

多种探测资料在人工增雨作业 效果物理检验中的应用

唐仁茂 向玉春 叶建元 袁正腾 陈英英 刘 剑

(湖北省人工影响天气办公室,武汉 430074)

提 要: 针对2007年湖北省在鄂东地区组织的4次外场试验作业,应用对流云人工增雨雷达效果分析软件选择对比云的方法,对催化目标云和对比云的多普勒天气雷达参数的变化特征进行了对比分析,并应用X波段双偏振雷达资料、FY2C卫星资料、闪电定位仪、加密雨量站等资料,对催化效果进行了初步分析。结果显示,催化后,目标云发生了比较明显的变化,回波强度、强回波面积、回波顶高、液态含水量、强回波高度等催化后均增大,约半小时内都能达到最强;而对比云增大率比目标云小,或者没有增大,目标云生命期对比云长。双偏振因子线性退极化比极小值变小,极小值区域面积变大;较大零延迟相关系数的面积也有所增大。FY2C卫星反演云参数不能有效地检验强对流云的催化效果,而对于层状云,云顶高度上升,云顶温度降低,过冷层厚度增大,有效粒子半径维持大粒子水平,云顶黑体亮温下降。闪电频数在催化后也有所增多,主要发生在催化后约半小时内。强回波中心对应的分钟雨强在催化后半小时内达到最高,降雨主要集中在从约第10分钟开始的20分钟内,与对比云相比,目标云降水时间长,降水强度大。

关键词: 人工增雨 多普勒天气雷达 闪电定位 自动雨量站

Application of Data Observed by Several Instruments in Effective Verification of Artificial Precipitation Enhancement

Tang Renmao Xiang Yuchun Ye Jianyuan Yuan Zhengteng Chen Yingying Liu Jian

(Hubei Provincial Weather Modification Office, Wuhan 430074)

Abstract: By using the data observed by Doppler weather radar, dual-linear polarization and entire-phase-parameter weather radar (on 3 cm wave-band), lightning location net and precipitation observation stations, the effect of 4 seeding experiments in eastern Hubei in 2007 are analyzed. The results show that there are increasing changes of the Doppler echo

characteristics of the target cloud in short time after seeding, including the intensity and area of strong echoes, echo tops, the value and the area of larger VIL, these factors reach the maximum in 25 min. Compared with the contrast cloud, the enlargement rate of seeded cloud is large. The FY2C data cannot reflect the seeding effect on convective cloud, but on stratus cloud, the cloud-top height rises while the cloud top temperature reduces, super-cooled cloud thickness increases, the effective particle radius maintains the big granule level and the cloud top brightness temperature drops. The dual-polarization factors including Ldr and ρ_{hv} (area of large value), the frequency (maximum appearing at 18th minute) and intensity of lightning all vary. Main rainfall period is centralized in half an hour from the 10th minute, and the rainfall intensity and duration of seeded cloud are more than those of contrast cloud.

Key Words: artificial precipitation enhancement Doppler weather radar lightning location automatic rainfall observing station

引 言

人工增雨催化效果的评估是世界性的科学难题。国外人工增雨作业效果评估从依赖统计检验,强调随机化试验重新转向注重经验证据、正确设计作业方案、探索物理因子同统计检验结合为一体的试验研究和业务性作业。我国增雨效果评估实践中,主要采用统计方法,通过催化云和不催化云的对比,以及催化时段催化影响区域和不催化影响区域的对比,得出人工增雨作业总体平均效果^[1]。随机试验虽能提供科学可靠的统计检验资料,但研究周期长,且其要求放弃一半的作业机会,国内在防灾应急作业中一般不采用。结合业务作业服务工作,国内学者针对人工增雨的效果检验做了许多工作,也取得了一些研究成果^[2-5]。尤其是近些年,随着卫星气象学、雷达气象学及以各种高新探测设备的不断发展,效果评估的物理检验发展很快,这在一定程度上弥补了统计检验方法的不足。如青海、河北等北方省份开始应用机载探测系统^[6-8]用于观测层状云催化前后过冷水、冰晶、雨滴等云中物理量变化,为效果检验提供物理证据。气象卫星资料也开始在人工增雨效果评估中得到应用^[9]。而在南方省份针对对流云的催化作业,主要开

