

2021-09-06 T08:00

人工增雨效果物理检验方法的建立及应用

沙修竹^{1,2} 褚荣浩³ 黄毅梅^{1,2}

1 中国气象局 河南省农业气象保障与应用技术重点实验室, 郑州 450000

2 河南省人工影响天气中心, 郑州 450000

3 安徽省公共气象服务中心, 合肥 230000

摘 要 本文针对基于多源探测数据的人工增雨效果物理检验, 建立对比区选取的相似性度量系数 *APC*, 建立人工增雨效果物理检验的无量纲化 *PIDI* 指数方法。结果表明: (1) 人工增雨效果物理检验 *PIDI* 指数方法, 能够实现以相似性度量系数 *APC* 最大程度削减增雨作业催化云体及降水的自然变率影响, 以无量纲化处理方法综合多种具有量纲差异的云物理探测参数, 最终以一个百分数变化率的数值形式综合度量多种云物理参数的整体变化趋势及程度。(2) 应用 *PIDI* 指数方法对 2014~2019 年 24 架次飞机增雨作业进行增雨效果物理检验。人工增雨催化引起作业后 3h 的云顶温度、云粒子有效半径、光学厚度、液水路径、组合反射率、 $\geq 30\text{dBZ}$ 回波面积、垂直累积液态含水量 7 项指标平均变化率 3.4%~19.6%。18 次作业的小时降水量变化率呈 0~58.3% 的增雨效果, 6 次作业的小时降水量变化率呈 -37.5%~0 的减雨效果。多数增雨作业引起的云物理参数变化明显小于降水变化。(3) 具有增雨正效果的 18 次增雨作业, 人工催化引起多数作业的云顶温度、组合反射率、垂直累积液态含水量呈增加趋势, 多数作业的云粒子有效半径、光学厚度、液水路径呈减小趋势。(4) 利用飞机增雨两个例对比 *PIDI* 指数方法与 *K* 值方法异同。对于降水量变化趋势的检验二者具有一致性。二者差别在于 *PIDI* 指数方法能够反映人工催化引起的所有检验指标平均变化率。

关键词 增雨效果物理检验 HYSPLIT 模型 *APC* 系数 无量纲化 *PIDI* 指数

文章编号

中图分类号 P481

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2105.20237

Establishment and Application of Physical Inspection Method for Artificial Precipitation Enhancement Effect

SHA Xiu-zhu^{1,2} CHU Rong-hao³ HUANG Yi-mei^{1,2}

1CMA-He'nan Key Laboratory of Agrometeorological Support and Applied Technique, Zhengzhou 450000

收稿日期 2020-11-30; 网络预出版日期

作者简介 沙修竹, 女, 1990 年出生, 工程师, 主要从事云降水与人工影响天气研究。E-mail:xiuzhu1990@163.com

资助项目 中国气象局·河南省农业气象保障与应用技术重点实验室应用技术研究项目 KM201923, KM202135

Funded by CMA-He'nan Key Laboratory of Agrometeorological Support and Applied Technique Research Project KM201923, KM202135

Abstract For physical inspection of artificial precipitation enhancement effect based on multi-source detection data, we establish the similarity measurement coefficient *APC* of contrast area selection, and the dimensionless *PIDI* index method for physical inspection of artificial precipitation enhancement effect. Results show that: (1) The *PIDI* index method of physical inspection for artificial precipitation enhancement effect can be used to minimize variability influence of seeding cloud body and precipitation with the similarity coefficient *APC*, and synthesize a variety of dimensionless cloud physical detection parameters with dimensionless method. Finally, a percentage change rate is used to comprehensively measure the overall variation trend and degree of various cloud physical parameters. (2) The *PIDI* index method was applied to inspect the precipitation enhancement effect of 24 aircraft from 2014 to 2019. The average change rate of 7 indexes (cloud top temperature, effective particle radius, optical thickness, liquid water path, combined reflectivity, ≥ 30 dBZ echo area, vertical cumulative liquid water content) caused by artificial precipitation enhancement was 3.4%~19.6%. The change rate of hourly precipitation of 18 operations was 0~58.3%, the change rate of hourly precipitation of 6 operations was -37.5%~0. The changes of cloud physical parameters caused by most precipitation-increasing operations are obviously smaller than the changes of precipitation. (3) For the 18 operations with positive effect of precipitation enhancement, cloud top temperature, combined reflectivity and vertical cumulative liquid water content for most operations were increased due to artificial catalysis, effective particle radius, optical thickness and liquid water path for most operations were decreased due to artificial catalysis. (4) The difference and similarity between the *PIDI* index method and the K-value method were compared by using an aircraft precipitation enhancement operation. For the test of precipitation variation trend, the two are consistent. The difference between the two is that the *PIDI* index method can reflect the average change rate of all inspection indexes caused by artificial catalysis.

Keywords Physical Inspection of precipitation enhancement effect, HYSPLIT model, *APC*, dimensionless, *PIDI*

1 引言

人工影响天气效果检验,是当前国内外人工影响天气领域亟待解决的一项重大科学技术问题。目前,人工增雨效果检验方法主要有物理检验、统计检验、数值模拟检验三种方法,统计检验、数值模拟检验的效果只有经过物理解释和观测的物理效应所证实,才能获得比较令人信服的检验效果(郭学良, 2010; 辛乐, 2010)。人工增雨效果物理检验,已被国际上许多重大项目作为效果检验的重要组成部分加以重视,物理检验每进一步,都将预示着云降水物理学的重大进展(李大山等, 2002; 官福顺, 2008)。然而,由于物理检验技术难度大、对探测手段要求很高,因此这种方法至今仍处于探索发展阶段。

人工增雨物理检验的发展空间,与云降水物理探测技术提升、物理检验方法更新密切相关。当前云降水物理探测技术快速发展,对物理检验方法更新提出更高要求。近十多年来,多种先进云水探测设备不断发展及布网完成,为物理检验提供更高分辨率的大气降水和云物理信息。然而,各种探测各有其优缺点(蔡兆鑫等, 2013):卫星观测可获取云场连续二维时变资料,通过反演可获取多种云特性参数,但主要反映云

顶和云内平均信息；雷达可获取云降水结构的三维时变资料，但主要是大粒子降水回波信息；机载粒子测量系统可直接得到云过冷水量、云滴及冰晶浓度等云微物理参数，但获取只是一维时空变化观测资料。因此，如何充分高效地结合多源化及精细化的探测手段，以更加科学合理的物理检验方法提升增雨效果检验水平，是人工增雨效果检验评估的重要发展方向。

已有相关研究，主要针对增雨作业催化前后的云宏微观物理变化及响应（自比法）（刘晴和姚展予，2013；贾烁和姚展予，2016；林丹和王维佳，2015），以及增雨作业影响区较对比区的某项云物理参数变化差异（双比法）（祝晓芸，2016；唐仁茂等，2009；王以琳等，2018；Daniel Rosenfeld et al, 1993）。目前，我国人工增雨作业大多是未预先进行严格设计的急性抗旱作业，对于增雨效果检验，通常在作业之后根据实际作业影响区确定相应对比区，属于非随机化检验，具有主观性强、倾向性选取等不足。

本文针对多源探测资料，建立对比区选取的相似性度量系数 APC ，采用 HYSPLIT 模型进行增雨作业影响区及对比区的追踪，建立以无量纲化处理为基础、包含多种差异性探测参数的人工增雨效果物理检验综合指数 $PIDI$ 。

2 资料及技术路线

所用资料包括：（1）飞机增雨作业详细信息。包括增雨作业飞机的飞行航线、经度、纬度、海拔高度、温度、催化时间、催化区域、催化高度、催化剂量等。（2）NCEP GDAS 全球资料同化系统分析资料（global data assimilation system）。水平分辨率 $1^\circ \times 1^\circ$ ，垂直方向 21 层，包括位势高度、风、温度和比湿等要素。（3）云降水探测资料。主要由以下探测方式获取：风云静止气象卫星（FY-2E/FY-2G/FY-4A）、多普勒天气雷达（SA/SB 型）、飞机机载探测仪器（DMT）。获取要素详见图 1。（4）地面气象站及探空站观测资料。获取要素包括地面小时降水量、高空温度及风向风速等资料。

针对人工增雨效果物理检验 $PIDI$ 指数方法，增雨效果物理检验技术路线见图 1。

3 人工增雨效果物理检验的 $PIDI$ 指数方法建立

3.1 建立对比区选取系数 APC

如何最大程度科学合理、客观准确地选取对比区，是确保物理检验结果可信度的关键之一，相似性度量为目前最优手段。相似性度量的数学衡量方法有很多，李开乐（李开乐，1986；唐仁茂等，2010）对各种方法的优劣给予分析之后，提出描述相似比较完备的统计量——相似离度。相似离度法优点在于，它从“值相似”和“形相似”两个方面来考虑相似的判定问题。然而相似离度是对样本差异的一个平均意义上的描述，易受样本中差异过大或过小少数因子或数据点影响。皮尔逊相关系数（李宏彬等，2015）能够弥补这一不足，当数据集出现异常值偏差时，皮尔逊相关度表现得更稳定，倾向于给出更好结果。

因此，为提高人工增雨影响区与对比区相似性的辨别能力，提出一个新的相似性度量判据，即以相似离度和皮尔逊相关系数为基础构造 APC 系数（相似离度-皮尔逊相关系数，Analogy Deviation-Pearson Correlation Coefficient）。该方法既能够度量两样本之间数值、形变化趋势的相似性，又削弱极端偏差数据影响。其基本原理表述如下。

