

贵州省人工影响天气作业效果评估系统研究

唐辟如¹, 刘国强^{2*}, 彭宇翔¹

(1. 贵州省人工影响天气办公室, 贵州 贵阳 550081;

2. 贵州省气象信息中心, 贵州 贵阳 550081)

摘要:人影作业的效果检验一直是当前人工影响天气工作的技术难题,然而又是人工影响天气工作中不可或缺的重要环节之一,因此,根据贵州省的干旱情况与地理环境,并结合贵州省的人影地面作业特点,基于C++进行开发,采用模块化和层次化的设计原则,以多种气象数据为基础,通过历史数据法、回归法、双比法及雷达物理检验等多种方法对气象及人影地面作业数据进行处理和分析,建立了集统计算法模块、物理算法模块和GIS模块于一体的贵州省人工影响天气作业效果评估系统。应用结果表明,该系统具有可扩容性高、可用性强和效率高等优点,实现了对人影作业的统计检验效果评估和物理检验效果评估,并构建了翔实的人影作业数据库,对进一步提升贵州省人工影响天气作业的科学性、准确性和及时性具有一定意义。

关键词:人工影响天气;效果评估系统;统计算法模块;物理检验模块;GIS模块

中图分类号:TP31

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2022)0138-06

Research on Effect Evaluation System of Weather Modification in Guizhou Province

TANG Pi-ru¹, LIU Guo-qiang^{2*}, PENG Yu-xiang¹

(1. Weather Modification Office of Guizhou Province, Guiyang 550081, China;

2. Meteorological Information Center of Guizhou Province, Guiyang 550081, China)

Abstract: The effect test of weather modification operations has always been a technical problem in the current weather modification work, but it is also one of the indispensable and important steps in it. Therefore, according to the drought and geographical environment of Guizhou Province, combined with the characteristics of weather modification ground operations in Guizhou Province, it is developed based on C++ and the modular and hierarchical design principles with a variety of meteorological data, the meteorological and weather modification ground operation data are processed and analyzed through historical data method, regression method, double ratio method and radar physical inspection, and a Guizhou artificial weather operation effect evaluation system integrating statistical algorithm module, physical algorithm module and GIS module is established. The application shows that the system has the advantages of high scalability, strong availability and high efficiency, realizes the statistical inspection effect evaluation and physical inspection effect evaluation of weather modification operations, and constructs a detailed weather modification operation database, which is of certain significance to further improve the scientificity, accuracy and timeliness of weather modification operations in our province.

Key words: weather modification; effect evaluation system; statistical algorithm module; physical inspection module; GIS module

0 引言

近十几年来,全球干旱、冰雹、台风等气象灾害发生频率逐渐提高^[1-2],随着经济的发展和人民生活水平的提高,社会、民众对人工影响天气的关注度也不断增强,在与各种自然灾害长期斗争的过程中,人工影响天气逐渐展起来的,它是降水物理学和云为基础的一门应用技术科学^[3],而提高人影作业准确性、科学

性、安全性是促进人工影响天气作业的关键保障。只有认真总结分析每一次作业后的效果,从中发现问题与不足,才能不断靠拢精准作业、科学作业和安全作业。因此,建立适合本省天气变化以及人影作业特点分析的人工影响天气作业效果检验系统显得尤为重要。

近年来,很多研究学者对人工影响天气效果检验

收稿日期:2021-08-24

基金项目:贵州省科技计划项目(黔科合基础-ZK[2021]一般217)

作者简介:唐辟如(1992-),女,硕士,工程师,研究方向为人工影响天气业务技术;通信作者:刘国强(1981-),男,高工,研究方向为气象信息化和人工影响天气技术。

