

不同地貌区域闪电代理雷达回波研究及应用分析

周威¹ 魏庆^{2*} 赵旋¹ 王彬雁¹ 张武龙¹ 周长春¹

(1 四川省气象台/高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室, 成都 610072;

2 四川省防雷中心, 成都 610072)

摘要 利用闪电与雷达回波资料,通过箱线图分析和对数拟合方法,为四川省不同地貌区域建立了闪电代理雷达回波的拟合方程,并进行了个例检验。结果表明:四川盆地、川西高原及攀西地区的闪电频次与雷达回波强度间存在显著关系,随着闪电频次的增加,雷达回波强度离散度减小,但样本格点数也急剧减少。三个区域的代理回波强度与拟合闪电密度频次大小呈正比关系,盆地的拟合效果是三个区域中最优的,盆地的回波中位数和均值与闪电的拟合优度均达到了 0.909,其回波值与闪电频次紧密相关,数据分布集中;川西高原次之,攀西地区因离散度大、频次跨度广而拟合较差。不同区域的拟合结果均整体偏弱,但是代理回波仍然能准确反映高值中心信息,而不同时刻的代理回波能够展现出回波的动态变化趋势,对雷暴预报预警具有重要价值。

关键词 闪电;雷达回波;对数拟合;代理回波

中图分类号: P427.3 **DOI:** 10.19517/j.1671-6345.20240102 **文献标识码:** A

引言

闪电资料因其独特的优势在气象监测中发挥着重要作用,能够为其他分类强对流天气的监测提供参考^[1-3],其探测范围广、时空分辨率高、传输效率高,且受地形影响较小,通过算法拟合将闪电资料转换成代理回波,可以在一定程度上弥补由于雷达观测范围有限、观测区域被遮挡或雷达盲区导致的雷达回波缺乏或缺失的问题^[4-5]。已有研究指出,通过物理初始化方法同化闪电代理反射率可以改进对流天气预报,且同化多时间闪电数据可以进一步提高预报的准确性^[6-7]。孙玉婷等^[8]基于地形差异,利用 S 形曲线拟合了本地化闪电和雷达回波关系,得到了更为接近实况的代理公式。我国华中区域快速更新同化预报系统通过引进 GSI 同化技术,何邓新等^[9]将这种本地化的代理关系应用到华中区域模式中,得到了较好的应用效果。这种代理关系不仅有

助于将闪电资料间接同化到模式中,还能在雷达实况观测缺失时作为替代资料进行同化,确保模式预报的准确率。这种代理回波为短临监测预警预报提供了重要的经验技术支持,何静等^[10-12]通过将雷达资料同化到数值模式中发现,雷达观测资料同化可在一定程度上提高降水预报性能。然而,不同地区的地理环境、气候条件、系统演变以及雷达布网情况等因素都会对两者之间的关系产生影响,多数研究也尚未给出明确的定量关系^[13-15]。

刘海兵等^[16-19]诸多研究者通过分析闪电特征与海拔高度、地形、坡度等相关关系及变化特征,发现不同区域闪电的密度、强度以及强雷区分布等存在明显差异。由于我省地形复杂,地理区域横跨多个地貌单元,海拔高度悬殊巨大^[20-21],雷达观测受到高山和建筑物的遮挡以及观测范围限制的影响,常常出现雷达回波观测空缺的情况。这不仅不利于本地强降水等短临天气的监测预警,同时还会影响

<http://www.qxkj.net.cn> 气象科技

中国气象局复盘总结专项(FPZJ2024-112)和创新发展专项(CXFZ2024J013)、四川省自然科学基金(2023NSFS0242)、高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室研究型重点专项(SCQXKJYJXZD202301)和青年专项(SCQXKJQN202227)共同资助

作者简介:周威,男,1987年生,硕士,高工,主要从事强对流天气预报技术研究,Email:624632436@qq.com

收稿日期:2024年3月28日;定稿日期:2024年11月19日

*通信作者,Email:997400080@qq.com

©《气象科技》编辑部(CC BY-NC-ND 4.0)

本地化区域模式对雷达资料的同化效果,进而影响区域模式预报结果。重新对闪电与雷达回波之间的关系开展本地化的定量分析,划分不同的地理区域并建立两者的经验关系,增强闪电资料的实用价值,丰富短临近天气预报的技术手段。

1 资料与数据来源

闪电资料:研究采用四川省 ADTD(Advanced TOA and Direction system)地闪定位系统数据,该系统专注于探测云地闪现象。基于 TOA(Time Of Arrival)定位技术,通过测量信号到达不同基站的时间并转换为距离,实现精准定位。该系统探测效率高达 90%,探测范围约 300 km^[22-24]。目前,我省共有 19 部正常运行的闪电定位仪,全面覆盖四川及周边区域。

雷达回波资料:研究选取中国气象局短临预报业务系统(SWAN)雷达三维拼图资料^[25-26],提取垂直柱内的最大回波作为分析对象,其强度类似于极坐标对应的组合反射率,资料的时间分辨率为 6 min,空间分辨率为 0.01°×0.01°。为确保研究成果可适用于本地西南区域模式,参照模式分辨率,研究进一步

提取每 0.03°×0.03°的格点内(即“九宫格”)的最大回波值作为分析回波值。

所有数据资料均源自四川省数据探测中心和四川省气象台,经过严格的质量控制,确保了分析结果的准确性与可靠性。

2 数据个例库的建立

2.1 个例挑选

已有研究指出,闪电频次等特征与雷达回波强度之间存在较高的相关性,且多数呈正相关,但不同区域间却存在一定差异^[27-29]。为了进一步明晰两个特征因子之间的具体关系,研究分别选取了 2020 年和 2021 年 6—8 月四川省三个不同地貌区域(四川盆地、川西高原及攀西地区)的 47 个典型雷暴天气过程。雷暴挑选以闪电相对集中的单体雷暴或多单体雷暴为主,分散或零星闪电的雷暴过程不纳入统计范围。个例具体信息如表 1 所示,从表中雷暴个例的时间分布来看,6 月川西高原和攀西地区雷暴个例多于四川盆地,7 月我省整体上雷暴过程较少,7 月底到 8 月四川盆地雷暴过程明显多于川西高原和攀西地区,个例的持续时间为几小时到十多个小时不等。

表 1 2020 年和 2021 年四川省 47 个典型雷暴天气过程发生时间和区域

Table 1 The occurrence time and areas of 47 typical thunderstorm weather processes in Sichuan Province in 2020 and 2021

