

智慧农业驱动川产道地药材产业升级的路径研究

陈 稷¹, 刘 瑶^{1*}, 李 瑞¹, 王晓琴², 马日勇², 黄 进³, 田孟良^{1*}

(1. 四川农业大学农学院, 成都 611130; 2. 雅安市宝兴县农业农村局, 四川 雅安 625700;

3. 成都理工大学环境生态学院, 成都 610059)

摘 要: 川产道地药材作为中医药文化的重要资源, 在传统栽培中面临资源浪费、生产效率低下及质量追溯困难等瓶颈, 制约产业升级. 本文基于智慧农业技术快速发展的背景, 系统分析物联网、大数据、人工智能及区块链等技术在川产道地药材栽培中的创新应用, 结合文献梳理与典型案例研究, 探讨其如何通过环境精准监测、生长模型构建、智能化决策及全链条溯源体系, 推动药材生产从“经验驱动”向“数据驱动”转型, 以促进智慧农业技术在川产道地药材栽培中的应用, 助力川产道地药材突破传统模式局限, 实现品质优化与生态经济协同发展.

关键词: 智慧农业; 川产道地药材; 栽培; 产业升级

中图分类号: S-01;R282 **文献标识码:** A **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



中药材的栽培、加工及销售在传统农业和我国经济发展中具有重要地位. 川产道地药材得益于四川盆地独特的自然环境与千年农耕文化, 成为我国中医药文化的重要瑰宝. 然而, 随着市场需求激增, 传统栽培模式下的川产道地药材存在资源浪费、生产效率低下及质量追溯困难等问题. 在此背景下, 如何通过技术创新实现药材种植的精准化、标准化和绿色化, 成为推动产业升级的核心命题.

为此, 现代信息技术与农业生产相结合的智慧农业技术逐渐兴起, 为解决上述矛盾提供了全新路径. 智慧农业利用先进的信息技术和智能设备, 整合农业生产中的各个环节, 通过物联网、大数据、人工智能及区块链等技术, 构建“感知—收集—分析—决策—执行”的闭环系统. 这一系统能够实现中药材的环境参数动态监测、生长模型构建、病虫害智能预警、水肥自动化灌施、产品追溯体系及资源高效调配^[1-6], 推动中药材种植业高质量发展, 实现经济效益与生态效益协同提升. 当前, 国家层面已将智慧农业纳入乡村振兴战略重点. 《“十四五”全国农业农村信息化发展规划》明确提出发展智慧农业, 建设基于物联网、大数据、智能控制、卫星定位的农田管理测控系统, 实现生产全程机械化, 建立健全智慧农业装备和软件检验检测体系, 完善国家

农产品质量追溯管理信息平台功能, 提升农产品供给质量和效率^[7]. 然而, 目前的研究主要集中在大宗农作物的智慧化应用, 而对川产道地药材这一特殊农产品的综合性应用正从局部试点向全域渗透, 但仍面临技术适配难、数据体系不健全、人才供给不足等问题.

本文系统梳理智慧农业在川产道地药材栽培中的研究现状与发展方向, 从川产道地药材在传统农业与经济发展中的重要性出发, 指出传统栽培模式下的川产道地药材所面临的挑战与困难, 重点探讨智慧农业中物联网、大数据与人工智能等核心技术在川产道地药材产业中的具体应用, 提出了未来发展的战略路径, 旨在从技术创新、政策协同、品牌打造与国际合作等方面推动构建“科技赋能—产业升级—生态保护”三位一体的现代化发展模式, 以期川产道地药材产业实现高质量振兴与可持续发展提供理论支持.

1 川产道地药材在传统农业与经济发展中的重要性

中药材种植作为现代农业体系的关键领域, 在推动传统医药体系传承创新和农业生产结构优化方面发挥着支柱作用, 同时成为农村经济振兴战略

收稿日期: 2025-06-04.

基金项目: 国家现代农业产业技术体系四川道地中药材创新团队项目(SCCXTD-2026-19); 四川农业大学雅安市市校合作成果转化揭榜挂帅项目(2025-CGZH-00012-NC); 西藏高原智创种业繁育技术创新中心科技计划项目(LSQSCNYQ2025001).

