

胡启元,杜莉丽,刘红涛,等. 基于回波遮挡订正的西安对流天气雷达气候特征分析[J]. 陕西气象,2023(3):1-7.

文章编号:1006-4354(2023)03-0001-07

# 基于回波遮挡订正的西安对流天气 雷达气候特征分析

胡启元<sup>1,2</sup>,杜莉丽<sup>1</sup>,刘红涛<sup>3</sup>,冯典<sup>1</sup>

(1. 陕西省气象台,西安 710014;

2. 陕西省气象局秦岭和黄土高原生态环境气象重点实验室,西安 710016;

3. 鄠邑区气象局,西安 710300)

**摘要:**基于2014—2019年4—9月西安多普勒雷达数据,在对因地形或高大建筑所造成的反射率遮挡区域进行修订的基础上,研究西安地区对流天气的雷达气候学特征。结果表明:(1)西安雷达在低仰角受到地形和高大建筑的严重遮挡,即在雷达0.5°仰角的西安东部、西南部及西北部方位与1.5°仰角的西安偏南部方位存在因地形因素遮挡造成的大范围反射率缺失现象,和因雷达站周边高大建筑等非地形因素导致的个别方位角上反射率因子缺失现象。本文通过交叉方位角插值法和高仰角反射率因子填补方法对遮挡区域进行修订并形成完整反射率因子数据,然后利用对流回波识别方法识别出对流回波。(2)西安雷达对流回波气候统计结果显示,2015年对流天气发生频次最多;2017年对流天气持续时间更长、强度更强,多发区主要为陕北南部至关中北部及关中南部至秦岭北麓;7—8月为对流天气高峰时段,其中7月下旬和8月上旬出现频次最多;日变化特征显示14—23时对流天气活动频繁,23时后活动频次迅速减少。

**关键词:**西安;雷达;雷达气候学;遮挡修订;对流回波识别

**中图分类号:**P412.25

**文献标识码:**A

对于某一地区的气候特点研究主要是利用长时间、连续性的气象要素资料集进行归纳统计分析。多普勒天气雷达探测数据相对气象站点地面观测数据、卫星遥感天基观测数据等常规资料具有更高的时空分辨率优势,并且对降水系统内部空间结构能够更直观有效地进行探测,因此以天气雷达资料为研究对象进行灾害性天气气候特征研究,能够更加精细描述降水天气尤其是对流性天气的时空分布特征。但在实际业务中,由于雷达探测站附近普遍存在高海拔复杂地形或高大建筑的原因,往往会造成雷达部分仰角上的电磁波被地形或高大建筑遮挡<sup>[1-2]</sup>,从而使观测到的反射率因子强度出现低估或缺失情况。因此需要对雷

达回波受遮挡区域进行修订,形成完整的三维反射率空间分布,才能准确描述降水回波气候特征。国外最早开展雷达气候研究是1972年KUO等<sup>[3]</sup>利用X波段Nike-Ajax雷达系统4a观测数据,对美国南达科他州布拉克山地区对流降水回波时空分布特征及不同盛行风背景下分布频率差异特征进行了研究。国内随着20世纪末天气雷达在全国各地布设及业务应用,许多学者也开展大量相关研究。刁秀广等<sup>[4]</sup>研究得出了山东夏季强对流天气回波的时空分布、源地路径及参数指标等气候特征,表明强对流回波具有明显规律性时空变化特点。韩雷等<sup>[5]</sup>利用天津塘沽天气雷达三维体扫数据对京津地区强对流风暴进行分析,

收稿日期:2022-02-23

作者简介:胡启元(1989—),男,汉族,陕西西安人,学士,高工,从事短临预报技术、雷达数据处理等研究。

基金项目:陕西省气象局秦岭和黄土高原生态环境气象重点实验室开放基金课题(2021G-13)

