (PDF)。对比同一天气过程在不同模式下的分布展宽 (方差), 分布越集中表明随机误差越小, 测量精度越高。

在评估各观测模式的性能后, 还需评估观测模式切换策略是否合适。考虑到 RDA 的硬件资源极为有限, 因此只能基于简单的物理参数和固定阈值构建切换逻辑。当前切换策略选用了三种核心参量: 包含了组合反射率因子 $> 18\ \text{dBZ}$ 的回波面积记为 A_{CR1} , 组合反射率因子 (CR) 达到 $35\ \text{dBZ}$ 的强回波面积记为 A_{CR2} , 回波顶高 (ET) 值 $\geq 8\ \text{km}$ 的累积面积记为 A_{ET} , 垂直液态含水量值 (VIL) $\geq 15\ \text{kg/m}^2$ 或 $20\ \text{kg/m}^2$ 的累积面积记为 A_{VIL} 。其中表 2 给出了三种观测模式在 2024 年汛期的切换触发条件。

表 2. 新一代天气雷达 SAD 雷达三种观测模式的切换触发条件表

Table 2 Table of switching trigger conditions for three observation modes of the new-generation SAD-type weather

radars

观测模式	切换条件
	满足下列条件之一:
VCP11D (降水模式 1)	1. $A_{\text{CR2}}(35\text{dBZ}) \geq 100\ \text{km}^2$ 且 $A_{\text{ET}} \geq 15\ \text{km}^2$
	2. $A_{\text{VIL}} \geq 15\ \text{km}^2$

满足全部条件:

VCP21D (降水模式 2)

1. $A_{CR2}(35 \text{ dBz}) < 100 \text{ km}^2$ 或 $A_{ET} < 20 \text{ km}^2$

2. $A_{VIL} < 15 \text{ km}^2$

3. $A_{CR1}(18 \text{ dBz}) \geq 1000 \text{ km}^2$

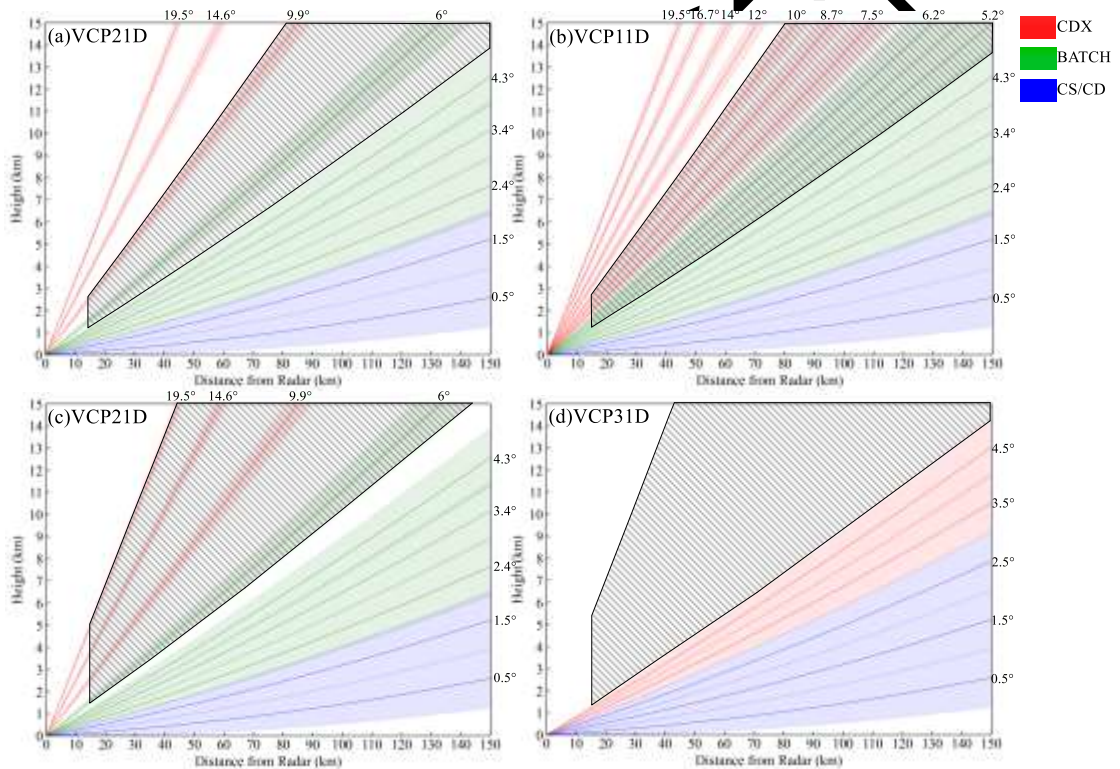
VCP31D (晴空模式)

$A_{CR1}(18 \text{ dBz}) < 1000 \text{ km}^2$

然而, 仅依靠上述二维平面参量切换参数并不能反映切换模式的垂直结构差异 (如图 2 阴影区域所示)。为此, 本文此次采用两步法评估切换策略:

(1) 典型个例剖析: 选取包含模式切换的天气过程, 对比切换前后的垂直剖面, 分析高垂直分辨率模式的优势及低垂直分辨率模式可能引入的偏差。

(2) 长序列统计检验: 统计长时间序列中, 图 2 所示“垂直采样区域变化”内有降水回波的占比, 以此来判断切换阈值是否有效, 进而提出更适合的切换阈值。



注: 阴影表示了两种观测模式切换前后的垂直采样区域差异。

图 2 VCP21D 观测模式切换至 VCP11D、VCP31D 模式的波束垂直采样剖面对比

(a,b) VCP21D 与 VCP11D 模式切换, (c,d) VCP21D 与 VCP31D 模式切换

Fig.2 Comparison of vertical sampling profiles for mode switching from VCP21D to VCP11D and VCP31D

(a, b) switching between VCP21D and VCP11D modes, (c, d) switching between VCP21D and VCP31D modes

2 不同观测模式的性能评估

2.1 不同观测模式的地物抑制能力评估

地物抑制能力是评估观测模式的重要指标。其效果受脉冲累积数、滤波器类型及参数配置共同影响。为准确评估不同模式下的地物抑制能力,需剔除降水样本,仅保留纯地物回波。本研究选取 2024 年 4-7 月 117 部雷达(含 92 部 SAD 型、12 部 CAD 型以及 13 部 CCD 型)的 0.5° 仰角的数据,联合使用强度($Z_T > 50$ dB)、滤波效果($\Delta Z > 3$ dB)及相关系数($\rho_{hv} < 0.8$)三个阈值筛选地物像元,并从抑制强度(ΔZ 差值)和地物范围两个维度进行评估。

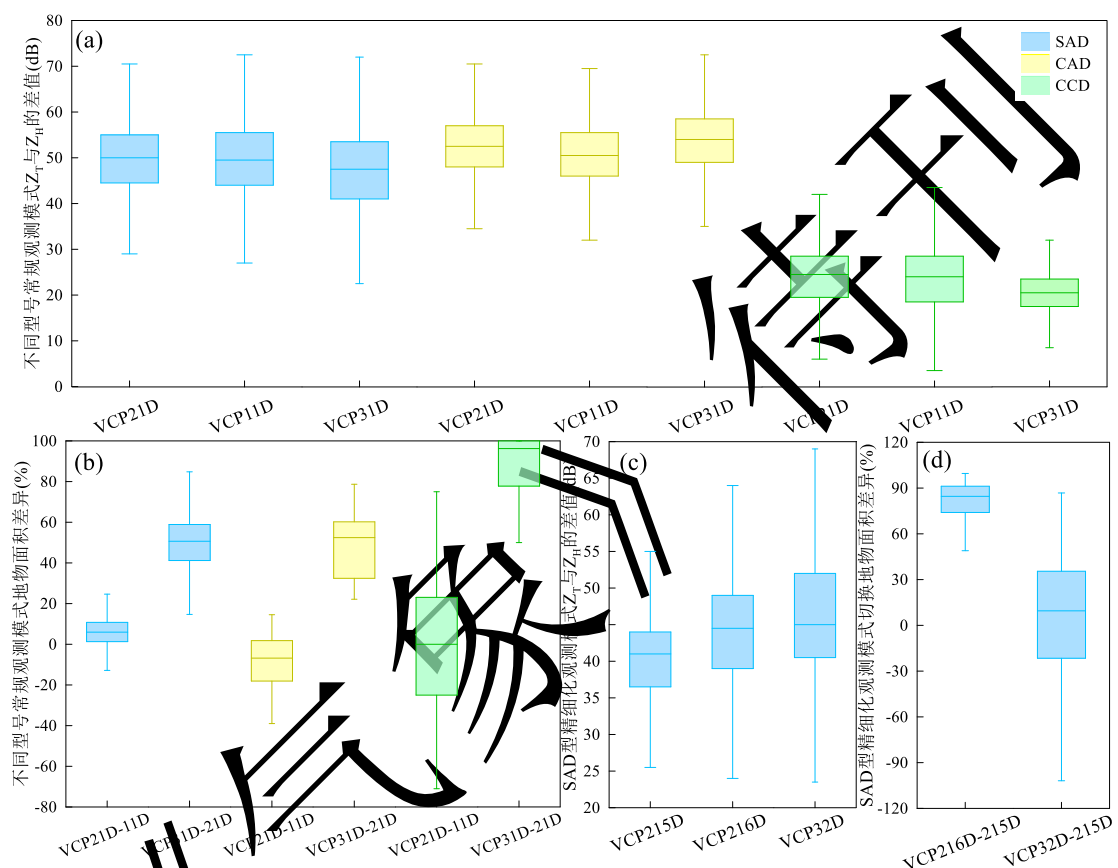
基于筛选出的地物像元,图 3a 展示不同体扫模式的地物抑制能力。对于 SAD 型雷达,VCP21D 的地物抑制能力比 VCP11D 略高 0.5 dB(脉冲累积数多 12 点),而 VCP31D 虽脉冲累积数最多,但其地物抑制能力比 VCP21D 略低 1 dB(对应脉冲累积数多 24 点)。可见对于 SAD 型雷达,单纯增加脉冲累积数对提升地物抑制能力的贡献已趋于饱和,三种常规观测模式的地物抑制能力基本相当。对于 C 波段天气雷达,CAD 型、CCD 型两种观测模式整体地物抑制能力同样没有明显差距。但值得注意的是,CCD 型雷达的整体地物抑制能力较 SAD 型和 CAD 型显著偏弱 25 dB 左右,这是由于 CCD 型采用了 IIR 时域滤波,而后者则使用了性能更优的频域自适应滤波。