序号	2020 年过程发生时间	主要发生区域	序号	2021 年过程发生时间	主要发生区域
1	06-06 13:00—20:00	川西高原	24	06-06 14:00—06-07 02:00	川西高原、攀西地区
2	06-07 14:00—22:00	川西高原	25	06-15 13:00—06-16 02:00	川西高原、攀西地区
3	06-09 14:00—06-10 01:00	攀西地区	26	06-16 21:00—06-17 15:00	四川盆地
4	06-11 14:00—06-12 06:00	全省范围	27	06-20 13:00—23:00	川西高原
5	06-13 15:00—23:00	川西高原、攀西地区	28	06-28 12:00—19:00	川西高原
6	06-15 19:00—06-16 10:00	四川盆地、川西高原	29	06-02 13:00—06-03 03:00	川西高原
7	06-16 15:00—06-17 11:00	四川盆地、川西高原	30	06-13 19:00—06-14 11:00	四川盆地、川西高原
8	06-19 14:00—22:00	川西高原	31	06-16 04:00—17:00	四川盆地
9	06-20 14:00—23:00	川西高原	32	06-18 13:00—06-19 02:00	川西高原、攀西地区
10	06-21 14:00—06-22 03:00	川西高原	33	06-24 12:00—06-22:00	川西高原
11	06-23 15:00—23:00	攀西地区	34	07-01 20:00—07-02 01:00	川西高原
12	06-26 13:00—06-27 01:00	攀西地区	35	07-09 21:00—07-10 08:00	四川盆地
13	06-27 17:00—23:00	攀西地区	36	07-15 20:00—07-16 01:00	四川盆地
14	07-05 13:00—23:00	川西高原	37	07-18 20:00—07-19 05:00	四川盆地
15	07-11 18:00—22:00	攀西地区	38	08-04 14:00—07-05 08:00	四川盆地
16	07-24 01:00—10:00	四川盆地	39	08-06 14:00—23:00	川西高原
17	08-02 01:00—05:00	四川盆地	40	08-06 23:00—08-07 13:00	四川盆地
18	08-02 23:00—08-03 07:00	四川盆地	41	08-12 14:00—23:00	川西高原
19	08 06 04:00—07:00	四川盆地	42	08-15 14:00—16:03	川西高原
20	08-08 18:00—08-09 00:00	四川盆地	43	08-16 18:00—08-17 03:00	四川盆地
21	08-11 19:00—08-12 06:00	四川盆地、攀西地区	44	08-19 14:00—08-20 07:00	四川盆地、川西高原
22	08-12 19:00—08-13 02:00	四川盆地	45	08-21 21:00—08-22 16:00	四川盆地
23	08-23 13:00—08-24 05:00	四川盆地	46	08-22 17:00—08-23 02:00	攀西地区
			47	08-30 12:00—20:00	川西高原

2.2 样本数据集建立

为了深入分析闪电与雷达回波之间的内在联系,并构建拟合模型,本研究采用了“九宫格”内最大回波值作为雷达回波的拟合因子,该值取自每个 $0.03^\circ \times 0.03^\circ$ 格点中的最大值。针对表 1 所列的雷暴个例,提取了每 6 min 间隔内各“九宫格”的最大回波值。随后,借鉴华中区域闪电代理雷达回波频次的计算方法^[8],设定了以当前雷达观测时间点为中心,向前 30 min、向后 12 min(共计 42 min)的时间窗口,用于统计该时间段内的闪电累计频次。通过这一方法,计算所有雷暴个例逐 6 min 雷达回波和对应 42 min 时间段内的累计闪电频次。另外,为了保证样本数据的准确性,排除雷达回波奇异值,将 25 dBz、15 dBz 及 15 dBz 以上的回波强度分别作为四川盆地、川西高原及攀西地区的初始样本阈值,建立所有雷暴个例时间分辨率为 6 min、空间分辨率为 $0.03^\circ \times 0.03^\circ$ 的雷达回波强度和闪电频次的初始样本数据集。

由于闪电与雷达回波之间的复杂关系在不同雷暴过程、同一雷暴的不同阶段以及不同区域中均表现出显著差异^[13-14]。因此,并非所有个例的闪电频次与雷达回波均可直接作为研究分析的对象。为了揭示数据分布的特征,研究采用箱线图^[8,30]作为分析方法,对原始数据集进行分析,发现随着闪电频次的增加,对应的样本数量逐渐减少,离散度增大。在对比四川盆地和攀西地区时,发现格点闪电频次的分布存在巨大差异,格点频次从最低的 1 次到最高的 227 次不等,同时高频闪电格点的数据量极为有限。为了确保研究的准确性和可靠性,研究对数据进行了严格的质量控制,仅保留格点样本数量超过 50 个的数据点,确保了样本的代表性和稳定性。最终,确定四川盆地、川西高原及攀西地区的样本格点最大闪电次数分别为 34 次、26 次及 14 次,具体样本数据信息详见表 2。

表 2 筛选出的最终样本数据
Table 2 Selected final sample data

区域	总格点 数	占初始 数据的 百分比	闪电 总频次	对应最大 闪电格点 次数	平均格点 闪电次数
四川盆地	118826	88.6	316031	34	2.7
川西高原	83224	96.9	167428	26	2.0
攀西地区	42752	75.4	86418	14	2.0

2.3 箱线图分析与计算

根据表 2 中的样本数据,绘制了闪电频次与雷达回波强度的箱线图,并在图中添加了不同格点闪电频次对应的雷达回波平均值,如图 1 所示,箱体中的横线代表雷达回波的中位数值,圆圈则标记了平均值。

从整体来看,三个区域的闪电频次与雷达回波强度的中位数和均值均呈现出较为接近的特征,这表明数据分布基本呈现对称形态,并未出现明显的左偏或右偏现象。尽管对雷达回波强度设定了最低阈值,但四川盆地的闪电频次(1~13 次)对应的回波强度仍然跨度较大,分布在 25~60 dBz 及以上。当闪电频次达到 14 次时,回波强度主要集中在 30~55 dBz 范围内。值得注意的是,随着闪电频次的增加,对应的回波值逐渐趋于集中,这在一定程度上与样本数据量的大小有关。另外,盆地整体的箱体长度及上下边界差值相差不大,且随着闪电频次的增加,箱体上边界的回波值略有增强。川西高原和攀西地区也呈现出类似的特征。然而,在川西高原随着闪电频次的增加,箱体高度的波动范围相对较大。但总体来看,箱线图的上下边界仍然是逐渐向中间靠拢的,这表明随着闪电频次的增加,回波的离散度逐渐减小。另一方面,在攀西地区,随着闪电频次的增加,中位数和平均值的偏离度逐渐增大,且平均值更偏向于回波较弱的一侧。

