

文章编号: 2096-1618(2025)03-0352-07

基于 FY-4A 卫星和天气雷达的陕南暖季强降水的云顶高度特征

黄迪威¹, 白爱娟¹, 王 钊², 张昊楠¹

(1. 成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都 610225; 2. 陕西省农业遥感与经济作物气象服务中心, 陕西 西安 710014)

摘要:为了解 FY-4A 卫星云顶高度 (cloud top height, CTH) 产品对陕南暖季降水云的反映状况, 以陕南地区 2020 年暖季 (5-10 月) 降水过程为例, 对比分析 FY-4A 卫星 CTH 产品与汉中天气雷达回波顶高 (echo top height, ET) 产品对该地区降水云的探测资料。结果表明: (1) 在暖季 21 次降水过程中, 卫星产品的云顶高度揭示了陕南地区降水云的空间变化, 尤其在大巴山峡口附近, CTH 值显著偏高的区域与陕南强降水的多发区相吻合。 (2) 以 2020 年暖季一次强降水过程为例, 云顶高度探测表明卫星 CTH 的高值区通常与雷达 ET 的高值区相对应, 说明卫星能够揭示陕南山地降水云体的时空变化, 但在雷达 ET 高值区卫星 CTH 存在以填充值代替的现象, 说明复杂地形区 CTH 填充值可能是潜在强降水区。 (3) 对比两种探测在降水云体发展中差异, 结果显示在降水云初生和消亡阶段, 两者绝对差值小于 2 km 的格点数与总格点数的占比都超过 50%, 说明 CTH 产品能有效捕捉降水云的初生和消亡变化。在降水云成熟阶段, 两者平均差值超过 4 km, 卫星探测云体不确定性增加, 较难反映降水云体特征。

关键词: FY-4A 卫星; 强降水; 云顶高度; 雷达回波顶高; 陕南地区

中图分类号: P414.4

文献标志码: A

doi: 10.16836/j.cnki.jcuit.2025.03.016

0 引言

陕南地区地势起伏大, 支流繁多, 平均年降水量在 700~900 mm, 其中米仓山、大巴山和秦岭山区的年降水量多达 900~1250 mm, 是陕西暴雨和强降水最频繁的地区, 也是降水诱发地质灾害的高风险区^[1]。暖季受东北路径移动西南涡的影响, 陕南地区对流活跃, 降水强度明显增大。近年来在气候变暖和极端降水增多的背景下, 受强降水和复杂地形相互作用的影响, 陕南洪涝、滑坡和泥石流等次生灾害频繁发生, 造成严重经济损失和人员伤亡。如在 2019 年 9 月 13-15 日, 陕南汉中持续强降水导致严重的泥石流和塌方险情。准确判识和预警复杂地形区的强降水天气, 是保护人民生命安全并减少经济损失的前提。

在强降水的天气学研究中, 云系的垂直发展是判识对流强度和预警强天气的指标, 对应的云顶高度成为降水云特征的重要参数, 表现为较高的云顶高度与强降雨密切相关^[2-3]。Simpson 等^[4], Castro 等^[5] 对光探测和测距、大气吸收和双光谱方法、云影的使用和立体测量等技术的研究, 使卫星估算云顶高度越发成熟。中国自主

研发的 FY-4A 卫星携带多通道辐射成像仪和闪电成像仪等多种设备, 具有探测范围广、时空分辨率高和立体探测优势。FY-4A 的云顶高度产品是判断对流初生和深浅对流及强天气类别的主要依据。除卫星遥感探测外, 地基多普勒天气雷达也具有对降水云垂直探测的优势, 且时空分辨高, 能够准确监测对流的发展^[6]。陕南汉中布设了 C 波段多普勒天气雷达, 可以监测距离雷达站大于 400 km 的短时降水和暴雨等强降水天气, 并能获取 150 km 范围内的降水区和风场的准确估测信息。汉中雷达与 FY-4A 卫星的联合探测为复杂地形区对流云的判识提供了丰富的数据产品, 也为降水灾害频繁的陕南地区对流云体研究提供了丰富的数据。周毓荃等^[7] 将 FY-2 卫星数据与 L 波段探空雷达资料进行联合反演, 获取了云顶高度、云光学厚度和云粒子有效半径等降水云的宏微观产品, 与同类产品相比具有较好的效果。然而, 目前对雷达探测和 FY-4A 卫星云特征产品的联合应用还较少, 因此迫切需要开展相关研究, 以提高卫星在复杂地形区的应用能力。

综上, 本文选择秦巴山区为主体的陕南地区 (图 1), 以 2020 年暖季的降水过程为例, 将汉中天气雷达探测的回波顶高 (以下简称 ET) 与 FY-4A 卫星反演的云顶高度 (以下简称 CTH) 产品进行对比分析, 检验卫星产品在陕南山地的应用效果, 推进 FY-4A 数据在强降水云监测和预警中的应用。

收稿日期: 2023-11-06

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目 (U2242202); 陕西省秦岭与黄土高原重点实验室基金资助项目 (2022G-10); 陕西省科技厅自然科学研究计划资助项目 (2023-JC-YB-279)

