

基于图像识别的人工影响天气业务的研究

王山海,刘 谦,马鑫鑫

(河南省人工影响天气中心,河南 郑州 450000)

摘 要:在人工影响天气业务中,对人影作业潜力区的划定,目前还没有准确的量化指标。传统方法依靠人工读图,通过分析卫星云图、雷达回波图、模式资料等来确定适于开展人影作业的潜力区。这些方法对经验依赖性较大,随意性较强,可靠性不高,人影业务的效果受到很大影响。当前基于深度学习的图像识别技术发展迅猛,在学术界和工业界都有了大量应用。深度学习能有效地提取图像中的丰富信息,为解决人影作业潜力区的划定难题提供了新思路和新方向。文中阐述了云雾降水基本机制,分析了卫星云图、雷达回波图在人影领域的应用。介绍了基于深度学习的图像识别原理,分析了三种不同的深度学习结构模型,提出利用卷积神经网络对卫星云图、雷达回波图等海量图片数据进行处理,充分挖掘图片中的重要信息,准确地划定人影作业潜力区,提高人影作业的针对性和时效性,使人影业务发挥更大的作用。

关键词:深度学习;卷积神经网络;图像识别;人工影响天气

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2019)05-0172-06

doi: 10.3969/j.issn.1673-629X.2019.05.036

Research on Weather Modification Based on Image Recognition

WANG Shan-hai, LIU Qian, MA Xin-xin

(Weather Modification Center of Henan Province, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: In the weather modification business there is no accurate quantitative index for delineation of the potential area of weather modification. Traditional methods rely on manual map reading and determine potential areas suitable for weather modification business by analyzing satellite cloud image, radar echo image and pattern data. They depend on experience with great randomness and low reliability. So the effect of weather modification business has been greatly affected. Currently, image recognition technology based on deep learning has developed rapidly and widely applied in academia and industry. Deep learning can effectively mine the rich information in the image and provide a new way and new direction to solve the problem of delineating the potential area of weather modification. The basic mechanism of cloud precipitation is expounded, and the application of satellite cloud and radar echoes in the field of weather modification is analyzed. We introduce the principle of image recognition based on deep learning, analyze three different models of deep learning structure, and put forward the use of convolution neural network to deal with mass picture data such as satellite cloud map and radar echo map to determine the potential area of weather modification operation, which can improve the pertinence and timeliness of weather modification and make the weather modification play a greater role.

Key words: deep learning; convolution neural network; image recognition; weather modification

0 引言

图像是客观事物在人脑中形成的影像,是一种重要的信息来源。它具有很强的直观性,而且便于理解。随着计算机与人工智能(artificial intelligence, AI)技术的快速发展以及硬件水平的提高,图像处理的应用越来越广泛,并在学术界和工业界都取得了一定的成果。图像识别(image recognition)是利用计算机对图像进行处理,以识别各种不同模式的目标和对象的技术。

它着重强调图像与图像之间进行的交换,或者对图像进行加工以改善图像的视觉效果,从而为后期的图像识别打下基础^[1]。在很多场景中,图像比文字或者其他形式的信息能够更直观地展示信息。将景物、图像、字符等信息经过预处理,然后进行识别,让计算机具有机器视觉,能够与外界进行交互,具有类似人类所拥有的识别物体的能力,这就是图像识别的目的。根据图像识别的具体结果,可以进一步处理,使其在不同的场

收稿日期: 2018-07-05

修回日期: 2018-11-08

网络出版时间: 2018-12-21

基金项目: 中国气象局气象关键技术集成与应用项目(CMAGJ2014M33); 河南省气象科研项目(Z201508)