发现京津地区风暴回波面积、体积具有西弱东强的特点,并且风暴平均高度为 6 km,大多由西南向东北方向移动。孙康远等<sup>[6]</sup>进一步从天气雷达数据中识别出对流性回波并格点化来开展研究,发现南京周边地区对流风暴具有明显的区域分布特征,并且不同尺度和对流高度的对流风暴发生频次存在明显日变化多峰分布现象。王国荣等<sup>[7]</sup>利用北京地区不同强度回波发生频率和空间分布的气候统计结果,识别出雷达附近地物杂波分布及雷达波数受遮挡区域,结合局部可变区域平均垂直廓线方法来进行雷达回波遮挡区域订正研究。管理等<sup>[8]</sup>将风暴追踪产品及风暴结构产品作为研究对象,分析了暖季上海地区午后对流风暴的三维空间分布气候统计特征,为研究对流性回波垂直结构特征提供较好指导。此外还有其他学者如毕旭、孟妙志等<sup>[9-13]</sup>也对陕西和西安地区回波特征进行了部分研究,但未形成系统性结论。本文以西安雷达探测空间为研究区域,通过对 2014—2019 年 4—9 月出现的对流回波进行气候特征分析,为西安地区强对流天气的临近预报预警提供支撑。

## 1 数据与方法

### 1.1 数据选取

雷达数据选取 2014—2019 年 4—9 月西安 C 波段多普勒雷达逐 6 min 体扫基数据,选取雷达探测距离为 400 km,雷达反射率因子和径向速度产品的分辨率分别为 0.5 km 和 0.125 km,采用 VCP21 体扫模式,包含 9 个有效仰角。本文结合灾害天气观测资料,筛除由于受融化层亮带影响造成部分对流回波识别结果出现偏差的样本,最终确定基数据样本总数为 216 968 个,每个样本数据包含  $360 \times 400$  个径向格点。

### 1.2 雷达回波受遮挡修订方法

雷达回波受遮挡修订方法分为两个步骤:(1)利用美国航空航天局(NASA)和美国国防部国家测绘局(NIMA)联合测量的航天飞机雷达地形测绘使命(shuttle radar topography mission,简称 SRTM)中国境内地理高程数据(分辨率为  $90 \text{ m} \times 90 \text{ m}$ ),判断某方位角上的遮挡率(电磁波束被地形遮挡的电磁波能量占总能量的百分比)是否

大于 50% 来确定该方位角是否属于被遮挡区,进而计算并识别出被地形遮挡的方位角区域;(2)针对受高大建筑等非地形因素导致的电磁波被遮挡的方位角区域,根据遮挡区域大小,采用不同修订方法进行遮挡修订。

①针对方位角范围小于  $5^\circ$  的遮挡区域,采用交叉方位角插值法进行处理,公式如下。

$$R_{A_z} = R_{A_{z_1}} + \frac{R_{A_{z_2}} - R_{A_{z_1}}}{|A_{z_2} - A_{z_1}|} \times (A_z - A_{z_1}), \quad (1)$$

(1)式中, $A_{z_1}$ 、 $A_{z_2}$  分别为遮挡区域的上、下边界方位角,单位为 $^\circ$ ; $A_z$  为  $A_{z_1}$  与  $A_{z_2}$  之间的某个方位角,单位为 $^\circ$ ; $R_{A_z}$  为方位角  $A_z$  上的反射率因子,单位为 dBz, $R_{A_{z_1}}$  和  $R_{A_{z_2}}$  分别为遮挡区域上边界方位角  $A_{z_1}$  和下边界方位角  $A_{z_2}$  上对应的反射率因子,单位为 dBz。

②针对方位角范围大于  $5^\circ$  的遮挡区域,则利用比遮挡区域所在仰角高一层或多层仰角上对应方位角范围的反射率因子数据替代遮挡区域数据,公式如下。

$$R_{A_z}^e = R_{A_z}^{e+i}, \quad (2)$$

(2)式中, $e$  是受到遮挡影响的仰角,单位为 $^\circ$ , $e+i$  是比遮挡区域所在仰角高  $i$  层的不受遮挡影响的仰角,单位为 $^\circ$ ; $R_{A_z}^e$ 、 $R_{A_z}^{e+i}$  分别是仰角为  $e$ 、 $e+i$ ,方位角为  $A_z$  上的反射率因子,单位为 dBz。

