

重庆智慧气象探索与实践

顾建峰

(重庆市气象局, 重庆 401147)

摘要: 重庆智慧气象围绕“天枢”智能探测、“天资”智能预报、“知天”智慧服务、“御天”智慧防灾组成的“四天”系统开展建设, 重点介绍了“四天”系统建设的内涵、构架、功能和成效。最后, 对“四天”系统的未来发展和应用进行了展望。

关键词: 智慧气象, “四天”系统, 探索, 实践, 展望

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2021.02.005

Exploration and Practice of Chongqing Smart Meteorology

Gu Jianfeng

(Chongqing Meteorological Service, Chongqing 401147)

Abstract: Chongqing smart meteorology is built on the basis of the “Tianshu” intelligent detection, “Tianzi” intelligent forecast, “Zhitian” intelligent service and “Yutian” Intelligent Disaster Prevention—the “SiTian” system. This paper focuses on the connotation, framework, function and effect of the “SiTian” system. Finally, the outlook of the future development and application of this system is presented.

Keywords: smart meteorology, “SiTian” systems, explore, practice, expectation

0 引言

2007年中国气象局首次提出了发展现代气象业务, 2013年提出了县级综合气象业务改革发展意见, 2014年明确了气象业务现代化建设的重点任务, 国家、省、市和县级气象业务先后经历了业务体制改革、气象信息化、智能网格预报等重大变革, 逐步构建了信息化、集约化、标准化的现代气象业务理念和方式。

由于资源分散、缺少统一规划等问题, 现代化业务体系建设仍存在“局部有效, 整体无序”, 表现为信息系统集约化程度不高, 业务和服务产品共享程度低, 应用烟囱众多等现象; 大数据、云计算、人工智能等技术应用仍处于初级阶段, 这种数据分散、信息孤岛、应用林立和互联网技术融合不深入等问题已成为制约现代气象业务高质量高品质发展的主要因素。

2015年国务院提出了加快推动互联网与各领域深度融合和创新发展及加快政府数据开放共享, 推动资源整合, 提升治理能力的思路。中国气象局也明确了气象信息化建设的行动计划, 即气象部门要大力发展气象信息化, 重点提升气象业务运行效率、公共服务效益和管理决策效能。2018年, 重庆围绕实施创

新驱动发展战略和新型智慧城市建设, 坚持“高质量高品质发展”“跳出小气象、做实大气象”, 大力发展现代气象业务, 以信息化驱动气象现代化, 开展重庆智慧气象“四天”, 即: “天枢”智能探测、“天资”智能预报、“知天”智慧服务、“御天”智慧防灾系统建设。通过“四天”系统建设推动实现观测协同化、预报精准化、服务智慧化, 最终达成“预报精准、服务精细、平台智能、技术领先、管理科学”的建设目标。

1 重庆智慧气象“四天”系统建设架构

智慧气象是新时代气象现代化的重要标志, 是以信息化技术为依托形成的气象观测、预报、服务、管理新理念和新模式, 是气象发展的新阶段、新境界、新形态^[1]。基于智慧气象的基本理念, 重庆智慧气象“四天”系统, 即“天枢”智能探测、“天资”智能预报、“知天”智慧服务和“御天”智慧防灾, 深度应用云计算、大数据、智能化、移动互联、物联网、5G、区块链、边缘计算、VR/AR等现代信息技术, 对标监测精密、预报精准、服务精细, 发挥气象防灾减灾第一道防线作用, 以全国气象大数据云平台为基础, 对接数字重庆云平台, 构建“数算一体”的重庆气象+大数据云平台为核心的“云+端”现代气象业务技术体系(图1)和集约化的业务服务体系(图2),