3 拟合关系的建立

3.1 分区域闪电和雷达回波拟合分析

基于箱线图闪电频次对应的雷达回波中位数和均值分析结果,研究分别选择了以自然对数 e 为底的对数分布函数($y=b+a\ln(x)$)和 Sigmoid 函数广义形式($y=1/(a+b\exp(-x))$)进行拟合,对比拟合结果与实况发现,对数函数拟合曲线结果更优(其拟合优度 R^2 更大),拟合结果与实况值更为接近,而 Sigmoid 函数拟合的 S 形曲线值偏小。因此,研究采用对数函数作为拟合函数,分别针对四川盆地、川西高原及攀西地区的雷达回波中位数和平均值进行拟合,结果如图 2 所示。从拟合结果来看,无论是中位数还是均值的拟合曲线,都呈现出先快速上升后趋于平缓的特征。在四川盆地,中位数拟合结果普遍优于均值拟合结果,差值在闪电频次大于 10 次时趋于稳定,约为 1.5 dBz。值得注意的是,当闪电频

次超过 25 次后,由于观测值的离散度增大,中位数和均值的离散度也随之增大,这在一定程度上影响了拟合结果的准确性。在川西高原和攀西地区,随着闪电频次的增加,雷达回波值的中位数和均值同样表现出更大的离散度。与盆地不同的是,这两个

地区的拟合曲线特征存在显著差异。对于川西高原,当闪电频次较少时,均值拟合结果高于中位数;而当闪电频次增多时,均值拟合结果则低于中位数,而攀西地区对应的闪电频次为 6 次时也有类似的特征。

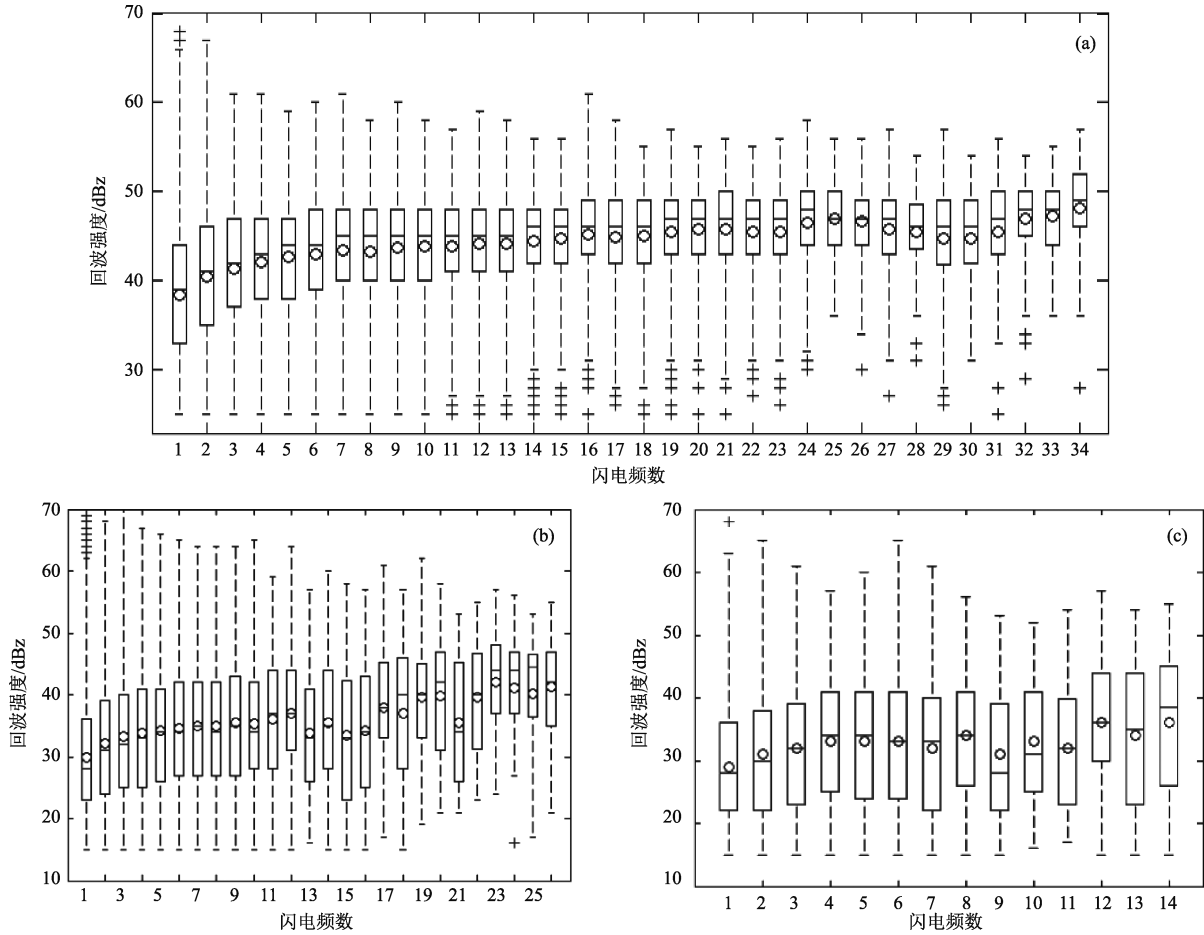


图 1 格点闪电频次和雷达回波的箱线图:(a)四川盆地,(b)川西高原,(c)攀西地区

Fig. 1 Boxplot of grid lightning frequency and radar echo: (a) Sichuan Basin, (b) Western Sichuan Plateau, (c) Panxi Region