### 1.3 对流性回波自动识别方法

对流性回波自动识别方法采用 QI 等<sup>[14]</sup>研究层状云回波与对流降水回波的定量降水估测差异特征工作中提出的识别算法。该算法基于单站雷达三维反射率因子体扫产品,通过对流核识别算法及对流区识别算法将降水回波分为对流性降水回波、不受亮带影响的层状云降水回波及受亮带影响的层状云降水回波。

QI 等人设计的对流核识别算法主要利用雷达基数据多个仰角探测到的反射率因子与垂直液态水含量等数据,首先通过判断雷达探测高度是否超过  $0^\circ \text{C}$  层和  $-10^\circ \text{C}$  温度层将探测区域分为雨观测区、冰观测区及冰雨混合观测区;其次对不同观测区域采用对应判据识别出对流核位置;在识别出对流核位置后,利用区域增长方法识别出对流区域,即在对流核相邻区域寻找满足以下特定条件的格点。①组合反射率因子  $> 45 \text{ dBZ}$ ;

②最大反射率因子高度不在  $0^{\circ}\text{C}$  层高度附近;  
 ③反射率因子垂直梯度小于  $4\text{ dBZ/km}$ 。将其作为新对流核,继续寻找临近区域符合条件的格点,进而循环查找出整个对流区域。

对流频次指雷达径向单元格点上识别出对流性回波的样本个数,如  $6\text{ min}$  间隔的雷达数据样本某格点上识别为对流回波,则该格点的对流频次增加一次。区域(年、月)平均频次=某一区域(时段)所有格点对流频次累加/区域总格点数。

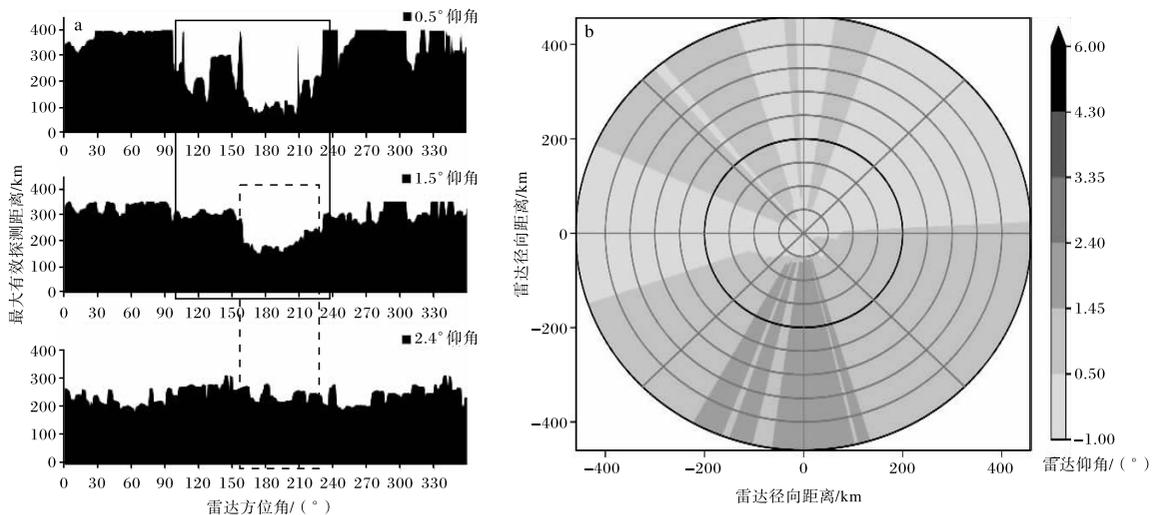
## 2 西安雷达 $0.5^{\circ}$ 和 $1.5^{\circ}$ 仰角受遮挡区域修订

### 2.1 $0.5^{\circ}$ 和 $1.5^{\circ}$ 仰角受遮挡情况分析

首先利用 2014—2019 年西安逐  $6\text{ min}$  多普勒雷达基本反射率因子产品进行全格点反射率因子强度累加,然后根据反射率因子累加产品分布情况计算各方位角上径向探测长度,以便尽可能获取雷达最大有效探测范围。从西安雷达各方位角上最大有效探测距离( $L$ )分布(图 1a)来看, $0.5^{\circ}$  仰角上  $L$  超过  $300\text{ km}$  的方位角区域占总探测区域的  $65\%$ ,其他方位角上  $L$  仅能达到  $100\sim 250\text{ km}$ ,明显存在电磁波束受遮挡情况; $1.5^{\circ}$  仰角上  $L$  超过  $250\text{ km}$  和  $2.4^{\circ}$  仰角上  $L$  超过  $200\text{ km}$  的方位角区域分别占总探测区域的  $81\%$  和  $97\%$ ,受遮挡情况显著减弱。可见雷达有效探测区域随着仰角抬高迅速增大,其中大部分遮挡情况出现在  $0.5^{\circ}$  仰角西安南部地区,该区域在  $0.5^{\circ}$  仰角至