收稿日期: 2020年8月11日; 修回日期: 2020年11月27日
第一作者: 顾建峰(1965—), Email: gujif@cma.gov.cn

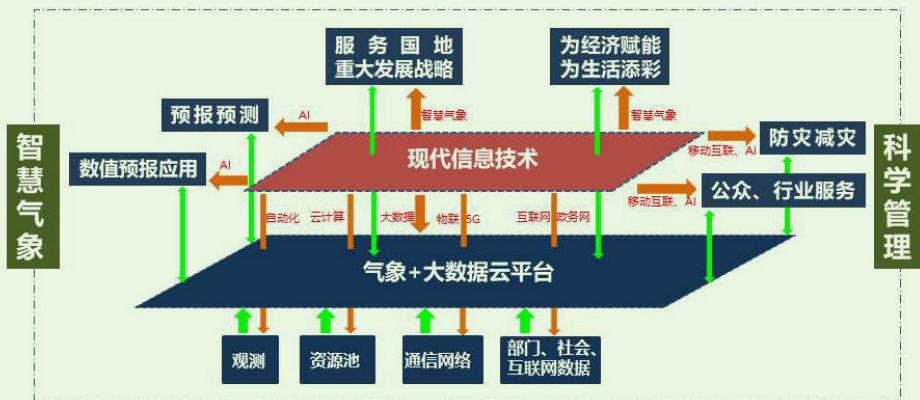


图1 重庆智慧气象技术体系架构图

Fig. 1 Outline of Chongqing smart meteorological technology system

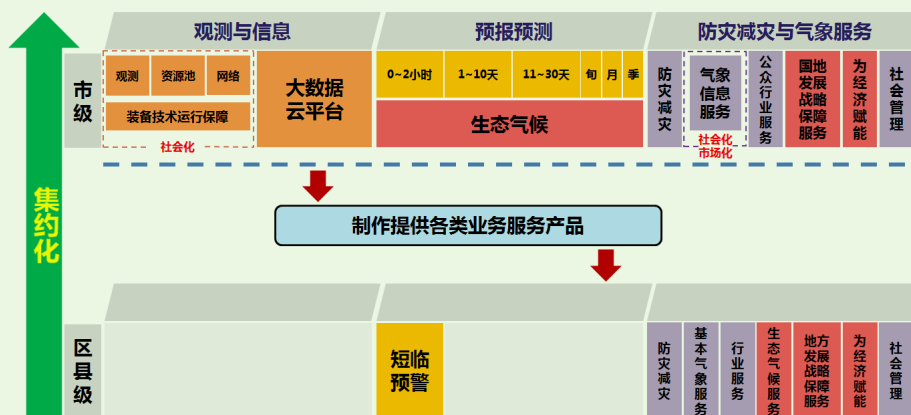


图2 重庆智慧气象业务服务体系架构图

Fig. 2 The architecture diagram of Chongqing smart meteorological service system

实现以大数据为中心的数据管理、加工处理、应用服务的高度集约，实现业务和系统之间的有效衔接和有机互动，实现“数算一体”的业务服务智能化发展。

2 重庆智慧气象“四天”系统建设与成效

重庆智慧气象“四天”系统重点推进“一平台、七系统”建设，即“天枢”气象+大数据云平台和“天枢”一智能协同气象观测系统、“天资”一高分辨率数值预报系统和智能预报预测系统、“知天”一智慧气象服务系统和智慧气象为农服务系统、“御天”一智能人工影响天气系统和智能预警信息发布系统（图3）。