APC 系数为相似离度 C_{XY} 与皮尔逊相关系数 ρ_{XY} 之比（式 1-5）。 D_{XY} 为值系数，是两样本对应值之差绝对值的总平均，反映两样本在总平均数值上的差异程度，其值越小表明两样本数值越接近。 S_{XY} 为形系数，

表示两样本各对应值之差对其总平均的离散程度，反映两样本的形相似程度，其值越小表明两样本形状越相似。 ρ_{XY} 数值范围表示的样本相关性见式 6， ρ_{XY} 值越大 ($\rho_{XY}>0$)，表明两样本线性正相关越显著。因此，APC 值越小 ($APC>0$)，表明两样本相似度越高。其中， X 和 Y 表示两个待比较样本， n 为数据长度。



图 1 人工增雨效果物理检验 *PIDI* 指数方法技术路线

Fig.1 Technical route of *PIDI* index method of physical inspection for artificial precipitation enhancement effect

$$APC = \frac{C_{XY}}{\rho_{XY}} \quad (1)$$

$$C_{XY} = \frac{1}{2}(D_{XY} + S_{XY}) \quad (2)$$

$$D_{XY} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n |X_k - Y_k| \quad (3)$$

$$S_{XY} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \left| |X_k - Y_k| - \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n |X_k - Y_k| \right| \quad (4)$$

$$\rho_{XY} = \frac{\sum_{k=1}^n (X_k - \bar{X})(Y_k - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{k=1}^n (X_k - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{k=1}^n (Y_k - \bar{Y})^2}} \quad (5)$$

$$\left\{ \begin{array}{ll} \rho_{XY}=1 & \text{完全正相关} \\ 0 < \rho_{XY} < 1 & \text{正相关} \\ -1 < \rho_{XY} < 0 & \text{负相关} \\ \rho_{XY}=-1 & \text{完全负相关} \end{array} \right. \quad (6)$$

将目标云与待选云的 m 个对比指标的 APC 值作算术平均，获得综合 APC (式 7)。 APC 最小的云体为最佳对比区 ($APC > 0$)。

$$APC = \frac{1}{m}(APC_1 + APC_2 + \cdots \cdots APC_m) \quad (7)$$

确定对比区选取的指标。考虑以下两个因素：一是云物理参数本身能够表征的云降水意义以及在人工增雨效果检验过程中的检验效应表现；二是在增雨效果检验方面已有研究中的云物理宏微观参数应用。云顶温度、云粒子有效半径、组合反射率、强回波面积、垂直累积液态含水量等参数作为人工增雨效果物理检验的指标已得到广泛认同 (国家气象中心, 2007; 黄毅梅, 2006)。研究采用 7 项指标参数进行对比区选取，参数详细说明见表 1 序号 1-7。

表 1 对比区选取指标(序号 1-7)、*PIDI* 指数构成指标(序号 1-8)的参数说明

Table1 Parameter description of contrast area selection index (number 1-7) and the constitution index of *PIDI* index (number 1-8)

序号	探测方式	探测或反演参数	定义	指导作用	单位
1	FY-2E/2G 或 FY-4A 静止气象卫星	云顶温度(t_{top})	云顶所在高度的温度	人工增雨云系播云温度窗的选择	℃
2		云粒子有效半径(ref)	指假设云层在垂直方向均匀条件下云粒子的有效半径	判断云中粒子大小，反映云可降水量	μm
3		云光学厚度($optn$)	云系在整个路径上云消光总和	了解云系垂直方向云体厚实程度	无量纲
4		液水路径(lwp)	云体单位面积上的垂直方向液水总量 (或称柱液水量)	了解垂直方向的水丰沛程度	mm

5		组合反射率(dBZ)	气象雷达接收周围一定范围内不同高度云层反射雷达波的比率	反映雷达体扫对所有回波在对应格点上的最大反射率因子值	dBZ
6	多普勒天气雷达	$\geq 30\text{dBZ}$ 回波面积 ($S \geq 30\text{dBZ}$)	组合反射率数值 $\geq 30\text{dBZ}$ 面积大小	表示 $\geq 30\text{dBZ}$ 反射率的实际范围	km^2
7		垂直累积液态含水量 (VIL)	降水云体中某一确定面积的垂直柱体内液态水总量的分布	反映将反射率因子数据转换成等价液态水值	kg m^{-2}
8	自动气象站	小时降水量(rh)	1 小时内的总降水量	反映云降水结果的宏观及直观特征	mm

3.2 利用 HYSPLIT 模型追踪影响区及对比区

人工增雨作业向空中播撒催化剂，其扩散与污染物扩散有相近的机制，因而可以借鉴大气环境影响预测方面的方法及研究。本文采用 HYSPLIT 模式模拟飞机增雨作业催化剂的扩散过程、对比区未催化云体的移动扩散过程，以追踪增雨作业后影响区、对比区的动态变化。

HYSPLIT 模型，由美国国家海洋和大气管理局（NOAA）的空气资源实验室和澳大利亚气象局在过去 20 年间联合研发，是用于计算分析大气污染物输送、扩散轨迹的专业模型，即混合单粒子拉格朗日积分轨迹模型，已被广泛应用于多种污染物在各个地区的传输扩散研究（王佳津等，2015；Brimelow C J and Reuter W G, 2005；Malin G.et al, 2010）。研究输入的主要参数包含 NCEP GDAS 全球资料同化系统分析资料、模拟位置地理信息、模拟时间、源参数等。

利用 HYSPLIT 模式模拟人工增雨作业催化剂扩散过程时，需要明确催化剂的有效作用过程包含的关键环节：释放过程、扩散过程、核化过程。（1）释放过程。增雨飞机机载焰剂型催化剂通过燃烧释放过程播撒入云，其燃烧开始至结束时长为释放时间。对于目前增雨飞机机载焰剂型催化剂碘化银烟条、碘化银焰弹，释放时间通常分别为数十分钟、1 分钟左右。（2）扩散过程。增雨飞机释放催化剂在某点瞬时排放，飞机作业属于移动线源催化，1h 内达到有效催化浓度宽度约 10km 左右。考虑到已有实际飞机作业的蛇形或 8 字形小间距航线特点，研究将催化作业区的数个边界点作为模式输入源。（3）核化过程。核化过程是指水汽在气溶胶粒子或离子上的汽-粒转化过程（盛裴轩等，2003）。对于目前使用的冷云催化人工冰核制剂， $-4^{\circ}\text{C} \sim -20^{\circ}\text{C}$ 条件下的核化时间通常为 1~40min 不等。目前一般认为，催化剂经过释放、扩散、核化后保持有效浓度（人工冰核充足）的持续时间约 3h，即催化剂有效作用时间 3h，有学者认为可以更长。

3.3 建立 PIDI 指数

针对各种云物理要素的量纲和量级不一致问题，研究建立一个以无量纲化处理为基础、包含多种差异性探测参数的人工增雨效果物理检验无量纲综合指数——PIDI 指数(Physical Inspection Dimensionless Index)。

（1）无量纲化处理

在多指标综合评价中涉及到两个基本变量：一是各评价指标的实际值，另一个是各指标的评价值。由于各指标所代表的物理含义不同，因此存在着量纲上的差异，这种异量纲性是影响对事物整体评价的主要因素。指标无量纲化处理（李荣平和李剑玲，2004；苏为华，2000；李玲玉等，2016）是解决这一问题的主要手段。无量纲化，也称作数据的标准化、规格化，是一种通过数学变换来消除原始变量量纲影响的

方法。对于增雨效果探测参数的实际观测值 X ，采用极值化方法进行无量纲化处理（式 8），即每一个变量与变量最小值之差除以该变量取值的全距，标准化后各变量取值范围限于[0,1]，从而消除纲量和数量级的影响。 X_{min} 、 X_{max} 分别为样本中 X 的最小值、最大值。 X' 表示对 X 极值化处理之后的物理指标。样本为增雨作业前 1h 至作业结束后 3h 时段的某探测参数实际观测值，数据时间间隔 0.5h。

$$X' = \frac{(X - X_{min})}{(X_{max} - X_{min})} \quad (8)$$

(2) $PIDI$ 指数计算公式

$PIDI$ 指数的相关计算公式见式 9-11。 A 、 B 表示增雨作业影响区、对比区的某指标观测值。 A_j' 表示对影响区的某指标观测值 A_j 极值化处理之后的数值， B_j' 表示将对对比区的某指标观测值 B_j 极值化处理之后的数值， n 为总时次数， i 为指标序号， j 为时次序号。 r_j 表示某指标的第 j 时次变化率差值。 $PIDI_i$ 为 A_j' 、 B_j' 二者平均变化率的差值，表示影响区和对比区的某指标变化差异，即影响区人工催化引起的某指标变化率。由于增雨作业产生的效果会使部分检验指标呈正变化率，使部分检验指标呈负变化率，因此采用对所有指标的 $PIDI_i$ 作绝对值再求平均值，以判断所有检验指标的整体变化程度。 $PIDI$ 为所有检验指标的 $PIDI_i$ 绝对值均值，表示影响区和对比区的所有指标综合变化差异，即影响区人工催化引起的所有检验指标平均变化率。 m 为指标总个数。

$$r_j = \frac{\Delta A_j'}{\Delta j} - \frac{\Delta B_j'}{\Delta j} \quad (9)$$

$$PIDI_i = \frac{\sum_{j=2}^n \left(\frac{\Delta A_j'}{\Delta j} \right) \times 100\%}{n} - \frac{\sum_{j=2}^n \left(\frac{\Delta B_j'}{\Delta j} \right) \times 100\%}{n} \quad (10)$$

$$PIDI = \frac{\sum_{i=1}^m |PIDI_i|}{m} \quad (11)$$

(3) $PIDI$ 指数的构成指标

$PIDI$ 指数的构成指标选取，考虑因素同对比区选取过程（3.1 章节）。研究选取包含云物理及地面观测参数的 $PIDI$ 指数构成指标共 8 项：云顶温度、云粒子有效半径、光学厚度、液水路径、回波强度、 $\geq 30\text{dBZ}$ 回波面积、垂直累积液态含水量、小时降水量，参数详细说明见表 1 序号 1-8。