$1.5^{\circ}$  仰角上最大有效探测距离较其他探测区域明显偏小,直到  $2.4^{\circ}$  仰角上有效探测距离才与其他未受遮挡区域相近,这说明电磁波束在低仰角尤其  $0.5^{\circ}$  仰角上受到南部秦岭地形严重遮挡,必须要对受遮挡区域进行填补修订。

其次利用陕西 SRTM 地形数据及西安雷达不同仰角波束高度信息,定量计算出各方位角的有效探测反射率因子所在仰角分布(图 1b)。其中  $1^{\circ}\sim 9^{\circ}$ 、 $20^{\circ}\sim 88^{\circ}$ 、 $252^{\circ}\sim 295^{\circ}$ 、 $320^{\circ}\sim 323^{\circ}$  和  $344^{\circ}\sim 360^{\circ}$  是雷达  $0.5^{\circ}$  仰角的有效探测区域,而  $0.5^{\circ}$  仰角其他范围都受到不同程度的地形遮挡,需要使用高一层或多层仰角反射率因子信息,如  $10^{\circ}\sim 19^{\circ}$ 、 $89^{\circ}\sim 164^{\circ}$ 、 $210^{\circ}\sim 251^{\circ}$ 、 $296^{\circ}\sim 319^{\circ}$  和  $324^{\circ}\sim 343^{\circ}$  区域需要在  $1.5^{\circ}$  仰角才能获取真实的雷达反射率因子信息,而在南部大约  $165^{\circ}\sim 209^{\circ}$  区域需要在  $2.4^{\circ}$  仰角才能获取反射率因子信息。因此针对  $0.5^{\circ}$  仰角上受遮挡区域需要采用  $1.5^{\circ}$  仰角对应区域的反射率因子进行填补修订,而  $1.5^{\circ}$  仰角受遮挡区域采用  $2.4^{\circ}$  仰角反射率因子进行修订。此外基于地形数据的各仰角有效探测信息分布虽然可以解决西安雷达的大部分受遮挡问题,但由于城市发展而出现的许多高大建筑物也会造成雷达低层个别方位角上出现回波受遮挡情况<sup>[15]</sup>。这类遮挡特点是遮挡区域呈楔形、方位角范围不超过  $5^{\circ}$ ,因此也需要进行填补修订。



实线方框为电磁波束受到遮挡的方位角区域,虚线方框为  $1.5^{\circ}$  仰角电磁波束受到遮挡且对应  $2.4^{\circ}$  仰角未受到遮挡的方位角区域。

图 1 西安雷达  $0.5^{\circ}$ 、 $1.5^{\circ}$  和  $2.4^{\circ}$  仰角各方位角最大有效探测距离(a)和基于 SRTM 地形资料的各方位角有效探测反射率因子所在仰角分布(b)

## 2.2 遮挡区域修订及结果评估

对基于 SRTM 地形数据各仰角有效探测区域进行第一阶段遮挡修订处理后,进一步对高大建筑物等非地形因素导致的回波遮挡进行处理。利用已对地形遮挡区域修订后的西安雷达 2014—2019 年 4—9 月逐 6 min 定量降水估测产品累积分布,计算确定高大建筑遮挡区域位置信

息,并制定西安雷达受高大建筑遮挡区域修订方案(表 1),方案中按顺时针方向定义  $A_{z1}$  为遮挡区域起始方位角, $A_{z2}$  为遮挡区域终止方位角。修订方案分别采用两种修订方法进行遮挡修订,其中针对方位角范围  $<5^\circ$  的遮挡区域,采用 1.2 节修订方法①进行修订,而针对方位角范围  $>5^\circ$  的遮挡区域,采用 1.2 节修订方法②进行修订。

