

汪玲,刘黎平. 2015. 人工增雨催化区跟踪方法与效果评估指标研究. 气象, 41(1):84-91.

人工增雨催化区跟踪方法与效果评估指标研究^{* 1}

汪 玲^{1,2,3} 刘黎平³

1 湖南省人工影响天气办公室,长沙 410007
2 成都信息工程学院,成都 610225
3 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室,北京 100081

提 要: 如何利用新一代天气雷达作业前后回波的变化分析人工增雨效果,对提高人工影响天气的科学性有非常重要的意义。文章基于新一代天气雷达三维拼图和最大相关系数的雷达回波跟踪方法(TREC),在考虑多个作业影响时间和催化剂扩散背景下,实现对高炮和飞机播云作业中催化区的连续跟踪,并计算区域内的最大反射率、垂直积分液态含水量等回波参数。利用 2 个降水过程,选择多个跟踪区域进行连续跟踪,详细分析了回波跟踪的合理性。选择北京的一次高炮增雨作业与一次模拟飞机作业,对其催化区进行跟踪。结果表明:利用 TREC 算法,能够合理跟踪回波在空间的垂直位置与水平位置,较好地跟踪单点、多点作业时催化区域移动,实时跟踪飞机播云催化区的回波变化,从而为人工增雨的效果评估提供了一个有意义的参考。

关键词: TREC, 催化区, 连续跟踪, 效果评估
中图分类号: P481 **文献标志码:** A **doi:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2015.01.010

Algorithm and Assessment of Tracking Seeding Coverage in Artificial Precipitation Enhancement

WANG Ling^{1,2,3} LIU Liping³

1 Weather Modification Office of Hunan, Changsha 410007
2 Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225
3 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

Abstract: How to use the echo changes of new generation of weather radar before and after the operation in assess ment the result of artificial precipitation enhancement is very important for improving the scientificity of weather modification. In this paper, the method of tracking the seeding coverage based on both maximum correlation coefficients (TREC) and a new generation of weather radar three-dimensional CAPPI grid data is realized by considering multiple effective duration and the seeding coverage in artificial precipitation enhancement by antiaircraft guns and aircraft. Meanwhile, the echo parameters such as maximum reflectivity, VIL, etc. , are calculated. Besides, the paper also analyzes the rationality of echo tracking method by using two precipitation processes and continuously tracking the related areas. One artificial precipitation enhancement operation by antiaircraft guns in Beijing and one artificial precipitation enhancement simulated by aircraft are chosen to track the seeding coverage. The result indicates that using the algorithm TREC, we can track the echoes reasonably in both vertical and horizontal positions in space, and also can track well the echo change in seeding coverage during artificial precipitation enhancement operations by single or

^{*} 中国气象局重点工程项目“新一代天气雷达建设业务软件系统开发项目”、公益性行业(气象)科研专项(GYHY201106046)和国家科技支撑计划项目(2012BAC22B00)共同资助
2013 年 4 月 30 日收稿; 2014 年 9 月 15 日收修定稿
第一作者:汪玲,气象雷达信号与信息处理. Email:wangling19890115@163.com
通信作者:刘黎平,主要从事大气物理、大气遥感、雷达气象研究. Email:llpliu@cma.gov.cn

several anti-aircraft guns and aircraft. So, the work provides a meaningful scientific reference for the assessment of artificial precipitation enhancement.

Key words: TREC, the seeding coverage, successive tracking, result assessment

引 言

世界上的人工降水已有六十多年的历史,中国也开展了五十多年。几十年来,关于云和降水物理研究,以及人工影响天气研究有了很大的发展(雷恒池等,2008),而关于人工降雨效果的评估也越来越受到重视。人工增雨效果评估方法有很多,主要分为物理检验和统计检验,其中,物理检验为评估人工影响天气效果提供了物理依据,它所提供的信息对人工影响天气的科学概念验证、人工影响天气技术方法和作业方法的改进有重要价值(中国气象局科技教育司,2000;刘晴,2013;唐仁茂等,2010)。关于物理检验,前人做了很多研究:唐仁茂等(2009)对催化目标云和对比云的参数变化特性进行了对比分析;余芳等(2012)统计每次作业云系作业前后雷达回波强度、回波面积等因子的变化;蒋年冲等(2008)针对催化云和对比云选择催化前和催化后部分雷达特征量分析。以上这些主要选择目标云和对比云的回波参数进行对比分析,并没有涉及到催化区的跟踪与参数统计。