* 通信联系人. E-mail: secondat@sicau.edu.cn; ly113000@163.com

的核心要素。2016年国务院印发的《中医药发展战略规划纲要(2016—2030年)》中明确提出要全面提升中药产业发展水平,加强中药材资源保护利用,推进规范化种植养殖,构建现代中药材流通体系,促进中药工业转型^[8]。四川省作为中药材资源大省,川产道地药材在中药材领域中占据核心的地位。其历史地位可追溯至《神农本草经》,其中有“川药首药”之称的川芎被列为上品^[9]。魏晋时期《本草经集注》以“第一”“最佳”等词汇评价描述11种川产道地药材。明代《本草品汇精要》系统标注269种药材道地产区,52种明确为四川所产^[10]。明清医籍更突出川药品质优势,如《本经逢原》《本草从新》等多次强调川贝母“味甘性润”“品质最优”,通过与其他产区对比,确立了川产药材的卓越地位^[11-12]。综上可见,充分印证了川产道地药材的卓越地位和重要价值。

川产道地药材种植在全省农业产业中占据着举足轻重的地位,常见大宗药材如表1所示。2021

年,四川省中药材种植面积突破50万hm²大关,其产值高达325亿元。从2013—2021年四川中药材播种面积和产量呈现出明显的上升态势,整体增长了44.2%和42.6%^[13]。近年来,川内多地大力发展道地药材产业,并通过多种方式拓宽市场,凸显出川产道地药材的巨大价值。宜宾市筠连县丰乐乡白果村着力把白及打造成为主导产业之一,打造了100多亩连片林下白及种植基地,预计收益达到340余万元。绵阳市三台县建成了全国最大的麦冬标准化种植基地,种植面积达7万余亩,产量占全国70%以上,产品远销日本、韩国、俄罗斯等多个国家,总产值超过40亿元。2023年“川药”年综合产值突破1200亿元,四川多次组织企业赴香港、澳门推介川产道地中药材和大健康产品,并与云南、贵州、重庆成立乌蒙山中医药传承创新发展联盟。近年来,四川的中药材及提取物已出口到美国、意大利、澳大利亚、日本、韩国、新加坡等20多个国家,获得海内外一致好评^[14]。

表1 大宗常用川产道地药材信息表

Tab. 1 Information table of bulk commonly used authentic regional medicinal materials from Sichuan

药材名称	基原	主要产区 (四川省内)	核心功效	道地药材特征
川贝母	百合科植物川贝母 <i>Fritillaria cirrhosa</i> D. Don、暗紫贝母 <i>Fritillaria unibracteata</i> Hsiao et K. C. Hsia、甘肃贝母 <i>Fritillaria przewalskii</i> Maxim.、梭砂贝母 <i>Fritillaria delavayi</i> Franch.、太白贝母 <i>Fritillaria taipaiensis</i> P. Y. Li或瓦布贝母 <i>Fritillaria unibracteata</i> Hsiao et K. C. Hsia var. <i>wabuensis</i> (S. Y. Tang et S. C. Yue) Z. D. Liu, S. Wang et S. C. Chen的干燥鳞茎	阿坝州(松潘、红原)、甘孜州(康定、炉霍)、凉山州(木里)	清热润肺,化痰止咳,散结消痈	川贝母常生长于高海拔的高山草甸或流石滩,其道地品质与特殊生境密切相关。其中松潘所产的“松贝”因其“怀中抱月”的形态特征和“形小、色白、质脆、气微”的特点被奉为极品。主产于昌都地区,过去集散于打箭炉(今四川省甘孜族自治州的康定县)的“炉贝”长圆锥形如马齿,表面白色有深黄色斑点,形成虎纹,也称为虎皮贝。《中国药典》将其单列,与浙贝、平贝等区分
川芎	伞形科植物川芎 <i>Ligusticum chuanxiong</i> Hort的干燥根茎	都江堰、彭州、眉山	活血行气,祛风止痛	都江堰产的“灌芎”或“坝川芎”被视为品质最佳,其根茎坚实、油性足、香气浓郁;彭州川芎多呈结节状拳形团块,以“菊花心”而闻名;眉山洪雅县的多呈分散状拳形团体
黄连	毛茛科植物黄连 <i>Coptis chinensis</i> Franch.、三角叶黄连 <i>Coptis deltoidea</i> C. Y. Cheng et Hsiao或云连 <i>Coptis teeta</i> Wall.的干燥根茎	彭州、峨眉山、大邑(味连);峨眉山、洪雅(雅连)	清热燥湿,泻火解毒	四川是“味连”和“雅连”的主产区。味连产于彭州,聚集簇生,弯曲,状如鸡爪,可见“过桥”;雅连主产于四川省洪雅县、峨眉一带,多为单枝,根条粗壮,略呈圆柱形,微弯曲,苦味极浓,有效成分含量高。《中华本草》记载“四川产者品质最佳”
附子/川乌	毛茛科植物乌头 <i>Aconitum carmichaelii</i> Debx.的子根(附子)和母根(川乌)的加工品	江油(核心道地产区)	附子:回阳救逆,补火助阳,散寒止痛。川乌:祛风除湿,温经止痛	“江油附子”是公认的道地药材,有“世界附子在中国,中国附子在四川,四川附子在江油”之说。其独特的栽培和加工技艺是保证其药效和降低毒性的关键,已被列入国家级非物质文化遗产。江油附子常见加工品为盐附子、黑顺片和白附片三类,盐附子外形为圆锥形,表面灰黑色,附盐霜,周围有瘤状支根或根痕;黑顺片上宽下窄,外皮黑褐色;白附片无外皮,黄白色,半透明