地物抑制能力相当,并不意味着地物残留面积一致,这还受脉冲宽度决定的本征距离分辨率影响。图 3b 统计了模式切换前后地物像元面积的变化。对于 SAD 型雷达,VCP21D 与 VCP11D 的地物面积差异小于 6%,但 VCP31D 的地物面积较 VCP21D 显著增加约 50%。这是因为 VCP31D 的脉冲宽度增至 $4.7\ \mu\text{s}$,其本征距离分辨率降至约 705 m,尽管信号处理输出 250 m 产品,但原始回波的空间“涂抹效应”导致更多距离库被标记为地物。C 波段雷达表现类似:晴空模式脉宽从 $1\ \mu\text{s}$ 增至 $2\ \mu\text{s}$ 后,CAD 型地物面积增加 52.44%,而 CCD 型增幅高达 96.23%。这一显著差异除脉宽增加外,也与 CCD 型自身较弱的滤波能力有关,导致其在宽脉冲下更容易保留弱地物。

采用相同方法对 SAD 型雷达的精细化模式进行分析(图 3c~3d)。抑制能力方面:精细化降水模式 VCP215D 和 VCP216D 较基准 VCP21D 分别偏弱约 5.5 dB 和 9 dB。这主要归因于脉冲宽度的大幅缩减(精细化降水模式从 $1.57\ \mu\text{s}$ 分别降至 $0.833\ \mu\text{s}$, $0.417\ \mu\text{s}$),窄脉冲增强了样本独立性,使得地物起伏特征更明显,增加了滤波器识别难度。精细化晴空模式 VCP32D 较 VCP31D 偏弱约 4 dB,这并非由脉宽引起,而是因其滤波器由频域自适应改为 IIR 时域滤波所致。地物面积方面:VCP216D 较 VCP215D 面积增加 84.58%,与其距离分辨率从 125 m 提升至 62.5 m(理论上像元数增加一倍)的预期基本吻合。值得注意的是,VCP32D 与 VCP215D 的距离分辨率虽相差一倍,但其地物面积仅相差 9.52%。这一背离现象进一步

印证了上述推断：VCP32D 采用的 IIR 滤波器配置可能较为保守，抑制了部分本应出现的地物像元，导致面积增量未随分辨率线性增长。

此外，在统计过程中发现，2024 年有 12 部 SAD 型雷达在 VCP21D 与 VCP11D 模式下的地物抑制能力较其他同型号雷达存在约 10 dB 的系统性偏差。经排查，该偏差源于这些雷达在模式切换时，地物滤波器配置异常，由标准的频域自适应滤波被错误地切换为 IIR 时域滤波。目前该问题已被定位并逐步修正。在后续的分析中，已剔除这 12 部雷达在该时间窗口内的异常数据，以确保评估结果的准确性。



注：箱线图中触须的上端和下端分别代表统计最大值和最小值，箱体三条绕线自下而上 分别代表第 25%、50%和 75%分位值。

图 3 (a, b) VCP21D/11D/31D 模式, (c, d) 精细化 VCP215D/216D/32D 模式的 (a, c) 地物抑制能力差异和 (b, d) 地物面积差异箱线图

Fig.3 Box plots of (a, c) ground-clutter suppression performance and (b, d) ground-clutter area difference for (a, b) the modes VCP21D, VCP11D and VCP31D, and (c, d) the fine-resolution modes VCP215D, VCP216D and VCP32D.

2.2 不同观测模式的灵敏度评估

246 雷达灵敏度决定了系统对弱回波（如晴空湍流、毛毛雨、云体边缘）的探测能力，是衡
247 量观测模式性能的关键指标之一。为对比不同模式下的灵敏度差异，本研究选取 SAD 型
248 （Z9002）、SAD 型精细化（Z9571）、CAD 型（Z9094）、CCD 型（Z9555）、CDD 型（Z9538）
249 雷达作为各型号雷达代表，统计其在不同观测模式下各仰角的反射率因子（ Z_H ）数据。通
250 过沿距离库按 5 km 间隔分段统计最小值，得到最小可测反射率因子随距离变化的廓线（图
251 4）。

252 对于 SAD 型雷达，晴空模式 VCP31D 的灵敏度最高，为 $-20.0 \text{ dBz}@50 \text{ km}$ ，降水模式
253 VCP21D 与 VCP11D 的灵敏度次之，为 $-10.0 \text{ dBz}@50 \text{ km}$ 。对于精细化观测模式，VCP32D
254 的灵敏度与 VCP21D 接近，为 $-9.5 \text{ dBz}@50 \text{ km}$ ，较 VCP31D 偏低 10.5 dB 。而两种精细化降
255 水模式由于脉冲宽度降低灵敏度较差，分别为 $-6.0 \text{ dBz}@50 \text{ km}$ 和 $0 \text{ dBz}@50 \text{ km}$ ，较 VCP21D
256 分别偏低 4.0 dBz 和 10.0 dBz 。这表明，追求高空间分辨率（窄脉冲）必须以牺牲弱回波探
257 测能力为代价。

258 对于 C 波段天气雷达，其灵敏度特征与 SAD 型类似，两种降水模式无明显差异，并弱
259 于晴空模式。其中，CAD 型 VCP31D、VCP21D 与 VCP11D 模式在 50 km 处灵敏度分别为
260 -9.5 、 -4.0 / -4.0 dBz ，CCD 型为 -15.5 、 -7.5 / -7.5 dBz ，CDD 型为 -5.5 、 -0.5 / -0.5 dBz 。
261 可见 C 波段天气雷达中 CAD 型最好，CDD 型最差，但各观测模式的整体灵敏度均低于 SAD
262 型，这主要是由于 C 波段波长较短，在大气中的衰减更强，且不同型号的发射机功率、天
263 线增益等硬件性能差异所致。

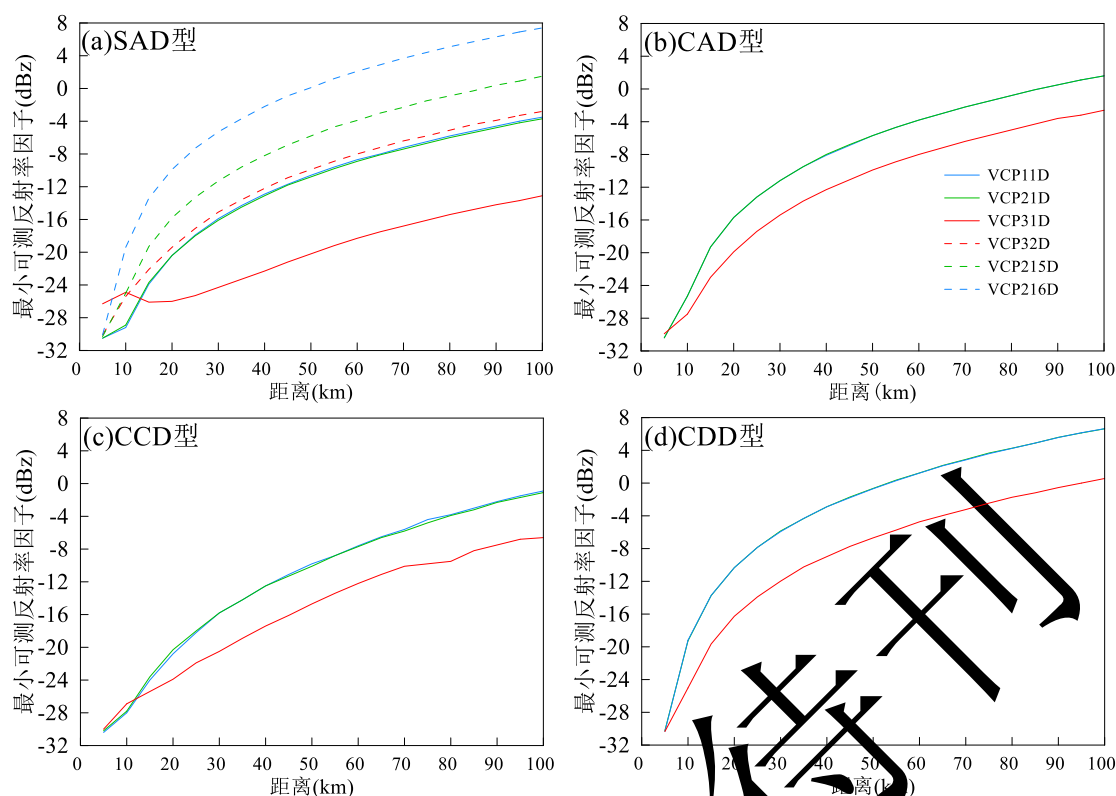


图 4 不同类型型雷达在不同观测模式的最小可测反射率因子随距离变化的廓线

Fig. 4 Range-dependent profiles for the minimum detectable reflectivity factor of different observation modes of different-type weather radars

2.3 不同观测模式切换前后的观测精度评估

脉冲累积数是影响偏振量测量精度的关键因素。理论上，累积数越多，估值方差越小，但这受限于时空分辨率约束。为量化不同模式对测量精度的影响，本文基于以下假设进行评估：假设在模式切换的 6 min 内，降水系统特性未发生显著变化，则观测量的频次分布差异可主要归因于测量精度的变化。考虑到各模式下低层仰角不完全一致，统一选取 2.4° 仰角层进行分析。以 SAD 型雷达为例，选取 78 部雷达中 441 组有效切换数据，对比四类切换场景，结果如图 5 所示。