进行了研究和分析,鲍向东^[4]等基于大数据和云平台等研发具有本省特色的人影综合业务系统,集成了作业效果分析评估功能,提升了河南省的人影作业实施的及时性和安全性;谢勇^[5]基于增雨作业信息、降雨量等建立了一套江西省人工增雨物理检验效果平台;杜景林^[6]等基于统计检验与回归分析理论研究,实现了基于降水和气温等资料多指标综合性判别的作业效果评估等,然而每一个地区,由于地势、气候条件的差异以及农业需求等的不同,人影作业的重点也各不相同,进而影响人影作业效果的因素及因素权重也不尽相同。

因此,为进一步提升贵州省人工影响天气作业的科学性、精准性,本研究基于本省地面气象站的降水数据、雷达数据、地理信息数据以及实时的人影作业相关数据,利用统计检验、物理检验等手段建立适合本省特

色的人工影响天气作业效果评估系统。

1 系统设计

1.1 系统总体设计

贵州省人工影响天气作业效果评估系统采用模块化、层次化的设计原则,具有可扩容性高,可用性强、可靠性高、效率高等优点。该系统由数据层、处理层、应用层和用户层共4大层面组成,其中数据层存储系统的所有数据,主要包括人影作业数据、雷达数据、降水数据和地理信息数据等;处理层基于序列分析、区域历史回归分析、图像识别等对相关数据进行计算处理;应用层通过对特定增雨量的相关分析、雷达云体识别追踪等建立对人影作业的统计检验效果评估和物理检验效果评估;用户层主要包括省、市、县三级人影部门。系统的总体框架见图1。