表 1 (续)

药材名称	基原	主要产区 (四川省内)	核心功效	道地药材特征
麦冬	百合科植物麦冬 <i>Ophiopogon japonicus</i> (L. f.) Ker-Gawl. 的干燥块根	绵阳市三台县	养阴生津, 润肺清心	三台县是我国最大的麦冬产区 and 出口基地, 被誉为“中国麦冬之乡”。川麦冬具有形如纺锤、色黄透亮的特质, 入口微甜带回甘。《中药志》明确记载“以四川绵阳、三台所产质量最佳”
白芷	伞形科植物白芷 <i>Angelica dahurica</i> (Fisch. ex Hoffm.) Benth. et Hook. f. 的干燥根	遂宁(“川白芷”的核心产区)	解表散寒, 祛风止痛, 宣通鼻窍, 燥湿止带	“遂宁白芷”是著名的道地药材, 其内呈粉红色菊花芯纹路, 块根均匀、条粗壮, 体重质硬, 香气浓郁, 被誉为“白芷之王”。其有效成分(欧前胡素等)含量高, 药用价值显著
泽泻	泽泻科植物泽泻 <i>Alisma orientale</i> (Sam.) Juzep. 的干燥块茎	都江堰、彭州	利水渗湿, 泄热, 化浊降脂	都江堰石羊镇等地所产的“川泽泻”似球形, 个大、质坚、色黄白、粉性足, 被视为道地药材
郁金	姜科植物温郁金 <i>Curcuma wenyujin</i> Y. H. Chen et C. Ling、姜黄 <i>Curcuma Longa</i> L.、广西莪术 <i>Curcuma kwangsiensis</i> S. G. Lee et C. F. Liang 或蓬莪术 <i>Curcuma phaeocaulis</i> Val. 的干燥块根	双流、崇州、新津(成都周边地区)	活血止痛, 行气解郁, 利胆退黄	四川是郁金的主要产区之一, 历史上以“黄丝郁金”(姜黄的块根)品质为佳, 黄丝郁金呈纺锤形, 有的稍扁, 有的一端细长, 表面棕灰色或灰黄色, 其断面橙黄色, 角质状, 香气特异。其产区常与莪术、姜黄等药材的产区重叠
丹参	唇形科植物丹参 <i>Salvia miltiorrhiza</i> Bge 的干燥根和根茎	中江县(传统道地产区)	活血祛瘀, 通经止痛, 清心除烦	“中江丹参”已成为地理标志产品, 其根条粗壮肥大、颜色紫红、质地坚实, 有效成分含量高
川牛膝	苋科植物川牛膝 <i>Cyathula officinalis</i> Kuan 的干燥根	乐山市金口河、天全、洪雅、雅安	逐瘀通经, 通利关节, 利尿通淋	四川所产的川牛膝条粗壮、质地坚韧、不易折断, 其活血通经、引血下行的力量更强, 长于治疗关节痹痛。天全川牛膝断面呈“菊花心”, 味甜无麻味, 为上品; 金口河是公认的道地产区, 所产川牛膝色黄节部膨大, 品质佳
天麻	兰科植物天麻 <i>Gastrodia elata</i> Bl. 的干燥块茎	通江县、广元市、乐山市、宜宾市	息风止痉, 平抑肝阳, 祛风通络	四川是天麻的主要产区之一, 尤以“通江天麻”闻名。其特点个大肥厚略弯曲、色白, 质坚实, 断面半透明状, 有效成分天麻素含量高; 广元青川天麻其特点为色褐皱纹多, 肉厚体白; 宜宾天麻以色黄白、个大、体实、无空心、断面角质样为佳