(1) 常规降水模式切换 (VCP21D vs VCP11D)：图 5a~5d 给出了常规降水模式 VCP21D 与 VCP11D 的切换前后对比。从图中可以看出，两者 Z_H 、 K_{DP} 与 ρ_{hv} 的频次分布基本一致，但 VCP11D 模式的 Z_{DR} 在 -1~2 dB 范围内频次累积偏低 2.96%，其原因是该模式在 2.4° 仰角层 38 点的脉冲累积数较 VCP21D 的 72 点减少 47.22%，从而使得 Z_{DR} 的随机测量误差增大。尽管 Φ_{DP} 精度受脉冲累积数的影响也应较大，但 K_{DP} 是由前后 6 个距离库中 $\rho_{hv} > 0.9$ 的 Φ_{DP} 观测值拟合而来，相当于对数据进行了平滑处理、掩盖了累积数的差异，因此 K_{DP} 的离散度

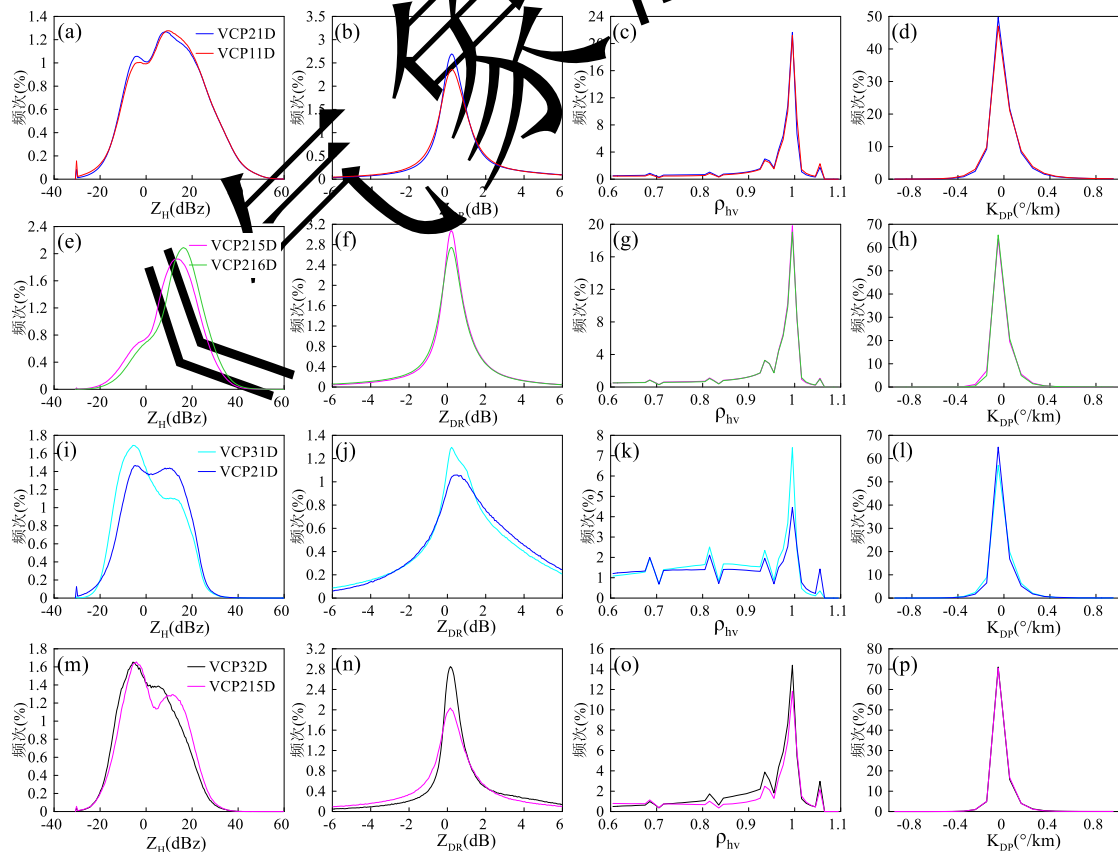
282 无明显变化。

283 (2)精细化降水模式切换(VCP215D vs VCP216D):精细化后的 VCP215D 与 VCP216D
284 模式同样发现了类似情况(图 5e~5h)。VCP216D 的 40 点累积数较 VCP215D 的 48 点减少
285 16.67%, 对应的 Z_{DR} 在 -1~2 dB 范围内频次偏低了 2.55%。

286 (3)常规晴空与降水模式切换(VCP31D vs VCP21D):图 5i~5l 给出了常规晴空模式
287 与降水模式的切换前后对比。从图中可见, Z_H 、 K_{DP} 的频次分布基本一致, 但 Z_{DR} 与 ρ_{hv} 却
288 有较大差异。VCP31D 在 2.4°仰角层的累积数比 VCP21D 增加 19%, 导致两者 Z_{DR} (-1~2 dB
289 区间)与 ρ_{hv} (0.8~1.0 区间)的频次累积差异达到 3.18%与 9.23%, 比常规降水模式切换
290 增加了 0.22%与 8.91%。

291 (4)精细化晴空与降水模式切换(VCP32D vs VCP215D):图 5m~5p 展示了精细化晴
292 空模式 VCP32D 与精细化降水模式 VCP215D 的切换结果, Z_H (-1~2 dB 区间)和 ρ_{hv} (0.8~1
293 区间)的频次累积差异分别达到 5.58%和 18.58%, 较常规切换增加 3.08%与 17.87%。

294 (5)C 波段雷达的验证:对于 C 波段雷达,其两种降水模式及晴空降水模式的观测精
295 度评估结果与 SAD 型基本一致(图略)。VCP21D 与 VCP11D 切换后的 Z_{DR} 分布 (-1~2 dB
296 区间)变化为 3.18~5.97%, 比 SAD 型的 2.96%略高。VCP31D 与 VCP21D 切换后 Z_{DR} (-1~2
297 dB 区间)和 ρ_{hv} (0.8~1.0 区间)分布变化为 3.38%~7.75%及 2.41%~13.95%。



298

图 5 SAD 型雷达不同观测模式切换前后的 Z_H 、 Z_{DR} 、 ρ_{hv} 、 K_{DP} 观测量频次对比

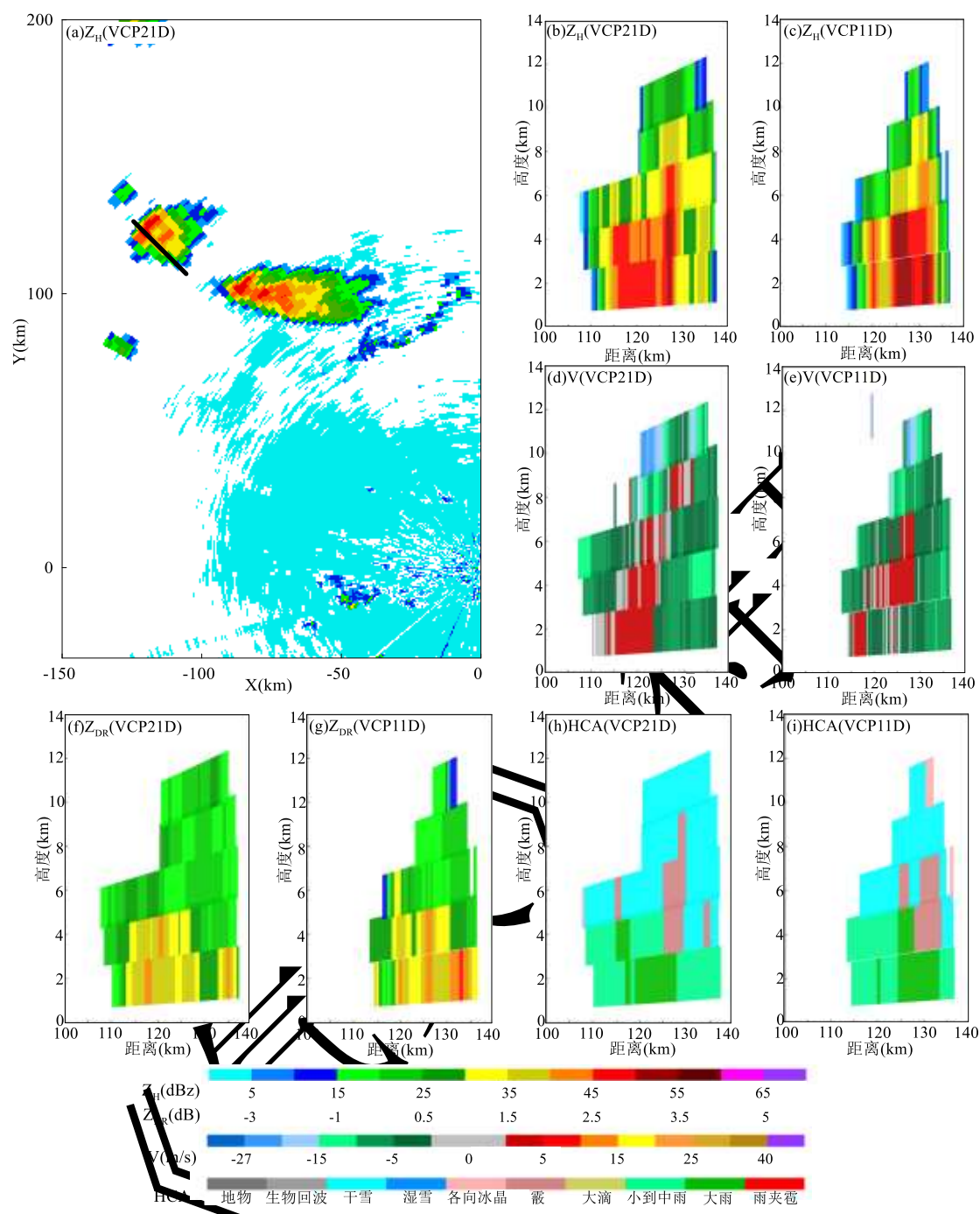
(a~d) VCP21D 与 VCP11D 模式,, (e~h) 精细化 VCP215D 与 VCP216D 模式,,(i~l) VCP21D 与 VCP31D 模式,, (m~p) 精细化 VCP215D 与 VCP32D 模式

Fig. 5 Frequency comparisons of Z_H , Z_{DR} , ρ_{hv} and K_{DP} under different mode-switching scenarios for the SAD-type radars
(a-d) VCP21D vs. VCP11D; (e-h) VCP215D vs. VCP216D; (i-l) VCP21D vs. VCP31D; (m-p) VCP215D vs. VCP32D