展应用新一代天气雷达进行效果检验的研究与实践^[10-11]。

本文针对 2007 年湖北省在鄂东地区组织的 4 次外场试验作业,应用对流云人工增雨雷达效果分析软件选择对比云的方法,对催化目标云和对比云的多普勒天气雷达参数的变化特征进行了对比分析,并应用 FY-2C 卫星资料、X 波段双偏振雷达资料、闪电定位仪、加密雨量站等资料,对催化效果进行了初步分析。

1 资料与说明

对 2007 年在湖北省东部地区组织的人工增雨效果检验外场试验选取了 4 次试验个例进行了分析,包括三次对流云催化和一次层状云催化,见表 1。分析所用的资料包括武汉雷达站 S 波段多普勒雷达 6min 一次的体扫资料及二次产品,国家气象中心下发的每 30min 一次的卫星反演云参数产品,中国气象局武汉暴雨研究所黄石雷达站 X 波段双偏振多普勒雷达体扫资料及 RHI 资料,湖北省闪电定位监测网闪电资料,试验区内自动雨量站网分钟雨量资料。9 月 14 日的层状云试验,仅应用卫星资料进行分析。仅 8

月31日的试验作业有双偏振雷达资料。

表1 催化试验情况

编号	试验日期	作业时间	作业云型	作业工具	作业量/发	作业地点	催化后1小时雨量/mm
1	8月3日	11:58	对流云	高炮	60	通城	13.7
2	8月3日	14:03	对流云	火箭	3	阳新	7.4
3	8月31日	15:49	对流云	火箭	3	阳新	10
4	9月14日	09:55	层状云	火箭	3	鄂州	2

2 雷达资料分析

2.1 自动选择对比云

应用S波段多普勒雷达二次产品,在作

业时存在的所有对流单体中,通过比较它们与目标云的生成时间和距离,以及从其初始生成到作业时的回波参量及其变化特征,自动找出对比云,最后给出在整个生命期内目标云的回波参量随时间的变化情况,以及目标云和对比云回波参量在同一时刻和同一发展时期的比较结果。依据此方法,研制对流云人工增雨雷达效果分析软件。图1为应用此软件分析的3次对流云作业过程的目标云和对比云雷达回波参数(最大回波强度、回波顶高、垂直积分液态水含量)演变,可以看出,目标云和对比云变化规律比较接近。