基于陈超等(2012)工作,本文试图开展有关人工增雨催化区的跟踪方法与效果评估指标研究,基于新一代天气雷达三维拼图和 TREC。将催化区作为跟踪对象,并统计催化区内回波参数,该算法相比仅仅统计催化云体内参数变化更为直观,更有说服力。陈超等(2012)的研究只考虑了火箭增雨的情况,且不能在不同时刻跟踪多个区域。本研究进一步考虑了高炮增雨作业和飞机增雨作业内容,高炮作业时,实现了同时刻跟踪多个区域,不同时刻跟踪不同区域;飞机作业时,实现了实时跟踪播云催化区。

1 资料来源与数据输入

采用的雷达数据为中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室开发的新一代雷达三维组网及产品处理系统输出的回波强度三维格点数据。组网数据为不同高度的 CAPPI 资料,经纬度分辨率为 $0.01^\circ \times 0.01^\circ$ 。组网数据文件时间间隔为 6 min。

为了实际模拟人工影响天气作业情况,该方法还需要输入不同高炮作业点的位置和作业时间,增雨飞机的飞行航线和作业时间。

2 催化区跟踪方法

本文算法基于 TREC(马建立等,2011;王改利等,2006;2005),将催化区作为跟踪对象,跟踪催化区的移动,并统计催化区内回波参数。

与作业效果分析有重要关系的两个参数是催化的影响时间和范围,高炮作业中,王以琳等(2010)以催化剂不同的浓度阈值模拟分析了湍流扩散系数、方位角、仰角、风速对人工增雨炮弹催化区的影响,发现高炮在最长作业影响时间 1901.8 s(约 30 min)内达到最大扩散半径为 289.6 m;余兴等(2002)针对个例对飞机人工增雨催化区进行了研究,发现催化剂扩散速度 1 h 平均为 $0.82 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,在最长作业影响时间 100 min 达到最大扩散半径约为 5 km($0.82 \times 100 \times 60$);而在飞机作业中,催化剂向两周扩散距离一般为 3~6 km。研究表明无论是高炮作业还是飞机作业,催化效果的落区,存在一个“时间可达范围”最大值。因此,将催化区作以下假设:在高炮作业时将作业范围看成催化区;在飞机作业时,催化区为与飞机飞行播撒路径平行的播云带,扩散半径取最大值 6 km(中国气象局科技教育司,2000)。

2.1 高炮作业催化区跟踪方法

实际的作业中根据云系情况,进行不同时次的作业,高炮作业分为单点作业,多点同时、不同时作业。由上文,跟踪时长,高炮约 0.5 h 左右,单点开始作业时刻为开始跟踪时间。

2.1.1 单点作业催化区域的跟踪

定位催化区:高炮可以沿着 $0^\circ \sim 360^\circ$ 方向作业,所以将高炮催化区取成圆形。对于高炮人工增雨作业,由上文可知,高炮在最长作业影响时间 1901.8 s 内达到最大扩散半径为 289.6 m,将作业区定为催化区。高炮作业时水平射程一般为 7~8 km,每门高炮影响距离为 2 km,取 10 km 为单点作业催化区半径。

t_0 时刻,根据圆形催化区信息:中心坐标 $(x_0,$

y_0)、半径 r_0 确定圆形跟踪区域的位置。 x_0 为纬度, y_0 为经度, r_0 单位为 km。假设任一点 a , 如果点 a 到圆心的距离小于等于半径, 则这点为圆形区域内的点。

计算催化区移动速度, 找到下一时刻的催化区: 采用相邻时刻回波, 经过 TREC 算法, 可以得到 TREC 矢量信息, TREC 矢量对应分为 u 和 v 分量。不同位置的回波移动情况不一致, 取跟踪区域内的 u 、 v 矢量平均值。在 r_0 范围内, 对催化区域内对应的 u 、 v 分量分别取平均值 $meanV$, $meanU$ 。将 u 、 v 分量的平均值合成求得跟踪区域合成速度 C 。

跟踪时间间隔 Δt 取 6 min, 下一时刻 t_1 催化区的中心坐标 (x_1, y_1) , 中心坐标的求解公式如下:

$$x_1 = x_0 + meanV \times \Delta t \quad (1)$$

$$y_1 = y_0 + meanU \times \Delta t \quad (2)$$

根据 t_1 时刻圆形催化区信息找到 t_1 时刻的圆形跟踪区域。如此循环。

2.1.2 多点作业催化区域的跟踪实现

将多点作业看成多个单点作业, 它的催化区对应为多个半径为 10 km 的单点催化区。如果炮点在作业, 则将该炮点对应的单点催化区圈入跟踪范畴, 对其进行连续跟踪。