4 人工增雨效果物理检验的 $PIDI$ 指数方法应用

4.1 飞机增雨作业过程合理性分析

采用 2014~2019 年 105 架次飞机增雨作业资料，利用 $PIDI$ 指数方法对飞机增雨效果进行物理检验。增雨作业对象的云系类型为层状或层积混合状冷云，催化剂类型为冷云催化剂。

对人工增雨作业进行效果检验，首先从人工增雨作业条件、作业时机、作业部位、催化剂量等方面对人工增雨作业过程进行合理性分析，对满足作业合理性要求的作业进行增雨效果物理检验才具备意义。增雨作业过程合理性分析条件见表 2。如果增雨作业过程不符合作业合理性分析条件，则认为本次作业过程不合理，放弃对该个例的增雨效果检验；如果增雨作业过程基本合理，则进行增雨效果检验。在 2014~2019 年 105 架次飞机增雨作业中，最终通过作业合理性分析的飞机增雨作业共 24 架次，作业详细信息见表 3，

将 24 架次增雨作业的飞机航线叠加雷达回波平面和垂直剖面见图 2。

表 2 人工增雨作业过程合理性分析条件

指 标	要 求
作业条件	(1) 云系类型为层状云、层积混合云 (2) 天气条件（降水云系）和水汽输送等适合增雨作业
作业时机	(1) 作业位于水汽含量、液态水含量充沛区域，作业区云层存在较强雷达回波 (2) 作业云体存在过冷层，且具有一定厚度 (3) 云顶温度<-10℃
作业部位	(1) 作业催化处于播云窗，利于催化剂最大核化 (2) 航线设计合理，作业区具有一定面积且实现充分播撒
催化剂量	催化剂量合理且充足，实现充分播撒

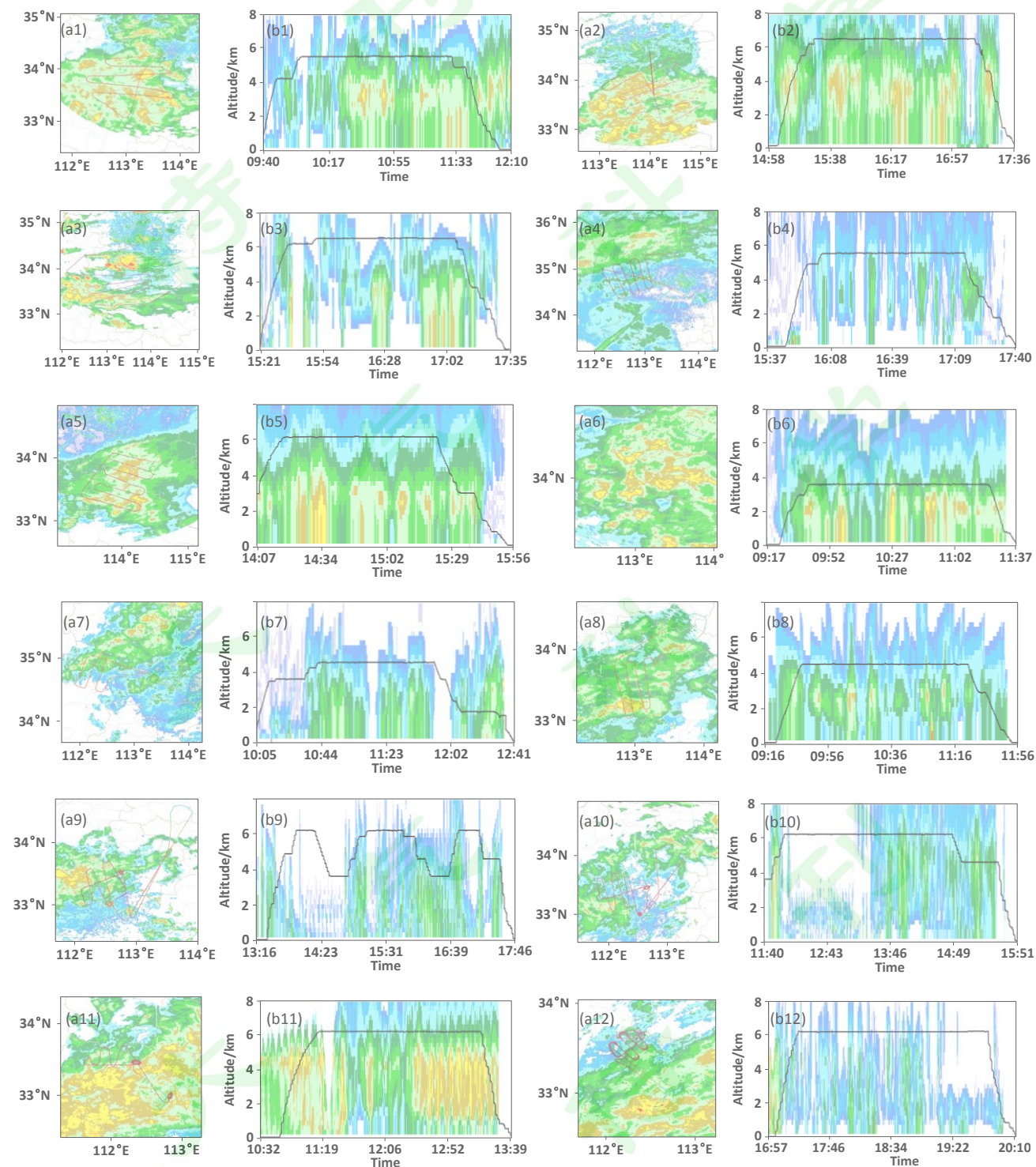
表 3 2014~2019 年 24 架次飞机增雨作业信息

Table3 Information of 24 aircraft precipitation enhancement operations in Henan from 2014 to 2019

编号	作业日期	作业机型	催化时段 (北京时)	催化时长 /h	催化平均 高度/km	催化剂量				催化区域
						干冰 /kg	AgI 烟 条/根	AgI 焰 弹/发	AgI 烟 管/根	
19	20140823	运 8	09:39-12:01	2.4	5.7	48	16	200	/	平顶山-许昌-漯河-南阳
20	20140823	运 8	14:58-17:36	2.6	6.5	/	19	187	/	平顶山-许昌-漯河-周口-驻马店
21	20140826	运 8	15:21-17:36	2.3	6.5	120	1	120	/	平顶山-许昌-漯河-周口-驻马店
56	20160507	运 8	16:17-17:20	1.1	5.6	/	15	193	/	洛阳-焦作-郑州
58	20160520	运 8	14:07-15:56	1.8	6.2	/	17	195	/	许昌-平顶山-漯河-周口-驻马店
65	20170404	运 12	09:45-11:26	1.7	3.8	/	13	/	/	平顶山-许昌
67	20170408	运 12	10:39-11:42	1.1	4.5	/	13	/	/	洛阳-焦作
69	20170410	运 12	09:45-11:21	1.6	4.5	/	13	/	/	洛阳-平顶山-南阳
72	20170924	MA60	14:02-17:10	3.1	5.3	/	20	180	/	南阳
73	20170925	MA60	11:57-14:59	3.0	6.2	/	18	194	/	南阳
75	20171001	MA60	11:10-12:00	0.8	6.2	/	26	191	/	南阳
76	20171001	MA60	17:19-19:43	2.4	6.2	/	37	175	/	南阳
78	20180124	MA60	09:50-11:50	2.0	4.2	/	16	182	/	平顶山-南阳
79	20180124	MA60	15:20-16:40	1.3	4.2	/	16	189	/	平顶山-漯河-南阳-驻马店
80	20180126	MA60	21:29-22:40	1.2	4.2	/	15	192	/	南阳
90	20181105	MA60	09:10-10:59	1.8	4.0	/	/	/	33	洛阳-南阳
91	20181105	MA60	14:55-17:25	2.5	4.3	/	/	/	37	洛阳-三门峡-平顶山
93	20181106	MA60	16:42-17:30	0.8	4.3	/	/	/	36	许昌-漯河-平顶山
94	20181107	MA60	15:11-17:35	2.4	4	/	/	/	35	平顶山-南阳
97	20181203	MA60	16:02-18:12	2.2	4	/	/	/	35	周口
99	20181210	MA60	16:18-18:15	2.0	2.7	/	24	183	/	漯河-周口-驻马店

100	20181219	MA60	14:11-16:00	1.8	4.2	/	16	187	/	南阳-驻马店
101	20181219	MA60	19:15-20:50	1.6	3.6	/	16	177	/	驻马店-南阳-信阳
105	20190226	MA60	15:15-16:50	1.6	4.2	/	18	/	/	南阳