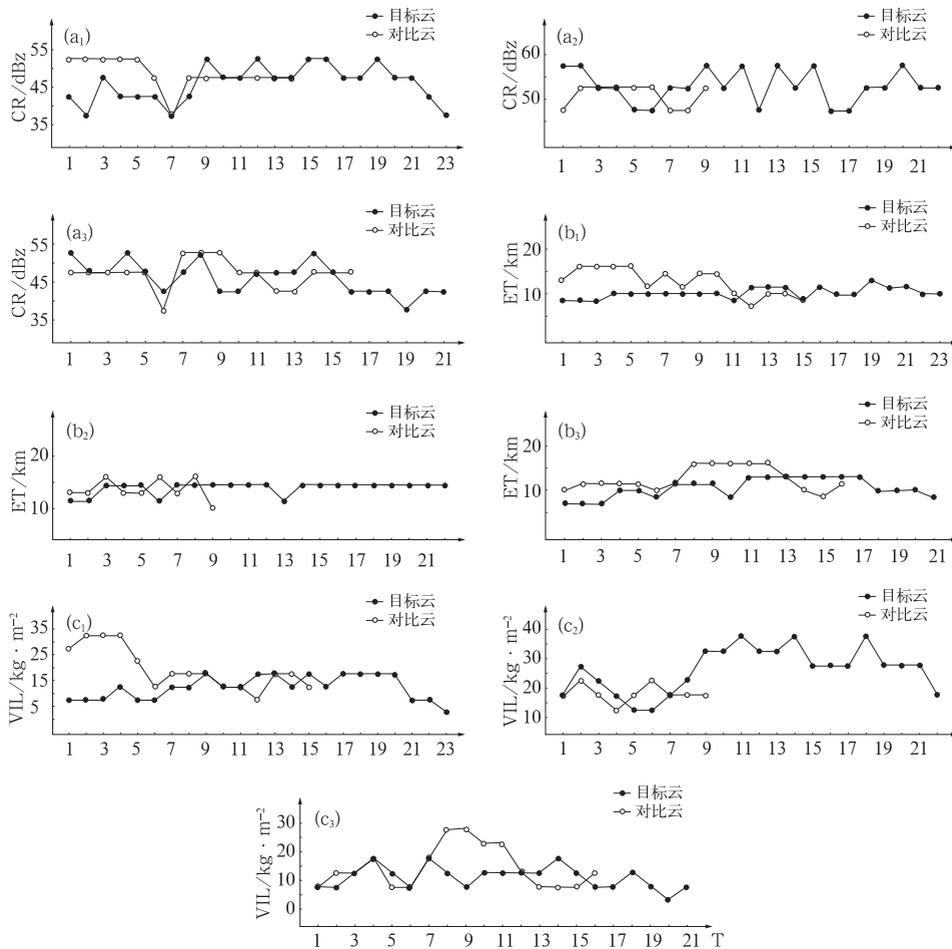


图1 3次对流作业过程目标云和对比云雷达回波参数演变
(a_i)、(b_i)、(c_i)分别为第*i*次作业过程的回波最大强度(CR)、回波顶高(ET)、
液态含水量(VIL)的回波参数演变图(图中横坐标均为时间点,每两个点之间间隔6min)

2.2 目标云回波参数变化特征

表 2 为目标云与应用上述对流云效果分析软件选择的对比云的回波参数变化表,回波参数数据分析基于多普勒雷达的风暴属性产品。分析 3 次试验目标云回波参数变化特征发现,催化后,回波强度在 9~13min 内达到最大,增大了 5~7dBz,增大率为 9%~

13%,强回波面积在 27min 内达到最大,增大率在 30%~110%之间;回波顶高 15min 内达到最高,最大增高 4km,增大率在 32%~40%之间;液态水含量在 9~25min 内达到最大,最大增大了 $21\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$,增大率在 40%~117%之间。上述统计的四个特征量在催化后约 27min 内都能达到最强。

表 2 目标云、对比云回波参数变化

作业 序号	分析 对象	强度			>45dBz 回波面积		回波顶高			液态水含量		
		时间 /min	增大值 /dBz	增大率 /%	时间 /min	增大率 /%	时间 /min	增大值 /km	增大率 /%	时间 /min	增大值 /kg·m ⁻²	增大率 /%
1	目标云	9	5	9	21	30	9	3	33	15	12	52
	对比云	3	2	4	6	16	15	1.5	12		0	
2	目标云	13	7	13	13	33	7	4	32	25	21	117
	对比云	13	5	11	13	18	7	3.5	28		减小	
3	目标云	9	5	11	27	110	15	3.7	51	9	5	40
	对比云	9	2	4		减小		减小		21	2.5	25

注:表中“时间”表示催化后各参数达到最强所经历的时间,单位为 min。对于对比云的时间,则是指与目标云催化时间同一发展阶段之后达到最强所经历的时间。表中“增大率”为增大值与催化时刻参数值的比值百分数。

三次试验作业目标云特征在催化作业时有一定的相似性,可以进行统计平均分析。图 2(见彩页)中蓝色图柱表示目标云的各回波参数的统计平均值,图中数据点为用雷达每 6min 一次体扫数据反演的二次产品数据,如果恰好是所取的时间上的,数据可直接获得,如果在两个体扫之间则用线性内插得到该数据。由于其中一次催化前只有 2 个数据点,所以只统计作业前 2 个时间点的数据,第 3 个数据点为催化时的回波参数。可以看出,催化前回波强度增加了 3dBz,催化后,回波强度平均值随时间先是快速增大,在 12min 左右达最大,增加了 5dBz,之后又缓慢减小;回波顶高在催化前呈逐渐增高的趋势,12min 内增高了 1.5km,催化后 12min 增高 1.8km,最大值维持 6min 后开始缓慢下降;液态水含量在催化前先减小后增加,变化幅度较小,而催化后迅速上升,到第 24min 达到最大,增加了 $11\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$,之后 6min 内迅速减小。说明作业云体催化后变化比较明显,催化有一定的效果。