加入两组参数来控制不同炮点的跟踪时段: 记录跟踪起始时刻参数 m (m 取第 0, 1, 2, ..., 时刻), 和记录跟踪时长的参数 n 。当到达跟踪起始时刻 m 时, 开始跟踪, 到达设定的跟踪时长时, 停止跟踪。

2.2 飞机作业催化区跟踪方法

飞机作业时, 跟踪时长约 2 h 左右, 增雨飞机经过每个位置的时刻为该位置开始跟踪时间。

飞机增雨作业时间长, 催化剂沿着飞行航线实时向两周扩散, 对飞机增雨催化区实时跟踪。根据飞行航线和作业时间, 将飞机催化区分段跟踪, 将 6 min 内增雨飞机飞过的航线作为一段, 每隔 6 min 对“段”跟踪一次。将每段催化区每隔 0.01° 经纬度取一个点, 每个点对应一个半径为 6 km 圆形催化区域, 这些区域构成“段”。

飞机作业催化区跟踪方法实质就是: 采用高炮催化区跟踪方法, 在连续的不同时刻, 分别开始跟踪连续的不同点。飞机增雨作业时, 催化剂向两周扩散形成具有一定扩散半径的播云带, 随着时间的增加, 飞机航线上催化剂扩散, 催化有效区域增加, 催化剂达到最长作业影响时间后, 催化剂失效, 催化有效区

域逐渐消失。

3 参数统计

一般视为作业有效的增雨作业, 作业后, 云体发展, 强度增强, 降水增加。而强回波面积变化体现云体发展消散过程, 最大反射率增加体现云发展程度, 垂直积分液态含水量反映的是降水云体内液态水总量的分布情况, 跟踪范围内雨强对实时降雨统计, 所以, 本文选择如下参数: 强回波面积 (A), 最大反射率 (CR), 垂直积分液态含水量 (VIL), 跟踪范围内雨强 (I), 分析其随时间变化, 从而为人工影响天气效果评估提供物理量。为了更好反映参数的变化情况, 强回波面积为跟踪区域内反射率 > 35 dBz 的面积; 最大反射率计算的是跟踪区域内最大值; 垂直液态含水量取跟踪区域内的平均值; 跟踪范围内雨强取跟踪范围内平均雨强。

垂直积分液态含水量反映的是降水云体内某一底面积上垂直柱体内液态水总量的分布情况, 假设滴谱分布为雷达定量测量降水中最常用的滴谱分布 M-P (Marshall-Palmer) 分布, 在计算 VIL 时, 将反射率 > 55 dBz 的反射率取为 55 dBz, 因为冰雹的高反射率因子经常导致 VIL 的异常 (王伏村等, 2008)。 M 的垂直积分得到 VIL , M 的单位为 $g \cdot m^{-3}$, Z 为反射率因子, 单位为 $mm^6 \cdot m^{-3}$ 。

$$M = 3.44 \times 10^{-3} Z^{\frac{1}{4}} \quad (3)$$

每隔一个时刻对单个催化区内所选定的 4 个回波参数分别进行实时统计, 参数统计时段为催化区跟踪时段如: 高炮多点作业时, 对应多个催化区参数统计, 参数统计开始时刻为单点开始作业时刻, 参数统计时长为 30 min。回波参数均由反射率基数据演算而得, 在做基数据处理时, 反射率的值过小或者过大认为是无效, 将反射率 < 10 dBz 和 > 80 dBz 的值置为无效。

4 跟踪位置移动合理性分析

由上文知, 飞机作业催化区跟踪方法基于高炮作业催化区跟踪方法, 因此, 只对高炮催化区跟踪方法做验证。本算法中, 催化区半径、跟踪时长为变量, 值可设定。将催化区半径范围设定为 5 ~ 15 km, 跟踪时长设定为 120 min。

从垂直、水平方向上验证移动位置是否合理。

在垂直方向,同一位置回波将不同高度 CAPPI 资料作为跟踪对象时,相同时刻移动速度应当一致;在水平方向上,跟踪区域移动时,单个区域位置相对整片云位置不变,多个区域移动相对位置不变。所以,从以下两个方面验证算法。第一,同一位置回波将不同高度 CAPPI 资料作为跟踪对象时,如果在相同时刻速度一致,则证明算法合理;第二,跟踪多个区域,观察单个区域相对整片云位置是否不变,多个区域移动相对位置是否不变,并且分析各区域的移动速度,同一系统中,各区域移动速度应在有限范围内波动。

