

# 海南热带云人工影响天气作业系统

■ 黄彦彬 叶彩荣 敖杰 李光伟

海南省针对本地热带地区特色，建立了一套具有本地特色、现代化和集约化的海南省人工影响天气业务系统。该系统基于Web设计，功能集约，提供人影模式等数据预处理、云分析产品的分析显示、云风暴实时追踪、人影作业效果评估等功能，实现了人影弹药物联网全流程管理，并提供手机App给作业点作业人员提供作业预警、空域申请、资料上传等服务，实现了省级制作、市县、作业点应用的联动。

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.04.021

海南省属热带季风气候，干旱灾害是该区域仅次于台风的最主要的自然灾害之一，多年通过人工影响天气（简称“人影”）作业来缓解旱情。通过本系统建设，海南省实现了人影业务指挥上下互通，人工影响天气作业指挥、管理和业务科学化、现代化和集约化水平进一步提高。

## 1 海南省人工影响天气主要需求和作业手段

### 1.1 主要作业需求

海南省地处热带，年平均降雨量为1639 mm，地形复杂，四周低、中间高，地区降水分布不均衡，中部、东部、东北部多雨，年降水最多的琼中县超过2300 mm；西部及西南部少雨，西部的东方市不到900 mm，形成区域性缺水。此外，时间分布也不均匀，有明显的多雨季和少雨季特点。每年的5—10月是多雨季，总降雨量达1500 mm左右，占全年总降雨量的70%~90%。每年11月一次年4月为少雨季，仅占全年降雨量的10%~30%，形成季节性缺水，冬春连旱较早频繁，尤其西南部沿海带是突出的历史性干旱区，夏秋季由于降水变率大且空间分布不均，在降水较少的年份和地区也会发生干旱，因此干旱是海南省四季均可发生的、影响范围最广的灾害性天气

旱灾是海南省仅次于风灾的气象灾害，旱季一般出现在每个年度的11月一次年5月，有的年份可延长到8月。每年的3—6月，由于连续几个月的干旱，又逢高温天气、蒸发旺盛之时，河流水量达到最低点，海南省的各个大、中、小水库的水位也是在最低

点上，水电站濒临无水发电的困境，橡胶、水稻、甘蔗等经济作物也正处于最需要水的时候。因此每年的3—6月需要通过人工增雨的手段增加降水量、缓解旱情，有些年份由于干旱蔓延，人工增雨作业往往延长到7—10月甚至全年。

### 1.2 作业手段

海南省人工增雨作业的主要对象为热带积雨云和积层混合云，作业季节基本没有大范围的层状云系适合飞机播云作业，因此海南省主要作业手段为地面作业装备，包括火箭和烟炉。

火箭作业设备主要采用“BL-1A”型火箭，该型火箭系统具有GPS自动定位、自动调整发射方位仰角等功能，还可以视频监控火箭作业、自动上传作业参数。根据海南省热带降水云以对流云和积层混合云为主的特点，设置流动作业点，将皮卡车作为移动平台，根据云的发展演变情况随时调整作业位置，机动灵活。该型火箭可根据云的性质发射冷云和暖云火箭弹，根据统计，海南省火箭人工增雨作业可相对增加雨量24%左右。

近年来，在海南中部山区和水库水源地还安装了暖云人工增雨地面催化发生器（简称地面烟炉），播撒的人工增雨催化剂为吸湿性焰剂，作业方法是在暖云、暖底对流云和混合性对流云的云底上升气流区域播撒大的或巨型的吸湿性粒子，当这些粒子进入云中后，通过水汽凝结增长，优先形成更大的云滴，与其它小云滴碰撞后，形成雨滴、冻滴或冰雹，最后降落

收稿日期：2019年7月1日；修回日期：2020年6月1日

第一作者：黄彦彬（1967—），Email: yanbinhuang@139.com

资助信息：2014年度公益性行业（气象）科研专项项目（GYHY201406033）；国家自然科学基金（41865009）

到地面。

烟炉人工增雨作业解决了山区交通不便、申报空域困难等问题，中西部五指山区受地形抬升影响，暖性降水云资源丰富，增雨效果明显，黄彦彬等通过5年的随机化人工增雨效果外场试验，分析了昌江、五指山烟炉的增雨效果，可以相对增加降水量11.4%左右。