注：烟条 AgI 含量 125g/根及 35g/根两种规格；焰弹 AgI 含量 3.6g/发；烟管 AgI 含量 12.5g/根。



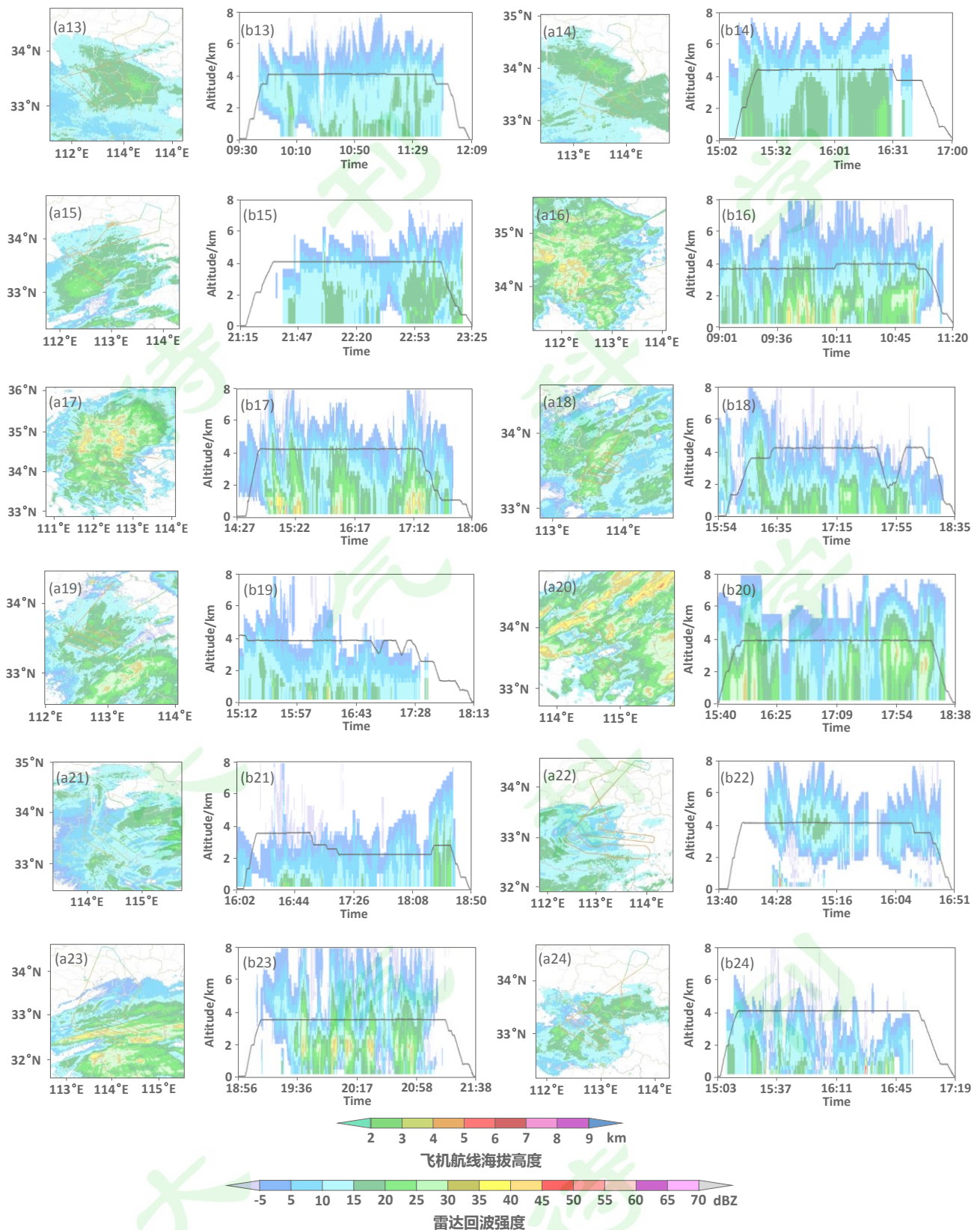


图2 24架次增雨作业的飞机航线叠加雷达回波平面(a1-a24)和垂直剖面(b1-b24)

Fig.2 The overlay of airline and radar echo plane(a1-a24), radar vertical profile(b1-b24) of 24 aircraft precipitation enhancement operations

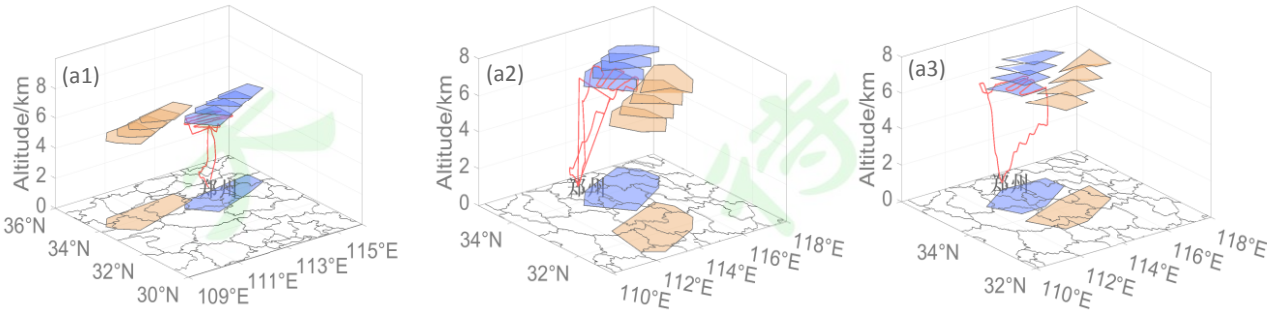
4.2 影响区与对比区的动态追踪

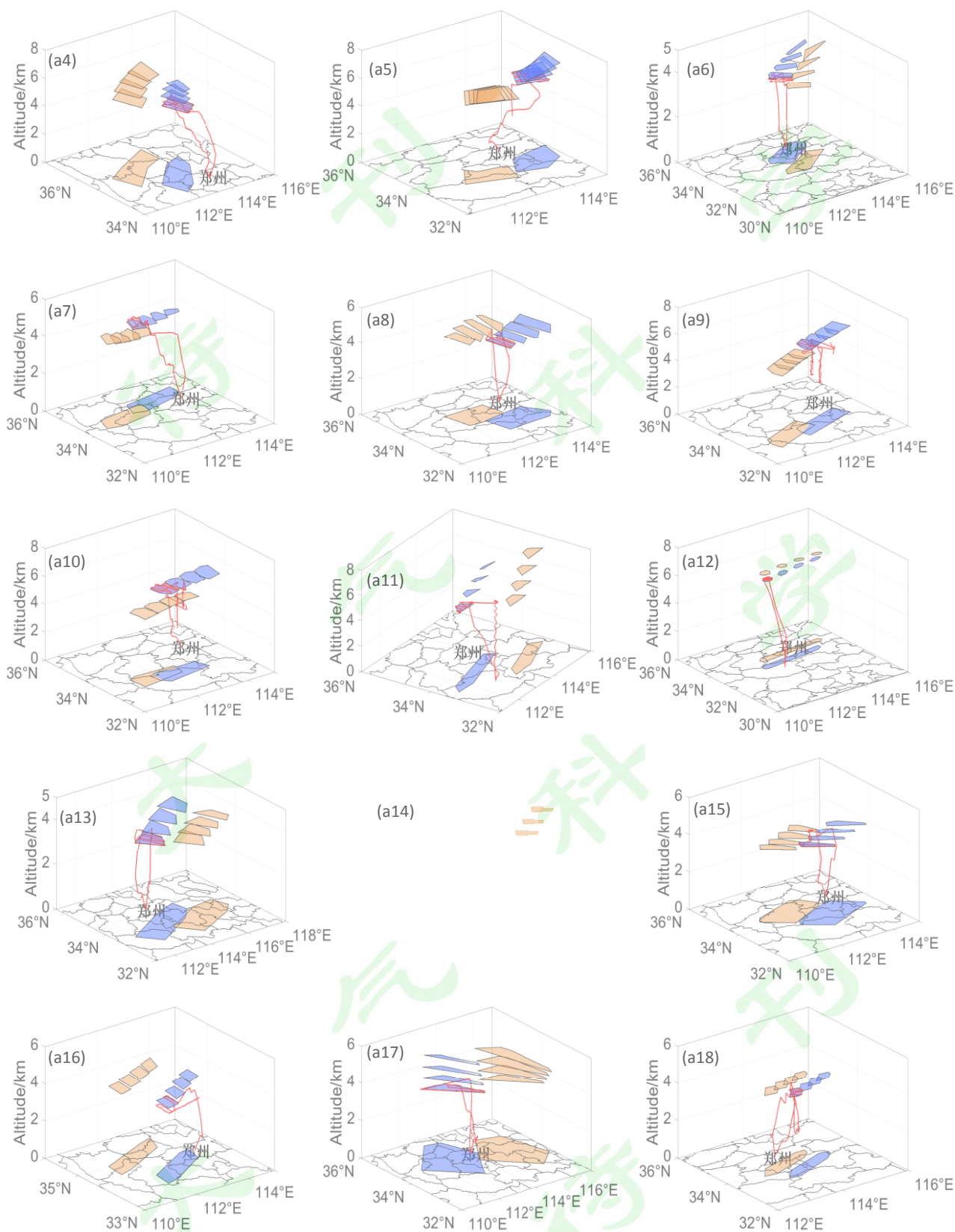
对于通过合理性分析的 24 架次飞机增雨作业，首先确定增雨作业的影响区，然后在影响区上游云区或附近相似云体初选与影响区面积等同的数个对比区，计算各初选对比区的 APC 系数，最终选取 APC 最小值的对比区为最佳对比区（表 4）。确定最佳对比区后，利用 HYSPLIT 模型模拟增雨作业结束后 0~3h 逐小时影响区 and 对比区空间变化（图 3）。