4.1 个例 1

2011 年 7 月 29 日北京局部出现强降水,取北京、天津和承德 3 个雷达站 00:00—02:00 的 CAPPI 拼图资料,开始跟踪时刻 29 日 00:00 时刻设为 0 时刻,分别选择 4、4.5 和 5 km 高度层的 CAPPI 作为跟踪对象,为保证在跟踪期间该点一直有回波,选定区域中心任意一个位置 A(40.4°N、116.37°E)的回波,对其移动速度进行跟踪统计,取该点周围 5 km 范围内的速度平均值为该点速度。

图 1 为位置 A 回波在选择 4、4.5 和 5 km 高度

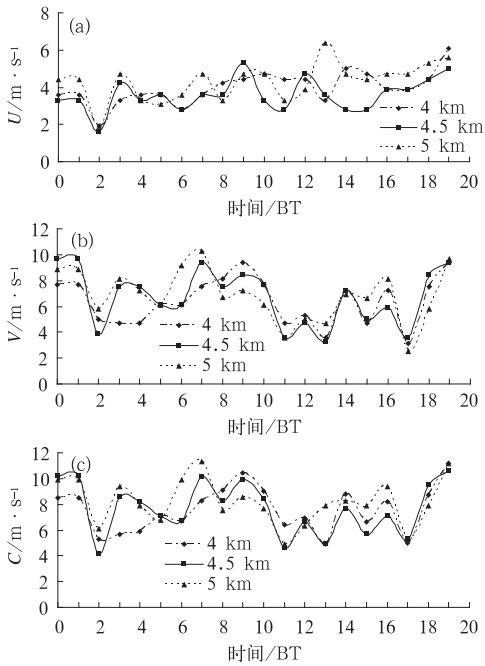


图 1 各高度层的 CAPPI 资料作为跟踪对象时位置 A 的速度统计

Fig. 1 Statistics of the speed of A position when each level of the CAPPI data chosen as tracking object

层的 CAPPI 作为跟踪对象时速度随时间变化表,表中分别统计了不同时刻、不同高度层的该位置的速度值:包括 TREC 矢量分量 u 、 v 方向上的速度 U 、 V ,以及该点合成速度 C 。图 1(a)中速度 U 在 $2\sim6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 范围内变化,在相同时刻的不同高度, A 位置回波的移动速度最大相差约 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;图 1b 中速度 V 在 $4\sim10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 范围内变化,在相同时刻的不同高度, A 位置回波的移动速度相差最大约 $3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;图 1c 中速度 C 在 $4\sim10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 范围内变化,在相同时刻的不同高度, A 位置回波不同高度的移动速度相差最大约 $3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;由上可得,同一位置回波将不同高度 CAPPI 资料作为跟踪对象时,相同时刻移动速度 U 、 V ,以及该点合成速度 C 基本一致,从第一方面证明了算法正确合理。

4.2 个例 2

2009 年 7 月 23—24 日我国南方出现一次大范围降水,西至武汉东至东南沿海地区。取武汉、南昌、黄山、杭州、宁波等 10 个雷达站的 23 日 23:00 至 24 日 00:00, 24 日 00:00—01:00 的 CAPPI 拼图资料,选择 3 个区域跟踪:圆形跟踪区域 1、圆形跟踪区域 2 及圆形跟踪区域 3。选择回波较好(回波强,回波面积大)的 4.5 km 高度层 CAPPI 作为跟踪对象。

为了跟踪不同时刻不同跟踪区域的情况,设置了彩色时间轴(图 2),其开始跟踪时刻 23 日 23:00 为 0 时刻,一个时刻设为 12 min。每个时刻对应不同颜色如:深蓝色对应第三时刻,对应时间为 23 日 23:36,用不同颜色的圆圈表示不同时刻催化区域的位置,箭头表示当前时刻区域内的 TREC 矢量,它反映了回波的移动趋势(下同)。

图 2 为 3 个圆形跟踪区域在每隔 12 min 回波跟踪图,各个圆形跟踪区域在跟踪过程中,相对整个云位置基本不变,3 个圆形跟踪区域均向偏东南方向移动并保持相对位置基本不变,但是在图 2b 中,圆形跟踪区域 2 移动出现了偏差,说明随时间加,跟踪效果会逐渐变差;图 3 为圆形跟踪区域 1、2、3 的移动速度,从图中可以看出 3 个区域移动速度波动较小,在 $8\sim14\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 范围内波动,但是随着跟踪时间的增长,会出现个别明显跳跃点,误差会随着时间累积,说明区域连续跟踪效果会随着时间变差。综上,在较长时间内,单个跟踪区域相对整个云位置合理,多个不同区域在不同时刻相对位置不变,并且

