

引用格式：

罗孳孳, 唐云辉, 武强, 阳园燕, 赵雨佳, 张逸轩, 陈欢. 气象大数据应用场景与气象服务技术预见研究——面向重庆农业领域[J]. 农业现代化研究, 2024, 45(1): 150-164.

Luo Z Z, Tang Y H, Wu Q, Yang Y Y, Zhao Y J, Zhang Y X, Chen H. Research on technology foresight of meteorological big data application scenarios and meteorological service technologies: A focus on agriculture in Chongqing[J]. Research of Agricultural Modernization, 2024, 45(1): 150-164.

DOI: 10.13872/j.1000-0275.2024.0004



气象大数据应用场景与气象服务技术预见研究 ——面向重庆农业领域

罗孳孳^{1,2}, 唐云辉^{1,2}, 武强^{1,2}, 阳园燕^{1,2*}, 赵雨佳³, 张逸轩⁴, 陈欢^{1,5}

(1. 中国气象局气候资源经济转化重点开放实验室, 重庆 401147; 2. 重庆市气象科学研究所, 重庆 401147; 3. 重庆市农业技术推广总站, 重庆 401120; 4. 重庆市人工影响天气办公室, 重庆 401147; 5. 重庆市气象服务中心, 重庆 401147)

摘要: 气象大数据在农业领域的应用尚处于模糊前端, 优先发展重要应用场景的气象服务关键技术, 对推动农业农村现代化具有重要的理论价值和现实意义。本研究基于文献计量和德尔菲法的定性定量相结合的技术预见方法, 对“十四五”至 2035 远景重庆农业领域气象大数据应用场景和基于场景的气象服务技术进行了预见。研究表明: “智慧农业”和“数字乡村”是我国农业领域气象相关大数据研究热点主题。气象大数据的重要应用场景和关键气象服务技术集中于农业产业链的产前和产中环节, 农业生产与管理子领域遴选出了最多的 5 个重要场景和 7 项关键技术。关键气象服务技术预期实现时间集中在 2026—2030 年, 研发应用风险总体偏大。此外, 分析结果表明, “政、产、学、研合作不够”、“数据资源获取和共享不畅”、“研究经费投入不足”、“缺少科研和技术人才”是制约气象大数据在重庆农业领域应用的主要因素。针对这些制约因素, 本研究提出了包括促进协同创新、破除“数据壁垒”、提高投入产出效益、培养复合型人才等方面的措施, 以推动气象大数据在农业领域的创新发展。

关键词: 技术预见; 大数据; 应用场景; 气象服务; 农业; 德尔菲调查; 文献计量

中图分类号: S16 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0275 (2024) 01-0150-15

Research on technology foresight of meteorological big data application scenarios and meteorological service technologies: A focus on agriculture in Chongqing

LUO Zi-zi^{1,2}, TANG Yun-hui^{1,2}, WU Qiang^{1,2}, YANG Yuan-yan^{1,2}, ZHAO Yu-jia³, ZHANG Yi-xuan⁴, CHEN Huan^{1,5}

(1. China Meteorological Administration Key Open Laboratory of Transforming Climate Resource to Economy, Chongqing 401147, China; 2. Chongqing Institute of Meteorological Sciences, Chongqing 401147, China; 3. Chongqing Municipal Agricultural Technology Extension Station, Chongqing 401120, China; 4. Chongqing Weather Modification Office, Chongqing 401147, China; 5. Chongqing Meteorological Service Centre, Chongqing 401147, China)

Abstract: The application of meteorological big data in the agricultural sector is still in its early stages, with priority given to the development of key meteorological service technologies for important application scenarios, which holds significant theoretical value and practical significance for advancing the modernization of agriculture and rural areas. This study utilizes a combined qualitative and quantitative technology foresight approach based on bibliometrics and the Delphi method to anticipate the application scenarios of meteorological big data and the meteorological service technologies based on scenarios in the agricultural sector of Chongqing from the “14th Five-Year Plan” to the 2035 vision. The findings reveal that “smart agriculture” and “digital countryside” are prominent topics in

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFB3901400); 重庆市技术预见与制度创新项目 (CSTB2022TFII-OFX0028); 中国气象局气候资源经济转化重点开放实验室开放课题 (2023007)。

作者简介: 罗孳孳 (1980—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为农业气候资源开发利用、农业气象灾害影响评估和气象技术预见研究, E-mail: loise11@sina.com; 通信作者: 阳园燕 (1978—), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向为农业气象灾害预警、农业气候资源转化评估, E-mail: 18996273823@163.com。

收稿日期: 2023-12-25; **接受日期:** 2024-02-22

Foundation item: National Key R&D Program of China (2021YFB3901400); Technology Foresight and Institutional Innovation Project of Chongqing (CSTB2022TFII-OFX0028); Open Research Project of China Meteorological Administration Key Open Laboratory of Transforming Climate Resource to Economy (2023007).

Corresponding author: YANG Yuan-yan, E-mail: 18996273823@163.com.

Received 25 December, 2023; **Accepted** 22 February, 2024

meteorological big data research within China's agricultural sector. Key application scenarios and meteorological service technologies of meteorological big data are predominantly focused on the pre-production and mid-production stages of the agricultural industry chain, identifying five significant scenarios and seven key technologies within the subfield of agricultural production and management. The anticipated implementation period for key weather service technologies is concentrated between 2026 and 2030, with overall high risks associated with research and development applications. Moreover, the analysis indicates that insufficient cooperation among industry, academia, research, and development, poor access to and sharing of data resources, inadequate investment in research funding, and a shortage of scientific research and technical talents are the primary constraints hindering the application of meteorological big data in Chongqing's agricultural sector. To address these constraints, this study proposes measures including promoting collaborative innovation, breaking down data barriers, enhancing input-output efficiency, and cultivating composite talents to propel the innovative development of meteorological big data in the agricultural sector.

Key words : technology foresight; big data; application scenario; meteorological service; agriculture; Delphi survey; bibliometrics

现代信息技术蓬勃发展带来数据信息爆发式增长,大数据已成为战略性资源,受到国家高度关注。在全球气候变暖背景下,极端天气气候事件对农业的威胁加剧,气象大数据在农业应对和适应气候变化、农业高质量发展中的价值不断显现。气象大数据是智能预报和智慧服务过程中,数据采集、加工处理、预报预测、共享服务等环节产生的海量非结构化或结构化数据及相关技术和应用的总称。结构化数据主要为地面、高空等基础气象观测数据,非结构化数据则包括监测数据(天气雷达、卫星遥感数据等)、模式数据(数值预报等)、产品数据(天气预报、气候预测、决策服务、专业服务、公众服务数据)。气象大数据是现代农业发展的重要引擎,通过运用大数据理念、技术和方法,合理利用和分析气象数据,可以支撑农业产业链各环节的高效运作、智能决策、风险预测和客户服务^[1]。

自大数据兴起以来,国内外已针对农业领域气象大数据开展了众多应用研究和实践案例。例如,美国、欧盟和FAO构建了农情遥感监测与预警系统,基于农情观测、气象资料等大数据,开展作物长势、产量预测^[2-3]。部分创业型公司,如The Climate Corporation基于气象大数据向农民提供种养殖、农业保险等服务,创造了巨大的商业价值^[4]。国内学者采用气象大数据进行农作物物候变化^[5]、产量预测预报^[6]、灾害预警评估^[7-8]等研究,并开发大数据系统,通过对农情、气象、市场等大数据的信息挖掘,开展农情监测预警、灾害损失评价、农产品交易预测^[9-10]。2015年以来,我国相继出台《国务院关于印发促进大数据发展行动纲要的通知》等一系列大数据政策和文件,其中提出了推动气象大数据融入农业农村现代化建设的重要指示和要求。在政策和技术的推动下,气象大数据正被应用到我国农业农村生产、生活、经营、管理等多个领域,与农村一二三产业的融合逐渐加快。然而,从发展阶

段来看,气象大数据在我国农业领域的应用尚处于模糊前端,农村经济、社会、生态等诸多方面的需求、技术和资金投入的路径尚不清晰。脱离应用场景,气象大数据难以有效融入农业农村现代化进程,必然丧失其对农村经济发展、社会治理能力提升等重要社会经济价值实现的引领和推动作用。因此,通过科学的技术预见研究,发现和甄别未来发展阶段气象大数据在农业领域的重要应用场景和依托场景的关键气象服务技术,对准确把握大数据发展机遇,合理制定发展政策,提高农业农村资源配置效率具有重要意义。

技术预见是对未来较长时期内科学、技术、经济及社会发展的系统性研究,其目标是确定具有战略性的研究领域及选择对经济和社会利益具有最大化贡献的通用新技术^[11]。当今世界各国越来越重视技术预见作为战略管理工具的作用^[12],美、日、德、英等发达国家相继开展多轮国家层面的技术预见活动^[11],我国科技部先后组织了5次技术预见活动,区域性技术预见活动也在全国兴起^[13-14]。国内外新一轮国家层面的技术预见活动中,农业是重要的科技领域。如日本第11次技术预见,中国面向2035年科学领域和工程技术领域技术预见等活动中均设置了农业领域议题^[15-17]。气象和大数据则以技术主题的形式出现在信息技术、生态环境等科技领域。如日本第11次技术预见中的“通过混合基因组获得的大数据和人工智能育种”和“针对暴雨等自然灾害先进观测技术”^[15];中国面向2035年生态环境领域技术预见中的“基于大数据和人工智能的地质灾害风险管理技术得到广泛应用”和“开发极端气候影响下综合风险防范技术平台”等技术主题^[17]。另外,相关省市也开展了一些相关主题的区域性技术预见,如上海面向2030年中长期科技重点领域技术预见提出了泛在互联网领域、农业科技领域的一系列大数据关键技术^[18],辽宁省进行了大数据产业