## 2 热带人工影响天气业务系统的构建

### 2.1 系统主要功能设计

海南自主开发建立起一套与气象信息系统、预报预测系统有机衔接、统一集约的省级人影指挥系统（含手机App），移植开发运用国家级CPAS核心功能，实现省级—市县级（作业点）全省人影业务上下互通、功能互补、规范集约（图1），子系统分别有资料信息采集、综合处理分析与指挥、数据存储管理以及共享与指令发布（含手机App）等功能。实现对卫星、雷达、探空、自动站、雨滴谱、闪电定位等监测数据及MICAPS、SWAN等分析产品的综合处理显示，具有作业装备数据上传、作业指挥自动化、作业效果评估和安全监控等功能。

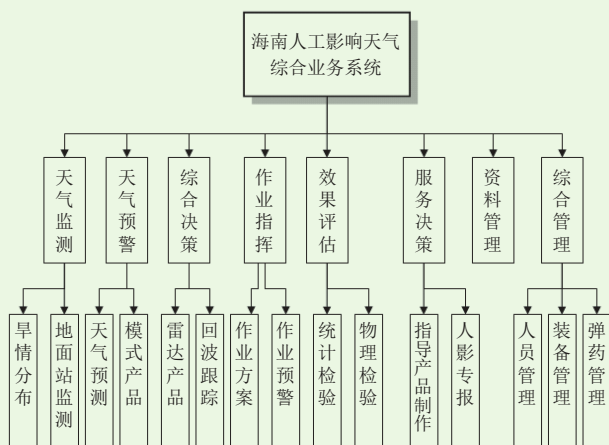


图1 业务系统框图

### 2.2 系统核心功能

根据中国气象局五段式人影业务流程规范，利用中国气象局下传的人影模式、卫星等数据产品制作作业条件预报、过程预报产品并发布，指导作业。

在大范围天气系统背景影响下，制作的潜力落区与实际作业区吻合度较高，但对于午后生成的局部热带对流云系的吻合度较低，潜力落区及作业预案合理性比率2017年为85.19%、2018年为87.09%。

根据云降水宏微观精细结构分析、卫星云特征参量、探空云分析、省气象台的短临预报和灾害性天

气预警，雷达实时监测产品，地面自动站实况以及雨滴谱实测资料，利用TITAN风暴识别追踪技术外推算法，当雷达监测目标云系回波强度 $\geq 20$  dBz、云顶高度 $\geq 5000$  m时，制作并滚动订正作业条件监测预警和作业方案，并向实施作业人员的手机app上推送（图略）：预警时效为未来0~2 h，发布时间为作业前3~0 h，可实现每1 h滚动订正发布。

2016年海南初步建立了五段业务指导产品，2017年进行业务化试运行，2018年实现业务化正式运行。2017年1月—2018年6月15日，海南共作业78次，作业前3~0 h发布地面作业方案设计报，预警时效为未来3 h，共发布50期，占作业次数的64.1%，覆盖了所有作业时段。

作业期间，省指挥中心利用实时雷达监测数据以及TITAN风暴识别追踪技术外推算法，对目标云系进行雷达回波垂直剖面特征层分析，测算各作业点作业参数，汇总并订正成作业指令后向地面作业人员手机App实时、准确发布；利用空域申报系统及时申请作业空域；利用手机App交互功能实时收集作业信息并上报。地面作业人员根据手机App接收到的作业指令和空域批复回复结果，安全、迅速开展作业；利用手机app交互功能实时上报作业信息。手机App极大提高了我省人影地面作业效率、作业安全水平。

### 2.3 作业效果评估

我国业务化的人工影响天气作业效果检验主要包括：一是基于地面降水量的统计检验技术方法；二是基于天气雷达探测资料的物理检验技术方法。基于地面降水量的统计检验技术方法，即采用作业影响区和对比区的降水量相关关系估算作业期间作业影响区的自然降水量，主要用于对某一时段内的累积作业样本进行作业效果的检验；而基于天气雷达探测资料的物理检验技术方法，通过对作业前、作业后作业云体单元和对比云体单元的雷达回波物理参量的时间序列进行对比分析得到催化作业的物理证据，主要适用于单次作业过程的效果检验。