作者简介: 王山海(1982-),男,工程师,研究方向为人工影响天气技术。

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20181221.1625.070.html>

景中发挥特定的作用。

人工影响天气(简称“人影”),指在适当条件下,人们通过科技手段对局部大气的过程进行影响,使某些局地天气朝着有利于人类的方向转化,从而避免或者减轻气象灾害,合理利用气候资源实现增雨(雪)、防雹、消雨等目的^[2]。目前实施人工影响天气作业主要通过地面和空中两种方式。地面作业通常利用高炮或者火箭架向空中具有一定条件的目标云发射含有催化剂的炮弹、火箭弹,它们在云中爆炸,把催化剂播撒在云中,以影响云物理过程。另外一种方式是利用飞机,在具有一定条件的云中直接播撒含有催化剂的物质,进行人工作业,影响云物理过程。

无论是采用地面人影作业方式还是飞机作业方式,对作业潜力区的分析都是必不可少的步骤。只有将催化剂播撒到潜力区内,才能取得良好的作业效果,实现人影作业目的。而对人影作业潜力区的研究,是一项比较困难的工作,目前还没有非常准确的定量化的指标来界定潜力区边界,大部分都是依赖经验,靠手工划定。因此,传统方法划定人影作业潜力区的随意性较大,可靠性不高。如果能结合图像识别技术,以卫星云图、雷达回波图、温度压强场为基础,配合模式预报来确定合适的人影作业潜力区,势必可以提高作业

潜力区划定的准确性,提高作业效益,使人影业务发挥更大的作用。

1 人影作业潜力区的研究

1.1 云雾降水的基本机制

由大气中的水汽凝结(凝华)形成水滴、冰雪晶或它们的混合物组成的可见悬浮体形成云雾^[3],构成降水的必要条件。云粒子在空中继续吸附水汽,体积与重量逐渐增长,获得较大的下落速度,并且在下落过程中没有被蒸发掉,才能形成降水。云雾降水微物理机制如图1所示。

自然界中的云具有不同的外形和空间尺度,可以存在于不同的高度,其组成也有固态或液态之分。云的分布及其演变过程,不仅反映了当时的天气形势和水汽状况,而且也是预示未来天气变化的重要征兆之一。人工影响天气作业的开展,正是基于对云进行充分的宏、微观研究,掌握云雾降水机制,开发空中水资源,增加降水。但长期以来,由于云雾、降水和可降水量有很大的不确定性,尤其是对云的了解还很不透彻,人工影响天气作业中存有很大的盲目性^[4]。这样导致了作业资源的浪费,延误了作业时机,不能充分发挥人影作业效益。