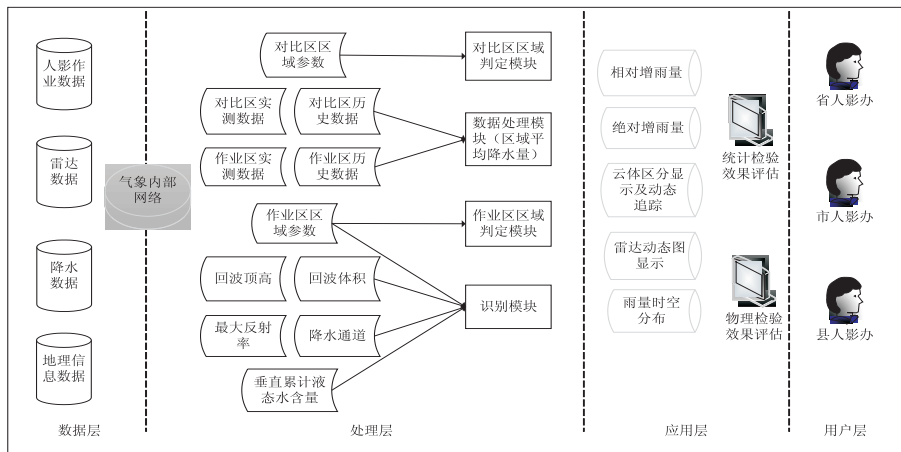


图1 系统总体框架

1.2 系统的功能设计

基于gis的人工影响天气作业效果评估系统主要包括6个功能模块:地图模块、查询模块、资料处理模

块、统计检验模块、物理检验模块和用户管理模块,如图2所示。

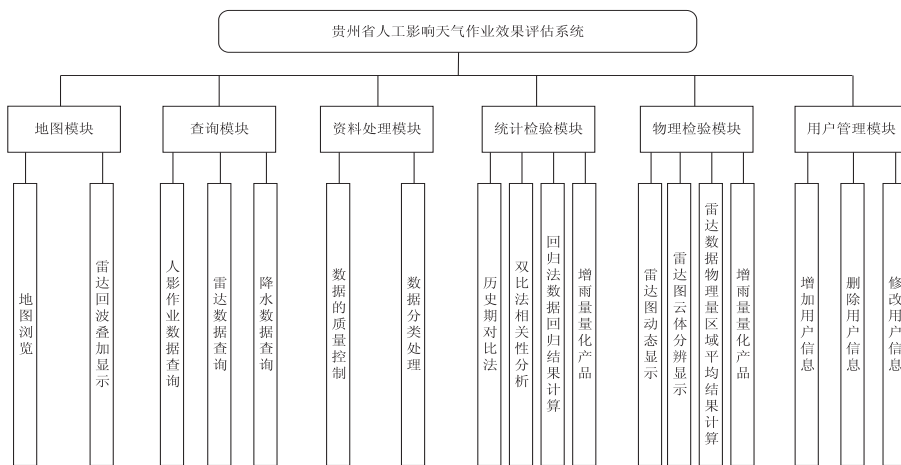


图2 系统功能结构

(1) 地图模块。

进入系统后,系统提供在地图上查看基础信息的功能,主要包括全省雨量空间分布、雷达回波图显示、

云体图空间分布、人影作业点分布等,且可以对两个及以上的云体进行区别显示和动态追踪,同时包括基础的底图操作功能,如放缩和测距等。

(2) 查询模块。

系统收集并建立相关的数据资料库,主要包括详细的人影作业信息、降水量数据库、雷达资料等,通过系统可以快速的查询用户所需的某一次作业过程的人影作业情况(作业站点经纬度、作业时间、用弹量或飞行轨迹、飞行高度、催化剂使用情况等)、降水情况(作业前后作业区域的降水数据)和雷达资料(作业前后相应位置的雷达变化发展情况等),并对于想提取的数据进行统计、导出等。

(3) 资料处理模块。

主要实现资料数据的提取、数据的质量控制、数据的分类处理及错误的前台显示等功能。

(4) 统计检验模块。

地面降水量是统计检验的主要评估对象,其原理主要是对未进行人影作业的自然降水量与人影作业后的降水量进行差值处理,并对其进行显著性分析。主要包括历史期对比法、双比法相关性分析、回归法数据回归结果、增雨量计算等。

(5) 物理检验模块。

物理检验的依据主要是云和降水形成的原理以及人工影响机制,基于遥感探测、示踪技术和直接探测等多种探测技术,测量催化作用带来的直接效果,制定相关的指标,从而检验人影作业是否明显改变相关指标^[7]。主要包括雷达动态图显示、雷达云体图分辨显示、雷达数据物理量区域平均结果计算、增雨量量化计算等。

(6) 用户管理模块。

考虑系统的安全性,该系统设置了权限管理功能,系统管理员拥有增加、修改和删除用户信息的权限,对系统数据库的基本信息可以修改和增减,而一般用户只有查询、浏览、统计等主要功能。

2 系统数据支持

(1) 降水数据。

来源于地面气象站收集的日雨量数据。由于雨量资料文件受到站点仪器质量、搬迁站、站点启用关闭时间不同等因素影响,未经过质量检验,因此,在计算前首先对雨量数据进行检验,并剔除不可用数据,在进行统计之前将 micaps 雨量资料数据整理成标准的站点通用格式,形成本地的按照以站点作为维度的日雨量数据集。在此基础上,根据本地不同天气气候特点、降水量等级和降水类型等,对本地的日雨量数据集进行分类,形成本地不同类型的日雨量数据集。

(2) 雷达数据。

雷达数据来源于贵州省内七部雷达的原始基数据,由于基数据通常无法直接进行计算和使用,增加一

个对雷达基数据进行中间处理的模块,该模块不但可以作为后续计算的接口,并具有较好的延伸开发性,同时还可以提供雷达资料绘图功能。经过中间处理的模块可以较为便利的和后面的产品模块接驳,通过底层 OpenCV 的阈值填充算法结合最先进的图像识别和机器学习算法可以自动进行云区的识别、自动化云区推演和回溯。

(3) 人影作业数据。

人影作业数据来源于贵州省人工影响天气办公室,主要包括作业站点基本信息(作业点经纬度、作业工具、弹药型号等)和作业实时信息(作业时间、作业方位角、作业用弹量、飞行轨迹、催化剂种类、使用焰条数量等)。

(4) 地理信息数据。

基础图层来源于国家基础地理信息中心。高分辨率、高精度的数值模式数据,用来确定对比区。作业影响区的侧风方或上风方常作为对比区,所以对对比区选择的关键因素是准确的风速和方向的分析 and 预报。