表 4 24 次飞机增雨作业初选对比区 APC 系数、最佳对比区

Table4 Coefficient APC of primary contrast area, best contrast area of 24 aircraft precipitation enhancement operations

作业号	APC 系数值				最佳对比区 (APC 最小值)
	对比区 1	对比区 2	对比区 3	对比区 4	
19	13.13	10.25	10.28	8.57	对比区 4
20	18.73	33.65	11.74	/	对比区 3
21	4.26	2.44	1.84	/	对比区 3
56	160.70	45.47	8.39	/	对比区 3
58	16.01	26.02	/	/	对比区 1
65	16.10	7.40	14.00	22.71	对比区 2
67	21.96	10.82	5.70	4.08	对比区 4
69	6.94	7.95	14.90	27.97	对比区 1
72	2.41	1.36	1.22	4.59	对比区 3
73	8.55	34.95	71.27	6.63	对比区 4
75	20.78	35.53	13.77	58.23	对比区 3
76	7.49	7.68	14.96	4.87	对比区 1
78	2.57	4.63	6.49	1.25	对比区 4
79	2.91	1.35	0.47	2.80	对比区 3
80	26.18	1.12	11.02	8.12	对比区 2
90	4.24	6.65	12.03	5.50	对比区 1
91	4.41	6.04	3.98	/	对比区 3
93	4.84	5.18	5.00	7.95	对比区 1
94	10.99	40.59	2.51	/	对比区 3
97	1.57	13.39	1.56	6.38	对比区 3
99	47.67	11.45	2.28	2.02	对比区 4
100	1.86	8.88	2.15	/	对比区 3
101	11.93	3.39	30.10	11.09	对比区 2
105	6.62	4.60	176.70	23.16	对比区 2





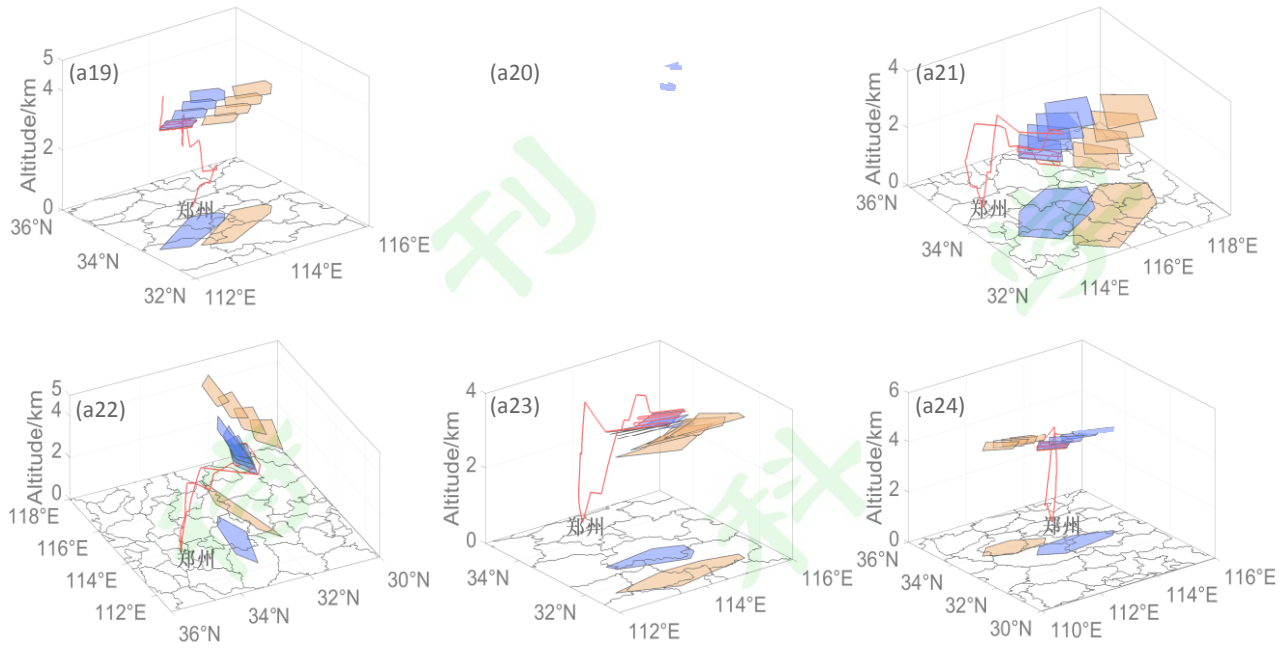


图3 24架次飞机增雨作业飞机航线、0~3h逐小时影响区和对比区的三维地理空间配置(a1-a24) (红色实线为飞机航线;空中蓝色、橘黄色区域分别为影响区、对比区;地面蓝色、橘黄色区域分别为空中影响区、对比区在地面上的投影)

Fig.3 Three-dimensional geospatial configuration of airline and 0~3h hourly influence area and contrast area of 24 aircraft precipitation enhancement operations (a1-a24) (The solid red lines represent the airline; the blue areas and the orange areas in the air represent influence area and contrast area, respectively; the blue areas and the orange areas on the ground represent the ground projection of influence area and contrast area in the air, respectively)

4.3 人工增雨效果物理检验结果

须说明的是,考虑可见光通道及卫星天顶角对反演产品准确性的影响(周毓荃等, 2008; 陈英英, 2007),近黄昏及夜晚时间卫星反演的云粒子有效半径、光学厚度、液水路径不予采用。本文设定当日 17 时以前催化作业为日间个例, 当日 17 时以后催化作业为夜间个例。日间个例增雨效果物理检验指标采用卫星反演、雷达探测参数 (12 次作业: 19、58、65、67、69、73、75、78、79、90、100、105 号), 夜间个例增雨效果物理检验指标采用雷达探测参数 (12 次作业: 20、21、56、72、76、80、91、93、94、97、99、101 号)。

4.3.1 日间个例物理检验结果

应用 $PIDI$ 指数方法对 12 次日间个例的增雨效果作物理检验, 统计 7 项云物理检验指标的 $PIDI_i$ 值、综合指数 $PIDI$ 值、降水量指标 $PIDI_{rh}$ 值见图 4。分析 12 次飞机增雨作业的 $PIDI_{ttop}$ 、 $PIDI_{ref}$ 、 $PIDI_{optn}$ 、 $PIDI_{lwp}$ 、 $PIDI_{dBZ}$ 、 $PIDI_{\geq 30dBZ}$ 、 $PIDI_{VIL}$ 、 $PIDI$, 认为影响区人工催化引起的云顶温度、云粒子有效半径、云光学厚度、液水路径、组合反射率、组合反射率 $\geq 30dBZ$ 面积、垂直累积液态含水量的变化率, 分别为-17.0%~30.4%、-17.6%~3.8%、-8.7%~6.5%、-19.8%~3.4%、-21%~32.8%、-23.9%~32.6%、-14.5%~22.2%。分析 12 次飞机增雨作业的 7 项云物理指标的综合指数 $PIDI$, 认为影响区人工催化引起的 7 项指标平均变化率 3.4%~19.6%。分析 12 次飞机增雨作业的 $PIDI_{rh}$, 10 次飞机增雨作业的小时降水量指标 $PIDI_{rh}$ 为正值, 即增雨作业呈正效果, 小时增雨率为 0~48.8%, 其中, 小时增雨率范围 0~10%、10%~20%、20%~30%、30%~40%、40%~48.8% 的作业数分别为 1 次、2 次、3 次、2 次、2 次; 2 次飞机增雨作业的小时降水量指标 $PIDI_{rh}$ 为

负值，即增雨作业呈负效果，小时减雨率为-17.9%~0。通过对比 $PIDI$ 和 $PIDI_{rh}$ 可见，多数催化作业引起的云物理参数变化明显小于降水变化。