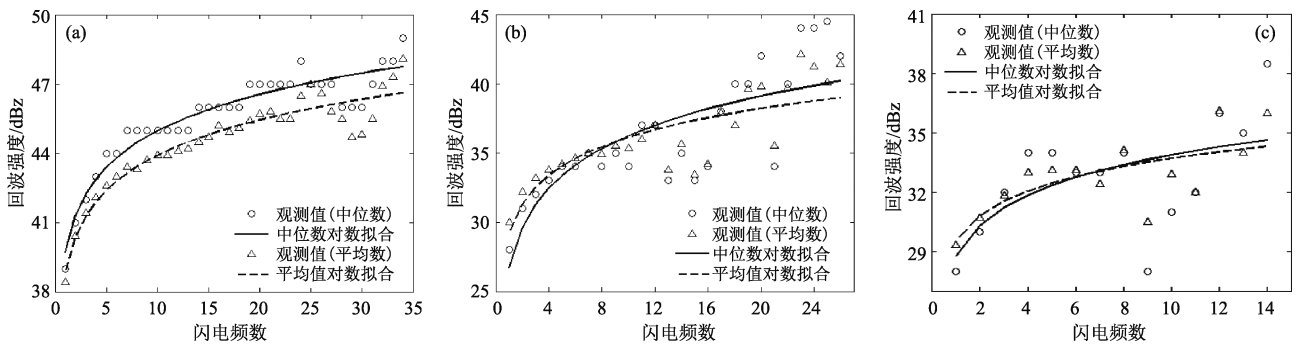


图 2 雷达回波值中位数、均值与闪电频次的对数曲线拟合关系:(a)四川盆地,(b)川西高原,(c)攀西地区

Fig. 2 Logarithmic curve fitting relationship between median and mean values of radar echo and lightning frequency:

(a) Sichuan Basin, (b) Western Sichuan Plateau, (c) Panxi Region

3.2 分区域拟合方程的建立

表 3 列出了三个区域的雷达回波中位数、均值与闪电频次之间的对数拟合方程。其中,拟合优度 (R^2)是衡量回归方程整体的拟合程度的一个关键指标,它反映了因变量与自变量之间的总体关系紧密程度。当 R^2 值越接近于 1 时,说明拟合曲线与观测数据之间的匹配程度越高,拟合效果越佳;反之, R^2 值越小,则表明拟合曲线与观测数据的契合度越低。从表中可以看出,四川盆地的回波中位数和均值与闪电频次的拟合效果尤为出色,其拟合优度均

表 3 雷达回波中位数、均值与闪电频次的拟合公式

Table 3 Fitting formula of radar echo median, mean and lightning frequency

区域	拟合参量	对数拟合方程	拟合优度(R^2)
四川盆地	中位数	$y=39.71+2.28\ln(x)$	0.909
	均值	$y=38.82+2.21\ln(x)$	0.909
川西高原	中位数	$y=26.68+4.14\ln(x)$	0.628
	均值	$y=28.83+3.24\ln(x)$	0.632
攀西地区	中位数	$y=28.75+2.22\ln(x)$	0.348
	均值	$y=29.51+1.82\ln(x)$	0.558

注: y 是垂直柱最大代理回波; x 是 $3\text{ km}\times 3\text{ km}$ 网格内 42 min 的累计闪电频次

高达 0.909,显示出极强的相关性和拟合精度。川西高原地区的拟合效果虽然稍逊于四川盆地,但也表现出了一定的相关性,其拟合优度均超过了 0.6。相比之下,攀西地区的拟合结果则相对较差,其中均值的拟合优度为 0.558,而中位数的拟合优度仅为 0.348,表明该地区的雷达回波值与闪电频次之间的关联度较弱。

4 拟合结果试验

4.1 四川盆地个别试验

根据表 3 的拟合方程,图 3 展示了 2022 年 6 月 22 日 22:30 四川盆地闪电代理回波和实况结果。首先,从实况雷达回波图(图 3a)中可见,盆地西部、南部及中部地区有分散的强对流活动,且大部分回波区域与闪电现象(图 3b)相对应,特别是盆地南部(圆圈处),对流活动尤为活跃,回波相对集中,强度均在 45~50 dBz 或以上。图 3c 是中位数拟合代理回波,与实况相比,代理回波的范围明显偏小,特别是在盆地西部一带,回波强度也相对偏弱。这是由于在没有闪电发生的区域,拟合新回波的受限,体现了代理回波方法的局限性。尽管如此,对比图 3e 可见,当回波强度超过 45 dBz 时,代理回波与实况回

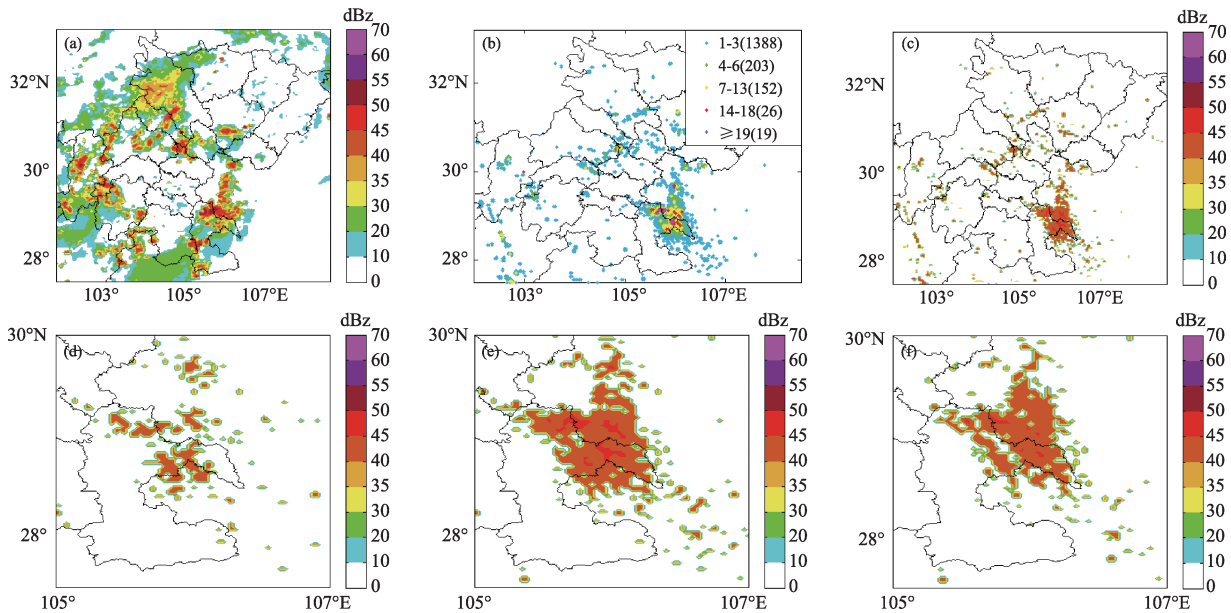


图 3 四川盆地闪电代理回波个别试验(2022 年 6 月 22 日 22:30):