重点领域技术预见^[13]。

梳理以上研究中发现,国家层面的大规模技术预见面向重点科技领域,偏重预见的战略性和竞争性,但在农业领域的技术预见研究中,很少出现气象和大数据的技术主题。区域性的技术预见活动则从中观层次关注“大数据”的特定技术方向,更多地考虑了区域的特色和差异性,偏重于应用^[19],但就现有的研究而言,农业领域大数据智能化方向的技术预见研究尚未受到重视。重庆市具有集大城市、大农村、大山区、大库区于一体的特点,其立体气候独具特色、农业业态多元化,大数据创新发展潜力巨大。本文将面向重庆市“十四五”及 2035 远景,以中观层次的技术预见视角,对该地区农业领域气象大数据应用场景与气象服务技术选择的方法、依据、过程与结果进行分析阐述,旨在为相关领域的应用性技术预见研究提供参考。研究成果对制定农业农村领域大数据发展战略和政策,推动农业农村现代化进程、助力乡村振兴具有重要的理论价值和现实意义。

1 研究方法和设计

1.1 文献计量分析

1.1.1 文献计量分析方法和工具 文献计量利用数学统计方法对文献进行定量化分析,并描述和刻画研究领域的特征与变化规律。该方法以数据为支撑,与德尔菲调查等方法协作,能有效提高预见活动的可操作性和客观性^[20]。关键词是文献研究主题的高度凝练,其出现频率可以反映某领域的研究方向和内容^[21],对关键词的分析能厘清领域的研究热点和发展趋势^[22]。本研究采用文献数据挖掘和可视化应用软件 CiteSpace 进行文献计量分析,通过软件对关键词的量化和知识图谱呈现,获取农业领域与气象相关的大数据研究现状、热点和发展动向。

1.1.2 文献计量分析数据来源与检索 文献计量数据来源设定为中国学术期刊全文数据库(CNKI)的科学引文索引、工程索引、中国科学引文数据库、北大核心和中国社会科学索引。自 2011 年麦肯锡发布大数据报告,“大数据”概念兴起,以“2011 年”为关键时间节点,对邻近时段“大数据”主题文献进行检索识别后,确定选取 2011—2022 年发表文献作计量分析。本研究以广义的农业为对象,涵盖农业、农村等层面^[23]。检索式设定为“(SU='农业'+ '农村'+ '乡村') and (SU='大数据'+ '智能'+ '智慧'+ '云计算'+ '数字化'+ '精准'+ '脱贫'+ '扶贫') and (FT=

'气象'+ '气候'+ '天气'+ '灾害')”。检索式中 SU 表示检索主题,FT 表示检索全文,式意为检索 CNKI 中主题和全文包含式中对应关键词的文献。检索后导出 Refworks 格式文献信息集,每条信息包括标题、关键词、摘要、作者等要素。

1.2 德尔菲调查和数据分析

1.2.1 德尔菲调查和技术预见流程 德尔菲法作为一种采用专家咨询方式的大规模调查方法,具有流程简易、反馈匿名、评估定量等优点,是技术预见领域的核心方法,在日本、英国、德国、APEC 等国家和组织技术预见活动中被广泛采用^[24]。本研究借鉴日本第 11 次技术预见、2015 年“中国未来 20 年技术预见研究”等国内外技术预见活动的先进经验,采取由技术课题拟定、德尔菲调查和集成分析论证三主体构成的技术预见流程,具体如图 1 所示。德尔菲调查通过网络匿名调查问卷的形式向专家进行两轮意见征询。在第二轮调查时向专家反馈第一轮调查结果,以第二轮调查收敛的综合结果作为集成分析论证基础数据。

1.2.2 建立德尔菲调查备选清单 参与式技术预见要以政策导向性原则设置议题^[25]。因此,德尔菲调查备选清单的建立还应结合政策背景分析。本文在通过文献计量分析了解领域研究现状、热点和发展动向的基础上,首先对照《重庆市推进农业农村现代化“十四五”规划》等政策文件,梳理重庆地区农业领域的气象大数据现实需求。结合气象大数据在重庆农业大数据智能化发展中的重要性定位,遵循“唯一性、前瞻性、可行性、完备性”等原则^[18],初拟气象大数据应用场景与气象服务技术清单。然后,经过专家意见和建议征集、多轮研讨、意见收敛等流程,最终建立气象大数据应用场景与气象服务技术备选清单。

1.2.3 德尔菲调查问卷设计 参照国内技术预见项目的问卷指标体系^[16-18],为便于专家理解气象大数据重要应用场景和气象服务关键技术两个预见项目之间的关联性,本研究设置“应用场景—服务技术”的同级关联题目结构,对两者关系给予明确说明,详见表 1。

1.2.4 德尔菲调查数据分析方法 根据表 1,气象大数据应用场景包括“保障农产品有效供给”、“促进农业经济增长”、“提高农民生活质量”和“改善农村生态环境”4 个评价指标项,气象服务技术包括技术核心性、技术通用性、技术带动性 3 个评价指标项。以上单项因素重要性指数采用式(1)计算:

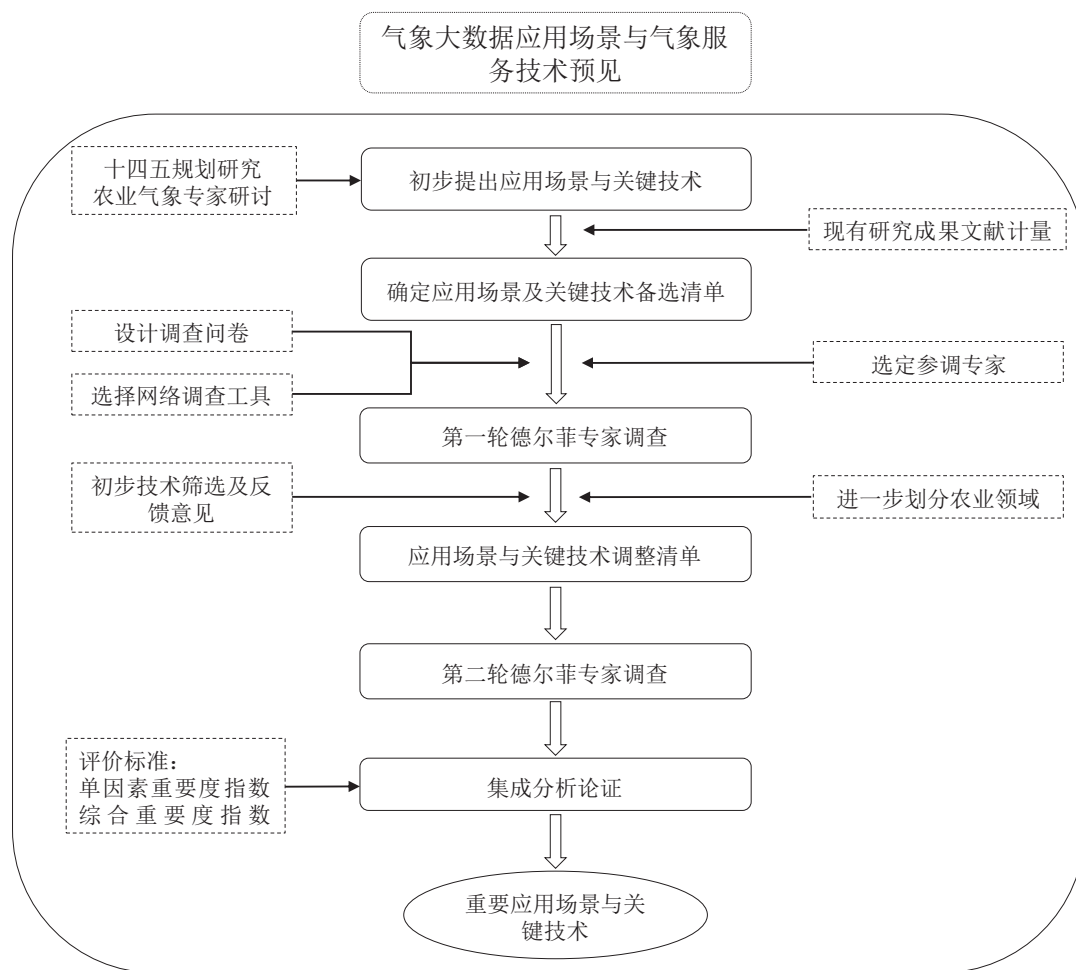


图 1 重要应用场景与关键技术预见流程

Fig. 1 Process for technology foresight of important application scenarios and key technologies

表 1 德尔菲调查问卷主要项目设置

Table 1 Delphi survey item selection

调查项目	评价指标	指标说明	指标选项
气象大数据应用场景重要性	保障农产品有效供给	气象大数据在该场景的应用是否对保障农产品有效供给具有重要作用	A：重要；B：较重要；C：一般；D：不重要。
	促进农业经济增长	气象大数据在该场景的应用是否对促进农业经济增长具有重要作用	
	提高农民生活质量	气象大数据在该场景的应用是否对提高农民生活质量具有重要作用	
	改善农村生态环境	气象大数据在该场景的应用是否对改善农村生态环境具有重要作用	
气象服务技术重要性	技术核心性	该项技术是否在各相关技术群组中起到核心关键作用，其应用是否显著提高相关领域的气象服务水平	A：高；B：较高；C：中；D：低。
	技术通用性	该项技术的应用范围是否广泛，是否是在多个应用场景具有共性的气象服务技术	
	技术带动性	该项技术是否具有先行作用，其研发是否对其他气象服务技术发展具有辐射带动作用	
	研发应用风险	该项技术在重庆是否会面临研发失败、被淘汰、难以实际应用等风险	
	预期实现时间	预计融合大数据技术的气象服务关键技术农业农村应用场景的实现时间	
气象大数据应用的制约因素	制约因素	当前制约气象大数据在农业领域应用的关键因素	A：研发经费投入不足；B：缺少科研、技术人才；C：政、产、学、研合作不够；D：政策法规支持力度不足；E：研发基础较差；F：数据资源获取和共享不畅。

$$I_s = \frac{\sum_{i=1}^n N_i S_i}{\sum_{i=1}^n N_i} \quad (1)$$

式中： I_s 为单项因素重要性指数；当 i 取值为 1 到 4 时， N_i 依次为德尔菲调查有效答卷中“重要”/“高”、“较重要”/“较高”、“一般”/“中”、“不重要”/“低”的作答数，对应的重要性评分 S_i 为 1、0.5、0.25、0。