3 典型个例的多观测模式对比分析

3.1 典型个例的 VCP21D 与 VCP11D 切换效果分析

为评估常规降水模式切换 (VCP21D→VCP11D) 对对流过程探测的实际影响, 选取郑州站 (Z9371) 2024 年 7 月 2 日 08: 26 (北京时, 下同) 发生的一次切换数据。图 6a 展示了该站点 VCP21D 的 0.5°仰角层水平结构, 此时 $A_{CR2}=419.55 \text{ km}^2$ / $A_E=631.92 \text{ km}^2$, 因符合 VCP11D 切换指标 ($A_{CR2}>100 \text{ km}^2$ 且 $A_E>15 \text{ km}^2$), 雷达在 8: 32 切换为 VCP11D。此时, 西北方向的流云距离雷达约 110~140 km, 对应了图 2a, 2b 中 VCP21D 模式 0.5°~6.0°仰角的采样范围, VCP11D 模式新增的 5.2°仰角填补了高度 12~16 km 的采样间隙。图 6b~6i 给出了切换前后的回波强度、双偏振观测量及雷达短临常用的水凝物相态识别 (HCA) 产品的垂直剖面对比。由图可见, 45 dBZ 的回波核心最高可达 7.5 km 高度, 回波顶约 12 km。由于 VCP11D 模式新增的仰角层超过了对流的顶高, 因此两种观测模式 Z_H 结构基本一致。同时, 两种模式在径向速度场中的辐合特征、 Z_{DR} 的垂直分布特征也几乎没有差异, 这导致了二者在 HCA 相态剖面基本一致。高度 4 km 以下为小到中雨和大雨区, 4 km 以上为淞附、碰冻过程产生的霰, 更高层为干雪和冰晶。综上所述, 尽管此次过程满足业务定义的切换阈值, 但由于对流云团的距离较远 (>100 km), 导致 VCP11D 模式新增的高仰角层实际采样高度高于回波顶, 未能提供额外的垂直发展信息。换言之, 在当前距离条件下, VCP21D 模式已足以完整刻画该对流云团的垂直结构, 切换至 VCP11D 并未带来显著的探测增益。



注：图 a 黑色实线为垂直剖面的剖面线。

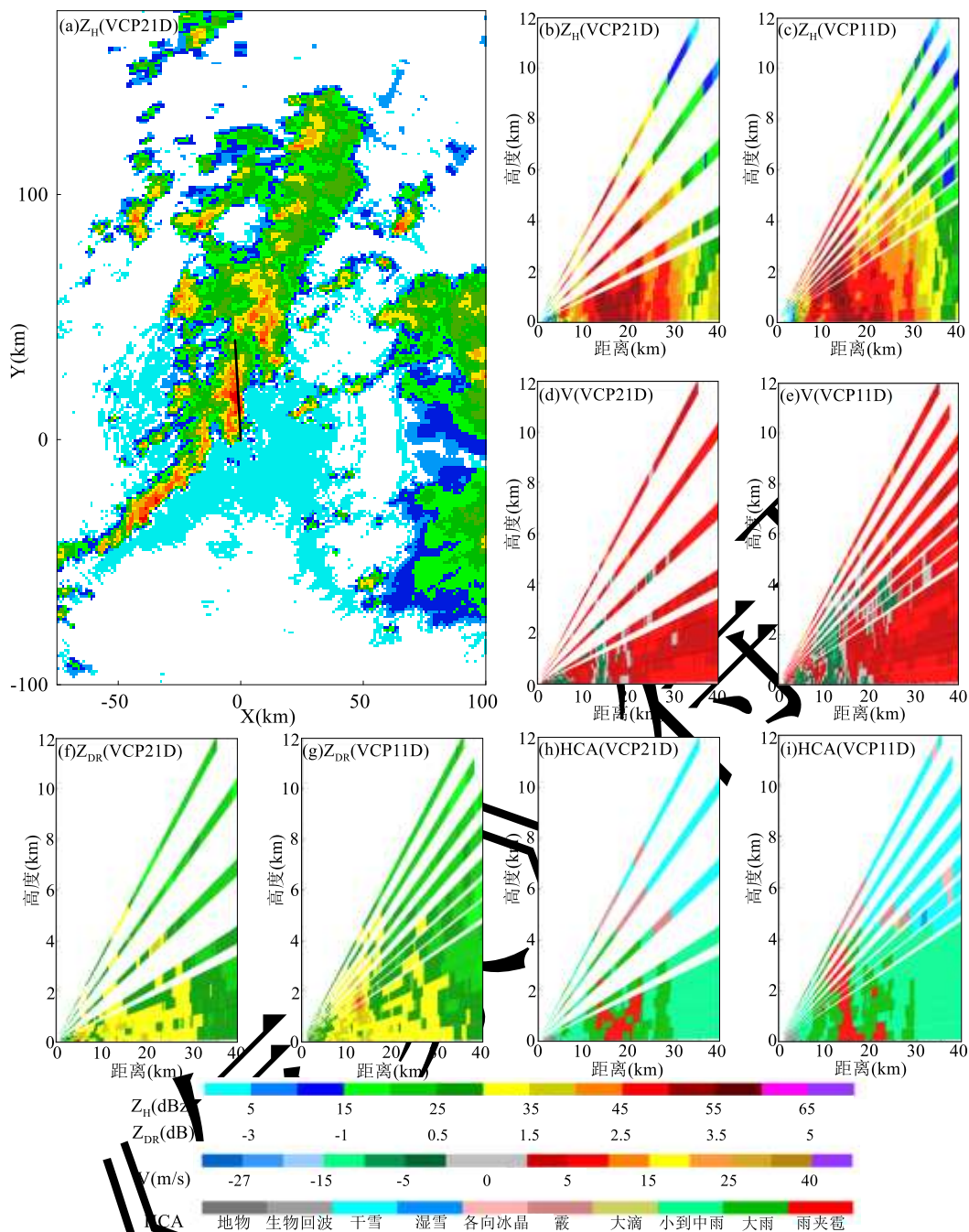
图 6 郑州站雷达 2024 年 7 月 2 日 08:26 (a) VCP21D 模式 0.5° 仰角 Z_H 水平分布, (b~i) VCP21D 与 VCP11D 模式切换前后 (b, c) Z_H , (d, e) V, (f, g) Z_{DR} , (h, i) HCA 的垂直剖面

Fig. 6 (a) Horizontal distribution of Z_H at 0.5° elevation in VCP21D mode, and (b-i) vertical cross-sections of (b, c) Z_H , (d, e) V, (f, g) Z_{DR} , and (h, i) HCA before and after switching between VCP21D and VCP11D modes at Zhengzhou Radar Station at 08:26 BT 2 July 2024

为进一步验证不同距离、不同强度对流条件下模式切换的实际效果, 选取上川岛站

(Z9750) 2024 年 7 月 28 日 11: 24 发生的一次切换数据。图 7a 展示了该站 VCP21D 的 0.5° 仰角层水平结构, 此时 $A_{CR2}=6319.43 \text{ km}^2$, $A_{ET}=1928.07 \text{ km}^2$, 同样达到 VCP11D 切换指标于 11: 30 切换至 VCP11D 模式。此时北方向的流云距离雷达约 0~40 km, 对应了图 2a~2b 中 VCP21D 模式 0.5° ~ 19.5° 仰角的采样范围, VCP11D 模式新增仰角 5.2° 、 7.5° 、 8.7° 、 12° 与 16.7° 填补了高度 2~6 km 的采样间隙。图 7b~7i 给出了切换前后的回波强度、双偏振观测量及雷达短时临近常用的 HCA 产品的垂直剖面对比。由图可见, 对流核心距离雷达 10~20 km, 高度在 2~3 km, Z_H 最大值超过 55 dBz。VCP11D 相较于 VCP21 提供了更连续、完整的对流垂直结构、更清晰的中层径向速度辐合特征和 Z_{DR} 柱的高度特征。反映到 HCA 产品中, 呈现出 0~4 km 连续的降雹带特征, 而 VCP21D 仅能识别出 2 km 以下存在雨夹雹。综上所述, 此次切换较为成功, VCP11D 模式凭借其加密的仰角层, 有效捕获了近场强对流的精细垂直结构和微物理过程, 为短时临近预报提供了新的关键信息。

上述对比表明, 当前基于 A_{CR2} 、 A_{ET} 等反射率面积类阈值触发模式转换, 其效果依赖于降水系统的垂直发展强度和与雷达的相对距离。对于远距离、垂直发展弱的降水 (如郑州站个例), 切换后新增仰角层因探测高度远超实际气象回波顶而无法获取有效信息, 导致资源浪费。对于近距离、垂直发展旺盛的强对流 (如上川岛个例), 切换能充分发挥 VCP11D 的高垂直分辨率优势, 提升对风暴垂直结构和微物理过程的分析能力。