(a) 实况回波, (b) 实况闪电密度, (c) 对应代理回波, (d) 前 30 min 代理回波, (e) 局部代理回波, (f) 后 30 min 代理回波

Fig. 3 Case study of lightning proxy echo in Sichuan Basin lightning (22:30 22 June 2022): (a) actual echo, (b) actual lightning density, (c) corresponding proxy echo, (d) proxy echo before 30 minutes, (e) local proxy echo, (f) proxy echo after 30 minutes

波的高值中心依然具有较好的一致性。此外,图 3d 和 f 分别描绘了拟合时刻前 30 min 和后 30 min 的代理回波情况。其中,22:00 的代理回波相对分散,且回波强度未超过 45 dBz。而到了 23:00,强回波区域的范围和高值中心强度略有减小,回波逐渐往东北方向移动,这与实际回波的移动方向和变化趋势保持了较高的一致性。

4.2 川西高原个例试验

图 4 展示了 2020 年 6 月 20 日 22:30 川西高原闪电代理回波和实况的结果。首先,从实况雷达回波图(图 4a)中观察到,回波主要集中在阿坝州中部南部和甘孜州东部,主要强度范围为 35~45 dBz,而在阿坝州南部的线状对流区(圆圈处),闪电活动尤为频繁(图 4b)。中位数拟合代理回波(图 4c)与

实况相比,代理强回波的范围明显偏小,这与盆地的情况类似,主要是因为实况回波中未对应应有闪电发生的区域。然而,值得注意的是,东南侧的回波范围略偏大,这是由于拟合算法中纳入了后 12 min 的闪电数据,恰好该时段对应的闪电数据出现在这一区域。虽然整体上,川西高原的代理回波强度略低于实况,但代理回波依然能够较为准确地反映出对流回波的大致区域,并且与实况回波的高值中心保持了良好的一致性(图 4e)。进一步观察拟合时刻前 30 min 和后 30 min 的代理回波(图 4d 和 f),可以发现 22:00 的代理回波较为分散,强度相对较弱。而到了 23:00,回波的高值中心范围略有减小,回波缓慢向东南方向移动,这与实况回波的移动方向和变化趋势基本一致。

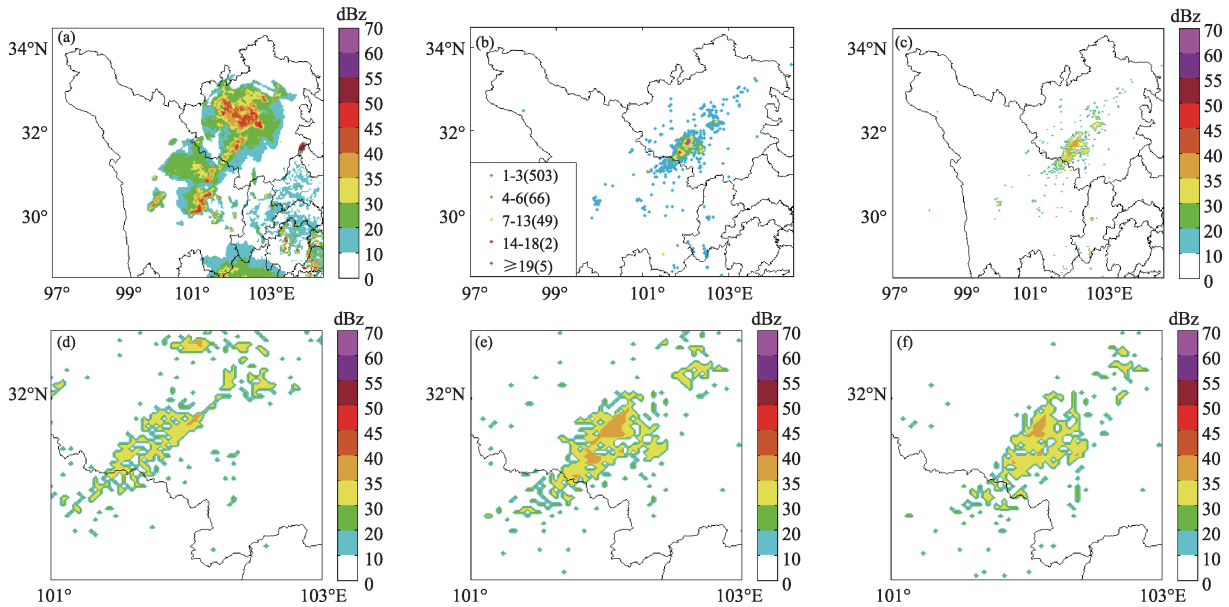


图 4 川西高原闪电代理回波个例试验(2022 年 6 月 20 日 22:30):

(a) 实况回波, (b) 实况闪电密度, (c) 对应代理回波, (d) 前 30 min 代理回波, (e) 局部代理回波, (f) 后 30 min 代理回波

Fig. 4 Case study of lightning proxy echo in Western Sichuan Plateau (22:30 20 June 2020):

(a) actual echo, (b) actual lightning density, (c) corresponding proxy echo, (d) proxy echo before 30 minutes, (e) local proxy echo, (f) proxy echo after 30 minutes

4.3 攀西地区个例试验

图 5 给出了 2019 年 8 月 12 日 19:30 攀西地区闪电代理回波和实况结果。从实况雷达回波来看(图 5a),回波主要集中在凉山州东北部,分布较为分散(圆圈处),局部区域的回波强度超过 50 dBz,闪电高值区与强回波区域呈现出较好的对应关系,但整体密度偏低(图 5b)。图 5c 为中位数拟合代理

回波,与实况对比,代理回波强度明显偏小,最大回波仅为 35 dBz,这一现象与前面分析的攀西地区闪电样本密度相吻合,由于该地区的闪电样本密度显著偏低,导致拟合结果强度偏小。尽管如此,代理回波仍然能够清晰地反映出 30~35 dBz 的对流回波区域(图 5e),其结构特征与实况雷达回波相似。同样,代理回波东侧还出现了一块与川西高原具有类似