表 1 西安雷达受高大建筑遮挡区域修订方案

方位角(起始~终止)/( $^\circ$ )	需更高仰角数	方法
18~19,37~40,86~87,92,94~96,99~101,141,162~163,166~167,183~186,199~201,203,205,241~242,245~247,250~252,257~258,266~270,323~327,330~333,340~343,356~357	0	①
0~8	1	②
188~194	1	②
319~325	1	②
343~355	1	②
358~359	1	②

按照西安雷达受高大建筑物遮挡区域修订方案,最终得出遮挡修订后的低层仰角反射率因子产品。结果表明修订效果明显,修订后水平方向不连续区域明显减少,可观测到的回波降水范围基本覆盖所有地区。对比西安雷达 2019 年 9 月 14 日 05—14 时  $0.5^\circ$  仰角反射率因子在修订前、后

结果来分析改进效果。图 2a~图 2d 为未经修订的反射率因子分布,随着回波从西向东发展,雷达南部和西北部的遮挡不连续现象非常明显,而对应时次的图 2e~图 2h 中上述不连续区域经地形遮挡修订和高大建筑遮挡修订后得到了明显改进,使反射率因子表现出了较好的连续和平滑特征。

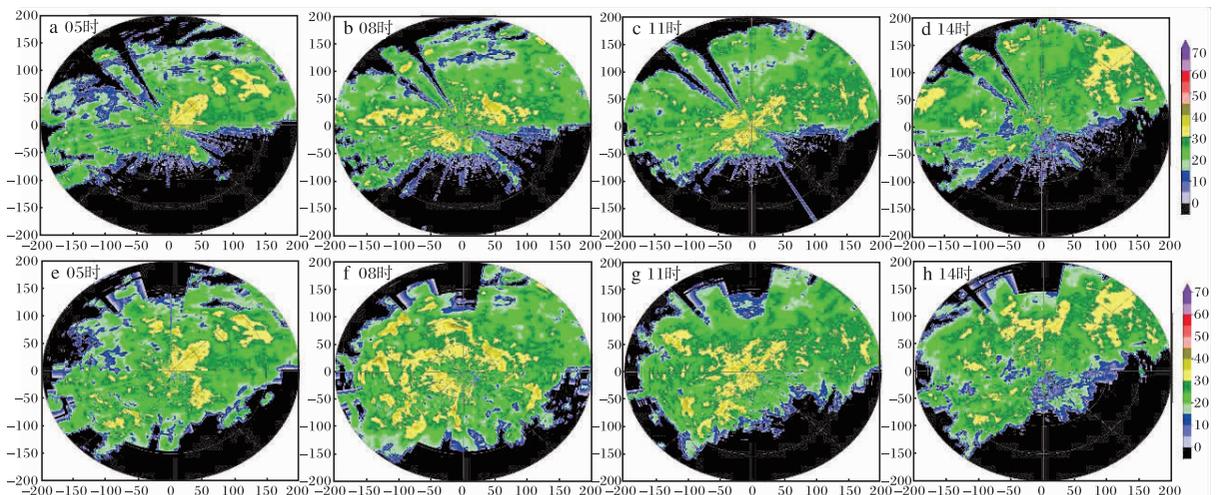


图 2 西安雷达 2019-09-14T05-14 修订前(a,b,c,d)后(e,f,g,h)  $0.5^\circ$  仰角反射率因子(单位: dBz)

### 3 西安地区对流回波时空分布特征

#### 3.1 年分布

从2014—2019年4—9月西安雷达探测区域的对流回波发生频次年分布(图3)可以看出,对流性回波在2015年发生频次最多(年平均频次为97.1次),2014年次之(67.9次);2017年相较于2018年对流频次分布区域较小,而年平均频次比2018年多(2017年为55.6次;2018年为46.8次),说明2017年对流天气虽然出现的区域比2018年小,但对流天气持续时间更长、强度更强;2016年平均频次为30.3次,而2019年对流回波