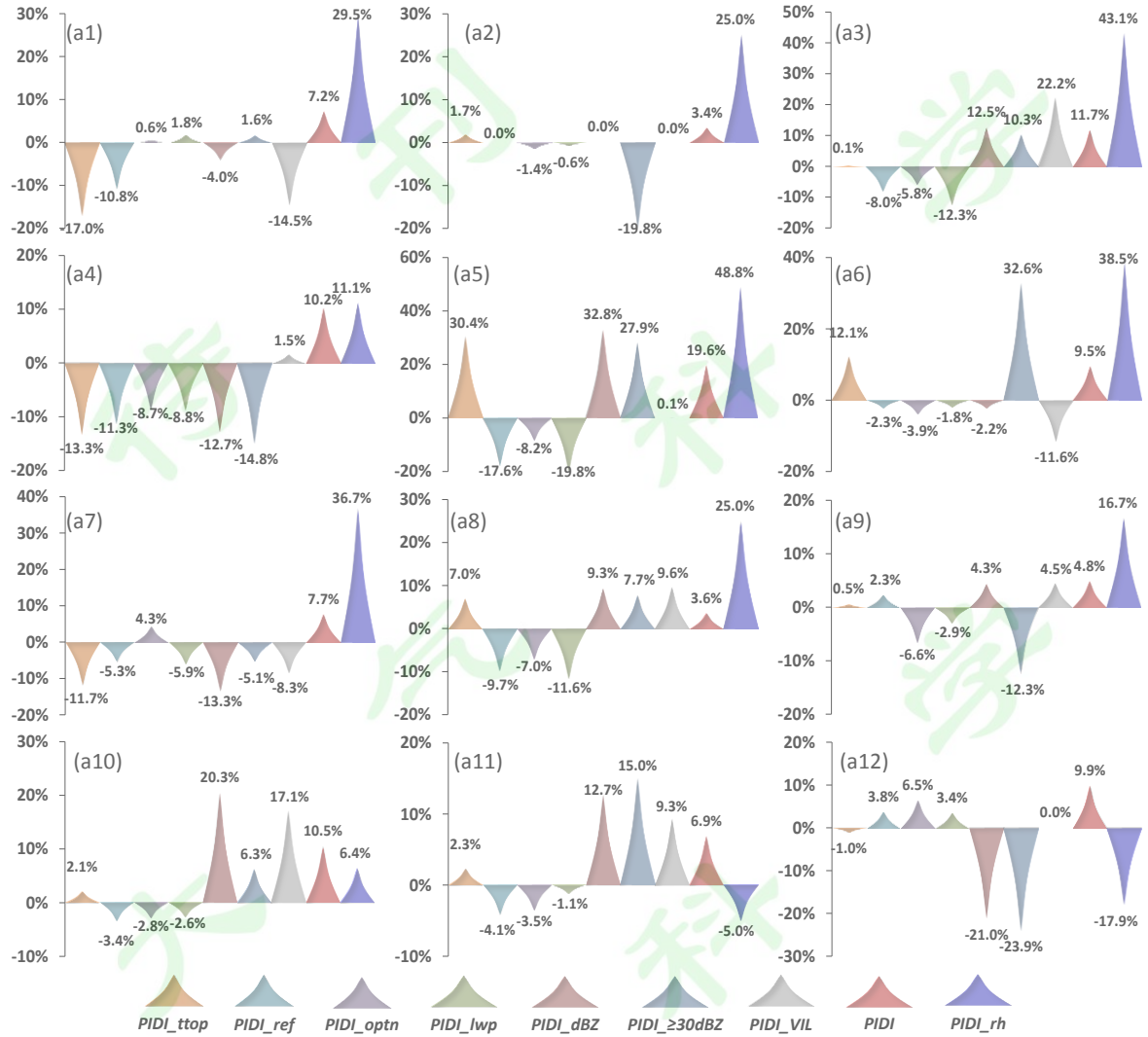


图 4 日间个例的物理检验各指标 $PIDI_i$ 及综合指数 $PIDI$ (a1-a12) ($PIDI_{ttop}$ 、 $PIDI_{ref}$ 、 $PIDI_{optn}$ 、 $PIDI_{lwp}$ 、 $PIDI_{dBZ}$ 、 $PIDI_{\geq 30dBZ}$ 、 $PIDI_{VIL}$ 、 $PIDI_{rh}$ 分别表征影响区人工催化引起的云顶温度、云粒子有效半径、光学厚度、液水路径、组合反射率、 $\geq 30dBZ$ 回波面积、垂直累积液态含水量、小时降水量的变化率， $PIDI$ 表征影响区人工催化引起的前 7 项指标平均变化率)

Fig.4 $PIDI_i$ of each indicator and comprehensive index $PIDI$ of physical inspection of diurnal cases (a1-a12) ($PIDI_{ttop}$ 、 $PIDI_{ref}$ 、 $PIDI_{optn}$ 、 $PIDI_{lwp}$ 、 $PIDI_{dBZ}$ 、 $PIDI_{\geq 30dBZ}$ 、 $PIDI_{VIL}$ 、 $PIDI_{rh}$ represent the change rate of cloud top temperature, effective particle radius, optical thickness, liquid water path, combined reflectivity, $\geq 30dBZ$ echo area, vertical cumulative liquid water content, hourly precipitation of influence area due to artificial catalysis, respectively. $PIDI$ represents the average change rate of the first seven indexes of influence area due to artificial catalysis)

4.3.2 夜间个例物理检验结果

应用 $PIDI$ 指数方法对 12 次夜间个例的增雨效果作物理检验，统计 4 项云物理检验指标的 $PIDI_i$ 值、综合指数 $PIDI$ 值、降水量指标 $PIDI_{rh}$ 值见图 5。分析 12 次飞机增雨作业的 $PIDI_{ttop}$ 、 $PIDI_{dBZ}$ 、 $PIDI_{\geq 30dBZ}$ 、 $PIDI_{VIL}$ 、 $PIDI$ ，认为影响区人工催化引起的云顶温度、组合反射率、组合反射率 $\geq 30dBZ$ 面积、垂

直累积液态含水量的变化率，分别为-15.6%~10.7%、-22.6%~25.8%、-20.9%~22.7%、-14.3%~23.2%。分析 12 次飞机增雨作业的 4 项云物理指标的综合指数 $PIDI$ ，认为影响区人工催化引起的 4 项指标平均变化率 1.5%~19.9%。分析 12 次飞机增雨作业的 $PIDI_{rh}$ ，8 次飞机增雨作业的小时降水量指标 $PIDI_{rh}$ 为正值，即增雨作业呈正效果，小时增雨率为 0~58.3%，其中，小时增雨率范围 0~10%、10%~20%、20%~30%、30%~40%、40%~58.3%的作业数分别为 4 次、2 次、0 次、1 次、1 次；3 次飞机增雨作业的小时降水量指标 $PIDI_{rh}$ 为负值，即增雨作业呈负效果，小时减雨率为-37.5%~0；1 次飞机增雨作业的小时降水量指标 $PIDI_{rh}$ 为 0 值。通过对比 $PIDI$ 和 $PIDI_{rh}$ 可见，夜间个例与日间个例同样，多数催化作业引起的云物理参数变化也明显小于降水变化。

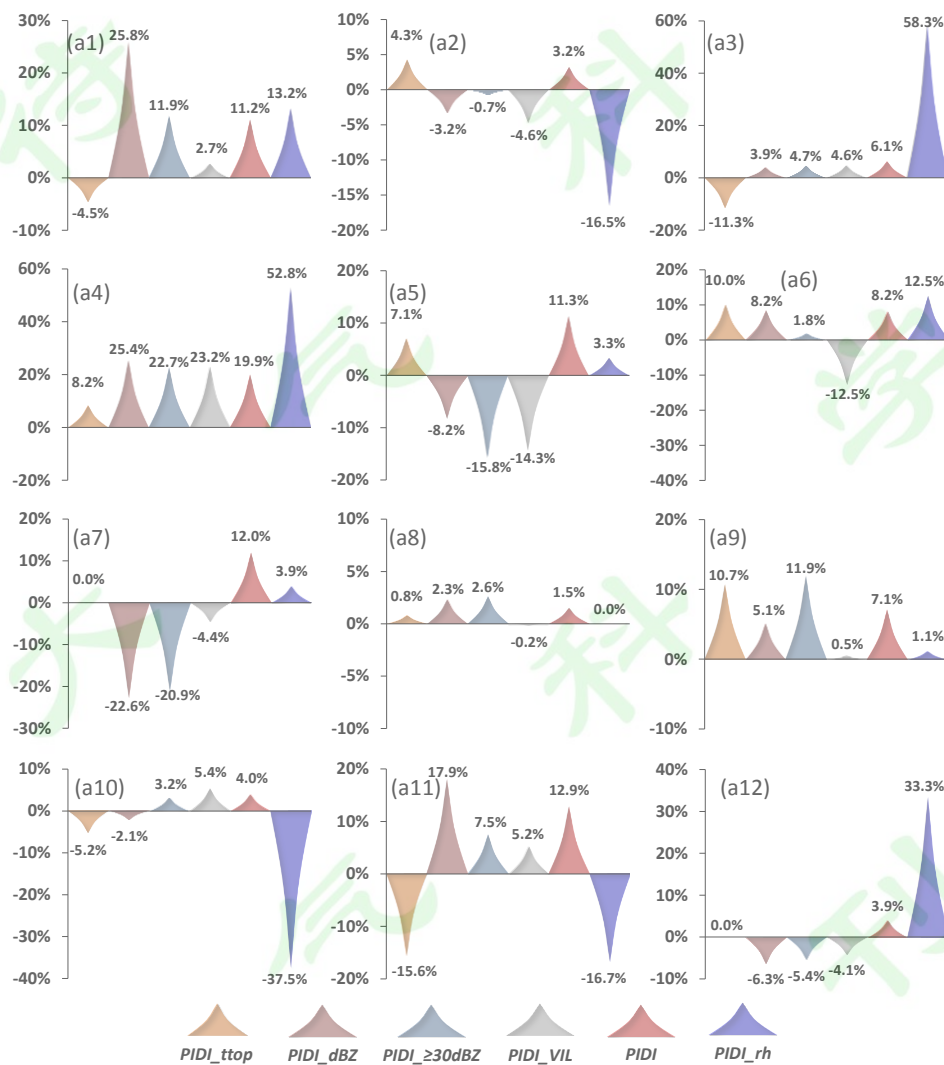


图5 夜间个例的物理检验各指标 $PIDI_i$ 及综合指数 $PIDI$ (a1-a12) ($PIDI$ 表征影响区人工催化引起的 $PIDI_{ttop}$ 、 $PIDI_{dBZ}$ 、 $PIDI_{\geq 30dBZ}$ 、 $PIDI_{VIL}$ 四项指标平均变化率)