2.1 “天枢”智能探测系统

“天枢”是北斗七星之首，寓意地位重要。就“四天”系统而言，“天枢”智能探测系统是基础和基石，对标监测精密，包括气象+大数据云平台及智能协同气象观测系统。

2.1.1 气象+大数据云平台

重庆气象+大数据云平台聚焦社会需求，实现数据统一汇交、快速存储、高效服务、智能运维监

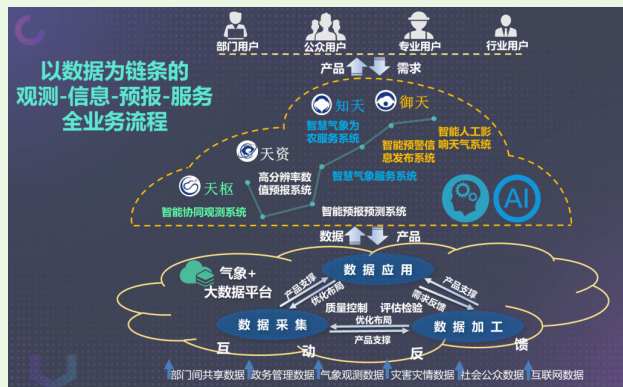


图3 重庆智慧气象建设方案图

Fig. 3 The construction diagram of Chongqing Smart Meteorology

视。平台建立了统管共用的基础设施资源池和大数据资源池，CPU核数约为3600核，内存总量为18 TB，可提供600多台虚拟机，存储近1 PB，数据存量达500 TB。通过专有网、政务外网、互联网及物联网等获取了市应急局、市水利局、市交通局、市生态环境局等共18个部门的106类数据、对外部门共享了40类气象数据，实现了数据统一汇交和快速存储。以数

据为链条，基于云计算和大数据，融合Cassandra、Spark、Docker和分布式架构等技术^[2-5]，优化数据传输、加工、分析全流程，贯通观测、预报、服务全链条。目前服务接口日平均调用106.4万次、数据下载量389.7 GB，数据服务遍及气象、水利、农业、生态、军队、民航、交通、电力等行业（图4）。

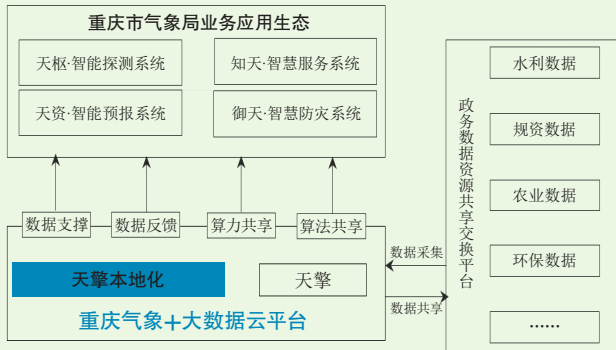


图4 重庆气象+大数据云平台定位图

Fig. 4 Logic diagram of Chongqing Smart Meteorology + Big Data cloud platform

2.1.2 智能协同气象观测系统

智能协同气象观测系统基于地基、空基、天基等立体智能感知物联网，实现了融合卫星、雷达、高空、地面等气象要素的智能协同观测和全时全域全要素的数据采集，利用多源异构数据质量控制、数据挖掘、数据融合等技术，对气象观测数据、遥感数据和社会观测数据进行综合分析应用。目前对接了7颗气象卫星、自建了5部多普勒天气雷达和2000多个地面气象观测站，与周边省份气象部门共享了10部多普勒天气雷达和近万个地面观测站的数据，每日数据采集量达5 TB，地面传输网络带宽50 Mbps，互联网出口带宽1000 Mbps，建立了基于北斗卫星的应急备份传输网络，形成了庞大的基于物联网的智能感知系统（图5），同时利用边缘计算及图像识别等算法，实现云量云状、地面凝结、电线结冰等天气现象的自动识别，提升气象全要素观测的自动化、智能化、协同化水平。

2.2 “天资”智能预报系统

“天资”智能预报系统，寓意天

资聪颖，宛如“最强大脑”，对标预报精准，包括高分辨率数值预报系统和智能预报预测系统。

2.2.1 高分辨率数值天气预报系统

系统建设了计算峰值达315万亿次、存储能力2.3 PB的高性能计算集群，实现了水平分辨率为3 km对流可分辨的集合数值预报系统（CQMEPS）和逐小时快速更新同化预报系统（CQ-RUC）的业务运行。CQMEPS采用的多初值多物理过程方案^[6]、物理过程参数化优选技术^[7]、集合成员的参数化方案组合优化技术提高了系统对重庆复杂地形下暴雨、强对流等灾害性天气的描述能力。为了提升两个系统的能力，开展了不同地形平滑方案和模式地形扰动技术对模式降水预报的影响研究^[8-9]；基于GSI的En3DVar系统，将一个非线性化程度可调谐的转换（图6）应用到了雷达资料变分同化的水成物控制变量中，当参数（ p ）调节到最优的状态时（目前取0.4），能够在一定程度上克服线性变换（CV q ，因极小化收敛问题，会导致径向风和较大的反射率资料不能被同化系统有效“吸收”）和对数变换（CV $\log q$ ，由于 q 和 $\log q$ 之间