在完成单项因素重要性分析后，还需计算应用场景和服务技术的综合重要性指数。本研究适度强调“拔尖”，要求突出单项重要性高的应用场景或服务技术在群组中的优势，计算方法应能够反映“边际价值非线性递增趋势”。为满足以上要求，综合重要性指数采用等权平方和求根运算。应用场景综合重要性指数计算公式表示为式（2）：

$$I_{CS} = \sqrt{I_{PS}^2 + I_{EG}^2 + I_{QL}^2 + I_{RE}^2} \quad (2)$$

式中： I_{CS} 为气象大数据应用场景综合重要性指数； I_{PS} 、 I_{EG} 、 I_{QL} 、 I_{RE} 分别为“保障农产品有效供给”、“促进农业经济增长”、“提高农民生活质量”、“改善农村生态环境”4 个单项因素重要性指数。

核心性、通用性、带动性反映了气象服务技术自身的关键性，而从市场需求的角度，技术的研发价值还依赖于其融合大数据技术后，在特定场景所展示出的应用前景。即气象服务技术重要性应是技术自身关键性和其所在场景重要性的综合体现，计算公式表示为式（3）：

$$I_{CT} = I_{CS} \sqrt{I_C^2 + I_V^2 + I_D^2} \quad (3)$$

式中： I_{CT} 为气象服务技术综合重要性指数， I_{CS} 为其所在应用场景综合重要性指数， I_C 、 I_V 、 I_D 分别为技术核心性、技术通用性、技术带动性 3 个单项因素重要性指数。

随后结合算术平均法与中位数法对气象服务技术的预期实现时间和研发应用风险进行分析。中位数法是将有效答卷中所有专家的预测结果按大小排序，排序在二分之一位置的预测结果即为预期实现时间或研发应用风险的中位数。

2 研究结果与分析

2.1 农业领域与气象相关的大数据研究热点主题

通过检索并剔除与研究主题不符、学术性弱的文献，本研究共得到有效文献信息 1 259 条。随后，使用 CiteSpace 进行关键词分析，得到包括关键词

名称、出现频次、共现网络图谱等信息。在此基础上，去除“大数据”和“数字技术”等不具指向意义的词汇，并合并同义词，结合词频和共现图谱进一步从农业和农村两个层面对关键词进行归类，得出了农业领域与气象相关大数据研究的热点主题，具体如表 2 所示。

在农业领域，归类结果包含精准施肥、智能灌溉等主题，其属于精准农业、智慧农业及其延伸方向。这些主题强调了在传统农业向现代农业转型过程中的关键概念，如“精准”、“精确”和“智能”。这些词汇实际上反映了农业实践中“智慧化”的共同核心要素^[26]。未来，大数据、云计算和人工智能等信息技术在农产品生命周期各个环节的应用，将推动整个产业链的不断创新和演进^[27]，从而形成一系列新的气象大数据应用场景，促使新业态的形成。在农村领域，数字乡村成为一个热点主题。数字乡村建设中，“大数据智能化”被视为一项重要任务，大数据与乡村经营、管理和服务等各个方面的融合不断加速。这加速了乡村新兴产业的蓬勃发展，重构了乡村治理方式，提高了治理效能。气象大数据在保险、旅游、物流、生态和健康等多个产业以及公共事业领域的应用场景也逐步清晰。

表 2 农业领域气象相关大数据研究热点主题及代表性关键词

Table 2 Hot topics and representative keywords for meteorology-related big data research in agriculture

研究领域	热点主题	代表性关键词
农业	精准施肥	水肥 - 体化、变量施肥
	智能灌溉	精准灌溉、节水灌溉
	遥感监测	“3S” 技术、无人机遥感、多光谱数据
	智慧农机	农业机械、机器人、智能装备
	智能控制	物联网、智能监控、机器视觉
	设施农业	温室、智能温室、智慧农业大棚
	生态农业	绿色农业、绿色发展、低碳农业
农村	农业资源	种质资源、气候变化、气候智慧型农业
	农村金融	数字金融、农业保险、普惠金融
	乡村治理	精准扶贫、贫困治理
	乡村产业	乡村旅游、产业融合、全产业链

2.2 气象大数据应用场景与气象服务技术备选清单

在向中国气象科学研究院、重庆市农业科学院等 5 家国家和地方气象和农业领域专业机构正高级专家征询对气象大数据应用场景与气象服务技术清单意见和建议的基础上，通过多轮会议研讨，对意见进行收敛，最终形成 5 个子领域包括 19 个气象大数据应用场景与 32 项气象服务技术备选清单，具体见表 3。

表 3 气象大数据应用场景与气象服务技术备选清单

Table 3 List of alternative options for application scenarios of meteorological big data and meteorological service technologies

子领域	应用场景		气象服务技术	
	编号	名称	编号	名称
农业生产与管理	S101	农场智能监测与精准诊断	T10101	基于遥感-作物模型同化技术的长势定量评估与管理措施优化
	S102	农业生产社会化服务	T10201	多源数据融合与多模型集成的产量动态预报
	S103	牧渔现代化养殖	T10301	基于气象预报与物联网技术的牧渔生产环境调控
	S104	设施农业精细生产	T10401	多要素融合的设施农业环境评价及优化调控决策
	S105	农业绿色生产	T10501	基于天气-效果影响的农药(化肥)施用天气预报
	S106	农业灾害智能化监测预警	T10601	基于高时空分辨率智能网格预报的农业气象灾害(病虫害)风险预报
农业资源利用与农业规划	S201	种质资源发掘及利用	T20101	山地特色优质农产品气候适应性诊断
	S202	优势农作物制种	T20102	新品种选育、引进气候适宜性评估与区划
	S203	农业产业分布与规划	T20201	基于小气候环境模拟的水稻制种花期相遇预测与调控
	S203	农业产业分布与规划	T20301	适应气候变化的气候资源动态评估与精细化农业气候区划
农业农村工程	S301	水利设施与高标准农田规划建设	T20302	农业气候生产潜力及种植布局优化
	S302	农业装备智能化作业	T30101	水-热-作物耦合的农业旱涝灾害风险区划与评估
	S302	农业装备智能化作业	T30201	智能农机高效安全作业气象保障
	S303	乡村规划建设与人居环境改善	T30202	基于气象-栽培环境的农机精准作业智能决策
农产品加工与流通	S401	农产品加工与仓储物流	T30301	乡村防灾与紧急避灾空间规划气候可行性论证
	S402	农产品订单生产及精准营销	T30302	撂荒地 and 宅基地复耕气候适应性评估
	S403	智慧农业保险	T40101	农产品仓储高影响天气气象保障服务
	S404	农产品品质溯源与安全认证	T40201	基于天气指数的订单农业气候风险补偿契约设计
休闲农业与乡村生活	S501	乡村公共服务	T40301	农产品交易天气衍生品(期货)设计
	S501	乡村公共服务	T40302	基于多触发机制的农业天气保险指数厘定(设计)
	S502	都市农业和乡村旅游	T40401	极端气候事件对农产品气候品质影响评价
	S502	都市农业和乡村旅游	T40402	基于生产物流销售全链条多源数据的农产品溯源
	S503	乡村生态保护与修复	T50101	农村气象灾害及其次生灾害风险预警及信息发布
	S503	乡村生态保护与修复	T50102	天气敏感性疾病气象风险指数预报
			T50103	农业-气象-能源耦合的农业农村能源气象服务
			T50201	基于天气-物候深度学习的最佳赏花(采摘)期预报
			T50202	乡村旅游(都市农业观光)气候舒适度评价与预报
			T50203	乡村旅游及康养气候资源经济价值核算
			T50301	多源探测资料云模式融合的人工增雨精准作业
			T50302	基于水-热-碳循环的乡村生态修复气象保障服务

2.3 德尔菲调查的基本情况

2.3.1 参调专家的筛选和组成 随着乡村振兴的全面推进,气象服务已从种养殖向农产品加工、乡村旅游、公共事业等二、三产领域延伸,参调专家应具有比较全面的专业领域知识。基于以上要求,本次调查采取专家推荐的方式,首先由课题组综合考量不同专业、地域、单位性质的专家比例,然后由选定的权威专家推荐参调专家,最后由项目组核定参调专家。

在两轮德尔菲调查中,参与的专家人数均超过 110 人。在第二轮德尔菲调查中,共有 110 名专家被列为候选参调专家,最终有 86 人完成了有效的答卷,完成度达到 78.2%。这些参调专家来自不同领域,包括高校、科研院所、事业单位、企业和政

府部门,占比分别为 27.3%、12.5%、47.7%、5.7% 和 6.8%。其中,正高级专家占 23.86%,副高级专家占 56.82%,总计超过 80%。

2.3.2 德尔菲调查的有效性分析 本研究对两轮德尔菲调查的应用场景和气象服务技术单项得分以及第二轮调查区分重要性的应用场景(得分最高的前 10 个场景为高重要性场景)和气象服务技术(得分最高的前 15 项技术为高重要性技术)单项得分的分布情况进行了对比(图 2)。从分析结果可以看出,第二轮调查中各单项因素的得分中位数普遍低于第一轮调查,表明专家在第二轮调查中对各项因素的评分更加谨慎。此外,第二轮得分的中位数多接近箱体中部或位于下部,这表明数据多呈正态分布或右偏分布,有更多的高值,说明第二轮调查的重要