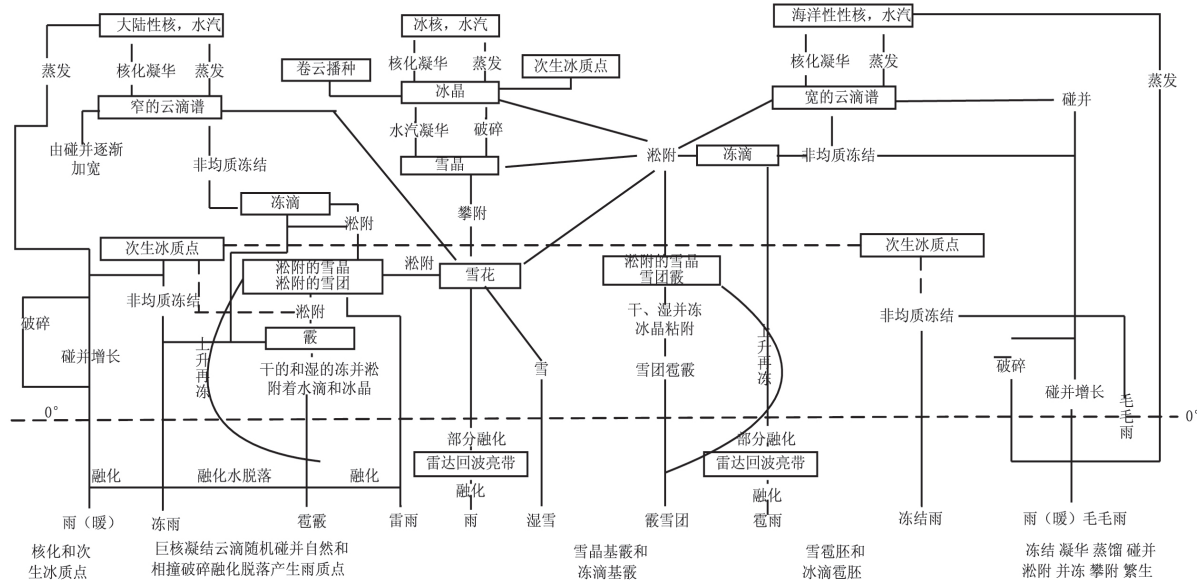


图1 云雾降水微物理机制

1.2 云雾降水的宏观特征

目前对人影增雨作业潜力区的研究主要从天气形势、高空探测、数值模式等云降水微观特征方面展开,选取适宜人工增雨作业的云系。通过查阅相关文献,Grant和Elliott(1974)提出了一个重要的概念—播云温度窗,他指出云顶温度介于 -10°C 到 -24°C 之间时具有最佳的催化剂播撒效果;而Rokicki和Young(1978)则提出了云最充分降水对应的最佳冰晶浓度;

Cooperand Marwitz(1980)则将云的不稳定能量与增雨潜力联系起来进行研究,Hill(1980)观测分析将 -22°C 的云顶温度作为地形云增雨的分界线是比较合适的,Vali等(1988)在研究时,重点关注过冷水含量与冰晶浓度,他将过冷水含量大于 0.05 g/m^3 和冰晶浓度小于 0.1 L^{-1} 百分比作为指标,该指标值越大就越利于开展人工增雨;另外,Hudak和List在1988年的研究表明,当热带海洋气团的云顶温度高于 -20°C 时播撒

效果最好; Sassen 和 Zhao(1993) 也用到过冷水含量来分析云的增雨潜力, 他们同时关注云底温度对增雨潜力的影响; 类似的, Long 和 Carter(1996) 用云中水平过冷水通量与地面垂直降水通量两个指标来研究地形云增雨潜力。另外, 曾光平等、冯彬等、汪学林等、张连云等、龚佃俐和边道相等相关研究人员也从天气形势的结构上分析了云降水特征及人工增雨的潜力^[5]。

云的宏观特征是指将云作为一个整体来看时所表现出来的特征, 一般包括云的外形、空间尺度、生命史等。云雾复杂多样的宏观特征, 不仅反映了云雾内部过程的复杂性, 同时也反映了云雾出现的天气条件。它对人们了解云的内部过程有很大的帮助, 对人工影响天气作业, 例如作业对象的选取、云中水分多少的估计、作业的方法选择都有很大的帮助。

云的水平范围有很大不同, 由几千米到几千千米, 依赖于成云过程的水平范围而定。厚度也有很大的不同, 由几百米甚至到十几千米。层状云系是一种主要的大范围降水系统, 尤其是层状冷云, 它是国内北方冬半年的主要降水来源, 也是为缓解北方春季干旱开展人工增雨的主要作业对象。因此, 对层状云的研究是人影作业需要重点关注的方向。图 2 是几种层状云实拍图。



图 2 层状云实拍图

1.3 卫星云图的应用

卫星云图是由气象卫星自上而下观测到的地球上的云层覆盖和地表面特征的图像。目前接收的云图主要有红外云图、可见光云图及水汽图等。利用卫星云图可以识别不同的天气系统, 确定它们的位置, 估计其强度和发展趋势, 为天气分析提供依据。一次台风演