智能协同观测系统



图5 重庆市立体综合气象观测网分布图

Fig. 5 Distribution of stereoscopic and comprehensive meteorological observation network in Chongqing

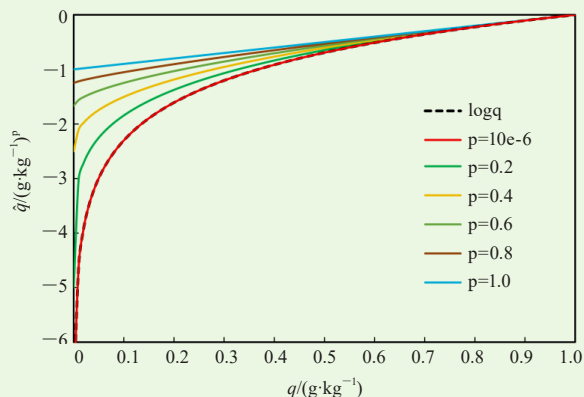


图6 自然对数函数及 p 取不同值时水成物控制变量 q 的非线性转换函数图像^[10]

Fig. 6 Image of natural logarithm function and nonlinear transfer function of hydrate control variable q with different values of p ^[10]

的高度非线性，会导致一些虚假的高估或低估的分析增量，尤其是观测较少地方) 存在的问题并得到更优的同化及预报效果^[10] (图6)。CQ-RUC系统逐小时同化雷达反射率因子和径向风资料，对重庆复杂地形下短时强降水(小时降水量 ≥ 20 mm)落区、强度和频率等日变化特征有较好的预报能力，2020年4—9月0~3 h和3~6 h逐小时短时强降水预报TS得分分别为13.2和8.3，较CQMEPS的控制预报分别提高了65.9%和22.9%。另外，以CQ-RUC输出的高分辨率数据开发的GUST、CAPE、0~3 km最大垂直螺旋度等产品对阵性大风和冰雹等分类强对流潜势预报具有较好的指示意义。

2.2.2 智能预报预测系统

包括智能天气预报系统和智能气候预测系统，实现了从站点到数字格点的跨越，构建了较为完整的智能化、集约化的气象预报预测业务体系。

智能天气预报系统集成大数据智能分析、智能网格天气预报、灾害天气智能预警、服务产品智能生产、行业气象智能预报、预报检验评估6大核心业务功能，通过引入AI技术，集成20余种客观预报技术，初步建立了客观预报技术体系，实现了天气预报业务市—区县两级一体集约化和智能化，打通了不同业务岗位和单位之间的数据断点，畅通了实况数据和预报数据的实时共享，优化了市—区县两级预报员联动监测、预警、防御的灾害性天气一体化业务流程。系统建成后，基于“迭代回归”技术的温度客观预报质量优于同期主观预报；基于误差平衡订正技术的降水预报产品，24 h晴雨预报和暴雨预报准确率分别较EC模式直接输出提高了17%和35%；采用TrajGRU^[11]和U-net^[12]技术，建立三维雷达回波智能预报模型及雷暴大风、冰雹智能识别模型，提升了强对流天气临近预