2 川产道地药材在传统栽培模式下面临的挑战与问题

2.1 资源利用效率低, 生态与品质风险突出

随着国务院办公厅关于《中医药振兴发展重大工程实施方案》的出台, 四川中药材种植业将进一步加速转变进程, 坚持节约集约利用土地资源, 提高土地资源利用效率, 寻求更高质量的可持续健康发展成为中药材产业的关键点^[13]。在传统栽培模式下, 中药材生产管理过度依赖人工经验且较为粗放, 在水肥管理上, 普遍存在灌溉不精准、肥料过量施用的问题; 在病虫害防治方面, 常以化学手段为主, 且存在随意使用植物生长调节剂的现象。同时

中药材的农残超标现象日益显著, Wang 等^[15]通过采集自中国主要产区的种植地、药材市场、煎制公司和药店, 以覆盖中药材的几乎所有流通渠道。研究结果显示, 89.2% 的样品检出农药残留, 76.0% 为多残留; 百里香等药材检出率高达 100%。国际数据也表明, 部分草药样本农药残留超出欧盟限量标准^[16]。这些现象易造成中药材生态环境恶劣, 长此以往形成恶性循环, 严重威胁药材品质。许艳秋等^[17]指出在麦冬等川产道地药材种植过程中, 施用植物生长调节剂的用量、时间和方式等尤为重要, 常出现多效唑等植物生长调节剂使用不当问题, 造成药材减产、土壤质地与肥力下降、影响后茬作物

生长及下流水源污染等一系列问题。Yue等^[18]指出盲目引进和扩产会严重影响三七生产的合理分布,大大削弱药材有效成分含量的可靠性,导致药材质量严重下降,致使土地资源与药材资源的双重浪费。

2.2 生产效率低,市场信息存在壁垒,规模化发展受限

在当前时代背景下,随着人口老龄化进程的不断加快,人力成本逐年攀升,在中药材种植的生产成本中,人工成本所占比重之高达70%~80%左右^[19]。传统的人工种植与栽培管理方式易依赖个体能力,在效率上存在明显不足,应对市场需求变化与中药材价格波动方面能力不足,难以契合当下大规模标准化中药材生产的要求。例如,中江白芍作为著名的川产道地药材之一,多集中种植于丘陵区域,农田基础设施条件相对较差,农户种植依赖于传统方法、获取先进科学技术与智能设备方面存在渠道缺失,导致了白芍种植不规范、生产成本较高、综合生产效率水平较低等一系列问题,难以满足种植户提升种植水平与效益的需求,制约了芍药种植产业综合生产效率的提升^[20]。以四川丹棱油菜的病虫害防治为例,传统人工农药防治需根据天气提前安排人员,100万m²油菜需50人耗时约7天才能完成全部打药工作,亩均工资24元。耗时长、效率低、人工成本高等问题显而易见,制约了当地油菜种植产业综合生产效率的提升^[13]。同时,传统种植缺乏专业市场信息服务平台支持,农户对价格波动和需求变化反应迟缓,中药材种植户常因信息不对称,陷入低价抛售或盲目扩种的困境,难以抵御市场风,无法合理规划种植,缺少中药材价格预期管理和种植规模预期管理规模化信息整合,导致川产道地药材生产和经济效益低下^[21]。