通信作者: 白爱娟. E-mail: baiaj@cuit.edu.cn

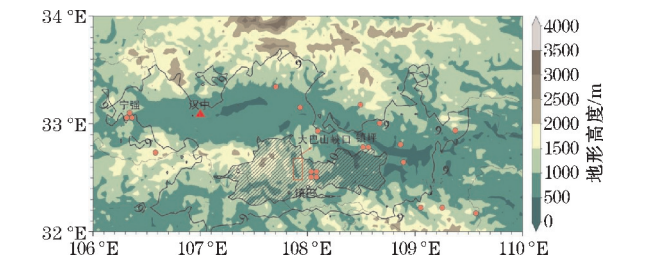


图1 陕南及周边地区的地形高度(阴影)和2020年21次降水过程中CTH平均值的空间分布及各次降水过程最大降水站分布(等值线,斜线为CTH高于10 km,▲:汉中雷达站,红色方框为大巴山峡口区,红色圆点是各次降水过程最大降水站点)

1 研究区域与观测数据

1.1 强降水个例

根据2020年暖季陕南地区的镇巴、宁强、镇坪站等23个地面观测站点24 h降水量数据,筛选出21次降水过程(表1)。21次降水过程中,有15次过程24 h降水量大于30 mm,为大雨以上过程,其中9次日降水量超过50 mm,达到暴雨量级,还有2次大于100 mm的大暴雨过程。由此可见,陕南强降水天气频繁。通过表1中21次过程中最大降水站点,结合图1的强降水位置分析陕南强降水的落区,发现21次暴雨中,汉中镇巴站出现4次,是强降水发生最为频繁的站点。其

表1 陕南2020年暖季降水过程概况

降水时段	最大过程降水量/mm	最大降水站	最大24 h降水量/mm和发生时间
5月7~9日	64.1	安康汉阴	45.3(5月8日)·
5月24日	27.9	汉中城固	24.6(5月24日)·
6月8~9日	65.3	汉中洋县	61.3(6月8日)*
6月11~13日	103.3	安康镇坪	61.1(6月11日)*
6月16~17日	148.2	汉中镇巴	130.8(6月16日)*
6月27~28日	51.3	汉中留坝	36.2(6月27日)·
7月1~2日	25.2	安康岚皋	20.4(7月2日)·
7月10~12日	95.3	汉中宁强	66.8(7月11日)*
7月14~19日	114.8	安康镇坪	41.6(7月15日)·
7月21~26日	111.7	安康岚皋	69.4(7月21日)*
7月30日	51.7	安康旬阳	51.7(7月30日)*
8月1~2日	49.2	商洛丹凤	48.2(8月1日)·
8月7~8日	125.8	安康白河	112.6(8月8日)*
8月13~16日	104.6	汉中镇巴	97.7(8月13日)*
8月17~20日	93.4	汉中镇巴	69.7(8月18日)*
8月23~24日	48.9	安康旬阳	48.9(8月24日)·
9月9~10日	39.6	汉中镇巴	39.3(9月9日)·
9月19~22日	101.0	安康白河	63.3(9月21日)*
10月1~6日	65.2	安康石泉	27.6(10月2日)·
10月12~16日	55.2	汉中宁强	19.5(10月15日)·
10月27~28日	13.2	汉中宁强	10.4(10月27日)·

注:“·”代表大到暴雨过程,“*”为暴雨及以上量级的过程。

次是汉中宁强和安康镇坪,分别出现3次和2次。这3个测站均位于巴山北麓,范围在31.7°N~33.5°N,106.2°E~109.4°E,是陕南强降水频发的中心地区。以上降水过程中,24 h降水量的极值发生在汉中镇巴的6月17日,日降水量达到130.8 mm,其次是安康白河的8月8日,24 h降水量达到112.6 mm。对于表1中陕南暴雨过程进行季节性分析,发现在6~8月分别出现了3次,9月只出现了1次。因此,陕南地区的强降水多集中在6~8月,暖季是暴雨频发的季节。

1.2 数据处理

1.2.1 FY-4A 卫星的云顶高度和云顶温度

使用2020年5~10月FY-4A卫星AGRI探测器的12级CTH和CTT产品。卫星云顶高度产品的算法应用AGRI的10.8 μm和12 μm两个红外分离窗口通道的亮温差及13.5 μm的CO₂吸收通道的亮温值,通过云顶高度算法进行检索得到^[8-9]。在处理多层云像素时,CTH产品通过插值从周围的低云估计下层云的云顶高度。CTH数据来自中国气象局国家卫星气象中心,产品时间分辨率为15 min,空间格点分辨率为4 km。

1.2.2 汉中天气雷达数据

选取汉中C波段多普勒雷达站的ET和反射率因子R产品,汉中雷达站位置如图1所示,海拔高度为569 m。在数据获取过程中,采用滤波、衰减订正和插值等相同方法进行质量控制。数据的时间分辨率为6 min,水平分辨率为500 m。ET格点产品通过对雷达基数据进行处理得到。首先以18.3 dBZ为阈值,从低到高搜索满足该条件的最大高度,确定为回波顶高值,再通过库长、仰角、方位角将极坐标的ET转化为经纬度格点数据。