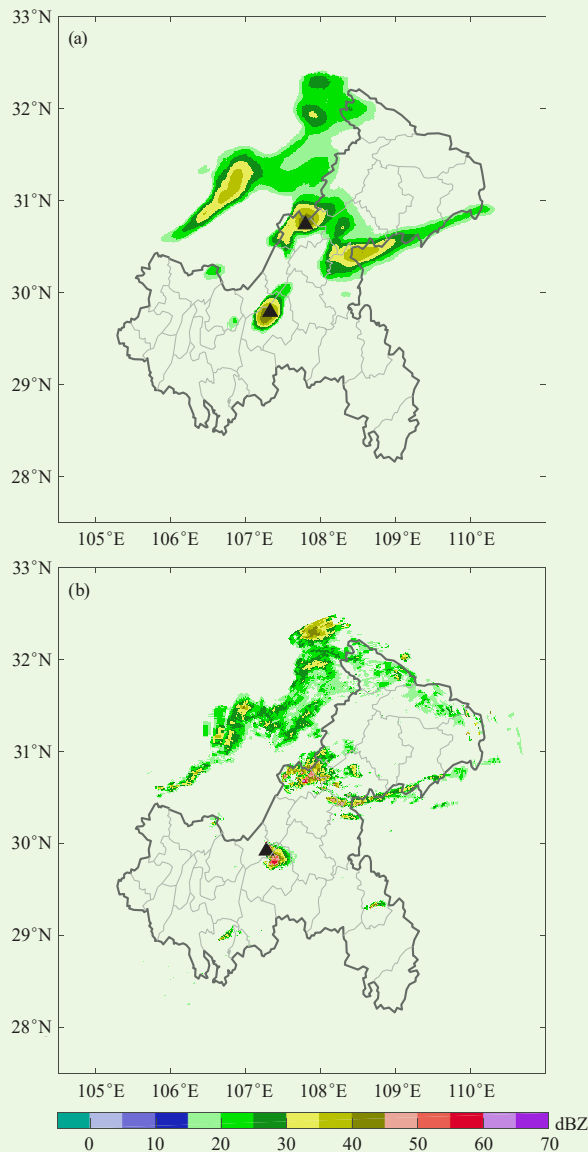


图7 2020年5月4日 (a) TrajGRU和U-net技术对冰雹的预报和 (b) 观测 (13:36) 对比

(起报时间: 12:28, 预报时间13:36; 填色: 反射率因子(单位: dBZ); 黑色三角形: 冰雹)

Fig. 7 Comparison of (a) hail prediction by TrajGRU and U-net and (b) observation on 13:36, May 4, 2020 (start time:12:38, forecast time:13:36; shaded: reflectivity (unit: dBZ); black triangles: hail)

报能力^[13]，2020年0~2 h雷达回波智能预报(图7)准确率较SWAN提高36%以上，冰雹和大风预报命中率接近100%，平均预警时间分别提前31 min和88 min。

智能气候预测系统包括气候监测分析、气候预测、气象灾害风险评估、生态气候评估和气候可行性论证等5个子系统。该系统在气候预测方面运用“大数据+常规预测+机器学习”的智能气候预测技术体系和智能化方案，集合客观定量预测的智能推荐业务流程和客观定量方法(图8)，开展智能气候预测业

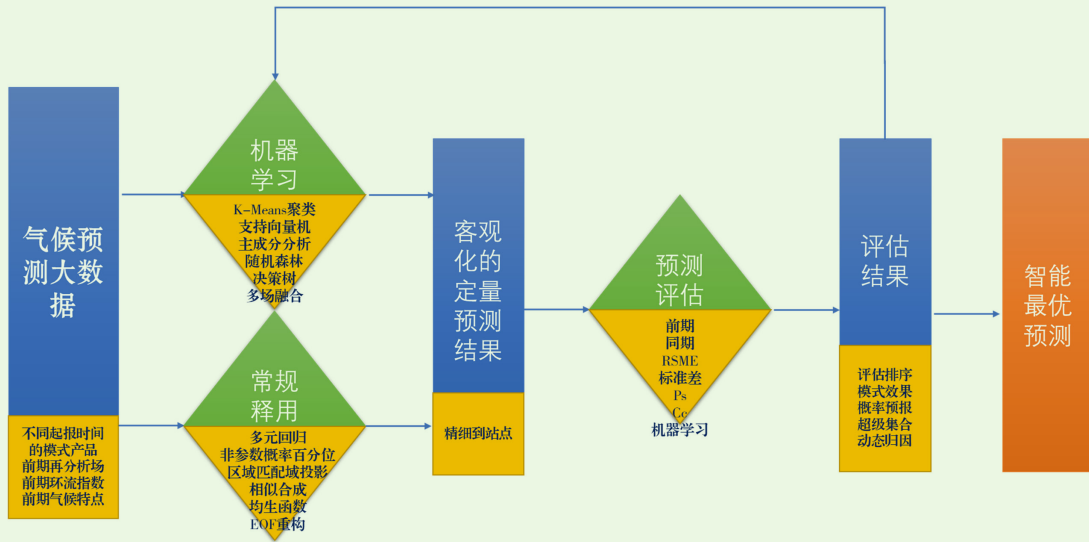


图8 气候预测智能推荐流程和客观定量方法

Fig. 8 Intelligent recommendation procedure and objective quantitative method for climate prediction