性区分度更高(图 2a、2b)。各单项因素重要性高低分组间均表现出显著性差异,高重要性组的得分中位数多处于箱体中下部,呈正态或右偏分布,重

要性得分具有明显优势(图 2c、2d)。以上结果说明研究设计的方法能有效识别应用场景和气象服务技术的重要性,具备科学性和实用性。

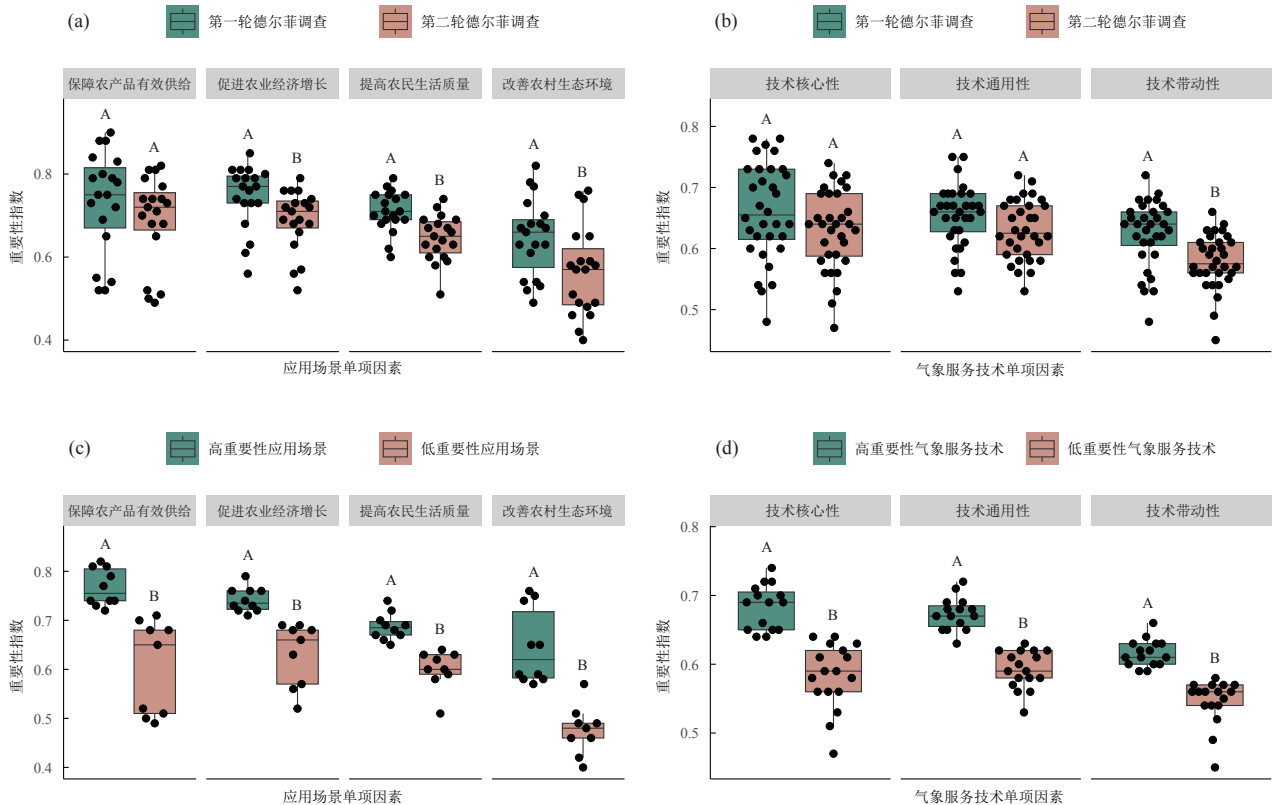


图 2 应用场景和气象服务技术重要性得分分布

Fig. 2 Distribution of importance scores for application scenarios and meteorological service technologies

注: AA 表示两组数据差异不显著 ($P < 0.05$); AB 表示两组数据差异显著 ($P < 0.05$)。

2.4 气象大数据应用场景分析

依据公式(1)计算结果,19个应用场景各单项因素重要性指数得分如图3。结果表明,各子领域应用场景在各单项的重要度表现出整体差异性。在农业生产与管理、农业资源利用与农业规划两个子领域中,应用场景在“保障农产品有效供给”、“促进农业经济增长”方面的重要性较高,得分普遍在70分以上。而在休闲农业与乡村生活子领域,应用场景在“提高农民生活质量”、“改善农村生态环境”方面的重要性较高,得分在65分以上。另一方面,在“保障农产品有效供给”和“促进农业经济增长”方面较低,多数场景得分不超过60分。而农业资源利用与农业规划以及农产品加工与流通子领域应用场景则分别在“提高农民生活质量”与“改善农村生态环境”方面的重要性较低,得分在60分以下。这些数据可以帮助决策者更好地理解各个应用场景的重要性,从而有针对性地制定发展战略和政策。

随着农村一二三产业融合的加深,产业领域呈

现出日益多元化的趋势。因此,本研究在选择重要应用场景时,除评估场景自身的重要度外,还综合考虑了其在子领域分布的均衡性和对推动农业农村多维度发展的重要性。基于以上原则最终确定的10个气象大数据重要应用场景如表4所示。具体来说,农业生产与管理子领域包括了5个重要应用场景,农业资源利用与农业规划子领域包括了2个,而其他三个子领域各包括了1个应用场景。以上结果表明,在“十四五”至2035发展期气象大数据的发展将重点关注农业生产的不同阶段,包括产前、产中环节,以提高精准化和智能化管理水平,从而推动重庆农业向智慧农业转型。此外,还包括了重要的应用场景,如农产品订单生产及精准营销、都市农业和乡村旅游,表明气象大数据将融入到二、三产业的关键领域,这也是未来气象大数据发展的一个趋势。

2.5 气象服务技术分析

2.5.1 关键气象服务技术 采用公式(1)和公式(3)

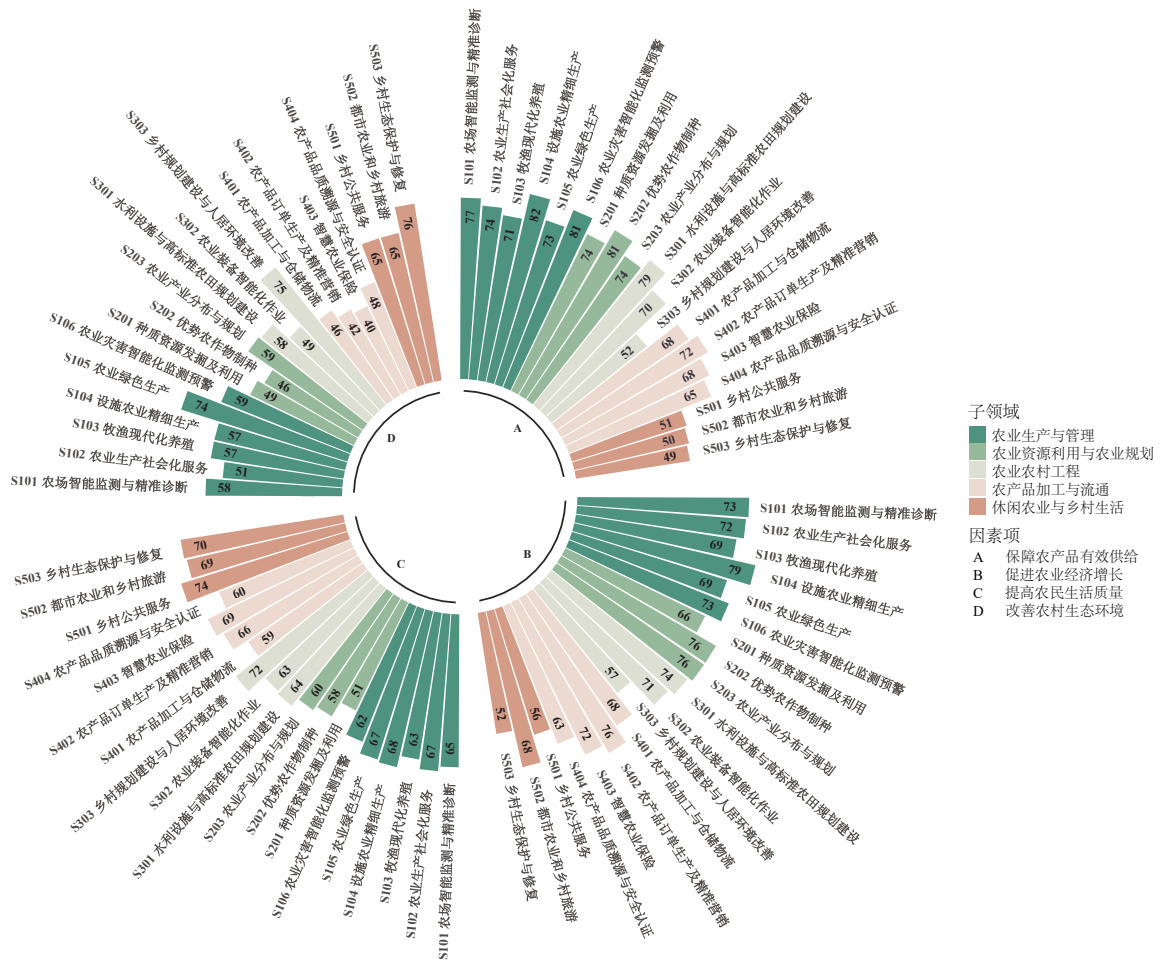


图 3 各子领域气象大数据应用场景的单项因素重要性指数得分

Fig. 3 Individual factor importance index scores for agrometeorological big data application scenarios in various subfields
注：为便于结果的展示和比较，将重要性指数得分换算为百分制，即重要性指数数值乘以 100。

表 4 10 个气象大数据重要应用场景、重要性排序及其所属于子领域
Table 4 10 important application scenarios of meteorological big data, their importance ranking, and their corresponding subfields