1.2.3 遥感数据时空匹配处理

分析中将卫星和雷达数据统一为北京时,并将雷达极坐标的ET产品转化为经纬度格点数据,与卫星格点数据进行空间匹配。取与雷达数据同时间对应或最接近的CTH进行时间匹配。由于ET是以雷达站基座为起点的雨顶高度,卫星的CTH为海拔高度,因此在比较分析中,将CTH值减去对应雷达站的高度(569 m)。在两者数据的空间匹配时,考虑雷达最高仰角探测的限制,忽略雷达站中心50 km内和200 km以外的数据。为更精细化地分析卫星的探测结果,根据汉中雷达反射率因子是否大于35 dBZ的特征,将降水云分为对流初生、成熟和消亡3个阶段。以ET作为降水云宏观参数的准真值,分析卫星CTH对陕南降水云的反演结果。

2 陕南降水云系的空间分布特征

云顶高度是降水云发展的标志,也是地面降水变化的基础,准确估量云顶高度对分析云特性和预警强

降水具有重要意义^[10]。为研究陕南地区降水过程中云顶高度的变化特征,对2020年21次降水个例FY-4A卫星CTH进行时间平均,分析格点云顶高度的水平分布,以研究降水云体的整体发展情况。

分析陕南地区暖季21次降水过程中FY-4A卫星探测平均云顶高度的分布(图1),将CTH平均值超过10 km的高值区作为强降水易发生区。图1中21次降水过程在汉中和安康盆地平均CTH在9~10 km,北部的秦岭山区,大巴山西部和东部平均CTH低于9 km,表明以上地区暖季降水云整体发展高度较低,云体偏弱。卫星探测CTH的高值中心在大巴山东西段之间,平均CTH超过10 km,尤其是在峡口地区,降水过程中最大降水站点镇巴也位于该处。造成峡口地区为强降水易发区的原因是,峡口地区位于大巴山安康段和汉中段之间的低海拔区域,冷空气和偏南暖湿气流在该地受强烈的地形辐合影响。这种辐合通过动力作用对降水产生增幅,形成强降水的“雨窝”。毕宝贵等^[11]研究指出大巴山地区的降水增加幅度最大,特别是峡口两侧地区。与CTH所显示的陕南强降水易发区位置对应,表明FY-4A卫星能够有效探测陕南地区降水云。