发生频次最少,年平均频次仅为26.2次,只达到2015年年平均频次的30%。西安地区对流回波的年分布特征没有呈现规律性的变化,但在空间分布特征上能够发现有两个区域对流回波发生频次较多,一个区域为关中北部(从宝鸡北部、咸阳北部至铜川、延安与渭南交界处),另一个区域为秦岭北麓(西安南部至渭南南部)。说明关中地区对流天气发生发展与关中盆地南北两侧地形特征有关,即关中北部平原向黄土高原过渡带和关中南部平原向秦岭高海拔山区过渡带的地形动力抬升作用更有利于对流天气发生。

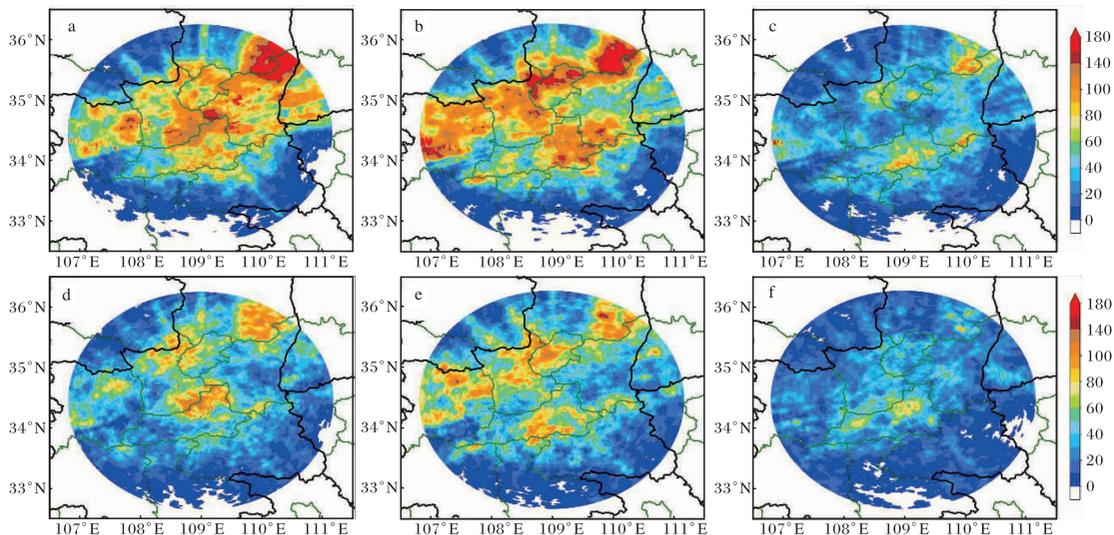


图3 2014—2019年4—9月西安雷达逐年对流回波频次(单位:次)累计空间分布

(a 2014;b 2015;c 2016;d 2017;e 2018;f 2019)

#### 3.2 月、旬和日分布

将2014—2019年对流回波发生频次按月进行统计,可得出4—9月对流回波发生频次(图略)。结果显示4、5月对流天气发生较少,6月开始逐渐增多,8月达到峰值,9月迅速减弱。在空间分布上与年统计特征类似,即关中北部与秦岭北麓为对流天气多发区。进一步对4—9月各旬对流回波频次进行统计。从图4旬平均频次可以看出,4月中下旬对流平均出现次数比月上旬多,5月上旬比中下旬多,6月各旬平均频次接近,7月中旬和8月中旬对流平均频次相近,7、8月对流平均发生频次最多的时段分别是7月下旬和8月上旬。