2.3 目标云、对比云回波参数变化比较

分析表 2 发现,催化(对于对比云,是指与目标云催化时间同一发展阶段)后,目标云的各回波参量增大率均对比云要大,其中,对比云 2 液态水含量和对比云 3 的强回波面积和回波顶高是迅速减小的。需要指出的是,试验 1 中催化云的最大强度和强回波面积达到最大值的时间对比云要长,但是增大率要大很多,还是能说明催化产生了正效果。统计对比 3 次目标云和对比云发现,目标云回波强度平均约大 5%,强回波面积(将减小值算为 0,下同)平均大 46%,回波顶高平均大 12%,液态水含量平均大 61%,单体生命期平均对比云长 44min。从图 2(见彩页)可看出,对比云回波强度和回波顶高在催化前与目标云相似,有小幅上升,催化后也有小幅上升,幅度比目标云要小;液态水含量催化后没有增大的过程,而是迅速减小。说明人工催化取得较好的效果。

2.4 双偏振因子变化特征

试验应用了武汉暴雨研究所新建设的 X 波段双线偏振全相参多普勒雷达。对 8 月 31 日试验 3 的双偏振雷达资料进行分析,图 3(见彩页)为各时间点的线性退极化比(L_{DR}),线性退极化比 L_{DR} 定义为发射水平脉冲时接收到的垂直回波功率与水平回波功率的比值,其主要与水凝物形状、不规则程度、热力学相态、介电常数、在偏振平面的倾斜角以及水凝物空间取向等有关。可以看出,15:49 作业时目标云(据雷达站约 37km)的 L_{DR} 最小值约为 -25dB;到 15:54,最小 L_{DR} 约为 -31dB,并且极小值区域的面积变大;到 16:12,最小 L_{DR} 继续变小约为 -34dB,极小值区域的面积继续变大;随后 L_{DR} 低值区的面积开始减小,极小值变化不大;16:48 开始, L_{DR} 低值区的面积开始减小,极小值变大。即催化后极小值区域面积变大,在 23min 达到最低,持续一段时间后,极小值开始变大,面积开始减小,说明作业后降水粒子直径变大。另一个双偏振因子零延迟交叉信号相关系数反映水平、垂直偏振波的后向散射特性的相关性,粒子的形状、空间取向以及降水粒子的数量是影响其值的主要原因。催化后,较大零延迟相关系数(图略)的面积也有所增大,相关系数值均在 0.97 以上,说明是单一相态的降水粒子,其值变化不明显,但是较大值面积在作业后也先增大后减小,说明降水粒子数量有所增多。

3 卫星反演资料分析

应用国家气象中心下发的卫星反演云参数产品:云顶黑体亮温、云顶温度、云顶高度、过冷层厚度和云粒子有效半径对 4 次试验进行检验,发现前 3 次作业均为较强对流云,对于此类云体,因受到反演方法的限制,无法准确反应真实云参数值,只能体现它们的最大阈值。如 8 月 3 日阳新作业,发现作业前后四个

时次云顶黑体亮温一致维持在较低的水平(-50℃左右),说明作业选择的对象是发展很旺盛的对流云。相应的云顶温度图像显示一直在 -30℃ 以下,云顶高度在 9km 以上。作业点附近大范围区域都处于旺盛发展的云体中。有效粒子半径产品显示有大量的大粒子,经检验发现,由于云顶过高,云顶出现冰晶,冰晶的实际大小已超出反演的阈值,因此,作业前后,粒子一致处于较大水平,无明显变化。过冷层一直处于较厚的水平,在 5km 以上,说明过冷水含量十分丰富。另外两次的作业情况都与之类似,都是针对于发展十分旺盛的强对流云。故对于强对流云,卫星反演云参数产品不能有效地检验催化效果。

而对于 9 月 14 日鄂州作业,作业对象为发展稳定的层状云,云顶温度处于 -25~-20℃,云顶高度在 8~9km,过冷层厚度在 3.5~4.5km,有效粒子半径在 27~30 μm ,因此可以考虑用卫星反演产品检验此次催化作业的效果。经检验发现,作业后较之作业前,云顶高度上升,由 8.25km 上升至 8.65km,云顶温度降低,由 -21.7752℃ 下降至 -24.094℃,过冷层厚度增大,由 3.757km 增加至 4.157km,有效粒子半径维持大粒子水平,在 27 μm 左右(研究显示,有效粒子半径达到 14 μm 是产生明显降水的阈值),云顶黑体亮温也由 -23.028℃ 下降至 -25.101℃,在一定程度上说明,此次人工影响天气作业使得作业区的云系得到了进一步发展,产生了比较明显的正效果。