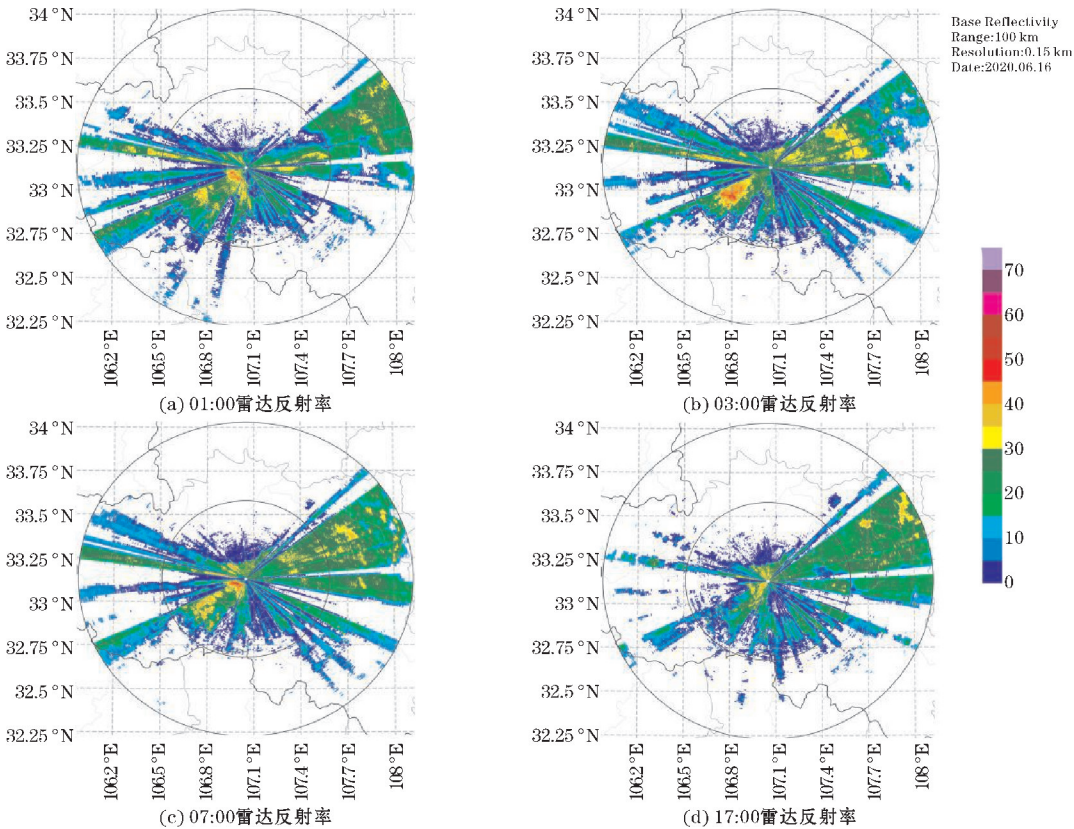


图2 2020年6月16日汉中雷达站反射率因子

3 降水云不同阶段卫星云顶高度与雷达回波顶高对比分析

为了解降水云的3个阶段下CTH和汉中雷达站

为进一步研究陕南强降水过程中卫星和雷达对降水云的探测结果,以表1中2020年6月16-17日汉中镇巴为中心的强降水过程为例,进行卫星和雷达对降水云顶探测差异的对比分析。在6月16-17日的强降水个例中,16日为主要降水日,该日汉中站24 h降水量达130 mm。根据常规定义,对流初生为多普勒雷达首次检测到对流云反射率因子 ≥ 35 dBZ^[12]。对6月16日汉中雷达站的反射率因子变化特征进行分析。图2(a)显示16日00:57汉中雷达站西南侧首次出现超过35 dBZ的强回波中心,表明降水云发生了对流初生。00:00-00:57为降水云对流初生之前。图2(b)汉中雷达站02:57有一明显的50 dBZ回波强中心,对流云继续发展加强,为降水云对流成熟阶段。图2(c)汉中雷达站06:57西南侧反射率因子开始减弱,但依然有高于35 dBZ雷达反射率。图2(d)的16:57雷达反射率因子低于35 dBZ,降水云开始进入消亡阶段。因此,根据图2中汉中雷达站的反射率因子变化,可以判断出汉中雷达站在00:00-01:00处于对流初生之前的阶段,01:00-03:00处于对流初生阶段,03:00-06:00处于对流成熟阶段,17:00后进入消亡阶段。

的回波顶高ET的分布差异特征,并评估FY-4A卫星CTH产品在秦巴山区降水云探测中的应用效果,对3个阶段下两者的差异进行对比分析。图3(a)为降水云的初生阶段(00:00)CTH的分布情况,整个汉中地区的西部具有最高的CTH值,达到12 km,表明在该时

段汉中地区的西部对流云发展最为强盛。汉中雷达站周围的 CTH 集中在2~6 km。图 3(b)为相同时间的汉中雷达站探测到的 ET 分布情况,ET 主要集中在4~9 km的高度,比 CTH 的2~6 km高,这表明在对流初生阶段 ET 相对 CTH 更高。分析图 3(c)中 12:00 的降水云成熟阶段卫星 CTH 的水平分布情况。相较于对流初生阶段,汉中站的西侧 CTH 增大,CTH 集中在8~12 km,与图 3(d)中的 ET 分布情况相对应,ET 也集中在8~12 km,两者的高度相近。同时,两者的西南侧都存在16 km的高值中心。从图 3(c)和图 3(d) CTH 与 ET 的对比可以发现,随着对流的发展和加强,在对流成熟阶段,CTH 开始明显接近甚至超过 ET。图 3(e)中 07:00 对流云进一步加强,CTH 集中在12 km以上,汉中站西南侧18 km高值中心进一步扩大。对应图 3(f)的 ET 高中心集中在16 km,整体 ET

集中在8 km。可见在对流旺盛阶段,卫星反演的 CTH 开始全面高于 ET,两者可相差3~4 km。图 3(e)显示的 07:00,对流云进一步加强,CTH 集中在12 km以上,汉中站西南侧的18 km高值中心进一步扩大。相应的图 3(f)显示的 ET 高值中心集中在16 km,整体 ET 分布在8 km范围内。可见在对流活跃阶段,卫星反演的 CTH 开始普遍高于 ET,两者的差值可达3~4 km。图 3(g)显示的 17:00,对流发展进入消亡阶段,CTH 范围在3~6 km,而图 3(h)的 ET 也集中在3~6 km,两者的高度再次接近。说明在降水云消亡阶段,由于云体快速减弱,CTH 随之减小,ET 与 CTH 之间的差值减小。CTH 高于 ET 的差值约为1~2 km。此外,从汉中雷达图中还可以观察到,由于雷达仰角的限制,雷达中心附近的 ET 值普遍偏低,因此在对比分析中应忽略雷达中心附近的区域。

综上,在陕南地区,FY-4A卫星 CTH 在降水云初生阶段较汉中雷达站探测的 ET 偏低。然而,在对流成熟阶段,CTH 随着对流的发展持续增加,并且增长速度高于 ET,导致 CTH 比 ET 高3~4 km,两种产品之间的高度差可达4~6 km。在降水云的消亡阶段,CTH 随着云体的减弱而迅速减小,与雷达站探测到的 ET 差距减小,两者之间的差值约为1~2 km。

4 陕南地区强降水云 CTH 与雷达基数数据换算 ET 的格点对比

对比陕南地区的强降水云 CTH 与 ET 的关系,发现FY-4A卫星的 CTH 产品与汉中雷达 ET 产品在不同对流阶段下两者之间存在差异。为更加精细化分析两者之间的差异,以2020年6月16-17日汉中的强降水过程为例,将雷达基数数据进行仰角换算为垂直精度为0.1 km的 ET 格点数据,具体方法为利用基数数据仰角、库长、以及张培昌等^[13]测高公式以18.3 dBZ为阈值将01:00-02:00 汉中雷达基数数据换算为 ET 格点数据,在相同时间段和经纬度格点搜索 CTH。针对降水过程的3个对流阶段,分别计算 CTH 和 ET 之间的相关系数和平均偏差等指标,通过在格点上对比两者,以了解FY-4A卫星在陕南秦巴山区 CTH 与汉中雷达 ET 之间的关系。