分析了同一天气过程中多个区域的移动速度,这些区域的移动速度在有限范围内波动,从第二方面证明了算法正确合理。

5.1 高炮作业催化区跟踪

选取 2012 年 5 月 18 日北京一次高炮增雨作业情况,讨论了催化区的选定方案、参数统计时段的确 定方案和统计参数的选定方案。对催化区回波参数 进行统计分析,试验表明:催化区在作业后 30 min 内 A,CR,VIL 以及跟 I 均出现增加趋势,为此次高 炮作业正效果评估进一步提供了依据。

表 1 为高炮作业信息,表 2 为催化区信息。由 上文可知,催化区位置设定为圆形区域,圆心为炮点 位置,半径为 10 km。参数统计开始时刻为单点开 始作业时刻,时长为 30 min。选定 A,CR,VIL 和 I 为统计参数。

表 1 高炮作业信息

Table 1 Information of antiaircraft gun operation				
作业点 编号	作业点 名称	作业时间	作业方位	用弹量 /发
0	西樊各庄	05:37—05:39	0~360°	10
1	东辛撞 作业点	05:37—05:39	0~360°	8

表 2 催化区信息

Table 2 Information of seeding coverage			
催化区 编号	参数开始 统计时间	区域中心点位置 (纬度,经度)	区域半径 /km
区域 0	05:42	(40.12°N,116.56°E)	10
区域 1	05:42	(40.18°N,117.02°E)	10

为了跟踪不同时刻不同催化区域的情况,也设 置了彩色时间轴,其开始跟踪时刻为 0 时刻(为 05:42),一个时刻设为 6 min。

图 4 为不同时刻跟踪图,黑色圆点代表炮点位

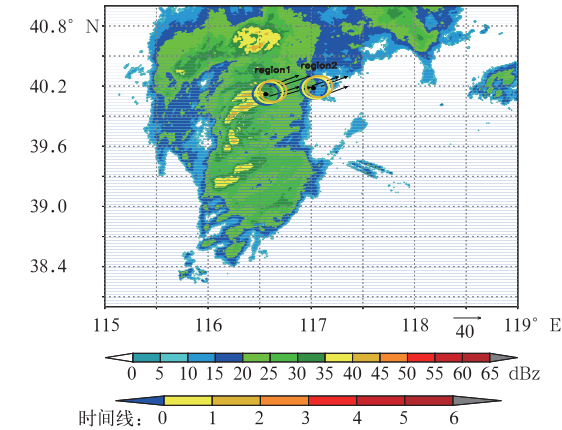


图 4 2012 年 5 月 18 日 05:54 回波跟踪
Fig. 4 Echo tracking at 05:54 BT 18 May 2012

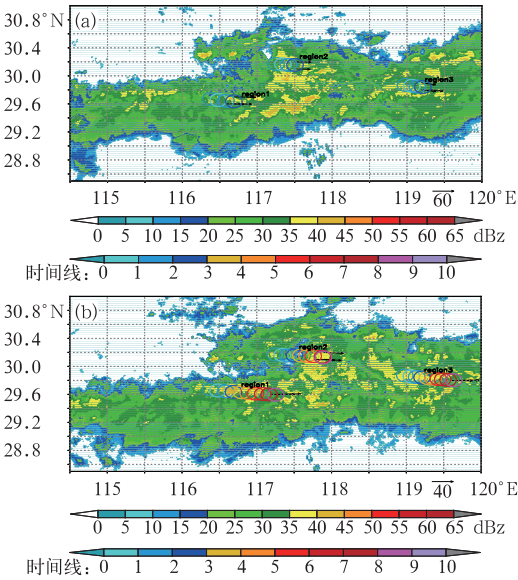


图 2 2009 年 7 月(a)23 日 23:36 和 (b)24 日 00:48 不同时刻回波跟踪 (不同颜色圈表示不同时刻跟踪 区域信息,箭头为 TREC 矢量)
Fig. 2 Echo tracking at different time at (a) 23:36 BT 23 and (b) 00:48 BT 24 July 2009 (Different color circles represent tracking area information at different time, black arrow is TREC vector)

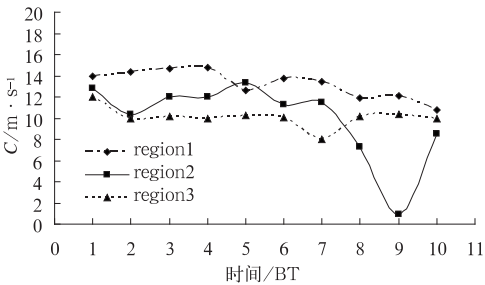


图 3 圆形跟踪区域 1、2、3 每 12 min 平均移动速度
Fig. 3 Average speed of circular track regions 1, 2, 3 every 12 minutes