4 闪电定位资料分析

已有研究^[12]表明,地闪与对流性天气中的降水有较好的相关性。因此,应用闪电定位网监测资料也可以对催化效果进行分析。分析催化后 1 小时内目标云周围 400km² 范围内闪电定位数据有关数据(表略),可以看出,催化后 1 小时内 3 次试验除试验 3 有 2 次正闪外,其他均是负闪。3 次试验的分钟最大频数分别出现在催化后第 26、第 18、第

18min。对3次试验的分钟闪电频数进行平均,分钟闪电最大频数出现2个峰值(图略),分别出现在第5min和第20min,均为9.7次,催化后28min内分钟闪电频次均较高。说明催化后分钟频数变化也有一定规律性。

5 自动站雨量分析

自动雨量站可提供每分钟的降水量,不仅可以检验上述其他探测资料对人工增雨催化的效果分析,还可以直接检验催化效果。分析3次试验的雨量值,小时雨量分别为13.7mm、7.4mm、10mm,最大分钟雨强分别出现在第27、第18和第21min,分别为1.9、0.5、1.2mm/min。3次试验平均雨强第25min最大,为0.8mm/min,主要降水时段在第11min到第28min之间,雨强基本上都在0.3mm/min以上。

从试验1的目标云与对比云强回波中心对应的雨量站雨强分布可以看出(图略),对比云小时降雨量为3.3mm,在前7min内对比云雨强基本上大于目标云,此后几分钟内两块云降雨强度相当,而从第18min开始,目标云雨强迅速增大,而对比云在几分钟内即减小至零。

6 结 语

(1) 催化后,目标云体回波强度、强回波面积、回波顶高、液态含水量、强回波高度等均增大,约半小时内都能达到最强,而对比云增大率比目标云小,或者没有增大,说明催化促进了强回波的发展,双偏振因子线性退极化比极小值变小(在第23min达到最小且持续一段时间),极小值区域面积变大,说明作业后降水粒子变大,较大零延迟相关系数的面积也有所增大,说明降水粒子数量增多;FY2C卫星反演云参数产品显示催化后较之作业前云顶高度上升,云顶温度降低,过冷层厚度增大,有效粒子半径维持大粒子水平,云

顶黑体亮温下降;目标云体闪电频数在催化后也有所增多。所有这些变化均主要发生在催化后约半小时内。

(2) 强回波中心对应的雨量站分钟雨强在催化后半小时内达到最高,降雨主要集中在从约第10min开始的20min内,分钟最大雨强与强回波面积和线性退极化比对应关系最好,三者出现最大值的时间接近,而总雨量跟雷达回波参数及面积、双偏振因子、闪电定位等综合信息相对应,而不是与某一个测量参数的极值相对应。与对比云相比,目标云降水时间长,降水强度大。

(3) 本文可为人工增雨效果的分析提供初步的物理检验证据,随着卫星资料、双偏振雷达资料不断深入的应用,以及新的探测资料的引入如地基微波辐射计等,将在今后的外场试验中进一步进行人工催化物理效果的验证。

参考文献

- [1] 曾光平,郑行照,方仕珍,等.非随机化人工降雨试验效果评价方法研究[J].大气科学,1994,18(2):233-242.
- [2] 蒋年冲,吴林林,曾光平.抗旱型火箭人工增雨效果检验方法初步研究[J].气象,2006,32(8):54-58.
- [3] 白卡娃.我国南方夏季人工增雨效果评估[J].气象,2002,28(增刊):38-41.
- [4] 蒋年冲,申宜运.安徽省人工增雨效果评价研究[J].气象,2002,28(增刊):48-49.
- [5] 文继芬.一种检验对流云人工增雨效果的方法[J].气象,2002,28(增刊):43-44.
- [6] 王广河,姚展予.人工增雨综合技术研究[J].应用气象学报,2003,14(增刊):1-10.
- [7] 杨文霞,牛生杰,魏俊国,等.河北省层状云降水系统微物理结构的飞机观测研究[J].高原气象,2005,24(1):84-90.
- [8] 王黎俊,刘彩红,孙安平,等.青海省人工增雨效果统计分析系统的设计与开发[J].青海气象,2006(2):62-65.
- [9] 王勇,段昌辉,徐军昶,等.气象卫星资料在人工增雨效果评估中的应用[J].气象,2002,28(11):26-28.
- [10] 袁野,冯静夷,蒋年冲,等.夏季催化对流云雷达回波特征对比分析[J].气象,2008,34(1):41-47.
- [11] 刘耀宗,王治平,陈历舒.湖南单块积云高炮增雨随机化试验效果的分析[J].气象,1999,25(8):16-21.
- [12] 周筠君,郗秀书.地闪与对流性天气系统中降水关系的分析[J].气象学报,1999,57(1):103-111.