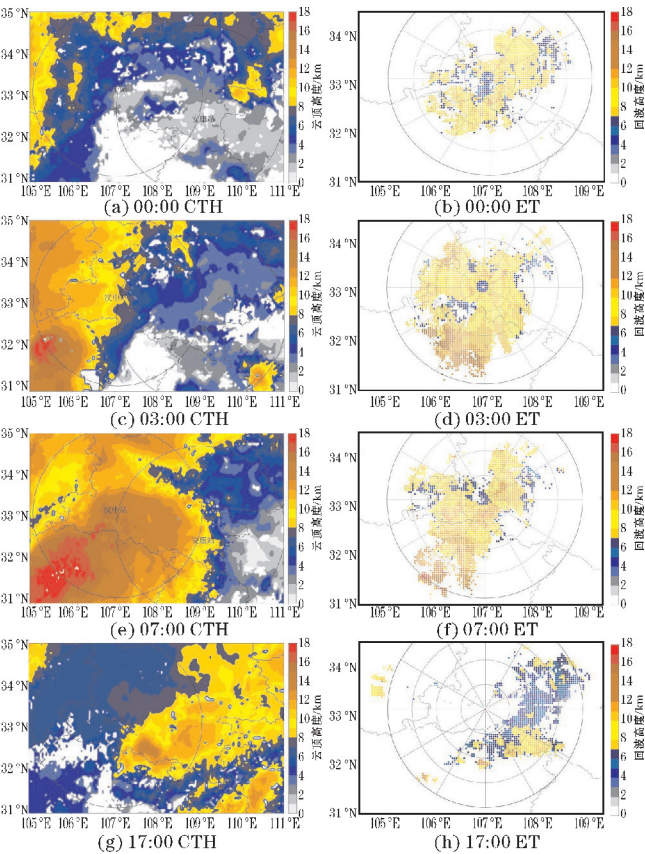


图3 陕南2020年6月16日FY-4A卫星CTH和汉中雷达ET (曲线为省界,图中200 km距离圈为雷达有效探测范围)

表2 2020年6月16日陕南地区卫星CTH与雷达ET在3个对流阶段的特征分析

对流阶段	绝对差值小于1 km 的百分比/%	绝对差值小于2 km的 百分比/%	平均差值/km	CTH和ET的相关系数
初生阶段	21.7	50.6	-0.3	0.28
成熟阶段	1.2	5.4	4.3	-0.21
消亡阶段	18.8	57.4	2.2	0.38

2020年6月16日01:00-20:00的19个时次中,汉中雷达共提取到218802个格点样本。在筛除掉汉

中雷达站50 km以内和200 km以外格点后,剩余15421个有效格点样本。表2中01:00-03:00对应对流初生

阶段,CTH 和 ET 绝对差小于1 km的格点占该阶段总体的21.7%,绝对差小于2 km为50.6%,卫星 CTH 与 ET 格点平均差值(简称 C-E)为-0.3 km。对流初生阶段两者差值较小,相关系数为0.28。在 03:00-17:00对流成熟阶段 CTH 和 ET 绝对差小于1 km的格点仅占总体的1.2%,C-E 达到4.3 km,误差陡增。17:00-20:00的降水云消亡阶段,两者绝对差小于2 km的格点为总体的57.4%,C-E 值为2.2 km,相关系数达到0.38。在对流初生和消亡阶段 CTH 和 ET 绝对差小于2 km的格点数都高于总体的 50%且相关性较好,表明卫星的云顶高度产品能有效捕捉降水云的初生和消亡云顶变化,在降水云成熟阶段,两者平均差值超过4.3 km,卫星探测云体变化不确定性增加,难以反映中低层降水云特征。

张艳品等^[14]分析欧洲极轨卫星 IASI 探测的云顶高与地基云雷达回波高度的差异时发现,通常 IASI 反演的云顶高低于雷达探测,与该研究相一致的是,在降水云初生阶段,ET 高于 CTH。此外,张艳品等^[14]还提出在云层发展增强以后,卫星 CTH 增加的结论,与本文FY-4A卫星的云顶高度随云层发展成熟快速增加,逐渐高于雷达回波顶高的结论相吻合。周非非等^[15]研究表明 FY-2 卫星探测云顶高度整体高于雷达探测,与本文FY-4A卫星与汉中雷达整体对比结果一致。