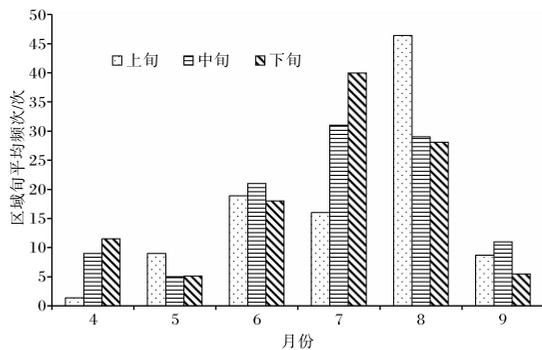


图4 2014—2019年4—9月西安雷达对流回波旬平均频次分布对比

由于对流天气过程发生发展时间尺度通常是分钟到小时级别,因此日变化特征相对于年、月、旬气候特征可以有助于更好了解对流回波的生消

规律。图5为2014—2019年4—9月每日逐3h对流频次累计空间分布,从时间变化上来看,每日02—11时对流天气发生活动频次较少;11—14时对流活动频次开始变多,回波局地性强;从14时开始对流频次明显增多,其中14—23时是强对流天气活动最多时段,23时后回波频次迅速减少。从日变化特征可以看出强对流天气在午后到傍晚达到一个高峰,说明关中地区对流活动发生发展主要受热力作用影响,7—8月14—20时地面吸收太阳短波辐射后增温显著,低层大气加热易形成不稳定层结,从而触发或维持对流过程。从空

间变化来看,对流活动最频繁区域同样位于关中北部和秦岭北麓,其中铜川、延安南部、西安东南部逐3h对流活动频次最大达到120次以上。从前面分析可知上述地区都存在地势明显由低变高的特点,因此也可以看出除热力作用占主要因素外,动力抬升作用对对流活动的生成维持也有一定贡献,这也与部分学者<sup>[16]</sup>所发现的陕西强对流天气地理分布的研究结果基本一致。相对而言宝鸡南部、咸阳南部和西安北部(非城区)、渭南中部为对流活动少发区。

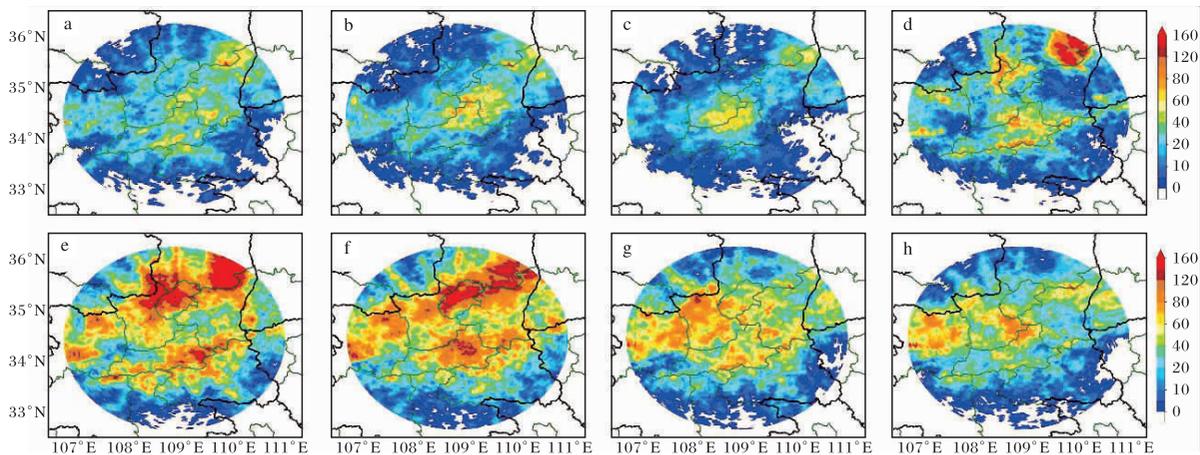


图5 2014—2019年4—9月西安雷达逐3h对流回波频次(单位:次)累计空间分布(a 02—05时; b 05—08时;c 08—11时;d 11—14时;e 14—17时;f 17—20时;g 20—23时;h 23—02时)

#### 4 结论

本文利用2014—2019年4—9月西安C波段多普勒雷达数据,并对由于西安周边地形和高大建筑等造成的反射率遮挡区域进行填补修订,通过遮挡修订后的三维反射率因子识别出对流性回波,分析研究西安地区夏季对流天气的雷达气候学特征。主要结论如下。

(1)西安雷达在 $0.5^\circ$ 和 $1.5^\circ$ 仰角上受到较严重的地形和高大建筑遮挡,在 $0.5^\circ$ 仰角上东部到西南部及西北部无法探测到有效反射率信息,在 $1.5^\circ$ 仰角上偏南部 $160^\circ\sim 210^\circ$ 仍然受秦岭高海拔山区地形遮挡出现回波缺失现象,直到 $2.4^\circ$ 仰角上遮挡情况消失。