注：图 a 黑色实线为垂直剖面的剖线。

图 7 上川岛站雷达 2024 年 7 月 28 日 11:24 (a) VCP21D 模式 0.5°仰角 Z_H 水平分布，(b~i) VCP21D 与

VCP11D 模式切换前后 (b, c) Z_H ，(d, e) V (f, g) Z_{DR} ，(h, i) HCA 的垂直剖面

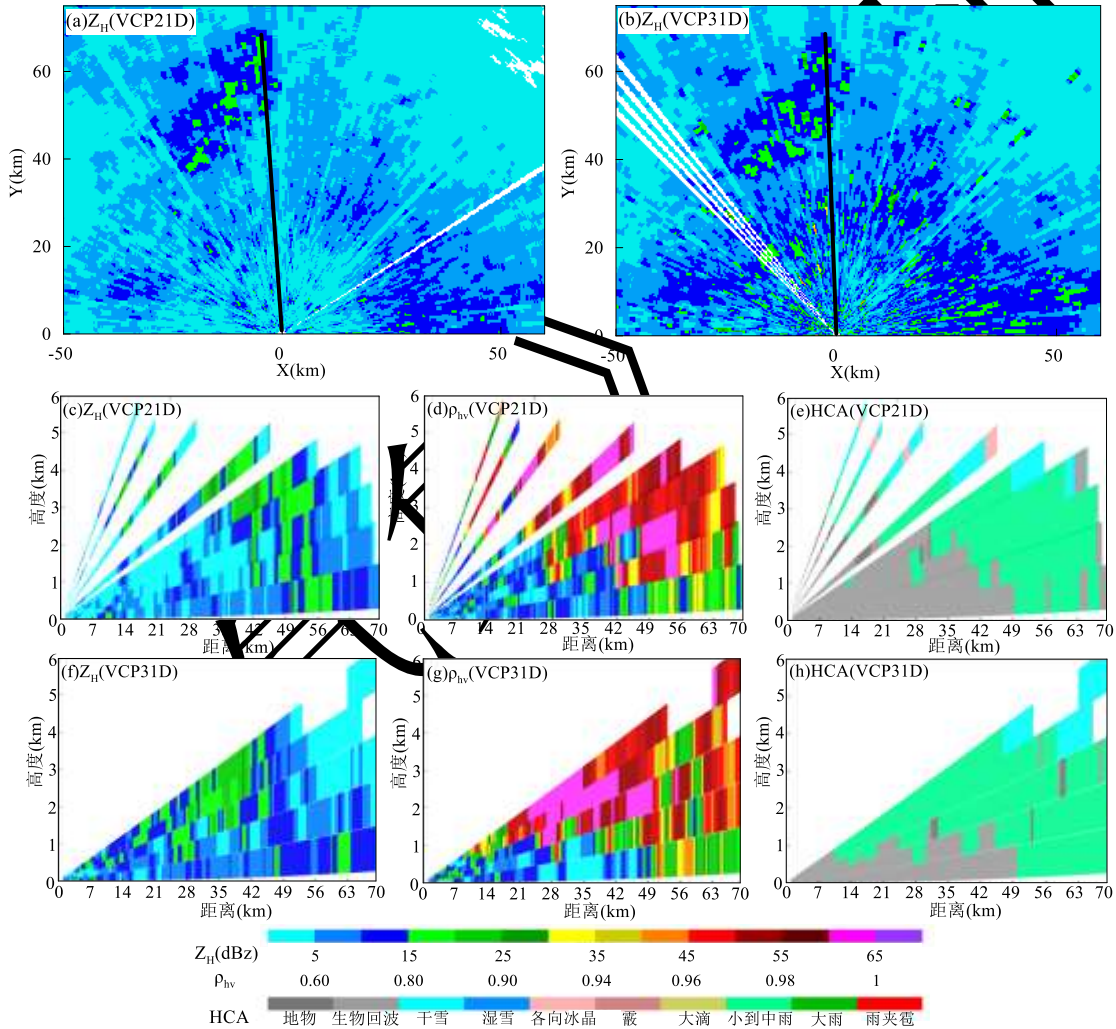
Fig. 7 (a) Horizontal distribution of Z_H at 0.5° elevation in VCP21D mode, and (b-i) vertical cross-sections of (b, c)

Z_H , (d, e) V, (f, g) Z_{DR} , and (h, i) HCA before and after switching between VCP21D and VCP11D modes at

Shangchuan Island Radar Station at 11:24 BT 28 July 2024

4.2 典型个例的 VCP21D 与 VCP31D 切换效果分析

选取郑州站（Z9371）2024 年 6 月 6 日 20: 01 发生的一次切换数据。图 8a~8b 为该站 VCP21D 与 VCP31D 的 0.5°仰角层水平结构，此时 $A_{CR1}=710.24 \text{ km}^2$ ，因符合 VCP31D 切换指标（ $A_{CR1}<1000 \text{ km}^2$ ），雷达站点在 20: 07 切换为 VCP31D。此时，弱降水位于雷达西北方向 20~60 km，两模式观测的降水区域没有明显的变化，切换将减少 VCP21D 中 6.0°、9.9°、14.6°和 19.5°仰角层的采样，对应了图 2c~2d 中 2~8 km 的高度。图 8c~8h 给出了切换前后的回波强度、双偏振观测量及 HCA 产品的垂直剖面对比。由图可见，尽管回波强度较弱，但 ρ_{hv} 作为降水与非气象回波的区分指标， $\rho_{hv}>0.98$ 的高值区表明了切换后降水仍未结束，与 HCA 产品的剖面一致。考虑到 VCP21D 的 6~19.5°仰角层仍有降水信息，此次过早的切换在降水尚未完全结束时即转入观测层次稀疏的晴空模式，造成了部分降水信息的遗漏。



注：图 a 黑色实线为垂直剖面的剖面线。

图 8 郑州站雷达 2024 年 6 月 6 日(a~b) VCP21D 模式与 VCP31D 切换前后 0.5°仰角 Z_H 水平分布，

(c~h) VCP21D 与 VCP31D 模式切换前后 (c, f) Z_H , (d, g) ρ_{hv} , (e, h) HCA 的垂直剖面

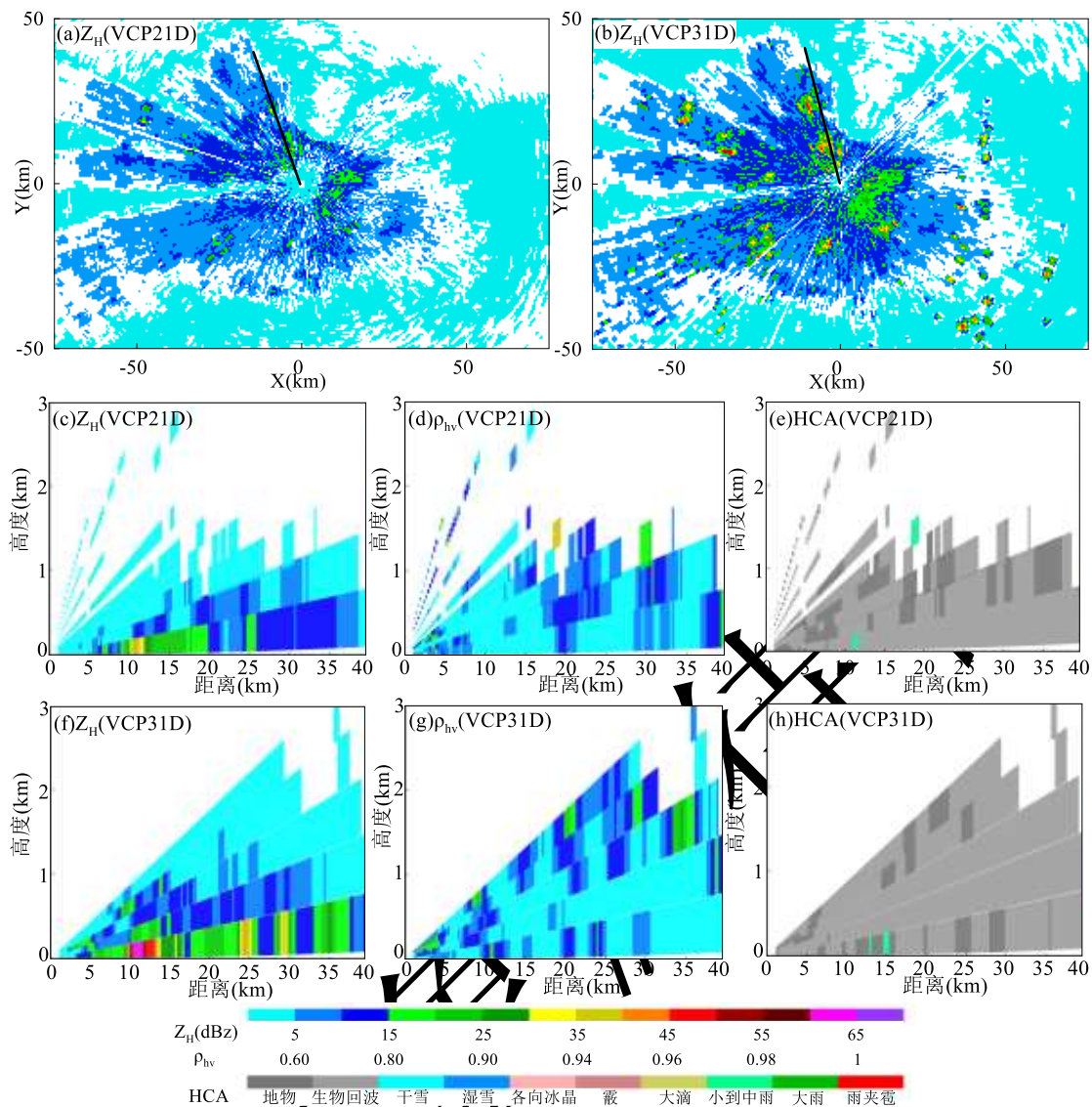
Fig. 8 (a, b) Horizontal distribution of Z_H at 0.5° elevation and (c-h) vertical cross-sections of (c, f) Z_H , (d, g) ρ_{hv} ,

and (e, h) HCA before and after switching between VCP21D and VCP31D modes at Zhengzhou Radar Station at

08:01 BT 6 June 2024

另选取威海站 (Z9631) 2024 年 5 月 27 日 13: 15 发生的一次切换数据。图 9a~9b 为该站 VCP21D 与 VCP31D 的 0.5°仰角层水平结构，此时 $A_{CR1}=587.15 \text{ km}^2$ ，因符合 VCP31D 切换指标 ($A_{CR1}<1000 \text{ km}^2$)，在 13: 21 切换至 VCP31D。从回波结构看，雷达半径 40km 范围内 Z_H 为 5~20 dBz，该特征在模式切换后没有变化，只是弱回波面积更大、地物回波数量增加，与第三节的结果一致。图 9c~9h 给出了切换前后的回波强度、双偏振观测量及 HCA 产品的垂直剖面对比。可见切换前后的 ρ_{hv} 基本低于 0.8，HCA 产品剖面以地物及非气象回波为主，表明降水基本结束。在此情况下，减少 VCP21D 中 6.0°、9.9°、14.6°和 19.5°仰角层的采样、增加探测灵敏度，是雷达晴空条件下的合理选择。

上述分析表明，当前基于组合反射率面积的晴空模式切换阈值 ($A_{CR1}<1000 \text{ km}^2$) 在判断降水是否完全结束时同样存在不足，如郑州个例所示，当降水并未真正结束，尤其是中高层仍有残留回波时，依据阈值切换会导致有效观测信息的遗漏。反之，在确为晴空条件下（如威海个例），切换至 VCP31D 是合理的。