4.1 降水云体垂直结构的探测对比

为检验汉中雷达提取的 ET 格点数据的准确性,从降水云的剖面结构进行汉中雷达 ET 与FY-4A卫星 CTH 对比分析。选取汉中雷达站00:00、03:00、19:00雷达反射率剖面,并与相应的 CTH 进行对比。图4(a)显示了对流初生阶段 03:00 汉中雷达探测到的反射率因子分布,在汉中以西存在一个西南—东北走向的带状50 dBZ 强回波。在该带状强回波中选择一部分基线进行空间剖面分析(图4a中的黑色基线)。尽管部分基线位于汉中雷达50 km范围内,但从剖面图中可以看出,能够完整地探测到18.3 dBZ雷达回波所在的高度,这对后续的 CTH 和 ET 分析没有影响。图4(b)中卫星 CTH 在雷达 ET 下部,比雷达 ET 低约1 km。FY-4A卫星探测降水云体结构的 CTH 与汉中雷达的雨顶高 ET(18.3 dBZ等值线)的平均差值为-1.6 km(简称 C-E_p),比 C-E 的-0.4 km小1.2 km。图4(c)中 03:00 成熟阶段,随着降水云发展加强,CTH 远高于 ET,C-E_p 最大可达到6 km,表明在对流成熟阶段,卫星难以反映中低层降水云特征。图4(d)降水云消亡阶段 ET 在4~7 km,CTH 也迅速减小到5~8 km,两者的平均差在1 km以内,C-E_p 为1.8 km,比 C-E 小0.4 km。此外,ET 与 CTH 的波峰空间分布也较一致,与前文结论相一致,即两者的高值中心对应良好。

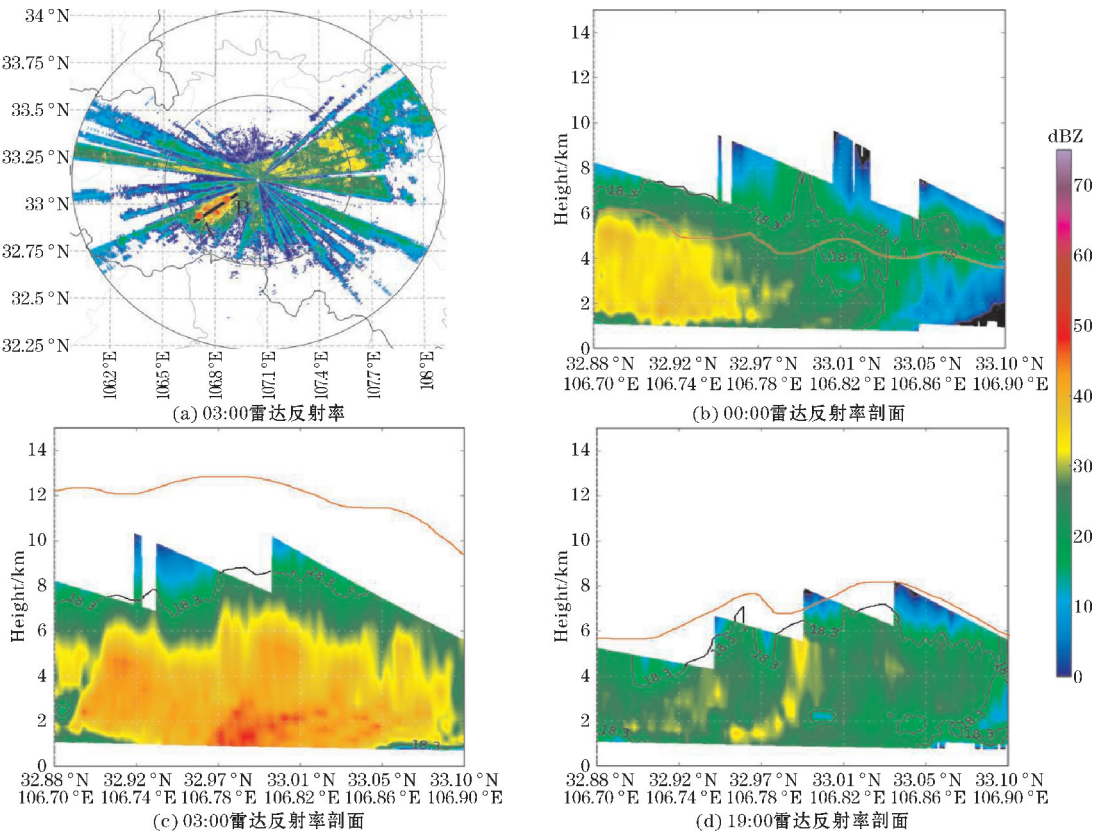
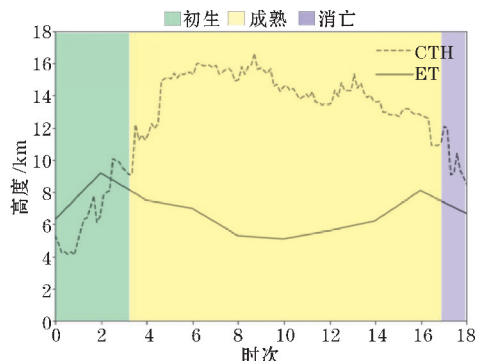


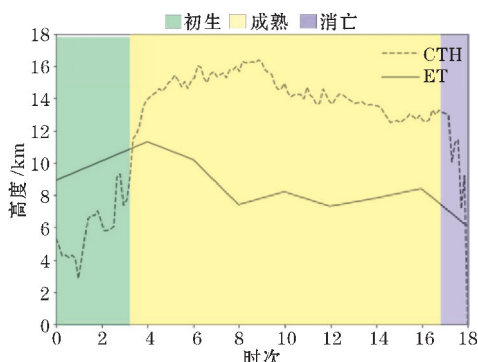
图4 汉中雷达2020年6月16日0.7°仰角的反射率因子分布(黑线为剖面的基线,红点A和B为基线上与卫星CTH作对比的雷达强回波格点)和沿黑色基线的雷达反射率剖面(黑线为18.3 dBZ等值线,红线为CTH)