5 实例分析

本文借助一个高炮增雨作业实例与一个模拟飞 机作业实例,对作业催化区进行跟踪。试验表明:利 用 TREC 算法,可以较好跟踪多点作业催化区和实 时跟踪飞机播云催化区的回波变化。

置;作业点 0、作业点 1 对应催化区域 0、区域 1,由图 4 可知,目前时刻为第二时刻,对应时间 05:54,区域 0 和 1 同时在 0 时刻开始跟踪;各催化区域偏东北方向移动,与 TREC 矢量方向一致。

图 5 为区域 0 与区域 1 的回波参量统计。从图 5a 中可以看出区域 0 与区域 1 在作业后,VIL 明显增加,区域 0 从 $0.65\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 增加到 $1.10\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$,区域 1 从 $0.25\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 增加到 $0.42\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$;图 5b

中 A 在作业后也增加,区域 0 在作业后 24 min 内 A 增加,区域 1 强回波面积虽偏小,但作业后呈现增加趋势;CR 呈现增加趋势,区域 0 在作业后最大反射率为 46 dBz,区域 1CR 明显增加,作业后半小时内 CR 值达到 30 dBz 以上;区域内平均 I 呈持续增大趋势。从图 5 可以看出,作业后 A、CR、VIL 和 I 呈现增大趋势,为此次高炮作业正效果评估提供了依据。

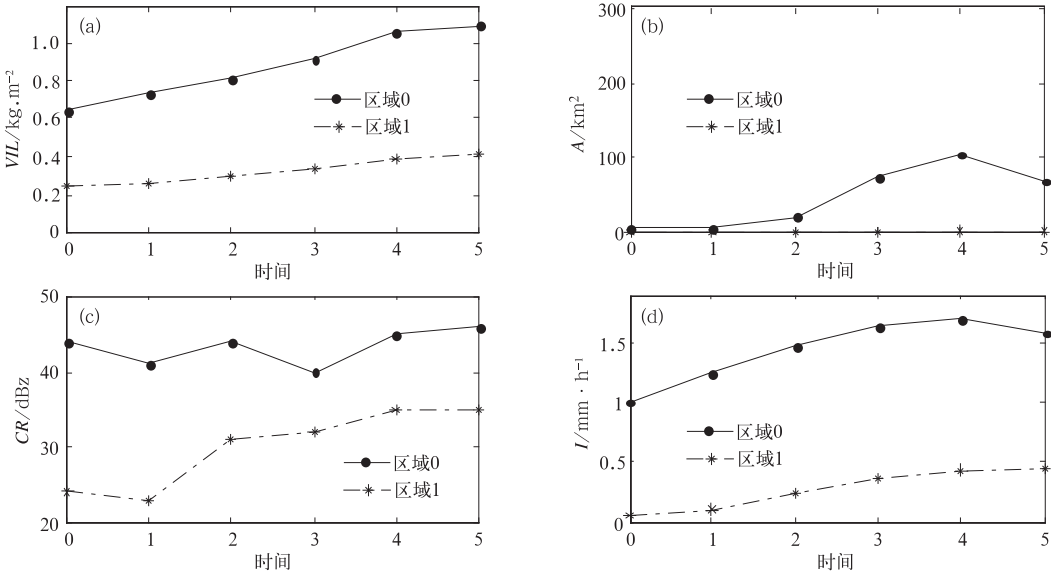


图 5 高炮作业各催化区雷达回波参数统计

Fig. 5 Statistics of radar echo parameters in (a) VIL, (b) A, (c) CR, (d) I each seeding coverage by antiaircraft guns

5.2 模拟飞机作业催化区跟踪

飞机实时催化区信息获取与校正存在一定工作量和难度,所以,文中采用模拟作业实例验证飞机作业催化区跟踪方法能否正确、实时跟踪飞机作业。

由上文,催化区半径取 6 km,跟踪时间取 2 h。2012 年 8 月 1 日北京地区出现局部强降水,选用北京、天津、承德和石家庄 4 个雷达站 05:00—08:00 时段的 CAPPI 拼图资料,选择高度层为 4.5 km。假设增雨飞机进行匀速播云作业,作业 1 h。