变过程中的卫星云图如图 3 所示。

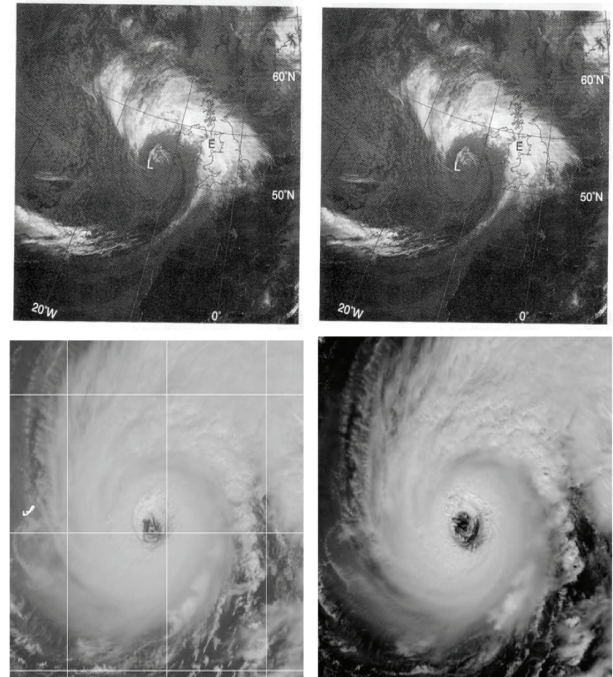


图 3 一次台风卫星云图

红外云图, 是气象卫星上的扫描辐射计利用红外辐射通道感测并向地面站发送的云图, 其亮度大致反映了云层顶的温度, 因而也反映了云顶的高度。一般温度越低, 高度越高的云层, 图上的色调过白, 反之色调越黑。由于红外遥感可以昼夜感测并向地面站发送云图, 并可分析高云和云顶温度, 提供了可见光云图不能提供的大量信息, 但红外云图的分辨率低于可见光云图。实际上要把两者结合起来使用, 互相取长补短, 从而获得了广泛的应用。

可见光云图, 是气象卫星上的扫描辐射计(早期用的是电视摄像机)用可见光通道感测并向地面站发送的卫星云图, 图上亮度明暗反映了云的反照率的强弱。可见光云图在研究云团、云系等的移动和发展方面, 在监测台风和其他天气系统的发生、发展及移动方面, 均获得广泛应用, 并取得了较好成效。但由于云图是利用可见光波段所拍, 其亮度和色调取决于云的性质和太阳高度角, 同昼夜间又拍不到, 故受到一定的限制。

目前在学术界已有大量基于卫星云图应用展开的研究, 文献[6]以 FY2 号气象卫星云图研究对象, 利用图像分割技术, 去掉非台风云系, 定位台风中心; 文献[7]选取了 1995-1998 年的冰雹卫星云图, 分析了产生冰雹卫星云图的特征, 为冰雹预报提供了技术方法; 文献[8]针对中尺度强对流云团的卫星云图识别, 设计了短时临近预报系统; 文献[9]利用卫星云图及其他资料分析了 2002 年 7 月 17 日在华北地区上空出现的中尺度涡旋成因, 对于提升对流性天气预报质量

有很好的帮助作用。这些文献的研究内容大部分都是针对天气预报方面而开展,如果能够借助卫星云图,结合当前先进的图形识别技术,将研究内容延展到人影领域,充分挖掘卫星云图实用潜力,必将提高人影作业效果和水平。

1.4 新一代多普勒天气雷达的应用

雷达在人工影响天气领域的应用已开展了大量的试验研究工作。青海省气象局、中国科学院大气物理研究所利用 711 雷达回波、地面和高空加密观测等资料在黄河上游的玛曲地区开展人工增雨试验,研究表明降水云系的变化和回波强度具有直接的关系,天气雷达在这一工作中发挥了重要作用^[10-11]。但由于受到雷达性能的限制,无法实现定量观测。新一代多普勒天气雷达的建设为人工影响天气作业和外场试验提供了先进的探测工具和手段。新一代天气雷达在暴雨外场试验中得到应用,如 973 “中国暴雨”项目在长江中、下游的实施,就是利用双多普勒雷达同步观测系统和单多普勒雷达对暴雨的中尺度结构特别是三维风场结构进行观测研究的。2002 秋季和 2003 年春季,分别在青海省、河南省开展了云和降水的雷达观测,为人工影响天气研究工作提供了参考数据^[12]。文献[12]研究表明,多普勒天气雷达风场资料可为降水系统的中尺度结构分析和人工增雨作业区域选择提供更多信息,在开展人工影响天气作业指挥、作业效果评估、云和降水动力机制研究等领域具有较大应用潜力。