4.2 强降水区雷达 ET 和卫星 CTH 时间变化对比

为进一步了解FY-4A卫星 CTH 对陕南降水云的反映状况,选取图4基线上的A和B两个强回波中心点,并分析这两个点在00:00–18:00汉中雷达ET和CTH的时间变化(图5)。在00:00–03:00的降水云初生阶段,两者都呈现整体上升的趋势,且ET高于卫星的CTH, $C-E_p$ 为负数。到04时降水云成熟阶段,CTH快速持续增大,直到06:00高度稳定在14~15 km。对应ET在降水云初生阶段的增加后,成熟阶段反而有所下降,稳定在6~8 km,明显低于CTH。在降水云消亡阶段,CTH出现断崖式下降, $C-E_p$ 迅速减小。这与俞小鼎等^[16]指出“通常在对流云初生阶段,云顶高度明显增加,相反在深对流发展成熟以后,云顶高度的突然强烈下降”结论相同。



(a) 强回波点 A



(b) 强回波点 B

图5 2020年6月16日00:00–18:00强回波点A和B的ET和CTH时间变化曲线

综合对卫星CTH与雷达ET在降水云体垂直结构和时间变化上的对比分析,发现 $C-E$ 比 $C-E_p$ 偏大。这是由于雷达探测最高仰角相对较低的限制,导致在提取生成ET格点数据过程中大于一定强度阈值的回波高度比云体发展高度偏低。对于降水云的3个阶段,ET与CTH的关系分析显示,在降水云初生阶段CTH低于ET, $C-E_p$ 小于0,且两者在不断增大中呈现一致的趋势,反映出对流初生时云体向上发展的特征,表现为正相关。降水云成熟阶段,卫星揭示的云顶高度急剧增大,稳定在对流层顶高度以上,对应ET呈弱下降

趋势。到降水云消亡阶段,两者同时下降, $C-E_p$ 减小,相关性再次增强。

5 结论

本文以2020年暖季陕南地区降水天气过程为例,利用FY-4A卫星的CTH数据产品、汉中的天气雷达ET产品以及以18.3 dBZ为阈值的ET格点数据,对比分析卫星和雷达对陕南强降水云系的探测结果,得到以下结论:

(1) 2020年暖季陕南地区21次降水过程中, FY-4A的云顶高度揭示了陕南地区降水云的空间变化,其中在汉中安康之间大巴山峡口区为云顶高度的高值区,平均云顶高达10 km以上,该区域对应陕南强降水易发区,以大巴山峡口为中心向东西方延展,大巴山东西段的云顶高度明显下降。

(2) 2020年6月陕南强降水个例的分析表明,卫星云顶高度的高值区能够与雷达回波顶高的高值区对应,说明风云卫星能够揭示陕南山区降水云体的整体分布。在雷达回波顶高的高值中心区域偶尔会出现卫星云顶高度填充值,表明在陕南复杂地形区内雷达回波高值区域对应的卫星云顶高度填充的区域也可能为强降水区,可为强降水监测提供参考。

(3) 以陕南2020年6月16日强降水为例,通过对雷达和卫星探测云产品进行时间和格点对比以及对降水云体垂直结构的探测,发现在降水云初生和消亡阶段阶段,卫星云顶高度与雷达回波顶高有一致升高或降低的趋势,两者绝对差小于2 km的格点数都超过总数50%,这表明FY-4A卫星的云顶高度产品能够有效捕捉降水云的发展和消亡过程,揭示对流云顶变化。在降水云成熟阶段,卫星云顶高度与雷达回波顶高绝对差急剧增大,平均差值高达4 km,卫星反演降水云高存在较大不确定性,难以反映中低层降水云特征。

分析FY-4A卫星和汉中雷达在陕南地区强降水云探测中的差异,卫星云顶高度整体高于雷达回波顶高,这是由于两者探测原理不同导致的。雷达回波顶高主要探测云中粒子的高度并受自身探测仰角一定限制。而卫星通过云顶亮温反演云顶高度,更易揭示中高云的变化特征,但较难反映中低降水云。总之, FY-4A卫星在探测山区强降水云时能够反映云体的整体分布,最重要的是能够捕捉到云体初期发展和消亡的特征,在降水云成熟后探测结果存在较大误差。为在陕南山区充分利用卫星反演云产品,给复杂地形区降水云分析提供参考,需要继续基于雷达的回波研究卫星云产品的反演算法和解释应用。

参考文献:

[1] 胡晓娜. 陕南秦巴山区小流域暴雨洪水成因特

- 征及计算方法探讨[J]. 地下水, 2019, 41(1): 2.
- [2] Snodgrass E R, L Di, Girolamo R M, et al. Precipitation Characteristics of Trade Wind Clouds during RICO Derived from Radar, Satellite, and Aircraft Measurements. [J]. International Journal Of Climatology, 2009, 48: 464–483.
- [3] Adler R F, Mack R A. Tunderstorm cloud height-rainfall rate relations for use with satellite rainfall estimation techniques[J]. Theoretical and Applied Climatology, 1984, 23: 280–296.
- [4] Simpson J, McIntire T, Jin Z, et al. Improved Cloud Top Height Retrieval under Arbitrary Viewing and Illumination Conditions Using AVHRR Data [J]. Remote Sensing, 2000, 72: 95–110.
- [5] Castro E, Ishida T, Takahashi Y, et al. Determination of Cloud-top Height through Three-dimensional Cloud Reconstruction using DIWATA-1 Data [J]. Scientific Reports. 2020, 10: 7570.
- [6] Marais WJ, Holz R, Hu Y, et al. Approach to simultaneously denoise and invert back scatter and extinction from photon-limited atmospheric lidar observations[J]. 2016, 55(29): 8316–8334.
- [7] 周毓荃, 陈英英, 李娟, 等. 用 FY-2C/D 卫星等综合观测资料反演云物理特性产品及检验[J]. 气象, 2008, 34(12): 27–35+130–131.
- [8] Min M, C Q Wu, C Li, et al. Developing the science product algorithm testbed for Chinese next-generation geostationary meteorological satellites: Fengyun-4 series. [J]. Journal of Meteorological Research, 2017, 31(4): 708–719.
- [9] 王诗圣, 向嘉敏, 祝善友, 等. 利用 MODIS 数据对 FY-4A-AGRI 传感器蓝光通道交叉辐射定标[J]. 遥感信息, 2020, 35(6): 115–121.
- [10] 宇路, 傅云飞. 基于 CALIOP 资料研究不同相态云边界的几何特征[C] 中国气象学会. 第 33 届中国气象学会年会 S12 大气物理学与大气环境, 2016, : 328.
- [11] 毕宝贵, 刘月巍, 李泽椿. 秦岭大巴山地形对陕南强降水的影响研究[J]. 高原气象, 2006, 25(3): 485–494.
- [12] 马鹏辉, 杨燕军, 张剑. 基于卫星云图的对流初生预测技术综述[J]. 气象与减灾研究, 2014, 37(1): 1–5.
- [13] 张培昌, 戴铁丕, 杜秉玉, 等. 雷达气象学[M]. 北京: 气象出版社, 1992, : 91–92.
- [14] 张艳品, 章文星, 吕达仁, 等. 卫星 (IASI 探测仪) 观测云顶高与地基云雷达观测的对比验证[J]. 大气科学, 2014, 38(5): 874–884.
- [15] 周非非, 周毓荃, 王俊, 等. FY-2 卫星反演的云顶高度与多普勒雷达回波顶高的关系初探[J]. 气象, 2010, 36(4): 43–50.
- [16] 俞小鼎, 郑永光. 中国当代强对流天气研究与业务进展[J]. 气象学报, 2020, 78(3).

Cloud Top Height Characteristics of Heavy Precipitation in the Warm Season in Southern Shaanxi based on FY-4A Satellite and Weather Radar

HUANG Diwei¹, BAI Aijuan¹, WANG Zhao², ZHANG Haonan¹

(1. College of Atmosphere Science, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. Shaanxi Agricultural Remote Sensing and Economic Crops Meteorological Service Center, Xi'an 710014, China)

Abstract: To understand the reflection of the FY-4A satellite Cloud Top Height (CTH) product on precipitation clouds in the warm season in southern Shaanxi, this study compares and analyzes the detection data of FY-4A satellite CTH product and Hanzhong weather radar Echo Top Height (ET) product for precipitation clouds in the region during the warm season of 2020 (May to October). The results show that: (1) Among the 21 precipitation events in the warm season, the satellite product reveals the spatial variation of precipitation clouds in southern Shaanxi, especially near the Daba Mountain Pass, where the areas with significantly higher CTH values coincide with the frequent occurrence of heavy precipitation in southern Shaanxi. (2) Taking a strong precipitation event in the warm season of 2020 as an example, the detection of cloud top height indicates that the high-value areas of satellite CTH generally correspond to the high-value areas of radar ET, indicating that the satellite can reveal the spatiotemporal variation of precipitation cloud systems in the mountainous areas of southern Shaanxi. However, in the high-value areas of radar ET, the satellite CTH exhibits a phenomenon of being replaced by fill values, indicating that fill values of CTH in complex terrain areas may represent potential areas of heavy precipitation. (3) Comparing the differences between the two detection methods in the development of precipitation cloud systems, the results show that during the initial and dissipation stages of precipitation clouds, the proportion of grid points with an absolute difference of less than 2 km between the two methods exceeds 50% of the total grid points, indicating that the CTH product can effectively capture the changes in the initial and dissipation stages of precipitation clouds. However, during the mature stage of precipitation clouds, the average difference between the two methods exceeds 4 km, indicating increased uncertainty in satellite cloud detection and greater difficulty in reflecting the characteristics of precipitation cloud systems.

Keywords: FY-4A satellite; intense precipitation; cloud top height; radar echo top height; Southern Shaanxi Province