Fig.5 $PIDI_i$ of each indicator and comprehensive index $PIDI$ of physical inspection of night cases (a1-a12) ($PIDI$ represent s the average change rate of $PIDI_{ttop}$, $PIDI_{dBZ}$, $PIDI_{\geq 30dBZ}$, $PIDI_{VIL}$ of influence area due to artificial catalysis)

4.3.3 $PIDI$ 指数统计

具有增雨正效果的 18 次增雨作业中，半数以上增雨作业的 $PIDI_{ttop}$ 、 $PIDI_{dBZ}$ 、 $PIDI_{\geq 30dBZ}$ 、 $PIDI_{VIL}$ 为正值 (表 5)，即影响区人工催化引起的云顶温度、组合反射率、 $\geq 30dBZ$ 回波面积、垂直累积液态

含水量表现正变化率；半数以上增雨作业的 $PIDI_{ref}$ 、 $PIDI_{optn}$ 、 $PIDI_{lwp}$ 为负值，即影响区人工催化引起的云粒子有效半径、光学厚度、液水路径表现负变化率。可见，对于该研究具有增雨正效果的作业，人工催化引起多数作业的云顶温度呈升高趋势，即云顶高度随之下降；人工催化引起多数作业的组合反射率、垂直累积液态含水量呈增加趋势；人工催化引起多数作业的云粒子有效半径、光学厚度、液水路径呈减小趋势。以上结果只针对该研究 18 次具有正效果的飞机增雨作业，统计性研究仍需更多大量样本。

垂直累积液态含水量、液水路径均为表征含水量的云物理量，但研究结果中两者呈相反趋势，分析其主要原因，垂直累积液态水含量作为雷达导出产品，表示将反射率因子数据转换成等价的液态水值，其假设所有反射率因子返回都是由液态水引起的经验导出关系，包含了液态、固态的水凝物含量。而液水路径作为卫星反演物理量，表示利用红外探测反演的液水含量，不包含固态水含量。因此，上述两种云物理量指示的对象差异是二者变化趋势存在差异的主要原因。此外，雷达及卫星的探测反演的系统误差，对研究结果也会产生微小影响。

表 5 具有正效果的 18 次增雨作业的各检验指标 $PIDI_i$ 正负值统计

Table5 Statistics of positive and negative values of $PIDI_i$ of 18 precipitation enhancement operations with positive effects

作业号	$PIDI_{ttop}$	$PIDI_{ref}$	$PIDI_{optn}$	$PIDI_{lwp}$	$PIDI_{dBZ}$	$PIDI_{\geq 30dBZ}$	$PIDI_{VIL}$	$PIDI_{rh}$
19	-	-	+	+	-	+	-	+
20	-	/	/	/	+	+	+	+
56	-	/	/	/	+	+	+	+
58	+	0	-	-	0	-	0	+
65	+	-	-	-	+	+	+	+
67	-	-	-	-	-	-	+	+
69	+	-	-	-	+	+	+	+
72	+	/	/	/	+	+	+	+
73	+	-	-	-	-	+	-	+
75	-	-	+	-	-	-	-	+
76	+	/	/	/	-	-	-	+
78	+	-	-	-	+	+	+	+
79	+	+	-	-	+	-	+	+
80	+	/	/	/	+	+	-	+
90	+	-	-	+	+	+	+	+
91	0	/	/	/	-	-	-	+
94	+	/	/	/	+	+	+	+
101	0	/	/	/	-	-	-	+
正值作业数	11	1	2	2	10	11	10	/
负值作业数	5	8	8	8	7	7	7	/
0 值作业数	2	1	0	0	1	0	1	/

注：“+”表示数值为正值，“-”表示数值为负值，“/”表示不作统计数据。

5 $PIDI$ 指数方法与 K 值方法物理检验的对比分析

以 2017 年 10 月 01 日飞机增雨作业（75 号作业）为例，对比分析基于 $PIDI$ 指数方法、 K 值方法的增雨效果检验结果，评估 $PIDI$ 指数方法的检验水平及应用性。二者的计算方式及表征含义存在差异（表 6）。

对比 *PIDI* 指数与各指标 *K* 值变化形势 (图 6.a), *PIDI* 数值为 7.7%, 认为影响区人工催化引起的 7 项指标平均变化率为 7.7%。*K_{ttop}*、*K_{ref}*、*K_{optn}*、*K_{lwp}*、*K_{dBZ}*、*K_{≥30dBZ}*、*K_{VIL}*、*K_{rh}* 数值变化范围分别为 0.4-0.7、0.3-1.7、0.5-1.2、0.2-1.1、0.7-1.1、0.4-1.4、0.6-1.1, 认为增雨作业后 3h 影响区与对比区的云顶温度、云粒子有效半径、光学厚度、液水路径、组合反射率、≥30dBZ 组回波面积、垂直累积液态含水量比值介于 0.2-1.7 之间, 各指标呈不规则波动变化, *K* 值无法反映出各指标在检验时段内的总体增减。对比 *PIDI_{rh}* 指数与小时降水量 *K* 值变化形势 (图 6.b), *PIDI_{rh}* 数值为 36.7%, 认为影响区人工催化引起的降水量变化率为 36.7%。*K_{rh}* 由 3.6 递增至 11.7, 表明增雨作业后 3h 影响区较对比区的降水量比值持续增大。基于这两种方法的增雨效果检验结果具有一致性。

表 6 *PIDI* 方法与 *K* 值方法对比

Table6 Comparison of <i>PIDI</i> method and <i>K</i> value method			
物理检验方法	计算公式	单位	表征含义
<i>PIDI</i> 指数方法	见文中公式 (10-11)	%	<i>PIDI_i</i> 表征影响区人工催化引起的某指标变化率; <i>PIDI</i> 表征影响区人工催化引起的所有检验指标平均变化率
<i>K</i> 值方法	$K = \frac{A}{B}$ A 为影响区某指标观测值; B 为对比区某指标观测值	无	影响区与对比区的某指标观测值比值

(a)

(b)

图 6 2017 年 10 月 01 日增雨作业 *PIDI* 综合指数与各指标 *K* 值的对比(a); *PIDI_{rh}* 指数与小时降水量 *K* 值的对比(b) (*PIDI* 表示影响区人工催化引起的 7 项检验指标平均变化率; *PIDI_{rh}* 表示影响区人工催化引起的小时降水量变化率; *K_{ttop}*、*K_{ref}*、*K_{optn}*、*K_{lwp}*、*K_{dBZ}*、*K_{≥30dBZ}*、*K_{VIL}*、*K_{rh}* 分别表示影响区与对比区的云顶温度、云粒子有效半径、光学厚度、液水路径、组合反射率、≥30dBZ 组回波面积、垂直累积液态含水量、小时降水量的观测值比值)

Fig.6 Comparison of *PIDI* and *K* value of each index(a); comparison of *PIDI_{rh}* and *K* value of hourly precipitation of p
recipitation enhancement operation on October 1st, 2017. (*PIDI* represents the average change rate of the seven indexes of infl
uence area due to artificial catalysis;*PIDI_{rh}* represents the change rate of hourly precipitation of influence area due to artif
icial catalysis;*K_{ttop}*、*K_{ref}*、*K_{optn}*、*K_{lwp}*、*K_{dBZ}*、*K_{≥30dBZ}*、*K_{VIL}*、*K_{rh}* represent the ratio of cloud top temperatur
e,effective particle radius,optical thickness,liquid water path,combined reflectivity,≥30dBZ echo area,vertical cumulative liquid
water content,hourly precipitation observed in the influence area to the contrast area,respectively)

6 结论与讨论

(1) 研究建立了人工增雨效果物理检验 *PIDI* 指数方法, 该方法优势在于: 一是引入相似性度量系数

APC 选取增雨作业对比区,以期最大程度削减增雨作业催化云体及其降水的自然变率影响;二是实现物理检验的指标综合性,采用无量纲化处理消除各云物理参数量纲和数量级差异性的影响,以无量纲化方法综合多种云物理探测参数;三是实现增雨效果检验结果的直观性和简洁性,最终以一个百分数变化率的数值形式综合度量多种探测参数的整体变化趋势及程度。

(2) 应用 *PIDI* 指数方法对 24 次飞机作业进行增雨效果物理检验。结果认为,综合统计日间个例(当日 17 时以前催化作业)与夜间个例(当日 17 时以后催化作业)的检验结果,人工增雨催化引起作业后 3h 的云顶温度、云粒子有效半径、光学厚度、液水路径、组合反射率、 $\geq 30\text{dBZ}$ 回波面积、垂直累积液态含水量 7 项云物理指标的平均变化率 3.4%~19.6%。各指标变化率分别为-17.0%~30.4%、-17.6%~3.8%、-8.7%~6.5%、-19.8%~3.4%、-22.6%~32.8%、-23.9%~32.6%、-14.5%~23.2%。24 次飞机增雨作业中,18 次增雨作业呈增雨正效果,小时降水量变化率 0~58.3%。6 次增雨作业呈减雨效果,小时降水量变化率-37.5%~0。多数增雨作业引起的云物理参数变化明显小于降水变化。