务试验和检验^[14], 实现了延伸期、月、季的气温和降水的空间分布智能推荐最优预测^[15]; 采用机器学习的决策树和随机森林算法建立重庆夏季旱涝的诊断和预测模型、利用场信息耦合合法建立了基于气候预测系统CFS模式实时预测产品与观测资料相结合的统计降尺度预测模型^[16]提升了预测质量。系统运行近2年来, 气候智能预测2019年月气温和降水质量分别为83.9、85.9, 2020年月气温和降水质量分别为83.5、83.6; 与中国气象局指导预报相比, 每年至少有9个月的预测质量高于指导预报, 智能推荐效果良好。在气象灾害风险评估方面, 应用风险矩阵法构建了重庆暴雨灾害乡镇级风险评估模型^[17], 利用水文淹没场景库实现了山洪灾害快速模拟^[18], 基于地形适应插值算法^[19]实现了高低温灾害风险的高精度评估, 初步实现了智能化的气象灾害风险评估。

2.3 “知天”智慧服务系统

“知天”智慧服务系统的核心是让决策、公众和各行各业知晓天机, 对标服务精细, 包括智慧气象服务系统和智慧气象为农服务系统。

2.3.1 智慧气象服务系统

智慧气象服务系统集决策、公众和行业气象服务三大功能于一体, 基于“天枢”和“天资”系统无缝隙、精准化的观测和预报大数据, 应用数字—文字转换规则、自然语言处理、数据可视化、机器学习等现代信息技术, 为决策者、公众用户和行业用户提供场景定制、用户行为自动感知、精准推送的气象服务。

利用1961—2019年重庆暴雨过程总降水量、日最大降水量、范围和持续时间, 结合不同指标的致灾

影响和不等权法, 构建重庆暴雨过程综合评估模型和综合强度等级^[20], 基于该暴雨过程综合强度等级和“天资”—智能天气预报系统的网格降水预报产品, 自动生成暴雨灾害风险落区产品(图9), 融合暴雨灾害预警四级等级标准和三类风险区等级标准, 实现了从暴雨天气预报到暴雨灾害风险预警的延伸, 提升了防灾救灾决策的针对性。基于气象服务数据的诊断分析和智能推荐, 应用信息靶向推送技术, 对接社交平台、移动互联网等, 为公众提供花期观赏预报、夜间听雨预报、星空预报、赏雪预报、雾凇预报等精细化预报产品(图10)。基于气象—电力多源观测降水和多模式预报降水的融合订正技术, 开展水电流域面雨量预报、逐时电力负荷预报、风电场结冰融冰预

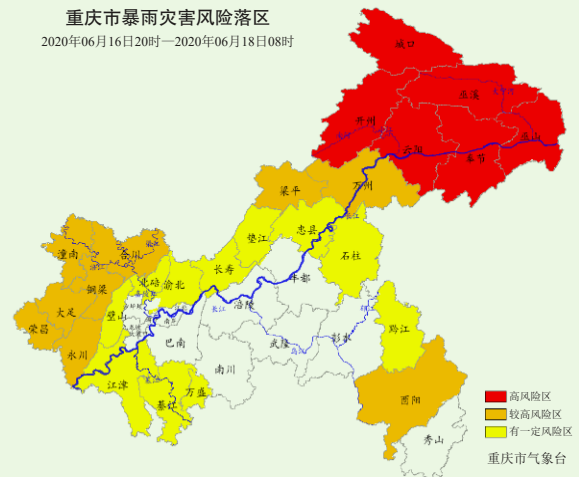


图9 2020年6月16日20时—18日08时暴雨灾害风险落区图
Fig. 9 Risk map of rainstorm disaster from 20:00 BT, June 16 to 08:00 BT June 18, 2020



图10 重庆红叶及彩叶观赏期预报公众气象服务产品
Fig. 10 Public meteorological service products for red leaf and color leaf viewing period forecast in Chongqing