特征的新增代理回波。此外,对比拟合时刻前 30 min 和后 30 min 的代理回波图(图 5d 和 f),19:00 代理

回波分布分散,强度较弱,而到了 20:00,局部区域回波逐渐消散,与实况回波变化趋势基本一致。

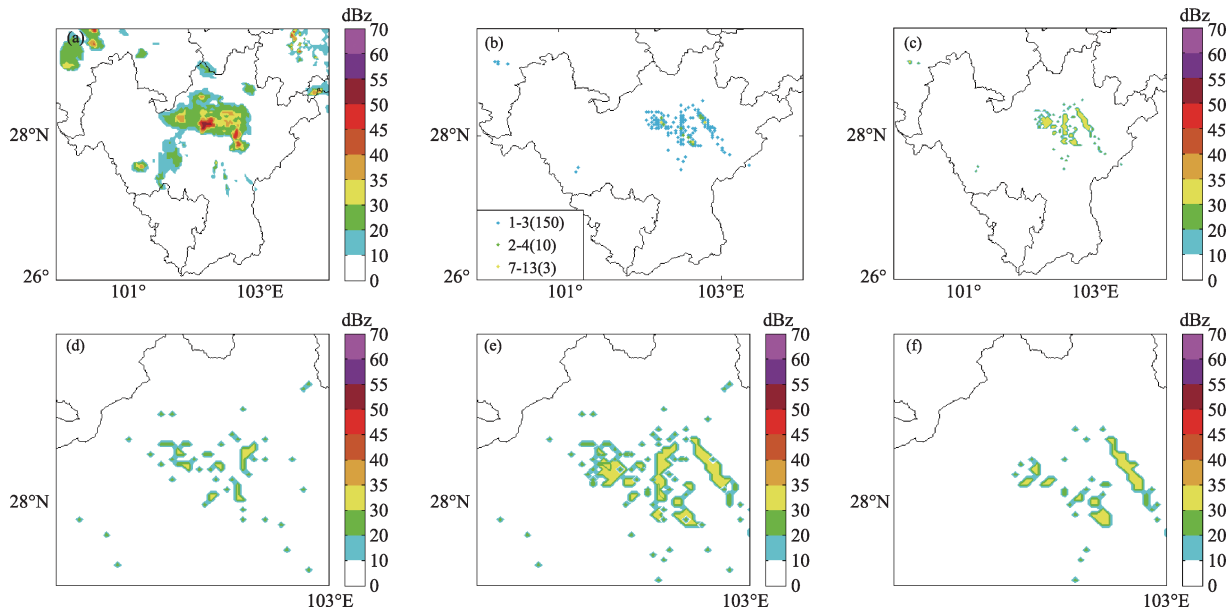


图 5 攀西地区闪电代理回波个例试验(2019 年 8 月 12 日 19:30):

(a) 实况回波, (b) 实况闪电密度, (c) 对应代理回波, (d) 前 30 min 代理回波, (e) 局部代理回波, (f) 后 30 min 代理回波

Fig. 5 Case study of lightning proxy echo in Panxi Region (19:30 12 August 2019): (a) actual echo, (b) actual lightning density, (c) corresponding proxy echo, (d) proxy echo before 30 minutes, (e) local proxy echo,

(f) proxy echo after 30 minutes

5 结论与讨论

本文选用 2020 年和 2021 年 6—8 月四川省 47 个典型雷暴天气过程的闪电和雷达回波资料,基于箱线图样本分析和对数拟合方法,分别建立了四川盆地、川西高原及攀西地区的闪电代理雷达回波模型,并进行了个例验证,主要结论如下:

(1) 三个区域的闪电频次与雷达回波强度的中位数和均值均较为接近,数据分布基本对称,随着闪电频次的增加,回波值趋于集中且离散度逐渐减小。尽管设定了最低回波强度阈值,但四川盆地闪电频次对应的回波强度跨度仍较大。

(2) 四川盆地和川西高原的对数拟合效果较好,尤其是四川盆地,其回波中位数和均值与闪电频次的拟合优度均高达 0.909,显示出极强的相关性和拟合精度。相比之下,攀西地区的拟合效果较差,表明该区域雷达回波值与闪电频次之间的关联度较弱。随着闪电频次的增加,雷达回波值的中位数和均值拟合曲线均呈现先快速上升后趋于平缓的特

征,但在不同区域间存在差异,揭示了闪电频次与雷达回波强度之间的复杂关系,为区域雷电预警和监测提供了科学依据。

(3) 三个区域的拟合结果均呈现偏弱的现象,其原因可能是在优化过程中为了降低离散度和确保数据稳定性,计算时所采用的格点闪电密度频次相对较小,这在一定程度上影响了对应样本回波的整体强度,进而导致拟合结果相对偏弱。尽管闪电代理回波存在一些局限,但是代理回波依然能够较为准确地反映出与观测实况相一致的高值中心信息,这对于雷暴天气的预报预警和闪电资料的应用具有重要的参考价值。

(4) 未来可以通过更多的个例进行验证,对拟合算法或者拟合公式和拟合方法进行优化,进一步提高拟合结果,还可以将拟合公式代入模式试验,探究其在不同地形地貌地区的应用效果。