所属于子领域	编号	应用场景	重要性排序				综合
			保障农产品有效供给	促进农业经济增长	提高农民生活质量	改善农村生态环境	
农业生产与管理	S101	农场智能监测与精准诊断	5	6	10	5	5
	S102	农业生产社会化服务	6	8	7	12	8
	S104	设施农业精细生产	1	1	6	6	1
	S105	农业绿色生产	9	11	8	3	2
	S106	农业灾害智能化监测预警	2	7	14	4	3
	农业资源利用与农业规划	S202	优势农作物制种	3	2	18	17
S203		农业产业分布与规划	8	3	15	7	6
农业农村工程	S301	水利设施与高标准农田规划建设	4	5	11	2	4
农产品加工与流通	S402	农产品订单生产及精准营销	10	4	9	18	9
休闲农业与乡村生活	S502	都市农业和乡村旅游	18	14	5	10	14

计算得到 32 项气象服务技术的核心性、通用性、带动性和综合重要性指数，为便于比较，将指数归一化到 [0.5, 1] 区间。32 项气象服务技术的重要性指数在各子领域分布的小提琴图如图 4 所示。由图可见，农业生产与管理子领域各单项指数中位数均

在 0.9 以上，明显高于其他子领域，且箱线下四分位至上四分位距离短，数据分布较为集中。这说明重要性高的技术项较多集中于该子领域。农业资源利用与农业规划子领域各单项重要性指数中位数均仅次于农业生产与管理子领域。该子领域核心性指

数分布非常集中，中位数在 0.8 以上，反映出领域技术核心性整体较高，但通用性和带动性指数较为分散，说明某些技术项适用范围较窄，带动效应不足。其他三个子领域各单项指数中位数比较接近，但分布差异较大。农产品加工与流通子领域各单项指数分布均较为集中，而农业农村工程子领域则非常分散（图 4a、4b、4c）。在叠加了应用场景重要性影响后，各子领域综合重要性指数分布趋于集中（图 4d），农业生产与管理子领域指数中位数为 0.9，而其他四个子领域中位数接近，在 0.6~0.7 之间，农业生产与管理子领域重要性表现出明显优势。农业资源利用与农业规划、农业农村工程、休闲农业与乡村生活三个子领域指数中位数低于均值，位置为箱体中下部，呈右偏分布，说明这些子领域有个别得分明显高于领域平均水平的关键技术。

在多个技术指标项均具有高重要性的气象服务技术是技术预见研究关注的重点，本研究对在技术核心性、通用性和带动性三个单项重要性指数得分排名前 15 的气象服务技术进行了集合分析，其集合关系网络如图 5 所示。从图中可见，共有 12 项技术同时是技术核心性、技术通用性、技术带动性

3 个集合的交集，说明气象服务关键技术的集中度非常高，多数关键技术同时具有较高的核心性、通用性和带动性，是综合重要性高的共性技术，应作为遴选的重点。12 项技术中，有 7 项来自农业生产与管理子领域，3 项来自农业资源利用与农业规划子领域，农业农村工程和休闲农业与乡村生活子领域各占 1 项。由此可见，技术指标得分呈现出了“拔尖”的关键技术，但其在子领域的分布不平衡，需按子领域进一步对技术项进行选择，以较为全面地反映各子领域的技术方向。

基于以上分析结果，兼顾技术在子领域分布的平衡性，最终遴选出重庆市“十四五”及 2035 远景 15 项基于大数据的气象服务关键技术（表 5）。这些技术涵盖了各个子领域，其中农业生产与管理子领域气象服务关键技术最多，达到 7 项，其他 4 个子领域各 2 项。从入选技术的特点来看，未来气象服务技术研发重点在于充分挖掘综合气象观测、智能天气预报等多源气象数据资源潜力，进一步融合重庆农业产业大数据，综合运用大数据技术和方法发展精细化的农用天气预报、气象灾害（病虫害）风险预警、作物监测与产量预报、气候风险管理以

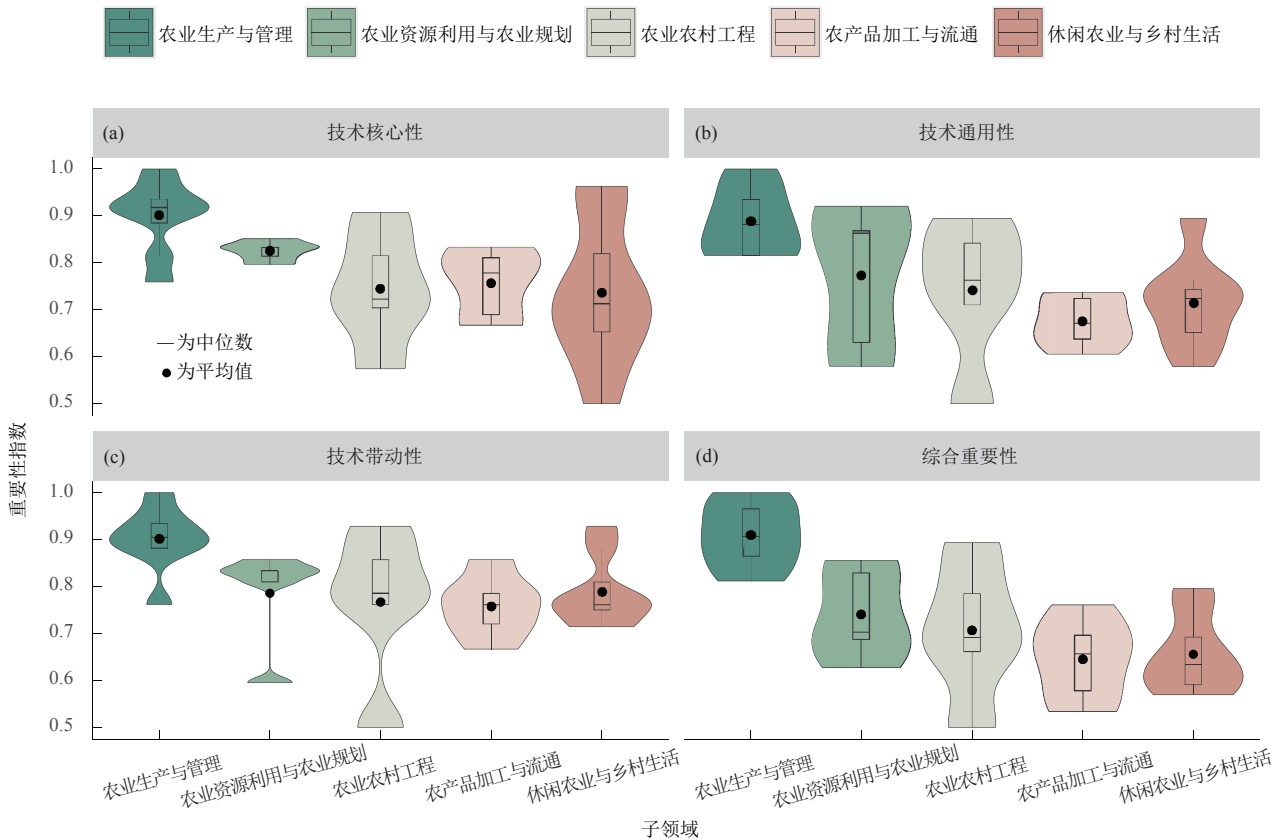


图 4 各子领域气象服务技术核心性、通用性、带动性及综合重要性指数分布

Fig. 4 Distribution of technological centrality, generality, driving force, and comprehensive importance indexes of meteorological service technologies in various subfields

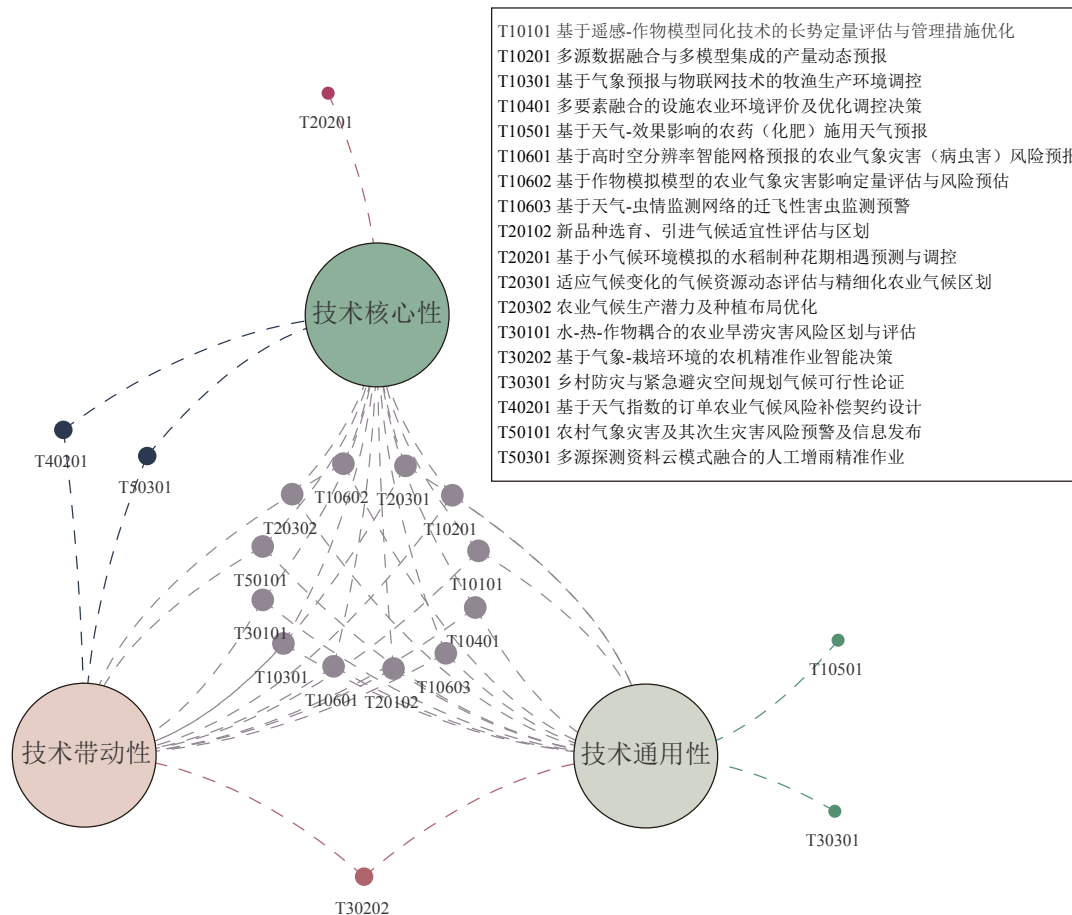


图 5 各单项技术重要性排名前 15 位的气象服务技术集合关系

Fig. 5 Collection of meteorological service technologies with the top 15 ranking of each individual technological importance