报；基于机器学习算法的大雾影像智能识别^[21]，开展通航等级、气象导航等航运气象影响预报；基于数据可视化等技术开展高速公路通行影响预报。2019年风电、旅游和公路交通等行业的气象服务贡献率分别达1.7%、6.2%和2.6%。

2.3.2 智慧气象为农服务系统

智慧气象为农服务系统由农业气象大数据平台、农业气象精细化智能业务平台、农业天气通app(图11)、农业气象物联网平台、农业气象综合门户网站、农业气象遥感平台等构成。基于重庆特殊的地理环境，利用GIS和“互联网+”方式，面向新型农业经营主体提供直通式、精细化、个性化的农业气象服务。目前覆盖全市60%的新型农业经营主体，汇集专家417名，累计注册用户37万余名。利用气候多因子加权相似评估法、气温变换界限法、有效活动积温法等，实现不同地域、不同海拔地区晚秋作物种类、品种熟性、干收/鲜食等智能推荐；应用作物生长模型等^[22-24]，开展农作物生长适应性评价、农业气象灾害监测评估、农产品气候品质评价、作物引种风险评估、农业天气指数保险等服务，研发农业气象服务指标132项，农业气象监测分析和灾害预警等86个农业气象精细化服务模式。

2.4 “御天”智慧防灾系统

“御天”智慧防灾系统中“御天”意为防御气象灾害及其衍生灾害，对标发挥气象防灾减灾第一道防线作用，包括智能预警信息发布系统和智能人工影响

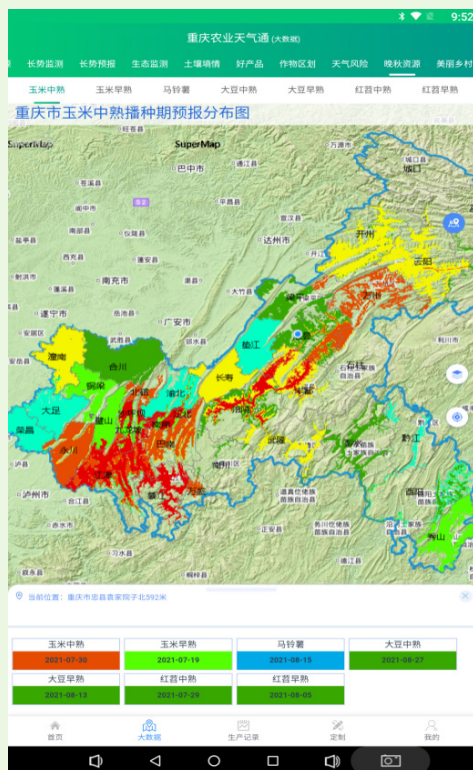


图11 重庆农业天气通app
Fig. 11 Chongqing agricultural weather app

天气系统。

2.4.1 智能预警信息发布系统

基于重庆社会公共信息资源和预警大数据，利用深度学习、云短信发布等技术，建立集自然灾害风险隐患、预警、灾情和救灾信息资源互联互通、开放共享、安全高效的智能预警信息发布系统。目前已建成1个市级预警中心、40个区县预警中心，470个市、区县部门预警分中心，1028个乡镇（街道）预警工作站，2064个预警村级工作站，拥有160万余名防灾应急处置人员，实现了多部门“联合监测、联合会商、联合发布预警”的横向联动预警机制，形成“市级—区县—乡镇—村社”四级纵向联防联控预警工作体系和“市级—区县—乡镇—村社—组—户”六级预警信息发布体系（图12）。采用层次分析法改进预警信息发布策略、评估预警响应效果；利用百度云短信发布技术，将预警短信发布速率从150条/秒提高到3000条/秒，实现预警信息通过电子显示屏（1664块）、重庆有线电视顶盒（449万）和农村大喇叭（3938个）等渠道的广泛发布；利用深度学习等技术实现预警信息的智能图文制作；利用基于基站覆盖的短信发布技术，实现面向手机用户的区域预警信息精准发布，在2020年“7.25”“8.10”“8.20”暴雨天气过程中仅向灾害影响范围内702万用户推送预警提醒信