3 系统实现的关键技术

系统基于 C++ 进行开发,界面引擎以 Qt 为主,绘图部分采用 NCL 等,算法部分基于 Fortran,地理信息采用开放地图接口实现。

3.1 统计模块

统计检验是人工增雨效果检验的基本方法,对未进行人影作业的自然降水量与进行人影作业后的降水量进行差值处理,再对其进行显著性分析,这种方法有利于评价作业有效性,估算效益比和开支^[8]。

本系统中采用的统计检验方案有两种,分别是考虑两个区域并使用数值方法拟合技术的区域历史回归分析和仅基于单站的序列分析,统计变量选择区域降水量,除了序列分析,其他方案进行作业效果统计检验时,均需要事先确定对比区和目标区(即作业影响区)。本系统使用区域历史回归统计检验方法进行人影作业效果检验,因为基于同样的样本,该方法具有准确度高、功效高等优点^[9]。

3.1.1 统计模块设计和历史数据整理

任何地面火箭、烟炉作业个例以及飞机作业个例,只要获得详细的作业信息(地面火箭、烟炉作业信息包括作业方位角和仰角、地面作业点经纬度、作业起止时间、作业用弹量等;飞机作业信息包括飞机飞行轨迹、催化剂种类和机载作业装备、飞行作业温度和高度、作业起止时间、作业剂量等)、空间和时间覆盖整个作业过程的地面降水量资料和相关历史降水量资料,均可利用本系统基于地面降水量的区域历史回归统计检验方法。

人工增雨作业效果统计检验的进行通常针对地面降水量,由于小时雨量区域相关性较差,自然变率较大,因此选择日降雨量为主要评估要素,其区域相关性更好,自然变率比小时雨量的小。

3.1.2 作业区位置选择

作业区的选择由计算算法自动完成,通过读取作业信息,算法会自动通过作业中心点扩散法进行自动化的区域选择。根据实际作业情况(作业工具、作业点或飞行作业轨迹、作业仰角和方位角或催化剂及用量、催化作业高度等)结合作业影响时效、作业高度的高空风等需要进行综合判断。

不同的催化作业方式对应不同的作业影响范围估计算方法,可将作业区近似为点源播撒或线源播撒,结合点源或线源扩散理论,以及考虑地面火箭的有效射程,我们评估确定作业影响区范围的大致缺省值。

3.1.3 对比区位置选择

在选择了作业区以后,作业区的数据点会自动的在地图上呈现给用户,并给出附近可以作为对比区参考的所有气象站位置作为参考,用户可以根据作业区的位置、范围,轻松通过点选的方法选择附近的区域的气象站作为对比区站点,系统会自动记录任务。

3.1.4 作业区历史序列统计

作业影响区自然降水量在历史上是平稳的时间序列,是作业区历史序列统计的假设,以作业影响区历史期降水量的历史统计数据作为作业期自然降水量的参考,而后与作业期实测降水量进行对比分析,进而得出人工增雨效果定性结果。本计算主要统计的是作业区域内的站点,在历史期所有降水作业所在月份,发生降水的降水量情况,用“降水量级-发生频次”的表达方式进行呈现,并点出此次降水作业后,作业区的实际降水量,让用户对于此次降水有一定的定性评估。

3.1.5 计算相关性、建立回归方程、计算增雨量

本系统运用所选对比区和作业影响区的历史雨量资料,对两个区的区域平均降水量进行相关分析,两个区区域平均降水量的相关程度由相关系数的大小

反映。

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

γ 表示区域相关系数,式(1)中的分子为协方差 $S_{xy} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$,分母为标准差 $S_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$ 与 $S_y = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$ 的乘积,其中 x_i 是历史期对比区的平均降水量、 \bar{x} 是历史期对比区平均降水量的平均值、 y_i 是作业影响区平均降水量、 \bar{y} 是作业影响区平均降水量的平均值。

$$y = a + bx \quad (2)$$

$$b = \frac{S_{xy}}{S_x^2} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - n\bar{x}\bar{y}}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - n\bar{x}^2} \quad a = \bar{y} - b\bar{x}$$