2.3 溯源体系缺位,多环节标准化缺失致品质不均

传统模式下,我国中药材从种植到流通环节存在信息分散、缺乏全链条溯源管理等突出问题。在种植环节,生产主体分散、种植方式粗放及抢收等行为导致药材品质参差不齐;加工环节因设备落后、炮制工艺不规范引发硫超标、水分过高等质量隐患;叠加包装标准缺失、信息标识不明及运输养护水平落后等因素,导致二次污染风险加剧,质量追溯体系难以有效运行^[22]。上述问题的根源在于传统栽培模式下全链条溯源体系的长期缺位,致使种植端源头数据断层、流通环节质量信息损耗严

重。在《四川省“十四五”中医药高质量发展规划》提到“两体系、三标准、五规范”等基础性溯源框架的补位建设。进一步反映传统模式下,中药材产业在标准化种植、规范化追溯等核心环节仍存在系统性短板。以川贝母为例,李瑞琦等^[23]对川贝母的外观性状进行客观量化,结果指出传统颜色判别川贝母质量的方式并不准确,且近年来出现的水洗去除川贝母泥土的加工方式也并不可取,水洗虽然降低了总灰分含量,却也导致了有效成分含量的降低。这一现象凸显了川产道地药材从生产到鉴定流通等环节中存在缺乏标准化的局限性。目前川贝母的加工方式多样,如传统加工法、水洗法、熏硫法等,不同的加工方法对川贝母有效成分的影响存在差异^[24]。传统加工方法在长期实践中虽有一定经验可循,但面对当下的药材质量和市场要求,其缺乏系统、精确标准的弊端逐渐显现。为实现川产道地药材的品质保障以及中医药行业的长远发展,加强中药溯源体系和标准化建设至关重要。

传统栽培方式下川产道地药材在资源利用、生产效率、质量控制等方面存在显著短板,亟需引入先进智慧农业技术推动实现资源高效整合利用、标准化智能化种植体系、溯源体系的完善及信息平台建设,以完成从“经验种植”向“智慧种植”的转型。

3 智慧农业技术在中药材领域的发展趋势

利用CiteSpace 6.3 R1软件对中国知网数据库中2015—2025年以“智慧农业核心技术”和“中药材”为主题的中文核心文献进行检索,共收集700篇文献进行热点分析和研究成果数量变化统计并绘制综合图表(图1),具体为关键词共享图(图1a)、高突显度关键词(图1b)、成果数量变化图(图1c),可知目前智慧农业核心技术在中药材领域的研究热点逐年攀升,发文数量大幅度增加,其研究前沿和发展趋势主要集中在大数据、人工智能、物联网、深度学习等新一代信息技术的深度融合,为中药智能化的发展和标准化质量控制提供不可缺失的平台和载体。

当前,智慧农业技术在中药材领域的集成应用对传统中药种植产业升级产生变革性影响。智慧农业技术通过卫星导航实现精准化、机械化播种;通过传感器、监测设备和无人机等技术,能够实时获取、分析土壤、气象、作物生长等多维度信息,实现病虫害智能诊断,优化种植环境,满足中药材生

长需求;分析可挖掘数据价值,预测市场需求与价格波动,助力药农合理规划种植,提高种植效率与利润;通过区块链等技术全程记录生产、加工、运输、销售等环节信息,实现质量追溯,增强消费者信

任度与提高产品附加值;通过建立中草药种植、加工、质检的一体化平台,实现药材品质快速鉴别,保障药材道地性、优化供应链,建立一个“多中心”一体化信息平台^[25-29]。