图12 智能预警信息 (a) 四级纵向联防联控预警工作体系和 (b) 六级预警信息发布体系

Fig. 12 Intelligent warning information (a) four-level vertical joint defense early warning system and (b) six-level early warning information release system

息，充分体现了智慧智能。

2.4.2 智能人工影响天气系统

基于作业区域基础、探测、空域、环境、装备物资、作业服务等人影多维数据，利用“物联网、互联网+”等新技术，集成实现人工影响天气需求分析、条件识别、作业预警、实时指挥、效果评估等功能（图13）。业务运行以来，应用数值模式物理量参数化优化技术，提高降水场、宏观场、云微观场对重庆降水、冰雹等的智能识别能力；采用SCIT技术对云团识别和跟踪，提高雷达对降水过程的识别能力、预警能力和作业监控能力；实现数值模式的云条件预报，地基特种观测设备的云监测分析，建立增雨防雹作业概念模型，拓展以改善空气质量为主的服务领域。通过市—区县—作业点三级联动，实现作业过程全方位跟踪监测指导，作业预警和实时指挥做到了上下功能一体化。发挥了人工影响天气在防灾减灾、改善生态环境、重大应急保障等服务中的作用。



图13 智能人工影响天气系统—大数据智能化平台

Fig. 13 Intelligent weather modification system—big data intelligent platform

3 结论与展望

当前正处于信息化快速发展的时代，重庆智慧气象深度融合服务新型智慧城市建设，通过重庆智慧气象“四天”系统，不仅改变了以往孤立的、分散的业务系统建设方式，还依托现代信息技术，发展智慧气象业务，建立了气象观测、预报、服务、管理的新理念和新模式，为提高重庆智慧气象水平奠定了基础。

重庆智慧气象将继续深入应用云计算、大数据、移动互联、物联网和区块链等现代信息技术，以数值模式精细化评估为基础，同时应用人工智能、机器学习等持续研发天气气候客观预报预测技术，面向用户和全媒体，实现任意空间、任意时间、任意要素按需提供的快速便捷智慧气象服务。将智慧气象“四天”系统建成具备自我感知、判断、分析、选择、行动、创新和自适应能力的系统，让气象观测、预报、服务、管理活动全过程都充满智慧^[25]。

参考文献

- [1] 顾建峰. 智慧气象: 奏响气象科技服务高质量发展和高品质生活的乐章. 重庆日报, 2018-03-23.
- [2] 杨永毅, 赵芳, 朱君. 基于Cassandra与Spark的降水量统计算法的设计与实现. 信息技术, 2020, 43(7): 54-57.
- [3] 杨永毅, 赵芳, 赵思亮. Docker技术在气象云平台服务中的研究. 机械制造与自动化, 2020, 48(5): 113-115.
- [4] 杨永毅, 赵思亮, 赵芳. 气象大数据在Cassandra数据库的应用研究. 现代科学仪器, 2020, 36(3): 14-20.
- [5] 杨永毅. 基于分布式架构的气象数据网设计. 信息技术, 2020, 43(10): 67-71.
- [6] 高松, 方德贤, 陈贵川, 等. 中尺度集合预报对川渝地区“8.16”暴雨过程的分析. 干旱气象, 2018, 36(4): 119-133.
- [7] 吴志鹏, 李跃清, 李晓岚, 等. 2021. WRF模式边界层参数化方案对川渝盆地西南涡降水模拟的影响. 大气科学, 45(1): 5-72.
- [8] 陈良吕, 夏宇, 庄潇然. WRF模式不同地形平滑方案对降水预报的影响. 气象科技, 2020, 48(5): 664-674.
- [9] 陈良吕, 吴钰, 高松. 对流尺度集合预报中模式地形扰动对其预报技巧的影响研究. 暴雨灾害, 2019, 38(6): 649-657.
- [10] Chen L, Liu C, Xue M, et al. Use of power transform mixing ratios as hydrometeor control variables for direct assimilation of radar reflectivity in GSI-based En3DVar and tests with five convective storms cases. Mon Wea Rev, 2021, in press.

(下转104页)