表 5 15 项气象服务关键技术、重要性排序及其所属于子领域

Table 5 15 key meteorological service technologies, their importance ranking, and their corresponding subfields

所属于子领域	编号	气象服务关键技术	重要性排序			
			核心性	通用性	带动性	综合
农业生产与管理	T10101	基于遥感-作物模型同化技术的长势定量评估与管理措施优化	1	12	8	4
	T10201	多源数据融合与多模型集成的产量动态预报	6	5	7	7
	T10401	多要素融合的设施农业环境评价及优化调控决策	7	3	6	2
	T10501	基于天气-效果影响的农药（化肥）施用天气预报	21	14	21	9
	T10601	基于高时空分辨率智能网格预报的农业气象灾害（病虫害）风险预报	2	1	1	1
	T10602	基于作物模拟模型的农业气象灾害影响定量评估与风险预估	8	13	9	5
农业资源利用与农业规划	T10603	基于天气-虫情监测网络的迁飞性害虫监测预警	5	2	3	3
	T20301	适应气候变化的气候资源动态评估与精细化农业气候区划	11	4	11	8
农业农村工程	T20302	农业气候生产潜力及种植布局优化	15	10	15	10
	T30101	水-热-作物耦合的农业旱涝灾害风险区划与评估	9	11	12	6
农产品加工与流通	T30202	基于气象-栽培环境的农机精准作业智能决策	16	7	5	13
	T40201	基于天气指数的订单农业气候风险补偿契约设计	13	18	13	15
休闲农业与乡村生活	T40401	极端气候事件对农产品气候品质影响评价	18	20	19	16
	T50101	农村气象灾害及其次生灾害风险预警及信息发布	4	7	5	12
	T50301	多源探测资料云模式融合的人工增雨精准作业	3	17	10	14

及农业适应气候变化等气象服务技术。

2.5.2 气象服务技术预期实现时间与研发应用风险
图 6 呈现了气象服务技术的预期实现时间与研发应

用风险。32 项气象服务技术中有 26 项预期实现时间在 2026—2030 年。农业生产与管理、农业资源利用与农业规划与农业农村工程子领域大多数技术

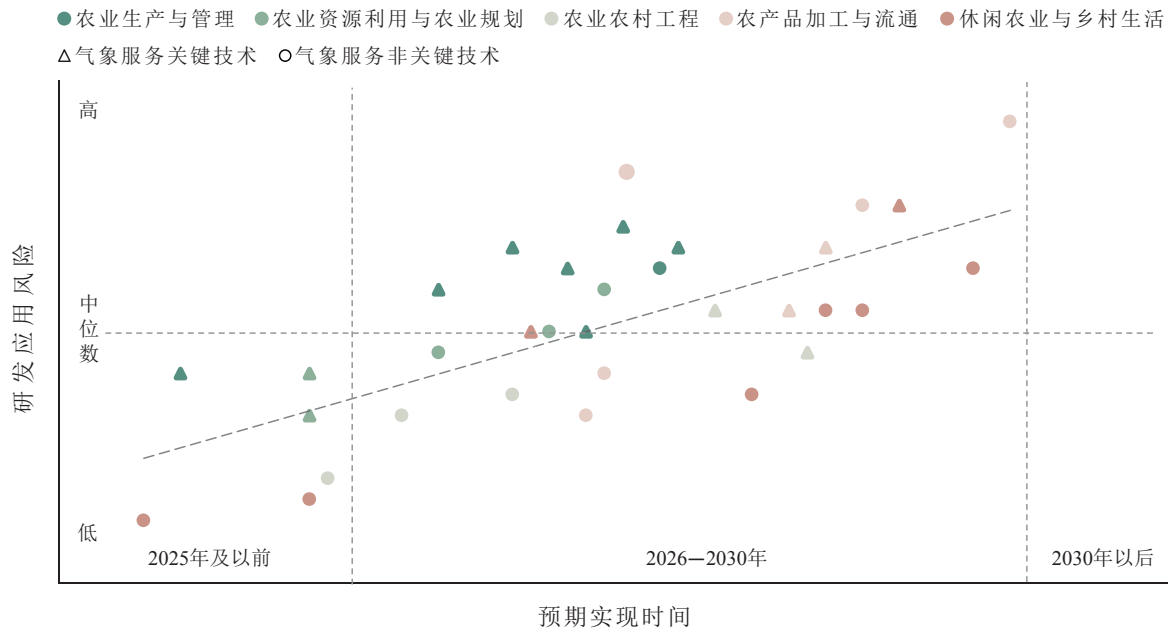


图 6 气象服务技术预期实现时间与研发应用风险

Fig. 6 Expected time and R&D or application risk for meteorological service technologies

预计在 2026—2030 年中前期实现。农产品加工与流通、休闲农业与乡村生活子领域则多数在 2026—2030 年中后期实现。农业生产与管理子领域各项技术预期实现时间的集中度较高，休闲农业与乡村生活子领域各项技术预期实现时间则跨度最大。15 项气象服务关键技术除 3 项预期实现时间在 2025 年及以前外，其余 12 项均在 2026—2030 年。

农业资源利用与农业规划、农业农村工程子领域的多数技术研发应用风险在中位数以下，总体风险较小。农业生产与管理、农产品加工与流通子领

域多数技术得分超过中位数，总体风险较大。休闲农业与乡村生活子领域各项技术研发应用风险差异性大。15 项气象服务关键技术中，有 11 项研发应用风险在中位数及以上，总体风险偏大。皮尔逊相关分析结果表明，气象服务技术研发应用风险与预期实现时间具有显著相关性 ($P < 0.01$)，随着预期实现时间的推迟，研发应用风险显著增大。

2.6 制约气象大数据在重庆农业领域应用的因素

重庆农业领域气象大数据应用的制约因素调查结果如图 7。“政、产、学、研合作不够”是制

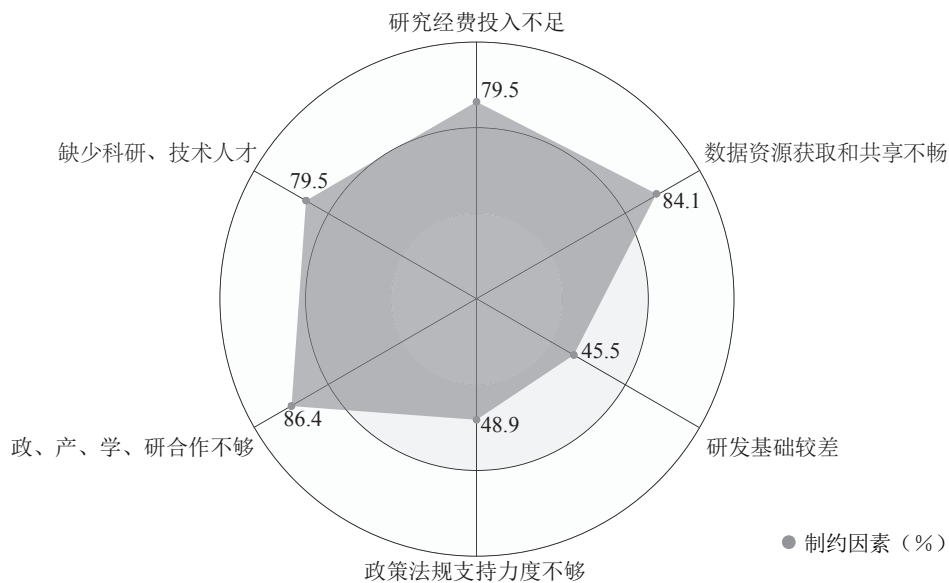


图 7 气象大数据应用的制约因素

Fig. 7 Constraints of agrometeorological big data applications in Chongqing

约气象大数据在重庆农业领域应用的首要因素，有 86.4% 的专家选择了该项。“数据资源获取和共享不畅”是获选比例第二高的选项，84.1% 的专家选择了该项。另外，“研究经费投入不足”、“缺少科研、技术人才”获选比例均接近 80%，也是重要的制约因素。“政策法规支持力度不足”和“研发基础较差”获选比例均不到 50%，是相对次要的制约因素。

3 讨论

3.1 文献计量与德尔菲法的组合预见方法应用

德尔菲法具有决策民主化和科学性的特点，一直在国家层面的技术预见实践活动中被采用。但该方法基于专家判断，参与人的认知偏差和有限理解，不可避免地影响预见的质量^[28]。文献计量法则更多的被用于技术预见学术研究^[29]，通过对文献的数据挖掘，可以分析科技领域的研究前沿，并对未来的新兴技术进行预测^[30]。将文献计量的定量分析结果作为德尔菲调查的参考点，可有效提高技术预见的客观性。新兴的技术预见更加强调学术和实践的结合，日本第 11 次技术预见、2015 年中国科学院“中国未来 20 年技术预见研究”等国家层面技术预见活动，均在文献计量、专利分析等定量研究的基础上展开德尔菲调查。本研究将文献计量和德尔菲法组合预见方法应用到农业领域的大数据技术方向，对气象大数据重要应用场景和气象服务关键技术进行了有效的识别，证明该组合方法在中观层次的技术预见活动中表现出较高的可操作性、客观性和有效性。基于德尔菲法的技术预见通常直接面向关键技术开展调查分析^[17, 31]，本研究根据自身特点在技术流程上做了针对性的优化，设置了“应用场景-服务技术”的同级关联题目结构，气象服务技术的评价建立在应用场景重要性评价的基础之上。气象服务技术与大数据应用场景的依托关系明确，最终以气象服务关键技术作为大数据技术与气象服务的契合点，有的放矢，有助于提高研究成果的应用性。