参考文献

- [1] 郑永光,周康辉,盛杰,等. 强对流天气监测预报预警技术进展[J]. 应用气象学报, 2015, 26(6): 641-657. Zheng Y G,

- Zhou K H, Sheng J, et al. Advances in techniques of monitoring, forecasting and warning of severe convective weather [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 2015, 26(6): 641-657.
- [2] 刘向科, 康宁, 张琴, 等. 星地探测闪电在一次中尺度对流系统中的活动特征分析[J]. *气象科技*, 2023, 51(1): 14-21.
Liu X K, Kang N, Zhang Q, et al. Analysis of activity characteristics of satellite-to-ground lightning detection in a mesoscale convective system [J]. *Meteorological Science and Technology (in Chinese)*, 2023, 51(1): 14-21.
- [3] 张勇, 吴胜刚, 张亚萍, 等. 基于SWAN雷达拼图产品在暴雨过程中的对流云降水识别及效果检验[J]. *气象*, 2019, 45(2): 180-190. Zhang Y, Wu S G, Zhang Y P, et al. Identification and effect verification of convective cloud precipitation in rainstorm processes based on SWAN mosaic products [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 2019, 45(2): 180-190.
- [4] 王曙东, 裴翀, 郭志梅, 等. 基于SRTM数据的中国新一代天气雷达覆盖和地形遮挡评估[J]. *气候与环境研究*, 2011, 16(4): 459-468. Wang S D, Pei C, Guo Z M, et al. Evaluations on Chinese next generation radars coverage and terrain blockage based on SRTM data [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 2011, 16(4): 459-468.
- [5] 勾亚彬, 汪章维, 刘黎平, 等. 雷达波束部分遮挡识别应用及效果评估[J]. *高原气象*, 2017, 36(1): 229-240. Gou Y B, Wang Z W, Liu L P, et al. Application and evaluation of radar partial blockage identification [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 2017, 36(1): 229-240.
- [6] Wang Y, Yang Y, Wang C H. Improving forecasting of strong convection by assimilating cloud-to-ground lightning data using the physical initialization method [J]. *Atmospheric Research*, 2014, 150: 31-41.
- [7] Weygandt S S, Hu M, Benjamin S G, et al. Assimilation of lightning data using a diabatic digital filter within the Rapid Update Cycle [C]//Proceedings of the 12th conference on Integrated Observing and Assimilation Systems for Atmosphere, Oceans, and Land Surface (IOAS-AOLS), New Orleans, 2008, LA: 201-211.
- [8] 孙玉婷, 赖安伟, 王明欢, 等. 基于地形差异的闪电频数与雷达回波关系分析[J]. *高原气象*, 2019, 38(6): 1320-1331.
Sun Y T, Lai A W, Wang M H, et al. Analysis of the relationship between lightning flashes and radar echo based on terrain difference [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 2019, 38(6): 1320-1331.
- [9] 何邓新, 赖安伟, 康兆萍, 等. 闪电资料在快速更新同化系统中的应用研究[J]. *气象*, 2021, 47(8): 995-1008. He D X, Lai A W, Kang Z P, et al. Application of lightning data to high-resolution rapid refresh assimilation system [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 2021, 47(8): 995-1008.
- [10] 王延东, 周筠珺, 王喜阳, 等. 闪电资料在中尺度WRF模式同化方法的研究[J]. *热带气象学报*, 2014, 30(2): 281-292. Wang Y D, Zhou Y J, Wang X Y, et al. A study on the assimilation method of lightning data with mesoscale model WRF [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 2014, 30(2): 281-292.
- [11] 何静, 陈敏, 仲跻芹, 等. 雷达反射率三维拼图观测资料在北方区域数值模式预报系统中的同化应用研究[J]. *气象学报*, 2019, 77(2): 210-232. He J, Chen M, Zhong J Q, et al. A study of three-dimensional radar reflectivity mosaic assimilation in the regional forecasting model for North China [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 2019, 77(2): 210-232.
- [12] 徐国强, 黄守友, 赵晨阳. FY-4A闪电资料在对流天气数值预报中的影响研究[J]. *气象*, 2020, 46(9): 1165-1177. Xu G Q, Huang S Y, Zhao C Y. Influence of FY-4A lightning data on numerical forecast of convective weather [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 2020, 46(9): 1165-1177.
- [13] 石湘波, 黄旋旋, 沈一平, 等. 不同下垫面雷暴雷达回波特征与地闪的关系[J]. *气象科技*, 2015, 43(5): 880-887. Shi X B, Huang X X, Shen Y P, et al. Correlation analysis of lightning activity and radar echo characteristics of thunderstorm under different underlying surface [J]. *Meteorological Science and Technology (in Chinese)*, 2015, 43(5): 880-887.
- [14] 张腾飞, 段旭, 张杰, 等. 云南强对流暴雨的闪电和雷达回波特征及相关性[J]. *热带气象学报*, 2011, 27(3): 379-386.
Zhang T F, Duan X, Zhang J, et al. Characteristics of lightning and radar echoes and relations between them for strong convective rainstorm in Yunnan [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 2011, 27(3): 379-386.
- [15] 易笑园, 孙晓磊, 张义军, 等. 雷暴单体合并进行中雷达回波参数演变及闪电活动的特征分析[J]. *气象学报*, 2017, 75(6): 981-995. Yi X Y, Sun X L, Zhang Y J, et al. Evolution of radar parameters and lightning activity during thunderstorm cells merging [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 2017, 75(6): 981-995.
- [16] 刘海兵, 张云峰, 李玉塔. 江西闪电特征海拔高度影响分析[J]. *气象科技*, 2017, 45(2): 342-348. Liu H B, Zhang Y F, Li Y T. Influence analysis of different altitudes on lightning characteristics in Jiangxi Province [J]. *Meteorological Science and Technology (in Chinese)*, 2017, 45(2): 342-348.
- [17] 谢冬, 王霄, 李平兰, 等. 云贵高原和青藏高原闪电活动的对比分析[J]. *高原山地气象研究*, 2022, 42(增刊1): 82-87.
Xie D, Wang X, Li P L, et al. Comparative analysis of lightning activity between Yunnan-Guizhou Plateau and Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Plateau and Mountain Meteorology Research (in Chinese)*, 2022, 42(S1): 82-87.
- [18] 赵生昊, 覃彬全, 刘青松. 重庆市地形对雷电灾害主要致灾因子影响分析[J]. *气象科技*, 2020, 48(1): 127-131. Zhao S H, Qin B Q, Liu Q S. Influence of topography on main lightning hazard factors in Chongqing [J]. *Meteorological Science and Technology (in Chinese)*, 2020, 48(1): 127-131.
- [19] 余田野, 徐达军, 余彦龙, 等. 湖北省地形特征对雷电参数的