#### 2.3.1 统计检验

业务化的人工增雨统计效果评估系统受制于现有效果评估技术的限制，主要采用：1) 固定增雨率法：孤立对流云单次作业后的效果评估的业务需求，由于海南很多孤立对流云作业无法找到合适的对比云系，国内外目前尚没有成熟的孤立对流云单次作业评估方法，因此本系统采用国内有名的古田对流云人工增雨随机化效果检验的结果，取固定的相对增雨率等于23.8%，设定固定的增雨率计算本次作业的增雨

量, 增水量、直接经济效益等, 待以后进一步的科学研究得到相对客观科学的海南省人工增雨效果评估方法再对系统进行调整。2) 直接对比法: 系统后台对作业期间的对流云进行自动对比筛选, 找出相似度最高的对比云, 根据作业云的影响区域和作业云的影响区域的平均雨量计算增雨量、增雨效率、增水量等。3) 区域历史回归法: 按照不同天气类型, 建立全省历史回归方程, 计算得出每个回归方程及显著度。作业后, 自动选取一个相关显著度最好的区域作为对比区域。根据对比区和影响区自动雨量站的实际雨量, 来计算增雨量, 主要用阶段性旬、月和长时间序列业务型人工增雨作业效果的评估。最后将效果评估过程涉及的影响区、对比区、评估结果以及作业信息等一并保存, 推送到专用数据库。

### 2.3.2 物理检验

崔丹等、黄彦彬等根据热带云系的自然降水形成原理和降水特征, 利用雷达资料总结了海南人工增雨物理检验方法。海南省人工影响天气业务系统进一步发展了物理检验方法, 移植开发了TITAN风暴识别追踪技术, 自动定位火箭和烟炉作业的影响云, 系统根据相似度原则自动匹配对比云, 对影响云-对比云的雷达产品物理量(最大强度、平均强度、强回波高度、回波顶高、液态水含量VIL、强中心位置、垂直强中心强度、垂直强中心高度、45 dBz回波顶高、不同强度等级面积等参量)自动绘制作业前后时间变化曲线; 若对比云条件不满足, 则对作业前后的雷达产品物理量进行对比分析, 判断播云催化后导致的宏观动力效应和微观物理响应的直接效果, 依据制定相应阈值指标的对比, 检验人工影响是否显著改变这些指标。以图表形式给出作业云和对比云变化特征的对比结果, 手工添加部分作业过程的描述和对比分析文字后就可以快速生成业务化的对流云人工增雨物理效果检验word文档产品报告。

黄彦彬等利用系统对2015—2018年昌江县霸王岭人工增雨烟炉随机化物理效果外场试验进行了检验, 结果显示: 处于增长阶段的积雨云, 人工催化后积云组合反射率、液态水含量、回波顶高与未催化样本相比出现明显差异, 催化样本人工催化后普遍组合反射率增强、含水量增大、回波顶高升高; 而相对于减弱阶段的积云, 多数催化样本人工催化后出现回波减弱趋势减缓。

### 2.4 手机app

系统采用B/S结构(Browser/Server, 浏览器/服务器模式), 由指挥系统、数据处理系统、app服务系

统以及App四部分组成。指挥系统使用GIS技术显示作业地区的地理信息, 实时显示气象局内部网络中的雷达图等资料, 为作业指挥人员的决策提供数据支持。指挥人员确定作业区域和时间后, 软件自动为相关火箭作业点生成详细作业参数, 并将作业指令通过App服务系统发送给一线作业人员。

数据处理系统实时从气象内网获取雷达、探空、卫星等数据, 进行实时处理监测, 当存在天气过程时候, 自动生成预警指令信息, 通过App服务系统发送给作业人员。

系统由指挥系统、数据处理系统、App服务系统以及App四部分组成。指挥系统安装在气象局人工影响天气部门的计算机上, 使用GIS技术在屏幕上直观地显示作业区域地图和作业点分布位置, 通过气象内部网络获取最新雷达资料等基础数据并在地图上叠加图层显示。指挥人员对实时气象资料进行分析后在地图上选择作业点, 输入包括方位角、仰角和用弹量在内的作业指令。待指挥中心向空域管理部门申请空域批复后, 指挥系统将作业指令发送到App服务系统。App服务系统安装在具有独立公网IP地址的服务器上, 负责维护指挥中心和作业点之间的连接, 接收来自指挥中心的作业指令并将其转发到各个作业点配备的指令接收机。