注：图a黑色实线为垂直剖面的剖面。

图 9 威海站雷达 2024 年 5 月 27 日 13:15 (a~b) VCP21D 模式与 VCP31D 切换前后 0.5° 仰角 Z_H 水平分布, (c~h) VCP21D 与 VCP31D 模式切换前后的 (c, f) Z_H , (d, g) ρ_{hv} , (e, h) HCA 沿图 a 黑色实线的垂直剖面

Fig. 9 (a, b) Horizontal distribution of Z_H at 0.5° elevation and (c-h) vertical cross-sections of (c, f) Z_H , (d, g) ρ_{hv} , and (e, h) HCA before and after switching between VCP21D and VCP31D modes at Weihai Radar Station at 13:15

BT 27 May 2024

4 不同观测模式的切换效果评估

4.1 VCP21D 与 VCP11D 的切换效果评估

基于第三节典型个例切换的分析结果, VCP21D 与 VCP11D 切换阈值不一定能较好的反映降水的垂直结构, 因此基于两种降水模式切换时段的相邻雷达数据, 批量统计 VCP11D 新增仰角层 (图 2a~2b 阴影区域) 观测的降水特征 (Z_H 为有效观测值的像元数) 与雷达理

论观测范围（对流层高度 0~15 km 内的所有观测像元数）的比例。该占比越接近 1 说明切换后的观测模式提供的观测信息越丰富，而越接近 0 则说明模式切换效果不大，以此来评估切换好坏。为了避免无效值的干扰，统计时仅考虑存在降水的方位角（CR>20 dBz 方位角）。

图 10a 给出了各型号雷达观测模式切换后新增仰角降水回波占比的箱型图。整体上看，无论哪种型号天气雷达，切换 VCP11 模式后新增仰角层的降水占比均不高，大多在 10%~40% 之间。其中，SAD 型稍好，中值为 27.13%，而 C 波段雷达的切换效果更差，中值为 15.55~22.85%，可能与其部署于内陆有关。由此来看，现有 VCP21D/VCP11D 的切换策略未能获取足够的降水垂直信息。

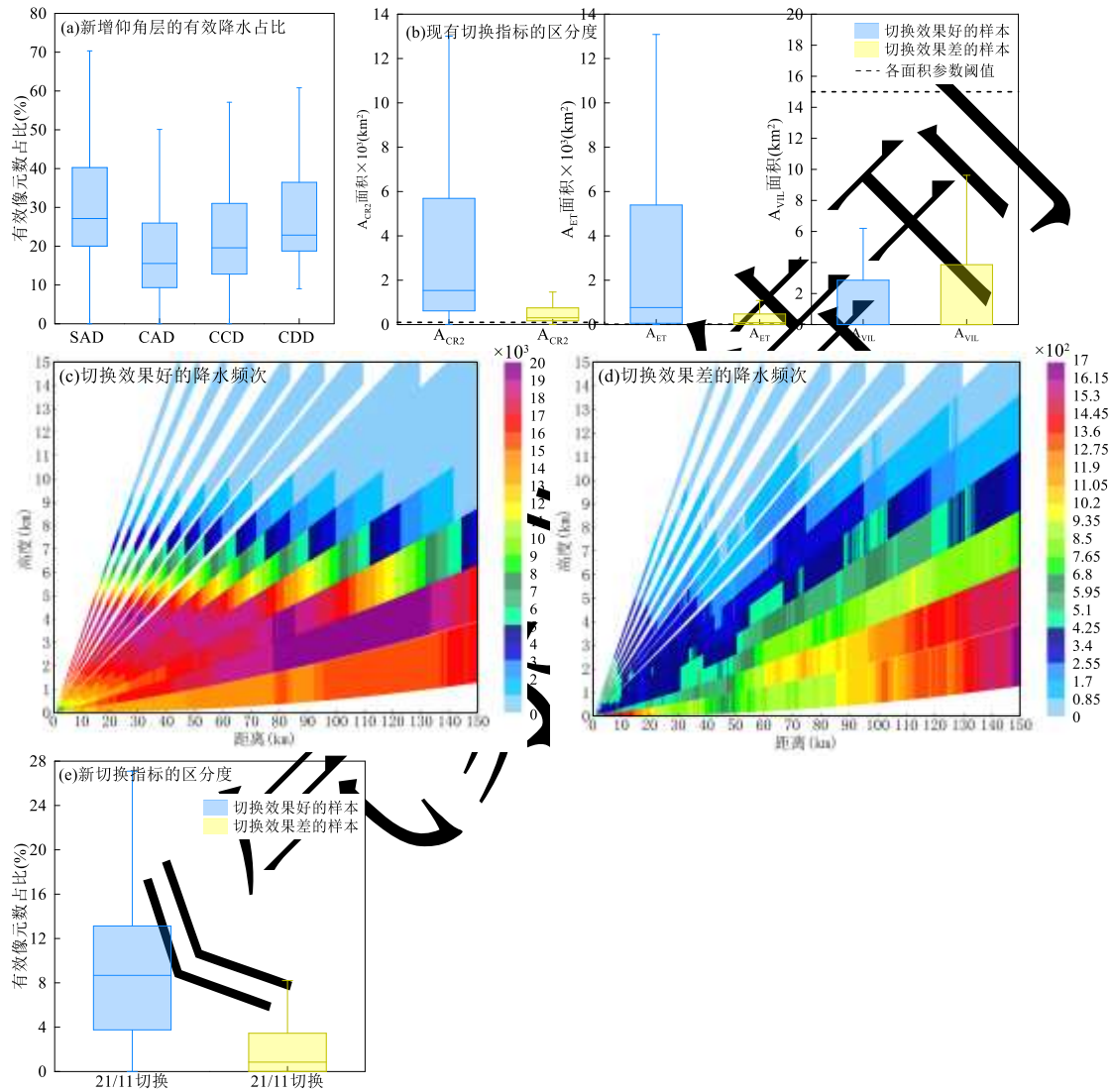
针对该情况，以 SAD 型雷达的切换数据为典型，筛选出切换后新增信息丰富的样本（降水占比>50%）和较差的样本（降水占比<18%），分别统计其现有切换阈值（CR>35 dBz 面积 A_{CR2} 、ET>8 km 面积 A_{ET} 、VIL>15 kg/m² 面积 A_{VIL} ）的分布特征，所得箱型图见图 10b。对比发现，不论新增信息是否丰富、切换效果是否良好，对比样本的 A_{CR2} 远大于 200 km²， A_{ET} 、 A_{VIL} 远大于 15km²，可见现有的切换阈值设置明显偏小。同时，两组样本的 A_{CR2} 、 A_{ET} 、 A_{VIL} 数值存在较大重叠区间，即某一阈值会同时满足切换效果良好和较差的样本，表明切换阈值的区分度不足。

为了找出更适合的切换阈值，进一步从降水回波的空间分布特征出发，将观测模式切换效果良好和较差的样本频次投影至距离-高度图上，见图 10c~10d。对于切换效果良好的样本，降水回波出现在距离雷达 130 km 之内，且该范围内 0~8 km 高度的回波频次较为均匀。相比之下，对于切换效果较差的样本，降水回波主要出现在距离雷达 100 km 以外，雷达近处 0~8km 高度的降水频次较低。由此可见，即使距离较远，降水满足了 VCP11D 模式 A_{CR2} 、 A_{ET} 、 A_{VIL} 的切换阈值，但该模式新增的 5.2°、7.5°、8.7°、12°、16.7° 仰角层在该距离下无法获取足够的降水信息，导致仰角资源的浪费，这便是切换效果不佳的根本原因。

针对上述问题，本研究拟提出新的降水模式切换条件，主要考虑如下：（1）触发条件必须简单直接，满足新一代天气雷达数据采集系统（RDA）的计算要求，为此使用 VCP11D 与 VCP21D 在图 2 阴影区域内共有仰角层（6°和 9.9°）数据作为输入。（2）切换阈值必须真实反映雷达在加密仰角层的降水垂直特征，为此将统计范围设置为 6°和 9.9°仰角下存在降水（ $Z_H>20$ dBz）的方位角，逐方位计算对应仰角层>20 dBz 的像元数占>20 dBz 方位角的有效观测像元数（距离雷达 20~150 km 及高度<15 km）的比例。图 10e 给出了 SAD 型雷达切换效果良好和较差的样本分别使用新指标计算的观测有效像元占比对比箱线图，可见切换效果好的样本与差的样本在新指标下的区分度差异明显，建议以降水观测有效像元占比 4%

作为切换阈值，高于该阈值时切换至 VCP11D，反之则切换至 VCP21D。

对于 C 波段业务雷达 VCP21D 与 VCP11D 的切换阈值，考虑其除波长外其余参数基本相同，使用上述方法分析后发现切换优劣的原因仍是降水空间位置的差异。只是 C 波段雷达双偏振升级较晚、大多部署于降水偏少西部，用于优劣对比的样本严重偏少（以 CAD 型雷达为例收集不足 80 组数据，仅为 S 波段雷达的六分之一），后续需要更多样本支撑 C 波段切换阈值的研究。



注：箱线图中的上端代表统计最大值，箱体内部 3 条线自下而上分别代表第 25%、50% 和 75% 分位值。

图 10 (a) 不同型号雷达新增仰角层的有效降水占比，(b) SAD 型雷达 VCP21D 与 VCP11D 模式切换效果好与差样本的现有切换指标 (A_{CR2} 、 A_{ET} 、 A_{VIL} 面积) 的箱线图；(c~d) 切换效果 (c) 好, (d) 差的降水频次距离-高度分布，和 (e) 两类样本的新切换指标(有效像元占比)箱线图

Fig. 10 (a) The proportion of effective precipitation at the newly added elevation angle layer in different types of radars, (b) box plot of the existing switching indicators (A_{CR2} , A_{ET} , A_{VIL} area) for samples with

good and poor switching performance between the VCP21D and VCP11D modes of SAD-type radars, (c, d) distance-height distribution of precipitation frequency for cases with (c) good switching performance and (d) poor switching performance, and (e) box plot of the new switching indicators (proportion of effective pixels) for these two types of samples