3.2 气象大数据重要应用场景与气象服务关键技术展望

跨学科、强交叉科技领域的研究正受到国家层面更高的重视，农业气象作为重要的跨学科领域，大数据技术在该领域的发展应受到学术研究和科技政策制定的关注。预见结果显示农业生产与管理是遴选出重要应用场景和关键气象服务技术最多的子领域。通过大数据、物联网、人工智能等现代信息技术的运用，以“生产”引领全产业链深度融合，这与我国“大食物观”的创新发展理念高度契合。

随着农业智能机器人和传感器带来数据在数量和范围上的增长，农业生产越来越依靠数据驱动^[32]，由精准农业到智慧农业的变革正在发生。日本第 11 次技术预见将“使用信息技术（物联网、人工智能、大数据）实时监控”作为科技主题之一也展现了大数据技术对发展智能监控的重要性，而农业气象的智能化监测是智能监控的重要技术方向。“十四五”时期至 2035 年，我国将加速迈进农业 4.0 时代，重庆市政府提出了“构建农业气象综合监测服务网络”、“提升气象灾害监测预警能力”、“开展气象防灾减灾和农业气象保障工作体系规范化建设”等“智慧农业”气象支撑工程相关任务，气象大数据在作物长势监测诊断^[33-34]、气象灾害与病虫害监测预警^[35]、社会化服务等场景的应用将逐步深入。现代天气预报技术、农业气象观测技术迅猛发展，基于气象、遥感与作物等综合大数据的作物模型模拟、灾害监测影响评估与风险预估、气候资源动态评估和精细化作物种植气候适宜性区划等关键技术是未来发展的重点^[36]。

农业绿色生产、农产品订单生产及精准营销、都市农业和乡村旅游等跨领域研究融合的重要性议题在研究中被提出并得到专家的认可。这说明在我国农业农村现代化进程中，与生产、生态、生活息息相关的环保、金融、交通等领域的新业态大数据技术创新是未来的重要技术方向。这与我国技术预见研究活动中所展现出的大数据引领产业领域跨界融合发展的技术发展趋势是一致的。“提升现代山地特色高效农业的质量效益和竞争力”是重庆“十四五”至 2035 远景的重要发展目标，实现这一目标的根本途径是农村一二三产业的融合集聚发展。本文选择的农产品加工与流通、休闲农业与乡村生活子领域的重要应用场景和气象服务关键技术，展示了未来农业产业融合发展方向对气象大数据的需求。在农产品品质和品牌创建、乡村休闲旅游资源开发、农产品加工产业建设以及订单式农业生产等产业创新发展过程中，气象与旅游、运输、保险等行业大数据的融合将不断拓展，形成新兴的大数据应用场景。通过向生产者、经营者、消费者等不同群体提供定向分类的都市农旅天气指数、农产品气候品质评估、气象农产品期货保险等精细化气象服务^[37]，将有助于提高农业的效率和产出质量，增强重庆农业在全国市场中的地位和竞争力。

3.3 技术方法的限制和预见结论的不确定性

尽管本研究较好的对气象大数据应用场景和气象服务技术进行了甄别和选择，但仍然有一些技

术细节值得探讨。服务技术的遴选虽考虑了场景重要性指数,但个别重要应用场景没有对应的关键技术被选出。例如,“优势农作物制种”作为重要应用场景之一,其对应的气象服务技术“基于小气候环境模拟的水稻制种花期相遇预测与调控”没有被选为关键技术。出现这种情况的原因是本研究采用技术重要性优先原则,以叠加场景重要性的技术重要性指数得分为首要遴选依据。解决该问题的方法是以场景重要性优先为原则,使关键技术的重要应用场景中产生,但这样可能出现过度看重应用场景,而遗漏拔尖的关键技术。技术的遴选首要考虑其本身的重要性还是其依托场景的重要性,可在后续的实证研究或其他同类型技术预见研究中进一步探讨。

此外,“设施农业精细生产”获得了很高的重要性得分,这一预见结果反映出设施农业作为现代农业标志的重要性。2023年中央一号文件要求实施设施农业现代化提升行动,加快大数据等信息技术与设施农业的融合显得更加必要和紧迫。然而,重庆市作为全国日照的低值区^[38],日光温室等设施农业的发展受到限制,发展水平较低。近年来,随着科技发展带来的装备水平提升,气候资源的利用效率和可调节性提高,设施农业在重庆的发展前景值得期待。站在当前传统农业与智慧农业的转折点,以前后向视角所见的设施农业即有发展水平与未来预期之间存在巨大差距,预见结果呈现出不确定性。现代装备和大数据信息技术在发掘山地立体气候资源优势、小气候高效利用模拟以及灾害预警等方面^[39]的应用,能为重庆设施农业创造多大的发展空间有待时间检验。

4 结论与政策建议

4.1 结论

1) 文献计量结果表明,“智慧农业”和“数字乡村”是我国农业领域与气象相关的大数据研究热点主题。随着大数据、物联网等信息技术向农业领域的渗透,气象大数据在精准施肥、智能灌溉等智慧农业生产环节以及农业保险、乡村旅游等数字乡村建设领域的应用研究正逐步深入。

2) 遴选出的 10 个气象大数据重要应用场景与 15 项气象服务关键技术较好的覆盖了重庆农业产业链的重要环节,从社会、经济、生态等方面反映出“十四五”及 2035 远景重庆对气象大数据研发应用的需求。农业生产与管理子领域的重要应用场景和气象服务关键技术数量最多,是未来气象大数据的

重点发展领域。

3) 气象服务技术的研发应用风险随预期实现时间的推迟而显著增大。15 项气象服务关键技术中,有 12 项预期实现时间在 2026—2030 年,有 11 项研发应用风险在中位数及以上,总体风险偏大。

4) “政、产、学、研合作不够”、“数据资源获取和共享不畅”、“研究经费投入不足”、“缺少科研和技术人才”是气象大数据在重庆农业领域应用的主要制约因素。

4.2 政策建议

针对气象大数据在重庆农业领域应用的主要制约因素,结合重庆地区农业大数据智能化的现状和发展需求,本文从政府与部门决策层面,提出以下建议:

1) 促进政、产、学、研协同创新。政府要推动农业、气象、信息技术等领域企业、高校和科研机构建立长效合作机制。鼓励产学研联盟、定期学术活动,支持通过联合申报项目、共建工程中心、重点实验室等形式,协同推进技术研发,提升创新和竞争能力。抓住乡村振兴的战略机遇,发挥大数据市场对产学研协作的引领作用,共同发掘气象大数据在农业全产业链的价值,形成市场驱动的良好循环。

2) 从政策与技术层面破除“数据壁垒”。深化市级部门政务数据共享,建立分级规范的数据共享机制。制定气象大数据共享标准,进一步推进数据的标准化治理。兼顾统筹管理与独立创新,协调农业、气象、水利等部门在重大信息化项目方面的合作,建立集中管理、部门共建、企业参与的大数据平台,为企业和机构提供便捷的数据交流渠道。

3) 提高研发经费投入产出效益。对于未来重要应用场景的农业气象服务关键技术研发,政府及相关部门要有序规划重点项目,加强科研经费统筹,集中投入,鼓励企业和机构与政府联合出资,强化对技术研发成果转化应用的考核,完善奖励制度。

4) 培养“农业+气象”大数据复合型人才。根据重庆大数据智能化人才发展政策,结合复合型人才需求目标,制定细化的人才引进措施。深化气象部门与农业农村等相关领域高校、科研院所、企业的合作,依托市内外高校、企业优势,建设合作培养平台,联合培养专业技能人才。

参考文献:

- [1] Mike G. Big data in 2013: What to expect[J]. Information & Management, 2013, 3(4): 20-25.
- [2] 吴炳方,蒙继华,李强子.国外农情遥感监测系统现状与启