式(2)为一元线性回归方程,其中系数 b 的分子和分母分别表示历史期对比区、作业影响区平均降水量的协方差和历史期对比区平均降水量的方差。

定量的增雨效果评估可通过历史回归算法计算得出,即将作业期对比区实测的区域平均降水量代入回归方程可计算出作业期作业影响区自然降水量的估计值, Y_2 即为作业期作业影响区自然降水量的估计值^[10]。

其中,式(3)为绝对增雨量,式(4)为相对增雨率:

$$O_{HR} = Y_2 - Y_1 \quad (3)$$

$$R_{HR} = \left(\frac{Y_2}{Y_1} - 1 \right) \times 100\% \quad (4)$$

3.2 物理模块

根据实际作业影响区,在雷达图中选定作业云体,在数据中输入作业云体单元、作业时间,在雷达图界面选择对比云体,数据输入对比云体单元,再通过物理算法进行效果检验(物理算法流程见图3),最后可视化模块将根据算法输出结果进行可视化展示。

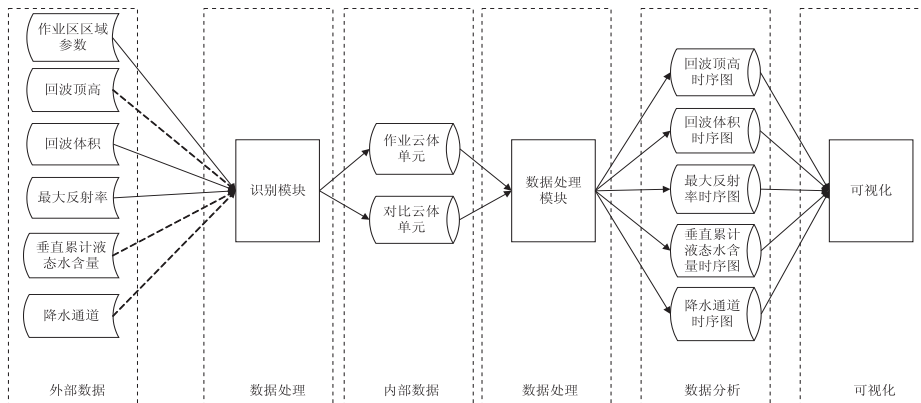


图3 物理算法流程

3.2.1 确定需要计算的雷达物理量

天气雷达探测的物理量有很多,本系统主要采用回波体积、回波顶高、降水通量、垂直累积液态水含量和最大反射率进行播云作业效果的物理检验。

3.2.2 确定云体单元

基于覆盖作业过程的雷达探测基数据资料,在雷达探测回波图上点选作业位置的大概点,再利用 OpenCV 的阈值分割算法,可以自动的确定准确作业区域,确定作业云体单元。

另外,在雷达探测范围内,根据所选取的回波反射率和回波体积两个特征值的阈值,识别出与作业云体单元发展演变比较类似的云体(特别是作业前与作业单元发展趋势相似的云体),进行选择,通过同样的简单点选,确定对比云体信息。

3.2.3 自动追踪识别

对自动识别出的作业云体和对比进行追踪,并产生出整个生命期的雷达图信息和物理量变化信息。

3.2.4 对比云体单元和作业云体单元的时间序列变化的对比分析

本系统选择上文中 5 个雷达探测物理量分别绘制出对比云体单元和作业云体单元物理量随时间的变化曲线,并时间序列变化进行分析。

3.2.5 物理模块算法

在图像识别中我们主要用到的是阈值自适应分割算法,其实现方法是:1. 根据选择行数 and 列数的需要将图像均匀分为若干行列的子图像;2. 通过全局阈值化方法对每一个子图像求出最优阈值,并用图像表示;3. 再将表示阈值的图像先进行延拓和滤波处理;4. 子图像的新阈值则是滤波的结果,对每个子图像进行阈值化处理^[11]。