(2)除地形遮挡外还存在由于雷达站附近存在高大建筑等非地形因素导致的个别方位角上反

射率受遮挡情况。针对此类问题进一步设计了遮挡修订参考方案,通过交叉方位角插值法和更高仰角反射率填补方法,最终形成遮挡修订后完整的雷达反射率因子数据,并利用对流性回波自动识别方法识别出2014—2019年夏季西安地区各时次对流性回波分布产品。

(3)西安雷达2014—2019年夏季对流性回波分布产品气候统计分析表明,年时间分布上西安周边地区2015年对流性天气发生频次最多,2019年最少,2017年对流天气比2018年出现少,但持续时间更长、强度更强;年空间分布上两个区域对流天气发生较多,分别为宝鸡北部、咸阳北部至铜川、延安南部地区,及秦岭北麓西安南部至渭南南部地区。

(4)西安雷达2014—2019年4—9月对流性

回波月、旬和日时间变化特征上,7—8月为对流天气高发期,其中7月下旬和8月上旬出现对流天气最多;每日14—23时对流天气活动频繁,23时后频次迅速减弱。日空间分布特征与年分布特征类似,两者特征相似说明地形强迫导致的动力抬升作用对当地对流活动生成和维持也具有一定贡献。

#### 参考文献:

- [1] GERMANN U, JOSS J. Operational measurement of precipitation in mountainous terrain [M] //Meischner P. Weather radar: principles and advanced applications. Berlin:Springer, 2003: 52-77.
- [2] ZHANG J, QI Y. A real-time algorithm for the correction of brightband effects in radar-derived QPE[J]. Journal of Hydrometeorology, 2010, 11(5):1157-1171.
- [3] KUO J T, ORVILLE H D. A radar climatology of summertime convective clouds in the Black Hills [J]. Journal of Applied Meteorology, 1973, 12(2): 359-367.
- [4] 刁秀广, 谢考现. 山东省强对流天气雷达回波气候特征[J]. 气象, 1999, 25(8):40-43.
- [5] 韩雷, 俞小鼎, 郑永光, 等. 京津及邻近地区暖季强对流风暴的气候分布特征[J]. 科学通报, 2009, 54(11):1585-1590.
- [6] 孙康远, 郑媛媛, 慕瑞琪, 等. 南京及周边地区雷达气候学分析[J]. 气象学报, 2017, 75(1):178-192.
- [7] 王国荣, 平凡, 仰美霖, 等. 基于气候统计特征的雷达回波质控方法[J]. 气象科技, 2019, 47(1):19-28
- [8] 管理, 戴建华, 赵渊明, 等. 上海地区暖季午后对流的雷达气候学特征分析[J]. 气象, 2020, 46(12): 1543-1554.
- [9] 毕旭, 徐军昶, 杨亦典, 等. 两次下击暴流天气的环境背景及多普勒雷达特征[J]. 陕西气象, 2021(5):1-8.
- [10] 孟妙志, 卢晔, 王仲文. 关中阵风锋环境场和雷达特征分析[J]. 陕西气象, 2019(5):12-16.
- [11] 支树林, 许东蓓, 潘赫拉, 等. 陕西汉中及其周边地区对流活动的雷达气候特征分析[J]. 干旱气象, 2021, 39(4):620-630.
- [12] 刘帆, 高萌, 谢逸雯, 等. 陕西关中地区一次突发性暴雨的雷达回波特征分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2019, 13(2):48-54.
- [13] 李金辉, 罗俊颖, 梁谷, 等. 陕西关中地区层状云降水及雷达特征分析[J]. 高原气象, 2010, 29(6): 1571-1578.
- [14] QI Y, ZHANG J, ZHANG P. A real-time automated convective and stratiform precipitation segregation algorithm in native radar coordinates [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2013, 139:2233-2240.
- [15] 胡启元, 戚友存, 王楠, 等. 基于 SRTM 地形数据的天气雷达电磁波非常规遮挡回波补偿技术研究[J]. 气象科技进展, 2021, 11(3):135-144.
- [16] 姚静, 屈丽玮, 朱庆亮, 等. 陕西省强对流天气气候特征分析与对流指标探讨[J]. 陕西气象, 2017(3):29-35.