- 示[J]. 地球科学进展, 2010, 25(10): 1003-1012.
- Wu B F, Meng J H, Li Q Z. Review of overseas crop monitoring systems with remote sensing[J]. *Advances in Earth Science*, 2010, 25(10): 1003-1012.
- [3] 潘友菊, 徐玉婷, 於冉, 等. 气候智慧型农业研究: 热点、趋势和展望[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2023, 31(1): 136-148.
- Pan Y J, Xu Y T, Yu R, et al. Climate-smart agriculture research: Hotspots, trends, and prospects[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2023, 31(1): 136-148.
- [4] 陈桂芬, 李静, 陈航, 等. 大数据时代人工智能技术在农业领域的研究进展[J]. 吉林农业大学学报, 2018, 40(4): 502-510.
- Chen G F, Li J, Chen H, et al. A survey of researches on artificial intelligence in the field of agriculture in big data era[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2018, 40(4): 502-510.
- [5] Wang X H, Ciais P, Li L, et al. Management outweighs climate change on affecting length of rice growing period for early rice and single rice in China during 1991-2012[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 233: 1-11.
- [6] 王海军, 柳敏燕, 高娟. 利用遗传算法和支持向量机测算农用地理论单产和可实现单产[J]. 农业工程学报, 2013, 29(19): 244-252.
- Wang H J, Liu M Y, Gao J. Calculation of theoretical and accessible yields of agricultural land based on genetic algorithm and support vector machine[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(19): 244-252.
- [7] 黄杰飞. 基于大数据处理的农业气象灾害评估模型研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2017.
- Huang J F. Research on assessment model of agro-meteorological disasters based on big data processing techniques[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2017.
- [8] Zhang L, Huo Z G, Zhang L Z, et al. Integrated risk assessment of major meteorological disasters with paprika pepper in Hainan Province[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2017, 23(3): 334-344.
- [9] 吴炳方, 张淼, 曾红伟, 等. 大数据时代的农情监测与预警[J]. 遥感学报, 2016, 20(5): 1027-1037.
- Wu B F, Zhang M, Zeng H W, et al. Agricultural monitoring and early warning in the era of big data[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2016, 20(5): 1027-1037.
- [10] 许世卫. 农业大数据与农产品监测预警[J]. 中国农业科技导报, 2014, 16(5): 14-20.
- Xu S W. Agricultural big data and monitoring and early warning of agricultural products[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2014, 16(5): 14-20.
- [11] 郭卫东. 技术预见理论方法及关键技术创新模式选择研究[M]. 北京: 北京大学出版社, 2013.
- Guo W D. Research on the theory and method of technology foresight and the choice of key technology innovation mode[M]. Beijing: Peking University Press, 2013.
- [12] 穆荣平, 任中保, 袁思达, 等. 中国未来20年技术预见德尔菲调查方法研究[J]. 科研管理, 2006, 27(1): 1-7.
- Mu R P, Ren Z B, Yuan S D, et al. The study on methodology of Delphi survey of technology foresight of China towards 2020[J]. *Science Research Management*, 2006, 27(1): 1-7.
- [13] 王倩, 李天柱. 大数据产业重点领域技术预见研究: 以辽宁省为例[J]. 科学与管理, 2017, 37(4): 52-58.
- Wang Q, Li T Z. The study on focus areas of big data industry based on technology foresight in Liaoning Province[J]. *Science and Management*, 2017, 37(4): 52-58.
- [14] 李兴华. 产业技术路线图: 广东科技管理创新实践[M]. 广州: 广东科技出版社, 2008.
- Li X H. Industry technology road mapping: The innovation practice of science and technology management in Guangdong [M]. Guangzhou: Guangdong Science & Technology Press, 2008.
- [15] 王达. 日本面向未来的特定科技领域技术预见分析[J]. 今日科苑, 2020(5): 1-9, 15.
- Wang D. Analysis of technology foresight in Japan's specific fields of science and technology[J]. *Modern Science*, 2020(5): 1-9, 15.
- [16] “中国工程科技2035发展战略研究”农业领域课题组. 中国工程科技农业领域2035技术预见研究[M]. 中国工程科学, 2017, 19(1): 87-95.
- Task Force for the Research on China's Engineering Science and Technology Development Strategy 2035 Agriculture Research Group. Technology foresight research on China's agricultural engineering science and technology to 2035[M]. *Strategic Study of CAE*, 2017, 19(1): 87-95.
- [17] 中国科学院创新发展研究中心, 中国生态环境技术预见研究组. 中国生态环境2035技术预见[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- Center of Innovation and Development, Chinese Academy of Sciences. Technology foresight towards 2035 in China: Ecology and environment[M]. Beijing: Science Press, 2020.
- [18] 上海市科学学研究所. 上海科技发展重点领域技术预见研究报告: 2013-2014[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2015.
- Shanghai Institute for Science of Science. Research Report on Technology Foresight in Key Areas of Shanghai Science and Technology Development: 2013-2014[M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 2015.
- [19] 万劲波. 中观层次技术预见与区域科技发展战略研究[J]. 科学管理研究, 2003, 21(6): 5-8, 75.
- Wan J B. Middle-level technology foresight and regional S & T development strategy[J]. *Scientific Management Research*, 2003, 21(6): 5-8, 75.
- [20] 沙振江, 张蓉, 刘桂锋. 国内技术预见方法研究述评[J]. 情报理论与实践, 2015, 38(6): 140-144, 120.
- Sha Z J, Zhang R, Liu G F. Review of the research on technology foresight method in China[J]. *Information Studies: Theory & Application*, 2015, 38(6): 140-144, 120.
- [21] 张增可, 王齐, 吴雅华, 等. 基于CiteSpace植物功能性状的研究进展[J]. 生态学报, 2020, 40(3): 1101-1112.
- Zhang Z K, Wang Q, Wu Y H, et al. Research progress of plant functional traits based on CiteSpace[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(3): 1101-1112.
- [22] 严陶韬, 薛建辉. 中国生物多样性研究文献计量分析[J]. 生态学报, 2021, 41(19): 7879-7892.
- Yan T T, Xue J H. Bibliometric analysis of biodiversity research literature in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(19): 7879-7892.
- [23] 孙忠富, 杜克明, 郑飞翔, 等. 大数据在智慧农业中研究与应用展望[J]. 中国农业科技导报, 2013, 15(6): 63-71.
- Sun Z F, Du K M, Zheng F X, et al. Perspectives of research

- and application of big data on smart agriculture[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2013, 15(6): 63-71.
- [24] 杨耀武. 技术预见学概要 [M]. 上海: 上海科学普及出版社, 2006.
Yang Y W. Summary of Technology Foresight[M]. Shanghai: Shanghai Popular Science Press, 2006.
- [25] 简兆权, 邓凌云, 李慧泉. 数字治理背景下技术预见共识形成机制研究 [J]. *科学学与科学技术管理*, 2022, 43(12): 46-56.
Jian Z Q, Deng L Y, Li H Q. Research on consensus formation mechanism of technology foresight under the background of digital governance[J]. *Science of Science and Management of S & T*, 2022, 43(12): 46-56.
- [26] 赵春江. 智慧农业的发展现状与未来展望 [J]. *华南农业大学学报*, 2021, 42(6): 1-7.
Zhao C J. Current situations and prospects of smart agriculture[J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2021, 42(6): 1-7.
- [27] 李建军, 白鹏飞. 我国智慧农业创新实践的现实挑战与应对策略 [J]. *科学管理研究*, 2023, 41(2): 127-134.
Li J J, Bai P F. Realistic challenges and countermeasures of China's smart agriculture innovation practice[J]. *Scientific Management Research*, 2023, 41(2): 127-134.
- [28] 张冬梅, 曾忠禄. 德尔菲法技术预见的缺陷及导因分析: 行为经济学分析视角 [J]. *情报理论与实践*, 2009, 32(8): 24-27.
Zhang D M, Zeng Z L. Analysis of the defect and cause of the Delphi method of technology foresight: a behavioral economics analysis perspective[J]. *Information Studies: Theory & Application*, 2009, 32(8): 24-27.
- [29] 张永伟, 周晓纪, 宋超, 等. 国内外技术预见研究: 学术研究与政府实践的区别与联系 [J]. *情报理论与实践*, 2019, 42(2): 50-55, 95.
Zhang Y W, Zhou X J, Song C, et al. Technology foresight research at home and abroad: Differences and relations between academic research and government practice[J]. *Information Studies: Theory & Application*, 2019, 42(2): 50-55, 95.
- [30] 梁帅, 李海波, 陈娜. 我国技术预见研究综述 [J]. *科技管理研究*, 2014, 34(17): 245-250.
Liang S, Li H B, Chen N. Review on technology foresight in China[J]. *Science and Technology Management Research*, 2014, 34(17): 245-250.
- [31] 陈进东, 张永伟, 梁桂林, 等. 中国工程科技 2035 关键技术选择与评估 [J]. *中国软科学*, 2019(8): 144-153.
Chen J D, Zhang Y W, Liang G L, et al. Key technology selection and evaluation for China's engineering science and technology to 2035[J]. *China Soft Science*, 2019(8): 144-153.
- [32] Wolfert S, Ge L, Verdouw C, et al. Big data in smart farming: A review[J]. *Agricultural Systems*, 2017, 153: 69-80.
- [33] 柳平增, 王雪, 宋成宝, 等. 基于大数据的西藏荒漠化治理植物优选与验证 [J]. *农业工程学报*, 2020, 36(10): 166-173.
Liu P Z, Wang X, Song C B, et al. Optimal selection and verification of plant species for desertification control in Tibet based on big data[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(10): 166-173.
- [34] 侯英雨, 何亮, 靳宁, 等. 中国作物生长模拟监测系统构建及应用 [J]. *农业工程学报*, 2018, 34(21): 165-175, 312.
Hou Y Y, He L, Jin N, et al. Establishment and application of crop growth simulating and monitoring system in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(21): 165-175, 312.
- [35] 郭安红, 王纯枝, 邓环环, 等. 草地贪夜蛾迁飞大气动力条件分析及过程模拟 [J]. *应用气象学报*, 2022, 33(5): 541-554.
Guo A H, Wang C Z, Deng H H, et al. Atmospheric dynamics analysis and simulation of the migration of fall armyworm[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2022, 33(5): 541-554.
- [36] 侯英雨, 张蕾, 吴门新, 等. 国家级现代农业气象业务技术进展 [J]. *应用气象学报*, 2018, 29(6): 641-656.
Hou Y Y, Zhang L, Wu M X, et al. Advances of modern agrometeorological service and technology in China[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2018, 29(6): 641-656.
- [37] 欧善国. 气象视域下广州都市农业创新发展策略研究 [J]. *广东农业科学*, 2020, 47(6): 134-144.
Ou S G. Research on urban agricultural innovation and development strategy in Guangzhou from the perspective of meteorology[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2020, 47(6): 134-144.
- [38] Wu W, Tang X P, Yang C, et al. Spatial estimation of monthly mean daily sunshine hours and solar radiation across China's mainland[J]. *Renewable Energy*, 2013, 57: 546-553.
- [39] 魏瑞江, 孙忠富. 我国日光温室小气候研究进展与展望 [J]. *西北农林科技大学学报 (自然科学版)*, 2014, 42(12): 139-150.
Wei R J, Sun Z F. Development and perspective of research on microclimate of sunlight greenhouse in China[J]. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2014, 42(12): 139-150.

(责任编辑: 孟岑)