冰雹是一种频发的灾害性天气,具有发生范围小,持续时间短,突发性强,破坏性大的特点,会给农业、建筑、通讯、电力、交通以及人民生命财产带来重大损失。在人工消雹方面多普勒天气雷达具有重要的使用价值,是探测冰雹等强对流天气的重要工具之一(张培昌等,2001)。分析冰雹云的回波特征,可以为人工防雹作业提供指标。目前已有利用多普勒天气雷达来研究冰雹特征的大量文献。在国外,Boston 等(1969)使用多种波长雷达来区分冰雹粒子;Battan(1975)使用多普勒天气雷达反射率、速度、谱宽数据分析降雹风暴内部结构,指出最大反射率往往处于上升气流的外部;Robert 等(1989)使用多普勒雷达探测了中纬度的中尺度对流风暴。在国内,张鸿发等(1997;2002)对平凉地区冰雹云雷达回波特征进行了分析;北京(王令等,2004)、重庆(江玉华等,2005)、河北唐山(王秀玲等,2012)、广西(农孟松等,2013)、滇南(段鹤等,2014)、福建(陈秋萍等,2015)等地的气象科技人员也对当地的强对流雷达回波进行了分析研究。冰雹云在雷达回波中有许多共性:回波强度特别强,回波顶高度高,PPI 上容易出现“V”型缺口、钩状回波和耀斑回波,RHI 上容易出现有界弱回波区(BWER)等(龚乃

虎等,1982)。文献[13]利用新一代多普勒天气雷达的探测资料,结合地面实况资料,基于风暴的识别和追踪算法(SCIT),提取反射率因子数据,计算出风暴单体结构,统计分析了雷达回波特征,对雷达等强对流天气的预报和人工消雹具有较强的指导作用。

从 1998 年开始在全国布设新一代多普勒天气雷达系统。普遍使用的新一代多普勒天气雷达产品包含以下三种:反射率因子产品反映了回波的强度,可以确定风暴的结构、强弱以及强降雨(雪)带分布,另外还能够根据反射率因子随时间的变化来推测未来的天气趋势等。平均径向速度可以用来导出大气结构,了解风暴特征,从而可以帮助产生、调整和更新高空分析图等。与传统雷达相比,多普勒雷达可以监测到距离垂直地面 8~12 km 的高空中的对流云层的演变规律,能够提高气象人员对超级单体、雷暴、降水、冰雹等重大灾害性天气的监测和预报能力。但目前对多普勒天气雷达的应用还仅仅限于人工读图,气象工作人员根据雷达回波图的不同色标变化趋势来预测天气过程,对经验依赖较强,随意性较大。将图像识别技术应用于雷达回波图的判定,实现智能化预报,减少人为干预将是未来发展方向。

2 图像识别研究

近年来,随着人工智能的发展,基于机器视觉的图像识别技术得到了广泛的应用。对于一个复杂场景,基于机器视觉的图像识别技术更加稳定、客观和准确^[14]。特别是深度学习技术的兴起,在日常生活中受到广泛的应用和关注。传统的图像识别方法需要人工设计特征,对识别经验依赖较强,且识别率较低^[15]。在气象领域,产生的海量图像数据由于没有科学的智能化识别方法而无法充分利用,大部分还是依靠人工读图来分析,效率低下且准确性不高。将基于深度学习的图像识别技术应用于人影行业,可以充分挖掘卫星云图、雷达回波图的信息,从而提高作业效率,降低气象灾害。深度学习网络是一个多层的网络结构,通过模拟人脑,能够自动地学习和提取特征,充分发挥大数据的优势。