4.2 VCP21D 与 VCP31D 的切换效果评估

同理，典型个例发现了 VCP21D 切换至 VCP31D 后，VCP31D 缺失的仰角层（图 2c、2d 阴影区域）仍有可能包含降水的信息。因此，选取 VCP21D 切换至 VCP31D 后缺失仰角层，采用 5.1 节相同的方式，批量统计分析降水回波数量在理论观测范围内的比例（对流层高度 0~15 km 内的所有观测像元数）。该占比越接近 1 说明切换后的降水并未结束，而越接近 0 则说明模式切换效果优秀。

图 11a 给出了各型号雷达观测模式切换后缺失仰角降水回波占比的箱型图。整体上看，无论哪种型号天气雷达，切换前仍有部分降水信息，大多在 4%~20% 之间。其中，SAD 型切换效果最差，中值为 15.66%，而 C 波段雷达的切换效果较好，中值为 6.43~13.95%。由此来看，现有 VCP21D/VCP31D 的切换策略未能反映降水终止的信息。

针对该情况，以 SAD 型雷达的切换数据为典型，筛选出切换后效果差的样本（缺失降水信息占比>25%）和较好的样本（缺失降水信息占比<9%），分别统计其现有切换阈值（ $CR>18$ dBz 面积 A_{CR1} ）的分布特征。所得箱型图见图 11b。对比发现，现有的切换阈值设置明显偏大，两组样本中有大量样本位于 $A_{CR1}<1000$ km² 的阈值内，且两组样本的 A_{CR1} 数值存在较大重叠区间，区分度同样不足。

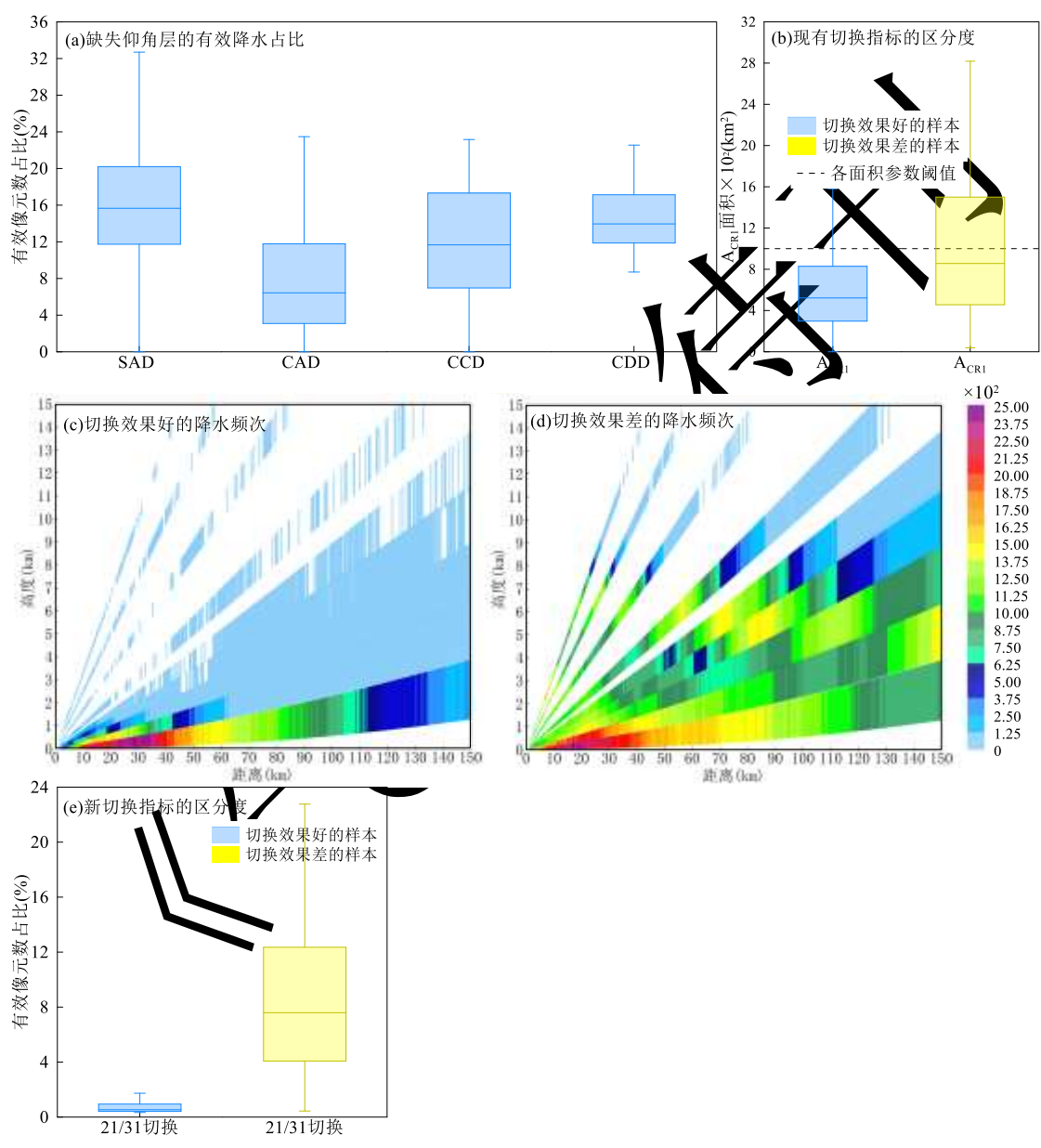
采用与 VCP21D/VCP11D 切换评估相同的方法，将晴空模式切换效果良好和较差的样本频次投影至距离-高度图上，见图 11c~11d。对于切换效果良好的样本，降水回波仅出现在距离雷达<40 km、高度<1 km 的最底层。对于切换效果较差的样本，降水回波则可能出现在距离雷达更远（40~120 km）、高度更高（1~8 km）的位置。由此可见，即使满足了 VCP31D 模式 A_{CR1} 的切换阈值，但该模式减少的 6°、9.9°、14.6°、19.5°仰角层在该距离下仍有降水信息，导致仰角资源被错误减少，这便是切换效果不佳的根本原因。

针对上述问题，本研究拟提出新的降水与晴空模式切换条件，主要考虑如下：（1）触发条件必须简单直接，使用 VCP31D 与 VCP21D 的共有仰角层（3.5°与 4.5°）数据作为输入。

（2）切换阈值必须真实反映雷达周围的降水是否停止，为此将统计范围设置为 3.5°与 4.5°仰角存在降水（ $Z_H>0$ dBz）的方位角，逐方位计算对应仰角层>0 dBz 的像元数占总有效观测像元数（距离<100 km 以及高度<15 km）的比例。图 11e 给出了 SAD 型雷达切换效果良

好和较差的样本分别使用新指标计算的观测有效像元占比对比箱型图,可见切换效果好的样本与差的样本在新指标下的区分度差异明显,建议以降水观测有效像元占比 1%作为切换阈值,低于该阈值时切换至 VCP31D,反之则切换至 VCP21D。

对于 C 波段业务雷达 VCP21D 与 VCP31D 的切换阈值,情况与 S 波段雷达类似,切换优劣的原因依旧是缺失仰角层保留有降水信息。受限于当前样本数量,未来可以收集更多个例开展切换阈值的研究。



注：箱线图的上端代表统计最大值，箱体内部 3 条线自下而上分别代表第 25%、50% 和 75% 分位值。

图 11 (a) 不同型号雷达缺失仰角层的有效降水占比, (b) SAD 型雷达 VCP21D 与 VCP31D 模式切换效果好与差样本的现有切换指标 (A_{CRI} 面积) 的箱线图; (c~d) 切换效果 (c) 好, (d) 差的降水频次距离-高度分布, 和 (e) 两类样本的新切换指标(有效像元占比)箱线图

Fig. 11 (a) The proportion of effective precipitation missing the elevation angle layer in different types of radars, (b) box plot of the existing switching indicator (A_{CR1} area) for samples with good and poor switching performance between the VCP21D and VCP31D modes of the SAD-type radars; (c, d) distance-height distribution of precipitation frequency for cases with good (c) and poor (d) switching performance, and (e) box plot of the new switching indicators (proportion of effective pixels) for these two types of samples

5 结论

本研究基于 2024 年 4-7 月全国 117 部新一代天气雷达的观测数据，系统评估了业务化运行的不同观测模式的数据质量及其自动切换策略的效果，得到以下主要结论。

(1) 不同观测模式在数据质量上各有优劣，需根据监测目标权衡选择。评估表明，VCP11D 模式时空分辨率高，利于捕捉快速演变的强对流系统，但其脉冲累积数较少导致差分反射率 (Z_{DR}) 的测量精度略低于 VCP21D 模式；VCP11D 模式灵敏度最高，适用于晴空弱信号探测，但其较宽的脉冲宽度导致地物识别面积显著增大，且时间分辨率较低。精细化模式在提升空间分辨率方面优势明显，但代价是灵敏度和地物抑制能力的下降。因此，在实际业务中，应根据主要监测目标（如强对流、稳定性降水或晴空）来选择最合适的观测模式。

(2) 当前业务中基于固定反射率面积阈值的模式自动切换策略，通过典型个例发现切换策略因忽略了降水系统的垂直结构与空间分布特征，造成雷达扫描资源利用率低下，以 CINRAD/SAD 型为例批量统计发现，VCP21D 向 VCP11D 的切换触发条件（如 $CR \geq 35$ dBZ 的面积 $A_{CR2} > 100 \text{ km}^2$ ）设置偏小且区分度不足，导致雷达常在降水垂直结构发展不充分的区域进行切换，未能有效利用 VCP11D 模式探测高仰角层降水结构的优势。相反，VCP21D 向 VCP31D 的切换条件（ $CR \geq 18$ dBZ 的面积 $A_{CR1} < 1000 \text{ km}^2$ ）设置偏大，导致在降水并未完全结束时过早切换至晴空模式，造成中高层降水信息的遗漏。

(3) 针对上述问题，本研究提出的新切换方案，摒弃了单一的反射率强度面积阈值，转而采用特定共有仰角层内有效气象回波的空间占比作为判据。新指标（如建议以中高层共有仰角层内 > 20 dBZ 降水观测有效像元占比 4% 作为向 VCP11D 切换的阈值，以中低层共有仰角层内 > 0 dBZ 降水观测有效像元占比 1% 作为向 VCP31D 切换的阈值）能更真实地反映降水系统的垂直结构特征，使模式切换的决策更贴合雷达站点的实时探测环境，从而显著提高仰角扫描资源的利用效率和数据的应用价值。