而在图像追踪识别的时候,使用的是模板匹配。模板匹配的方法之一是在一幅图像中寻找一个特定目标,当相似度足够高时,就认为找到了目标。

$$R(x, y) = \sum_{x', y'} [T(x', y') - I(x + x', y + y')]^2 \quad (5)$$

在计算雷达的液态水含量的时候,具体步骤是:(1)在识别云体的的任一层高度中,找出该层 DBZ 值最大的格点;(2)将该值转换成反射率因子 $Z = 10^{(\frac{DBZ}{10})}$ (单位: mm^6/m^3);(3)由反射率因子 Z 计算水物质密度 $M = 3.44 \times 10^{-3} Z^{0.7}$ (单位: g/m^3);(4)在垂直方向将单元体内每一层的水物质密度 M 从零度层高度到层顶高度做积分处理 $VIL = \int_{z_0}^{z_T} M dz$ (单位: g/m^2)。

在计算雷达的降水通量的时候,具体计算步骤为:(1)通过在水平投影面格点逐点找出 DBZ 阈值所识别出的某单元体的垂直方向上最大 DBZ 值,并将其转

换成反射率因子 $Z = 10^{(\frac{DBZ}{10})}$ (单位: mm^6/m^3);(2)根据 Z (反射率因子)与 R (降水率)的经验关系(Z—R)计算降水率 $R = (\frac{Z}{200})^{1.6^{-1}}$ (单位: mm/h);(3)将降水率 R 乘以格点面积,得到格点面积上的降水通量 $\Delta P_{flux} = \Delta A \times R$ (单位: m^3/s);(4)将单元体水平方向投影面所有格点上的降水通量求和,即可得到该单元体总降水通量 $P_{flux} = \sum \Delta P_{flux}$ (单位: m^3/s)。

4 系统实现结果及性能

该系统基于地面气象站的降水数据、雷达数据、地理信息数据以及实时的人影作业相关数据(地面作业点经纬度、作业方位角和仰角、作业用弹量、作业起止时间等);飞机作业信息主要包括飞机的飞行轨迹、机载作业装备和催化剂种类、飞行作业高度和温度、作业剂量、作业起止时间等),进而实现历史作业数据回查、统计检验、物理检验等功能,系统的操作主界面如图 4 所示。



图 4 系统操作主界面

通过该系统可以随时查询全省人影历史作业情况(地面作业时间、作业点经纬度、作业批复时间、用弹量等);飞机飞行起止时间、催化剂播撒时间、飞行轨迹、催化剂种类以及焰条使用情况等)、降水数据(时间和空间覆盖相关历史降水量资料和整个作业过程的地面降水量资料)、雷达数据等。系统对已有的资料进行处理分析,可以实现从界面读入数据后自动化数据处理、提供自动选择将参数合并到气象观测站进行计算,得到合理的量化产品;实现在雷达回波图及云体图上叠加作业点信息,对两个云体区别显示编号并动态追踪,通过对雷达基数据物理量诊断得到合适的衍生量,并用合理化指标进行增雨量化评估。系统通过进行历史期对比法相对增雨量、历史期对比法绝对增雨量、双比法相对增雨量、双比法绝对增雨量、雷达数据物理量增强显示等分析可以形成统计检验和物理检验增雨效果评估,能快速、科学、有效的对人影增雨作业进行效果评估,既便于后期科研工作的开展,又能通过效果评估,发现作业的不足(作业时间不及时、作业部位有偏