(3) 具有增雨正效果的 18 次增雨作业,人工催化引起多数作业的云顶温度呈升高趋势,即云顶高度随之下降;人工催化引起多数作业的组合反射率、垂直累积液态含水量呈增加趋势;人工催化引起多数作业的云粒子有效半径、光学厚度、液水路径呈减小趋势。以上结果只针对该研究 18 次具有正效果的飞机增雨作业,统计性研究仍需更多大量样本。

(4) 对比以 *PIDI* 指数方法、*K* 值方法进行 2017 年 10 月 01 日飞机增雨效果检验的结果。对于降水量变化趋势的检验二者具有一致性,二者差别在于 *PIDI* 指数方法能够反映人工催化引起的所有检验指标平均变化率。

(5) 基于 *PIDI* 方法的人工增雨效果物理检验的客观性和准确性受多种因素制约。其一,利用对比区作增雨效果检验时,即使对比区选取方法理论上科学合理,但自然界中有时不存在与作业影响区相似性极高的对比区,导致仍无法完全剔除云及降水的自然变率,在一定程度上影响基于该方法的增雨效果物理检验结果。其二,云降水探测误差对不同增雨作业过程的物理检验具有不同程度影响。比如,当增雨作业催化云体较厚时,风云静止气象卫星获取的信息无法准确反映催化引起的云中局部云水场变化,从而产生一定误差;当影响区或对比区距离邻近探测雷达较远时,探测回波误差对物理检验结果造成一定影响。

参考文献(References)

- Brimelow C J, Reuter W G. 2005. Transport of atmospheric moisture during three extreme rainfall events over the Mackenzie river basin[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 6(4): 423-440.
- 蔡兆鑫, 周毓荃, 蔡淼. 2013. 一次积层混合云系人工增雨作业的综合观测分析[J]. *高原气象*, 32(5): 1460-1469. Cai Zhaoxin, Zhou Yuquan, Cai Miao. 2013. Analysis on comprehensive observation of artificial precipitation enhancement operation for a convective-stratiform mixed cloud[J]. *Plateau Meteorology*, 32(5): 1460-1469.
- 陈英英. 2007. 利用 FY-2C 静止卫星资料反演云微物理参数的试验研究[D]. 南京信息工程大学硕士学位论文. Chen Yingying. 2007. Experimental Research of the Retrieval of Cloud Microphysical Parameters by FY-2C Geostationary Satellite Data[D]. M. S. thesis (in Chinese), Nanjing University of Information Science and Technology.
- Daniel Rosenfeld, William L W. 1993. Effects of cloud seeding in west texas: Additional results and new insights[J]. *J Appl Meteor*, 32: 1848-1866.

- 官福顺.2008.博弈论与人工影响天气效果评估初探[C]//中国气象学会 2008 年年会大气物理学分会场论文集.北京:中国气象学会,131-137. Guan Fushun.2008.Preliminary study on game theory and artificial influence weather effect evaluation[C]//Proceedings of the 2008 annual meeting of the Chinese meteorological society.Beijing:Chinese Meteorological Society,131-137.
- 国家气象中心.2007.卫星监测及反演产品在人工增雨效果检验中的应用初探[C]//中国气象学会 2007 年年会气象综合探测技术分会场论文集.北京:中国气象学会,361-364. National Meteorological Center.2007.Preliminary study on the application of satellite monitoring and inversion products in artificial precipitation effect inspection[C]//Proceedings of the 2007 annual meeting of Chinese meteorological society on integrated meteorological sounding technology.Beijing:Chinese Meteorological Society,361-364.
- 郭学良.2010.大气物理与人工影响天气[M].北京:气象出版社,618-620. Guo Xueliang.2010.Atmospheric physics and weather modification[M].Beijing:China Meteorological Press,618-620.
- 黄毅梅.2006.卫星反演云物理参数研究及其在人工影响天气中的应用[D].兰州大学硕士学位论文. Huang Yimei.2006.The cloud physical parameters are retrieved by using satellite data and their applications in weather modification[D].M. S. thesis (in Chinese),Lanzhou University.
- 贾烁,姚展予.2016.江淮对流云人工增雨作业效果检验个例分析[J].气象,42(2):238-245. Jia Shuo,Yao Zhanyu.2016.Case study on the convective clouds seeding effects in Yangtze-Huaihe region[J].Meteorological Monthly,42(2):238-245.
- 李大山,章澄昌,许焕斌,等.2002.人工影响天气现状与展望[M].北京:气象出版社,345-350. Li Dashan,Zhang Chengchang,Xu Huanbin,et al.2002.Current situation and prospect of weather modification[M].Beijing:China Meteorological Press,345-350.
- 李宏彬,赫光中,果秋婷.2015.基于皮尔逊相关系数的有机质谱相似性检索方法[J].化学分析计量,24(3):33-37. Li Hongbin,He Guangzhong,Guo Qiuting.2015.Similarity retrieval method of organic mass spectrometry based on the pearson correlation coefficient[J].Chemical Analysis and Meterage,24(3):33-37.
- 李开乐.1986.相似离度及其使用技术[J].气象学报,44(2):174-183. Li Kaile.1986.A new similarity parameter and its application [J].Acta Meteorologica Sinica,44(2):174-183.
- 李玲玉,郭亚军,易平涛.2016.无量纲化方法的选取原则[J].系统管理学报,25(6):1040-1045. Li Lingyu,Guo Yajun,Yi Pingtao.2016.Analyzing the principles for choosing dimensionless methods[J].Journal of Systems&Management,25(6):1040-1045.
- 李荣平,李剑玲.2004.多指标统计综合评价方法研究[J].河北科技大学学报,25(1):85-88. Li Rongping,Li Jianling.2004.Research on regional technique creativity and vires evaluation method[J].Journal of Hebei University of Science and Technology,25(1):85-88.
- 林丹,王维佳.2015.一次飞机增雨作业的云参数变化响应分析[J].高原山地气象研究,35(1):67-73. Lin Dan,Wang Weijia.2015.Case analysis of satellite-retrieved cloud parameters of artificial precipitation enhancement operation[J].Plateau and Mountain Meteorology Research,35(1):67-73.
- 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[J].气象,39(10):1359-1368. Liu Qing,Yao Zhanyu.2013.On physical evaluation of aircraft cloud seeding and case study[J].Meteorological Monthly,39(10):1359-1368.
- Malin G,David R,Chen D L.2010.Extreme rainfall events in southern Sweden:Where does the moisture come from?Tellus A, 62(5):605-616.

- 盛裴轩,毛节泰,李建国,等.2003.大气物理学[M].北京:北京大学出版社,315. Sheng Peixuan,Mao Jietai,Li Jianguo,et al.2003.Atmospheric Physics[M].Beijing:Peking University Press,315.
- 苏为华.2000.多指标综合评价理论与方法问题研究[D].厦门大学博士学位论文. Su Weihua.2000. Research on the theory and method of multi-index comprehensive evaluation[D].Ph. D. dissertation (in Chinese),Xiamen University.
- 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[J].气象,35(8):70-75. Tang Renmao,Xiang Yuchun,Ye Jianyuan,et al.2009.Application of data observed by several instruments in effective verification of artificial precipitation enhancement[J].Meteorological Monthly,35(8):70-76.
- 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[J].气象,36(4):96-100. Tang Renmao,Yuan Zhengteng,Xiang Yuchun,et al.2010.A method for selecting contrast cloud automatically based on radar echo in effectiveness evaluation of rain enhancement[J].Meteorological Monthly,36(4):96-100.
- 王佳津,王春学,陈朝平,等.2015.基于 HYSPLIT4 的一次四川盆地夏季暴雨水汽路径和源地分析[J].气象,41(11):1315-1327. Wang Jiajin,Wang Chunxue,Chen Chaoping,et al.2015.Analysis of a summer rainstorm water vapor paths and sources in Sichuan basin based on HYSPLIT4 model[J].Meteorological Monthly,41(11):1315-1327.
- 王以琳,姚展予,林长城.2018.人工增雨作业前后不同高度雷达回波分析[J].干旱气象,36(4):644-651. Wang Yilin,Yao Zhanyu,Lin Changcheng.2018. Analysis of radar echoes at different heights before and after precipitation enhancement[J].Journal of Arid Meteorology,36(4):644-651.
- 辛乐.2010.人工增雨效果物理检验应用技术研究及个例分析[D].中国气象科学研究院硕士学位论文. Xin Le.2010.Studies on the application technology of artificial precipitation effort evaluation and case studies[D].M. S. thesis (in Chinese),Chinese Academy of Meteorological Sciences.
- 祝晓芸.2016.江西省对流云火箭增雨作业效果检验技术方法研究[D].中国气象科学研究院硕士学位论文. Zhu Xiaoyun.2016. Technical methods study of convective clouds seeding effects in Jiangxi province by rockets[D].M. S. thesis (in Chinese), Chinese Academy of Meteorological Sciences.
- 周毓荃,陈英英,李娟,等.2008.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,34(12):27-35. Zhou Yuquan, Chen Yingying,Li Juan,et al.2008.Retrieval and preliminary test of cloud physical parameters from combination of FY-2C /D geostationary satellite data and other observation data[J].Meteorological Monthly,34(12):27-35.