需要指出的是，本研究仅针对业务雷达的历史数据开展统计评估，未涉及新旧指标的效

果对比。其原因是国内每部业务雷达的观测模式及其切换方法都是中国气象局综合观测司发
文固定的,以目前的研究条件不可能在实时业务运行的雷达上大幅修改切换方法。未来研究
将考虑与中国气象局气象探测中心联合,对一部科研雷达的 RDA 上进行改造、使用本研究
提出的新切换指标,采集独立的观测样本,用于评估新方法的适用性和效果。

参考文献

- 陈大任, 陈刚, 吴峥嵘, 2010. 基于体扫模式的组合 RHI 自动实现算法[J]. 气象, 36(2): 109-112. Chen D R, Chen G, Wu Z R, 2010. Composite RHI auto-implementation algorithm based on volume scan mode[J]. Meteor Mon, 36(2): 109-112 (in Chinese).
- 杜赛, 刘显通, 孙皓霆, 等, 2021. 华南一次典型雷暴过程双偏振雷达参量与闪电活动关系研究[J]. 热带气象学报, 37(3): 427-438. Du S, Liu X T, Sun H T, et al, 2021. Relationship between dual-polarization radar parameters and lightning activity during a typical thunderstorm in South China[J]. J Trop Meteor, 37(3): 427-438, doi: 10.16032/j.issn.1004-4965.2021.038 (in Chinese).
- 李柏, 古庆同, 李瑞义, 等, 2013. 新一代天气雷达灾害性天气监测能力分析及未来发展[J]. 气象, 39(3): 265-280. Li B, Gu Q T, Li R Y, et al, 2013. Analyses on disastrous weather monitoring capability of CINRAD and future development[J]. Meteor Mon, 39(3): 265-280, doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2013.03.001 (in Chinese).
- 李芳, 刁秀广, 魏鸣, 2024. 一次强冰雹超级单体风暴双偏振参量特征分析[J]. 气象, 50(2): 195-209. Li F, Diao X G, Wei M, 2024. Characteristic analysis of dual-polarization parameters of a severe hail supercell storm[J]. Meteor Mon, 50(2): 195-209, doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2023.100801 (in Chinese).
- 李佳慧, 马建立, 陈明轩, 等, 2025. 基于瓦片分区侧雷达偏振参量动态定量降水估测研究[J]. 高原气象, 44(4): 1046-1056. Li J H, Ma J L, Chen M X, et al, 2025. Dynamic quantitative precipitation estimation study of polarization parameter of radar based on tile partitioning[J]. Plateau Meteor, 44(4): 1046-1056 (in Chinese).
- 刘应军, 顾松山, 周雨华, 等, 2006. 新一代天气雷达体扫模式的比较分析[J]. 气象, 32(1): 44-50. Liu Y J, Gu S S, Zhou Y H, et al, 2006. Comparison of CINRAD/SA volume coverage patterns on algorithms output[J]. Meteor Mon, 32(1): 44-50 (in Chinese).
- 阮悦, 黄慧琳, 魏鸣, 等, 2022. 福建冰雹云三维闪电及双偏振雷达回波特征分析[J]. 气象, 48(4): 442-451. Ruan Y, Huang H L, Wei M, et al, 2022. Analysis of three dimensional lightning and dual-polarization radar echo characteristics of hail cloud over Fujian[J]. Meteor Mon, 48(4): 442-451, doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2022.011501 (in Chinese).
- 王文青, 杨慧玲, 孙跃, 等, 2026. 冰雹预警的差分反射率特征: 以山东三次冰雹过程为例[J]. 气象, 52(2): 146-159. Wang W Q, Yang H L, Sun Y, et al, 2026. Characteristics of differential reflectivity for early warning of hail: three hail cases in Shandong Province[J]. Meteor Mon, 52(2): 146-159, doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2025.071601 (in Chinese).
- 王睿, 伍志方, 林青, 等, 2023. 改进的精细分辨率雷达探测强对流效果评估[J]. 热带气象学报, 39(3): 323-336. Wang R, Wu Z F, Lin Q, et al, 2023. The assessment of processed fine resolution radar based on observation[J]. J Trop Meteor, 39(3): 323-336, doi:

10.16032/j.issn.1004-4965.2023.030 (in Chinese).

汪章维, 陈昊, 袁圣, 等, 2020. 新一代双偏振天气雷达(CINRAD/SAD)精细化探测技术[J]. 气象科技, 48(3): 331-336. Wang Z W, Chen H, Yuan S, et al, 2020. Fine detection technology of new generation dual polarization weather radar (CINRAD/SAD)[J]. Meteor Sci Technol, 48(3): 331-336, doi: 10.19517/j.1671-6345.20190267 (in Chinese).

吴若婷, 杨思晓, 黄楚贤, 等, 2026. “海葵”残涡的雨滴谱特征及其对 S/X 波段定量降水估测算法的影响[J]. 气象, 52(1): 29-43. Wu R T, Yang S X, Huang C X, et al, 2026. Characteristics of raindrop size distribution of the residual vortex of typhoon Haikui and Its Impact on the S/X-band QPE Algorithms[J]. Meteor Mon, 52(1): 29-43, doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2025.051901 (in Chinese).

肖艳姣, 王珏, 王志斌, 等, 2022. 双偏振天气雷达精细化探测技术对 2021 年两个龙卷风暴识别能力的影响分析[J]. 暴雨灾害, 41(2): 130-141. Xiao Y J, Wang J, Wang Z B, et al, 2022. Analysis on the influence of fine detection technology of dual polarization weather radar on recognition ability of two tornado storms in 2021[J]. Torr Rain Dis, 41(2): 130-141, doi: 10.3969/j.issn.1004-9045.2022.02.003 (in Chinese).

杨金红, 陈大任, 王曙东, 2013. 改进新一代天气雷达低层探测能力研究[J]. 气象, 39(4): 494-499. Yang J H, Chen D R, Wang S D, 2013. Research on improving CINRAD detection ability in lower layers[J]. Meteor Mon, 39(4): 494-499, doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2013.04.012 (in Chinese).

姚自伟, 龚红梅, 陈卓, 等, 2025. 滇西南冰雹的 X 波段双偏振雷达特征统计[J]. 气象, 51(9): 1137-1145. Yao Z W, Gong H M, Chen Z, et al, 2025. Statistical analysis of X-Band dual-polarization radar characteristics of hail in southwestern Yunnan[J]. Meteor Mon, 51(9): 1137-1145, doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2025.091001 (in Chinese).

张晶, 姚文, 孙召平, 等, 2024. 双偏振天气雷达新体积扫描模式试验评估分析[J]. 气象, 50(10): 1201-1215. Zhang J, Yao W, Sun Z P, et al, 2024. Evaluation and analysis of experimental testing of dual-polarization weather radar's new volume coverage pattern[J]. Meteor Mon, 50(10): 1201-1215, doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2024.080101 (in Chinese).

张沛源, 杨洪平, 胡绍萍, 2008. 新一代天气雷达在临近预报和灾害性天气警报中的应用[J]. 气象, 34(1): 3-11. Zhang P Y, Yang H P, Hu S P, et al, 2008. Applications of new generation weather radar to nowcasting and warning of severe weather[J]. Meteor Mon, 34(1): 3-11 (in Chinese).

张强, 李栋梁, 姚玉璧, 等, 2024. 干旱形成机制与预测理论方法及其灾害风险特征研究进展与展望[J]. 气象学报, 82(1): 1-21. Zhang Q, Li D L, Yao Y B, et al, 2024. Progress and prospect of the research on drought formation, prediction, and related risk assessment[J]. Acta Meteor Sin, 82(1): 1-21, doi: 10.11676/qxxb2024.20230095 (in Chinese).

荀爱萍, 张伟, 黄惠铭, 等, 2019. 厦门市 S 波段双偏振雷达测雨效果分析[J]. 气象与环境科学, 42(4): 103-110. Xun A P, Zhang W, Huang H R, et al, 2019. Analysis of rainfall measuring errors of s-band dual polarization weather radar in Xiamen[J]. Meteor Environ Sci, 42(4): 103-110, doi: 10.16765/j.cnki.1673-7148.2019.04.015 (in Chinese).

竺夏英, 孙林海, 钟海玲, 等, 2024. 2023 年中国气候异常特征及主要天气气候事件[J]. 气象, 50(2): 246-256. Zhu XY, Sun LH,

572 Zhong HL, et al, 2024. Characteristics of climate anomalies and major meteorological events over China in 2023[J]. Meteor Mon, 50(2):
573 246-256, doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2024.010501 (in Chinese).
574 Brown R A, Janish J M, Wood V T, 2000. Impact of WSR-88D scanning strategies on severe storm algorithms[J]. Wea Forecasting,
575 15(1): 90-102.
576 Kingfield D M, LaDue J G, 2015. The relationship between automated low-level velocity calculations from the WSR-88D and
577 maximum tornado intensity determined from damage surveys[J]. Wea Forecasting, 30(5): 1125-1139.
578 Kingfield D M, French M M, 2022. The influence of WSR-88D intra-volume scanning strategies on thunderstorm observations and
579 warnings in the dual-polarization radar era: 2011–20[J]. Wea Forecasting, 37(2): 283-301.
580 Kurdzo J M, Donovan M F, Cho J Y N, et al, 2024. Impact of WSR-88D MESO-SAILS usage on MRMS-based quantitative
581 precipitation estimation[C]//2024 IEEE Radar Conference (RadarConf24). Denver: IEEE: 1-6.
582 Tyynelä J, Chandrasekar V, 2014. Characterizing falling snow using multifrequency dual-polarization measurements[J]. J Geophys
583 Res Atmos, 119(13): 8268-8283.
584 Zhang Q, Wang X P, Liang H H, et al, 2021. Assumption and discussion of volume scanning strategy of new generation weather
585 radar in China I[C]//2021 CIE International Conference on Radar (Radar). Haikou: IEEE, 2021: 1154-1158.