- 影响[J]. 气象科技, 2022, 50(5): 734-741. Yu T Y, Xu D J, Yu Y L, et al. Influence research of topographic features on lightning parameters in Hubei Province [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 2022, 50(5): 734-741.
- [20] 魏庆, 周威, 陈小尘, 等. 四川省闪电活动特征及其与海拔高度的关系分析[J]. 成都信息工程大学学报, 2023, 38(5): 566-571. Wei Q, Zhou W, Chen X C, et al. Study on the relationship between the characteristics of lightning activity and altitude [J]. Journal of Chengdu University of Information Technology (in Chinese), 2023, 38(5): 566-571.
- [21] 周威, 张武龙, 康岚, 等. 基于EC模式闪电格点概率预报模型及应用[J]. 气象科技, 2020, 48(6): 862-870. Zhou W, Zhang W L, Kang L, et al. Application of lightning grid probability prediction products based on EC model [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 2020, 48(6): 862-870.
- [22] 崔雪东, 张卫斌, 顾媛, 等. 基于ADTD资料的浙江地区多回击地闪特征分析[J]. 气象科技, 2021, 49(3): 491-497. Cui X D, Zhang W B, Gu Y, et al. Characteristic analysis of multi-return strokes of cloud-to-ground lightning in Zhejiang based on ADTD data [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 2021, 49(3): 491-497.
- [23] 王志超, 庞文静, 梁丽, 等. ADTD闪电定位网在北京地区定位效率的自评估[J]. 气象科技, 2018, 46(4): 638-643+664. Wang Z C, Pang W J, Liang L, et al. Self-evaluation on detection efficiency of ADTD lightning location network in Beijing [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 2018, 46(4): 638-643+664.
- [24] 孙凌, 周筠珺, 郭在华. 湖南雷暴天气中地闪活动的预报研究[J]. 成都信息工程学院学报, 2010, 25(2): 186-192. Sun L, Zhou Y J, Guo Z H. Forecasting of CG lightning activity in thunderstorms in Hunan [J]. Journal of Chengdu University of Information Technology (in Chinese), 2010, 25(2): 186-192.
- [25] 王善昊, 胡志群, 王福增, 等. 基于ConvLSTM融合RMAPS-NOW数据的雷达回波外推研究[J]. 气象学报, 2024, 82(4): 554-567. Wang S H, Hu Z Q, Wang F Z, et al. Extrapolation of radar echo based on ConvLSTM with fusion of RMAPS-NOW data [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 2024, 82(4): 554-567.
- [26] 王俊超, 王志斌, 赖安伟, 等. 基于数值预报与雷达外推预报融合方法的降水回波短临预报试验研究[J]. 干旱气象, 2022, 40(3): 485-499. Wang J C, Wang Z B, Lai A W, et al. Experimental study on short-term and impending prediction of precipitation echo based on blending method of numerical prediction and radar extrapolation prediction [J]. Journal of Arid Meteorology (in Chinese), 2022, 40(3): 485-499.
- [27] 张春燕, 刘霞, 高文俊, 等. 强雷暴天气的闪电和雷达回波特征个例分析[J]. 热带气象学报, 2021, 37(3): 419-426. Zhang C Y, Liu X, Gao W J, et al. Analysis of lightning and radar echo characteristics in a severe thunderstorm [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 2021, 37(3): 419-426.
- [28] 周威, 魏庆, 杨康权, 等. 四川两次极端暴雨强降水特征及与雷达回波和闪电关系分析[J]. 高原山地气象研究, 2024, 44(1): 104-110. Zhou W, Wei Q, Yang K Q, et al. Characteristics of heavy precipitation and its relationship with radar echo and lightning in two extreme rainstorms in Sichuan [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research (in Chinese), 2024, 44(1): 104-110.
- [29] 于函, 张鸿波, 刘冬霞, 等. 飑线系统中的闪电活动与雷达回波特征的相关性研究[J]. 大气科学, 2022, 46(4): 835-844. Yu H, Zhang H B, Liu D X, et al. Relationship between lightning activities and radar echoes of squall line convective systems [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 2022, 46(4): 835-844.
- [30] 龙柯吉, 康岚, 罗辉, 等. 四川盆地雷暴大风雷达回波特征统计分析[J]. 气象, 2020, 46(2): 212-222. Long K J, Kang L, Luo H, et al. Statistical analysis of radar echo characteristics of thunderstorm gales in Sichuan Basin [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 2020, 46(2): 212-222.

Research and Application Analysis of Lightning Proxy Radar Echo in Different Geomorphologic Regions

ZHOU Wei¹ WEI Qing² ZHAO Xuan¹ WANG Binyan¹
ZHANG Wulong¹ ZHOU Changchun¹

(1 Sichuan Meteorological Observatory, Heavy Rain and Drought-Flood Disasters in Plateau and Basin Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610072; 2 Lightning Protection Center of Sichuan Province, Chengdu 610072)

Abstract: This study delves into the relationship between lightning frequency and radar echo intensity across three distinct geomorphological regions in Sichuan Province (Sichuan Basin, Western Sichuan Plateau, and Panxi Region) based on lightning and radar echo data from 47 typical thunderstorm events occurring from June to August in 2020 and 2021. Employing boxplot analysis and logarithmic fitting methods, the study selects the maximum echo value within $0.03^\circ \times 0.03^\circ$ grid points from SWAN radar echo mosaics as the fitting factor for radar echoes and establishes a specific time window to accumulate lightning frequencies, thereby constructing a comprehensive sample dataset. The results reveal that the median and mean values of lightning frequency and radar echo intensity are relatively close in all three regions, with a generally symmetric data distribution. As lightning frequency increases, echo values tend to converge with reduced dispersion. Despite setting a minimum echo intensity threshold, the span of echo intensities corresponding to lightning frequencies in the Sichuan Basin remains relatively wide. A logarithmic distribution function is adopted to fit lightning frequency and radar echo, yielding satisfactory results in the Sichuan Basin and Western Sichuan Plateau, particularly in the Sichuan Basin where the goodness-of-fit for both the median and mean echo values versus lightning frequency reaches 0.909, indicating a strong correlation and high-precision fit. Conversely, the fit in the Panxi Region is less satisfactory, suggesting a weaker correlation between radar echo values and lightning frequencies in this area. The study further observes that as lightning frequency increases, the median and mean fitting curves of radar echo values in all three regions initially rise rapidly before levelling off, albeit with regional variations. These findings not only uncover the intricate relationship between lightning frequency and radar echo intensity but also provide a scientific basis for regional lightning warning and monitoring. From the perspective of individual case validation of fitted echoes, the fitting results in these three regions exhibit a tendency towards underestimation, likely due to the relatively low grid-point lightning density frequency used in calculations to reduce dispersion and ensure data stability. Nevertheless, the proxy echoes still accurately reflect high-value centre information consistent with observations, which holds significant value for thunderstorm forecasting and warning as well as the application of lightning data. In the future, further validation through more individual cases can be conducted to optimise the fitting algorithm, formula, and method, thereby enhancing the fitting results. Additionally, the fitting formula can be incorporated into model experiments to explore its application effects in different topographical and geomorphological regions.

Keywords: lightning; radar echo; logarithmic fitting; proxy echo

Received: 2024-3-28 Accepted: 2024-11-19

© Editorial Office of *Meteorological Science and Technology* (CC BY-NC-ND 4.0)