图 6 和图 7 为不同时刻跟踪图,增雨飞机从北到南进行直线播云作业,图中粉红色线表示飞机实时播撒路径,暗红色线勾勒出催化区域。从图可知,催化区域朝东北方向移动,与 TREC 矢量方向一致;观察整体回波移动,发现其移动方向也为东北方向。由上可得,跟踪区域移动方向、TREC 矢量指

向、回波移动趋势一致,证明了算法的合理性。

算法对增雨飞机催化区进行实时跟踪,随时间增加,飞机播云航线上催化剂扩散,催化有效区域增加(图 6),催化剂达到最长作业影响时间后,催化剂失效,催化有效区域逐渐消失(图 7),直至催化有效区域完全消失。图 6 和图 7 显示跟踪区域连续,并没有出现断层现象,证明了此方法的可行性。从理论上分析:时间上,回波的移动是连续的,跟踪间隔(6 min)内回波不可能发生大移动;空间上,回波的移动在邻近空间不可能出现大跃变,跟踪出来的区域不会发生明显的断裂。

因为增雨飞机作业时间长,随时间加,飞机播云航线上催化剂扩散,催化区域中心线并不与飞机播云路线严格平行,先播撒的区域位置会偏移,从图 6 和图 7 中可以明显看到此种情况。

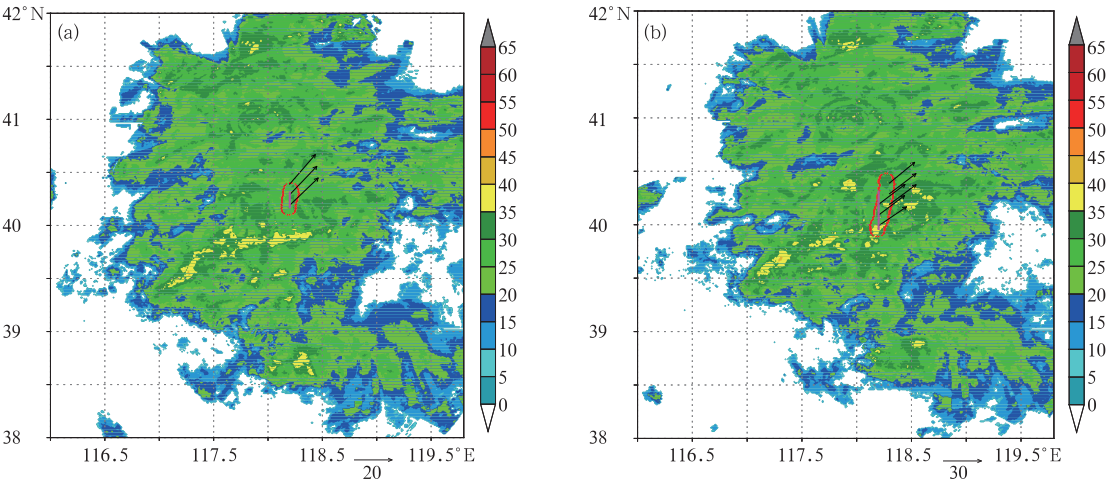


图 6 2012 年 8 月 1 日飞(a)05:12 和(b)05:36 机播云航线上催化剂扩散和回波跟踪(单位:dBz)
(暗红色区域为催化区,粉红色线为实时播云线,箭头为 TREC 矢量)

Fig. 6 The increased seeding coverage along seeding line of aircraft and echo tracking
at (a) 05:12 BT and (b) 05:36 BT 1 August 2012 (unit: dBz)

(Dark red area is the seeding coverage, pink line is for real-time seeding line and arrow for TREC vector)