差等),进而能更好的把握作业时机,找准作业最佳方位,进一步靠拢科学作业、精准作业。

5 结束语

本系统基于地面气象站的降水数据、雷达数据、地理信息数据以及实时的人影作业相关数据,实现了地图模块、统计模块、物理检验模块等一系列功能,已成功地应用到实际人工影响天气工作业务中,建立了一套完整详实的作业信息数据库,积累了人工增雨两个例的历史数据,实现了人影作业效果评估分析,为人影作业的科学性、及时性奠定基础。同时系统设计严格遵循软件工程“高内聚,低耦合”设计理念,结合了NCL绘图、Fortran算法等方法,所使用的地理信息采用开放地图接口实现,使系统具有良好的运行速度和扩展性。

参考文献:

- [1] 张庆云,陶诗言,彭京备.我国灾害性天气气候事件成因机理的研究进展[J].大气科学,2008,32(4):815-825.
- [2] 肖风劲,徐良炎.2005年我国天气气候特征和主要气象灾害[J].气象,2006(4):79-84.

(上接第137页)

4 结束语

使用膨胀算法、腐蚀算法和漫水填充法等图像处理算法,实现根据相邻两个时次的雷达回波图外推雷达回波走势,绘制出了客观的和具象化的雷达回波走势图,再叠加上本地区县、乡镇的行政边界后,能够为预报员制作临近预报和开展气象服务提供了更为直观的参考资料。但外推时确定云团移动位置和大小变化程度的方法较为粗略,还需要进一步优化。

参考文献:

- [1] 李莉.新一代天气雷达在临近天气预报中的应用[J].河南科技,2013(22):194.
- [2] 杨成芳,刘畅,孟宪贵.GB/T 28594-2021,临近天气预报[S].国标,GB/T28594-2021:1-2,2021.

- [3] 冯学文,冯雪菲,苏华,等.云降水物理和人工影响天气研究进展和思考[J].生态环境与保护,2019,2(3):31-32.
- [4] 鲍向东,丁建芳,郭献林,等.河南省人工影响天气一体化智能业务系统设计思路[J].气象与环境科学,2019,42(2):115-123.
- [5] 谢勇,吴瑶,宾振,等.江西省人工增雨效果检验平台研究[J].中国科技成果,2020(5):24.
- [6] 杜景林,尚金龙,薛建军.人工影响天气作业效果评估系统设计[J].计算机应用与软件,2013,30(2):152-156.
- [7] 唐仁茂,袁正腾,向玉春,等.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,2010,36(4):96-100.
- [8] 贾烁,姚展予.江淮对流云人工增雨作业效果检验个案分析[J].气象,2016,42(2):238-245.
- [9] 房彬,王吉宏,杨文霞.人工增雨效果检验的研究进展[J].安徽农业科学,2010,38(13):6756-6758.
- [10] 王婉,石玉恒,李宏宇,等.对流云人工增雨效果检验技术方法及应用[J].气象科技,2014,42(6):1131-1136.
- [11] 廖苗,赵于前,曾业战,等.基于图割和边缘行进的肝脏CT序列图像分割[J].电子与信息学报,2016,38(6):1552-1556.

- [3] 俞小鼎.多普勒天气雷达原理与业务应用[M].北京:气象出版社,2006:185.
- [4] 吴集林.论数字图像的膨胀与腐蚀[J].广东广播电视大学学报,2007(1):112-113.
- [5] 杨琨,曾立波,王殿成.数学形态学腐蚀膨胀运算的快速算法[J].计算机工程与应用,2005(34):54-56.
- [6] 蒲石,龙文光.基于膨胀和腐蚀的迭代优化算法[J].四川师范大学学报:自然科学版,2014(3):120-124.
- [7] 董晓华,赵乔,苏中波,等.基于漫水填充算法的叶面积仪研制[J].节水灌溉,2016(9):169-172.
- [8] 冯宗雪,董晓.基于漫水填充算法的肺实质分割方法[J].电脑知识与技术,2016(6X):205-207.
- [9] 王伟轩.基于漫水填充算法提取太湖水边线研究[J].水科学与工程技术,2021(2):57-59.
- [10] 常胜利.多边形重心坐标的求法[J].高等数学研究,2005,8(2):21-23.