唐仁茂等：多种探测资料在人工增雨作业效果物理检验中的应用

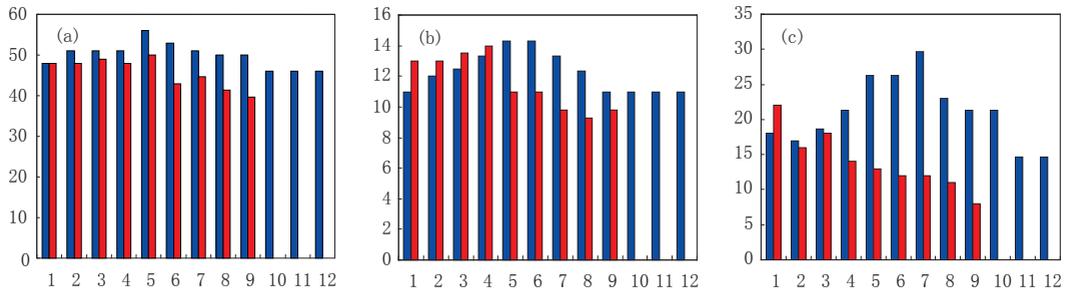


图 2 目标云和对比云回波参数变化特征

(a) 最大回波强度(单位: dBz); (b) 回波顶高(单位: km); (c) 液态水含量(单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$), 图中横坐标均为时间点, 第3个点为催化时间点, 每两个点之间间隔6min(蓝色表示目标云, 红色表示对比云)

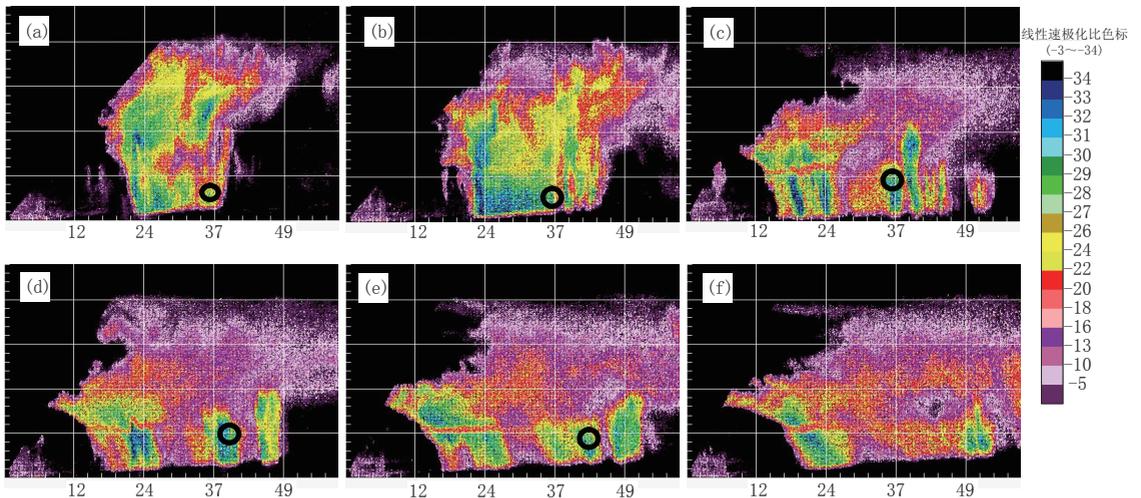


图 3 线性退极化比

(a) 15:49; (b) 15:57; (c) 16:13; (d) 16:27; (e) 16:48; (f) 16:58
横坐标为离雷达站距离, 纵坐标为高度, 单位均为km