2.1 图像识别基础理论

图像识别也属于模式识别的一种,它是模式识别在图像领域中的具体应用。其基本原理是对输入的图像建立识别模型,提取图像的特征参数,然后建立分类器,根据图像的特征进行分类识别。一般的图像识别系统结构如图 4 所示。

图像的特征是图像识别的基础,特征对一个模型的作用至关重要。特征从表示的粒度上可以分为初级特征(浅层特征)和高级特征(结构性特征)。初级特

征是由底层的像素特征组成的一些边缘特征;结构性特征是由边缘特征组成的更结构化、抽象化、复杂化的特征。底层的特征可以向高层的特征传递,层层递进,可以得到更高层的特征表示。图像的特征提取包含两个层次:第一层是对底层的特征进行抽取;第二层是对图像的高层特征进行抽取^[16]。常用的底层特征分为形状特征、颜色特征以及纹理特征等,这些特征鲁棒性强,计算的复杂度低。高层的特征更抽象,需要根据浅层的特征抽取并学习得到,利用这些特征可以进行更高级的操作^[17]。

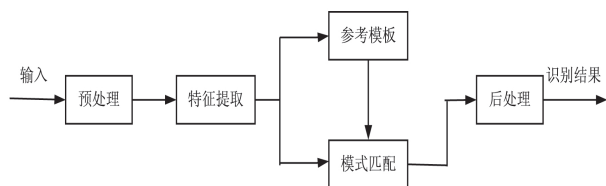


图4 图像识别系统结构

图像识别的常用方法有:模板匹配法、贝叶斯分类法、人工神经网络法等。模板匹配法通过将目标图像与模板进行匹配比较,在某种事先定义的代价损失函数最小者即为识别对象。这种方法需要研究者具有一定的经验知识,且有设计合适的模板。贝叶斯分类法是一类基于概率统计的识别方法,属于统计学的一类。常见的贝叶斯分类算法有朴素贝叶斯算法和 TAN 算法(树增强型朴素贝叶斯算法)。人工神经网络法起源于对生物神经系统的研究,模拟人的大脑来智能化处理问题。该方法的发展潜力巨大,常用的有模糊神经网络、BP 网络、SOFM 神经网络等。以上是传统的图像识别方法。2006 年深度学习概念的提出,使得基于神经网络的深度学习在图像识别中取得了很大的突破和进展,是目前图像识别研究领域的主流方法。

2.2 基于深度学习的图像识别

近年兴起的深度学习算法(deep learning, DL)逐渐成为机器学习领域的一个新的热点。2006 年机器学习领域的教授 Hinton 和他的学生 Salakhutdinov 在《Science》上发表了一篇文章,在这篇论文中他们提出了深度学习的概念^[18],引起了学术界的广泛关注,从此以后深度学习成为了机器学习领域内的研究热点^[19]。深度学习是一种机器学习算法,它利用多层神经网络模型,进行有监督或者无监督的学习,对原始信号进行非线性变换,提取其特征进行模式分类或识别^[20]。

多层神经网络系统结构如图 5 所示。

深度学习通过模仿人脑多层次的模型结构逐步处理信息,来发现数据的本质特征。常用的深度学习结构有深信度网络(deep belief networks, DBN)和深自动编码器(deep autoencoders, DAE)结构。深度学习算法

在做有监督学习前要先做非监督学习进行预训练(pre-training),然后将非监督学习得到的网络参数当作有监督学习的初值,利用 BP 算法进行精调(fine-tuning)。深度学习目前在语音、图像、自然语音等方面都已开发了相关的服务和应用,并取得了显著性成果。它具有多层次非线性信息处理的特点,根据其不同的使用目的和架构,大致可以分为三类^[21]:

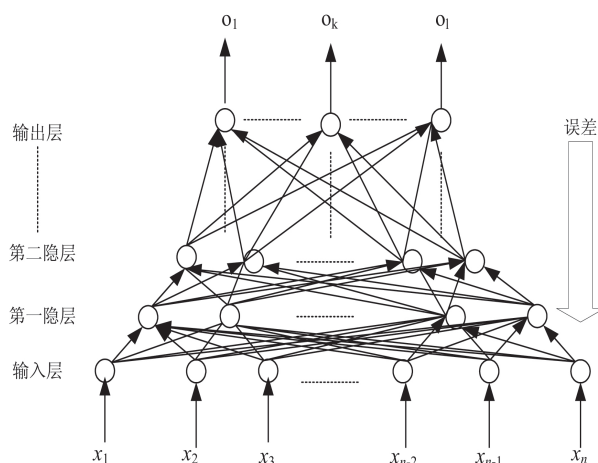


图5 多层神经网络系统结构

(1) 生成型深层结构(generative deep architectures),该结构主要用来生成观测到的可见数据和它的所属类别的联合概率分布。常见的一种生成型深层结构是深度信念网络(DBN)。这种结构重点关注的是观测数据和它所属类别的联合概率分布,得到这个数据后就可以用这个概率来对它的先验概率和后验概率进行估计^[22]。

(2) 区分型深度结构(discriminative deep architectures),这种结构较多的应用场景是模式分类,可以用来描述已知数据类别的后验概率分布。这种结构的典型例子是卷积神经网络(CNN),它是第一个真正成功的深度学习算法。这种算法受动物视觉系统结构的启示从而被研究人员提出。

(3) 混合型深度结构(hybrid deep architectures),这种结构综合了生成型和区分型两种特征,在预训练阶段能够结合其他区分型学习算法来对神经网络初始权值进行优化,具有更容易优化系统的优势,同时还有较高的泛化能力。

目前已有基于深度学习进行天气预报、雷达回波外推、云图分类等方面的研究。文献[23]提出了基于物理量参数和深度学习模型的 DBN 短时强降水天气识别预报模型,根据模型检验的结果,能够取得较好的提前预报的效果。文献[24]尝试利用卷积神经网络进行雷达回波外推,在传统卷积神经网络基础之上,通过增加 DSN 和 PPL,提出了基于输入的动态卷积神经网络,该模型具有较强的适用性,能够提高雷达回波外

推的准确性,并有效提高外推时效。文献[25]借鉴传统的基于内容的图像分类技术,结合词袋模型理论,研究数字地基全天空云图的特征表示以及分类建模方法。以深度学习为基础,提出了在小样本数据下进行迁移学习的训练方法,提出了基于无监督深度学习进行特征自学习和有监督深度学习进行特征导向学习相结合方法。

卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)是基于深度学习的一种重要网络模型,由于CNN具有特殊的网络结构,在图像处理领域具有深远的研究前景,近年来得到高度重视并得到了广泛研究^[26-27]。CNN是一种具有多层结构的网络,其低层由卷积层和下采样层交替组成,是网络提取图像特征的重要环节,高层为分类器,一般为全连接层。目前这种网络结构已经成功应用在图像识别领域。如果能够在人影方面利用卷积神经网络(CNN)对卫星云图、雷达回波图进行处理,提取图形中的深度特征,划定人影作业潜力区,可以减少人工判别的主观性、随意性,减少人影作业盲目性,提高作业效益,发挥人影价值。

3 结束语

在实施人工影响天气作业过程中,无论采用哪种作业方式,对作业潜力区的划定会直接影响作业效果。而对人影作业潜力区的研究,目前还没有非常准确的量化指标来界定潜力区边界,大部分都是依赖经验,靠手工划定。传统方法划定人影作业潜力区的随意性较大,可靠性不高。当前基于深度学习的图像识别技术发展迅猛,在学术界和工业界已取得巨大进展并有了具体应用。结合图像识别技术,构造一个卷积神经网络对卫星云图、雷达回波图等海量图片数据进行处理,提取图片深层信息,配合模式预报来确定合适的人影作业潜力区,势必可以提高人影作业的准确性,提高作业效益,使人影业务发挥更大的作用。

参考文献:

- [1] 胡爱明,周孝宽.车牌图像的快速匹配识别方法[J].计算机工程与应用,2003,39(7):90-91.
- [2] 王广河,胡志晋,陈万奎.人工增雨农业减灾技术研究[J].应用气象学报,2001,12:1-9.
- [3] 邓北胜.人工影响天气技术与管理[M].北京:气象出版社,2011.
- [4] 苏立娟.内蒙古地区云、降水和可降水量的时空分布、变化趋势及其与气候因子的关系[D].兰州:兰州大学,2005.
- [5] 刘贵华,余兴,岳治国,等.卫星遥感人工增雨作业条件Ⅱ:层状云[J].气候与环境研究,2012,17(6):758-766.
- [6] 王福宁.基于卫星云图的台风云系分割和中心定位研究[D].昆明:云南师范大学,2006.
- [7] 张晰莹,方丽娟,景学义,等.黑龙江省产生冰雹的卫星云图特征[J].南京气象学院学报,2004,27(1):106-112.
- [8] 洪毅,李玉柱,陈智源,等.中尺度强对流天气卫星遥感短时临近预报系统设计[C]//中国气象学会2007年年会气象综合探测技术分会论文集.北京:中国气象学会,2007:1047-1053.
- [9] 李云川,王福侠,戴念军,等.一次中尺度涡旋的成因分析[J].气象,2003,29(11):33-35.
- [10] 赵仕雄,德力格尔,涂多彬.黄河上游降水云层对流特性及降水微结构机制研究[J].高原气象,2003,22(4):385-392.
- [11] 李仑格,德力格尔.高原东部春季降水云层的微物理特征分析[J].高原气象,2001,20(2):191-196.
- [12] 刘黎平,邵爱梅.新一代可移动式天气雷达在人工影响天气中的应用研究[J].暴雨灾害,2007,26(1):40-45.
- [13] 鲁德金,陈钟荣,袁野,等.安徽地区春夏季冰雹云雷达回波特征分析[J].气象,2015,41(9):1104-1110.
- [14] 王信,汪友生.基于深度学习与传统机器学习的人脸表情识别综述[J].应用科技,2018,45(1):65-72.
- [15] 文旭.基于深度学习的图像识别方法研究与应用[D].武汉:华中师范大学,2017.
- [16] 孙兴华,郭丽.数字图像处理:编程框架、理论分析、实例应用和源码实现[M].北京:机械工业出版社,2012.
- [17] 孙君顶.图像低层特征提取与检索技术[M].北京:电子工业出版社,2009.
- [18] HINTON G E, SALAKHUTDINOV R R. Reducing the dimensionality of data with neural networks[J]. Science, 2006, 313(5786):504-507.
- [19] AREL I, ROSE D C, KARNOWSKI T P. Deep machine learning - a new frontier in artificial intelligence research[J]. IEEE Computational Intelligence Magazine, 2010, 5(4):13-18.
- [20] DENG L. An overview of deep-structured learning for information processing[C]//Proceedings of Asian-Pacific signal and information processing - annual summit and conference. Xi'an, China [s.n.], 2011.
- [21] 孙志军,薛磊,许阳明,等.深度学习研究综述[J].计算机应用研究,2012,29(8):2806-2810.
- [22] HINTON G E, OSINDERO S, TEH Y. A fast learning algorithm for deep belief nets[J]. Neural Computation, 2006, 18(7):1527-1554.
- [23] 路志英,任一墨,孙晓磊,等.基于深度学习的短时强降水天气识别[J].天津大学学报,2018,51(2):111-119.
- [24] 施恩,李骞,顾大权,等.基于卷积神经网络的雷达回波外推方法[J].计算机应用,2018,38(3):661-665.
- [25] 张振.基于深度学习的全天空云图分类方法研究[D].北京:北京交通大学,2017.
- [26] 常亮,邓小明,周明全,等.图像理解中的卷积神经网络[J].自动化学报,2016,42(9):1300-1312.
- [27] 李倩玉,蒋建国,齐美彬.基于改进深层网络的人脸识别算法[J].电子学报,2017,45(3):619-625.