作业指令接收程序安装在各作业点配备的智能手机上。指令接收程序通过无线GPRS网络连接到指令中转服务器, 即时获得作业信息并显示在手机屏幕上。一线作业人员根据收到的参数进行作业, 然后将实际操作情况反馈回指挥系统。最后指挥中心将实际作业情况存入数据库系统, 以便后续资料分析和处理。

## 3 小结

1) 基于热带云系人工影响天气实际构建了业务系统, 为海南省人工影响天气作业提供了发挥了关键业务支撑作用, 系统界面友好, 操作简单和快捷, 在2015—2018年中国气象局“人工影响天气现代化三年行动计划”实施过程中全面提高了海南省人工影响天气现代化水平。

2) 系统设计集约, 提供人影模式等数据预处理、云分析产品的分析显示、风暴云实时追踪、人影作业效果评估等功能; 从流程上能实现省级制作、市县应用的两级联动, 对提高海南省人影业务的科学性、高效性具有重要意义。

3) 手机app的交互功能自动实时采集各作业点的

(下转127页)

作业信息并在作业结束后即时存至省级人影指挥系统的数据库内,实现了作业后作业信息的即时上报,提高了人影作业信息的上报时效;弹药安全管理系统实现了火箭弹从产品出厂到运输、仓储、转运、发射等全流程跟踪管理,全面提高了安全监管水平。

4) 通过人工影响天气业务系统,建立并完善了人影五段实时业务流程,通过五段实时业务指导产品的制作发布,迅速改变了以往地面人影作业盲目性大和作业方式简单、粗放、随意、低效等问题,从五段业务内容的完整性、产品发布的实时性和作业指挥的合理性等方面加强要求,省级指挥人员与地面作业人员的业务衔接更为流畅、产品指导性更强、指挥准确性更高、作业时效性更好,五段实时业务指导产品的科技内涵得以显著提升。

5) 系统作业指挥、效果评估的核心为TITAN系统的移植、开发和本地化处理,利用TITAN风暴追踪技术,可以快速识别作业云-对比云,自动计算作业云和对比云的相似度,根据相似度选择两者对比的雷达参数,在一定程度上消除了人为主观判断的误差,提

高效率检验的科学性。但由于对对流云发展演变过程中云的并合、分裂导致TITAN追踪失败出现bug,系统仍需要进一步优化和不断改进。

### 深入阅读

- Tessendorf S A, Bruitjies R T, Weeks C, et al, 2012. The Queensland cloud seeding research program. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(1): 75-90.
- 曾光平, 吴明林, 林长城, 等, 1993. 古田水库人工降雨效果的综合评价. *应用气象学报*, 4(2): 154-161.
- 崔丹, 黄彦彬, 肖辉, 等, 2012. 多普勒雷达数据在海南省人工增雨效果评估中的应用. *大气科学学报*, 35(1): 87-94.
- 黄彦彬, 李天富, 李春鸾, 等, 2006. 2004年春夏季海南火箭人工增雨效果检验. *广东气象*, 28(1): 50-53.
- 黄彦彬, 毛志远, 邢峰华, 等, 2019. 海南岛西部山区人工催化暖底积云随机化效果检验. *气象科技*, 47(3): 487-495.
- 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. *气象*, 42(2): 238-245.
- 王婉, 石玉恒, 李宏宇, 等, 2014. 对流云人工增雨效果检验技术方法及应用. *气象科技*, 42(6): 1131-1136.
- 周毓荃, 潘留杰, 张亚萍, 2009. TITAN系统的移植开发及个例应用. *大气科学学报*, 32(6): 752-764.

(作者单位: 黄彦彬、敖杰、李光伟, 海南省人工影响天气中心, 海南省南海气象防灾减灾重点实验室; 叶彩荣, 海南省气象服务中心, 海南省南海气象防灾减灾重点实验室)