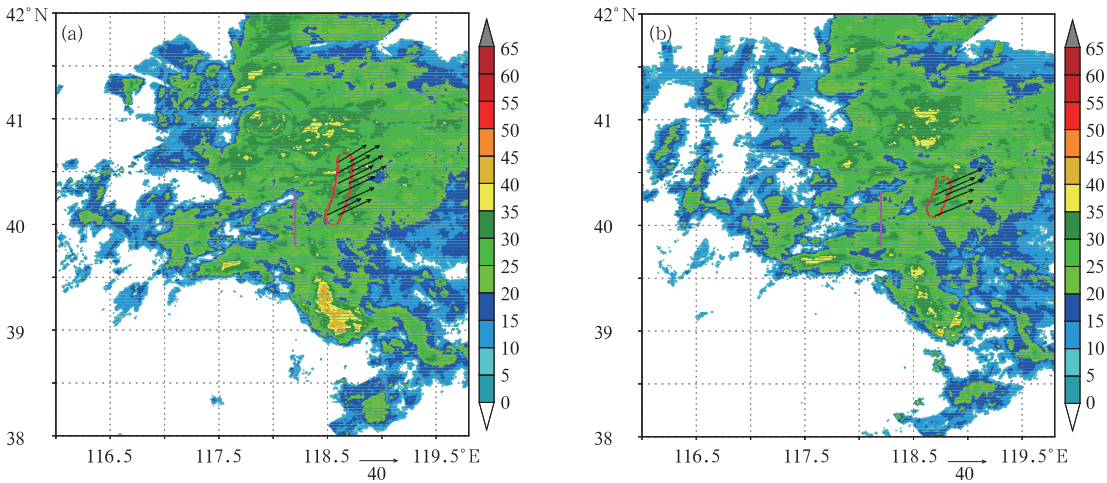


图 7 2012 年 8 月 1 日(a)07:12 和(b)07:36 机作业催化有效区域消散过程和回波跟踪
(图例同图 6)

Fig. 7 The decreased seeding coverage by aircraft operation and echo tracking
at (a) 07:12 BT and (b) 07:36 BT 1 August 2012

6 结论与讨论

本文在 TREC 算法上,初步实现了对高炮作业催化区以及飞机作业催化区的连续跟踪。选用 2 个降水过程和多个区域进行连续跟踪,从垂直、水平方向上验证移动位置合理性;选择一次北京高炮增雨作业和一次模拟飞机作业,对催化区回波进行跟踪,验证跟踪方法可行性,并对催化区内强回波面积、最

大反射率等回波参数进行了计算,得出如下结论:

- (1) 高炮作业催化区跟踪方法可较好地对单点作业、多点同时、不同时作业的催化区进行合理跟踪。
 - (2) 飞机作业催化区跟踪方法可较好地对飞机作业催化区进行实时跟踪。
 - (3) 对催化区内强回波面积、最大反射率等回波参数进行了计算,方法合理。
- 但是,催化区跟踪方法需要更多实例验证,另

外,除了统计催化区回波参数外,选择影响区域、对比区域回波参数进行统计对比分析,为今后的研究内容之一;由于催化区半径取催化时间可达范围的最大值,而实际催化区是逐渐变化的,研究催化剂扩散速度,将催化半径取为变化值为今后研究的方向之一。

致谢:在论文完成之际,谨向中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室胡志群老师表示感谢,同时感谢北京市人工影响天气办公室及马建立等同志,感谢他们在论文的写作过程中给我提供了无私的帮助。

参考文献

陈超,刘黎平,王改利,等. 2012. 人工影响天气中雷达回波跟踪方法及其应用. 气象科技,40(3):459-496.

蒋年冲,曾光平,袁野,等. 2008. 夏季对流云人工增雨效果评价方法初探. 气象科学,28(1):100-104.

雷恒池,洪延超,赵震,等. 2008. 近年来云降水物理和人工影响天气研究进展. 大气科学,32(4):967-974.

刘晴,姚展予. 2013. 飞机增雨作业物理检验方法探究及个例分析. 气

象,39(10):1359-1368.

马建立,王改利,金永利,等. 2011. TREC 算法在人工影响天气系统中的应用. 气象科技,39(2):236-239.

唐仁茂,向玉春,叶建元,等. 2009. 多种探测资料在人工增雨作业效果物理检验中的应用. 气象,35(8):70-75.

唐仁茂,袁正腾,向玉春,等. 2010. 依据雷达回波自动选取对比云进行人工增雨效果检验的方法. 气象,36(4):96-100.

王伏村,丁荣,离耀辉,等. 2008. 河西走廊中部冰雹天气的环流和多普勒雷达产品特征分析. 高原气象,27(6):1343-1348.

王改利,刘黎平. 2005. 多普勒雷达资料在暴雨临近预报中的应用. 气象,31(10):12-15.

王改利,刘黎平,阮征,等. 2006. 多普勒雷达资料在暴雨临近预报中的应用. 应用气象学报,17(4):388-394.

王以琳,余康元,姚展予,等. 2010. 高炮人工增雨催化区的探讨. 气候与环境研究,15(1):45-52.

余芳,刘东升,张世林,等. 2012. 催化效应的雷达回波变化统计特征. 高原山地气象研究,32(2):87-90.

余兴,王晓玲,戴进,等. 2002. 过冷层状云中飞机播云有效区域的模拟研究. 气象学报,60(2):205-213.

中国气象局科技教育司. 2000. 飞机人工增雨(雪)作业业务规范(试行). 北京:气象出版社,58-60.