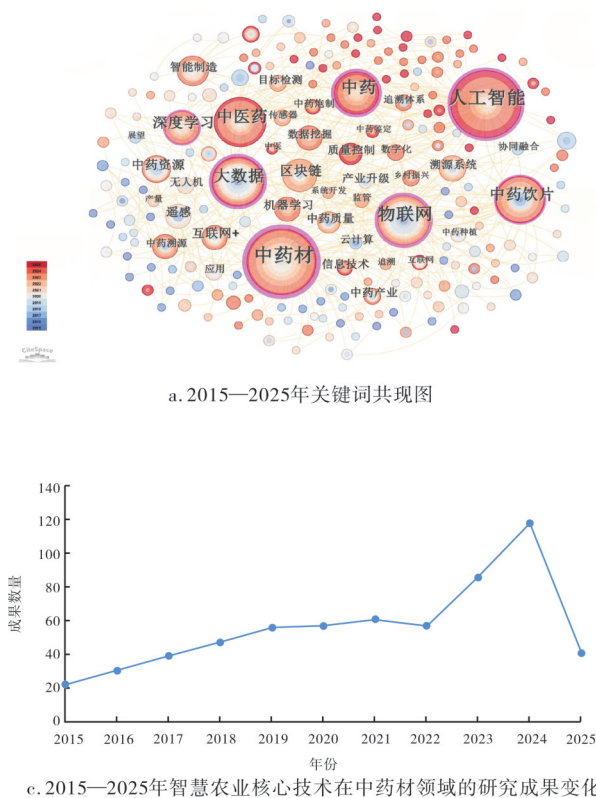


图 1 2015—2025年智慧农业核心技术在中药材领域研究热点及成果变化综合图

Fig. 1 Comprehensive map of research hotspots and achievements of smart agriculture core technology in the field of traditional Chinese medicine from 2015 to 2025

从已有的成果来看,安顺市宝林科技公司凭借数字化智能大棚与传感器等智慧农业技术,高效实施水肥一体化设施及数字化管理体系,扩种毛慈姑 1 000 亩,带动 200 余农户日均增收 100 元,形成“公司+农户”联农机制^[30]。玉溪市新平县建兴乡马鹿社区各级携手构建科技赋能振兴乡村创新体系,依托智慧农业技术,开展天门冬、滇黄精等中药材的资源评价、优势种源筛选和规范化栽培技术研究,为中药材种植特色产业发展提供了技术支撑。同时政府、企业等多方协同发力,实现创新要素集聚与资源整合,为药农提供全方位支持,带动了 4 000 多户药农走上增收致富路,为乡村振兴注入强劲动力^[31]。甘肃省渭源县通过“陇药云平台”整合卫星遥感、物联网等技术,实时监测 18 项生长指标,确保道地药材的标准化生产。同时,构建中药材“六统一可追溯”发展模式,实现道地药材可溯源,强化质量优势。2024 年渭源县通过省级验收的《中药材生产质量管理规范》(Good Agricultural

Practice for Chinese Crude Drugs, GAP) 基地达 6.8 万亩,带动 9 239 户农户年均增收 1.5 万元^[32]。综上所述,智慧农业技术正在推动中药材领域迈向“技术—经济”一体化协同发展的新阶段。

4 智慧农业在川产道地药材栽培中的应用

4.1 物联网技术与遥感技术

物联网(Internet of Things, IoT)技术是新一代信息技术的重要组成部分,形成“物联网”与“互联网”的结合,包括信息感知技术(各种传感器、信息检测器等)、信息传输技术(分组无线服务技术、低功耗无线广域网技术、窄带物联网技术等)和信息处理技术(云计算、算法模型融合技术等)等^[33-34]。而遥感技术可通过各种传感仪器对远距离目标辐射和反射的电磁波信息进行收集、处理并成像,探测和识别地面各种物体。

物联网和遥感技术为传统中草药种植业注入了智能化转型动力,可通过构建数字化种植体系实现生产过程的标准化与精准化。智能传感网络和高光谱遥感技术可实时获取叶片光合效率、果实膨大速率、茎秆维管束发育等关键部位的动态生长数据,并通过融合人工智能技术,检测相关环境参数(土壤肥效、光照强度、空气温湿度),判断是否符合药材生长,并建立环境参数与药材有效成分积累的定量关系模型,同步监测异常气候等胁迫因素,实时了解中药材生长与健康状况,提高中药种植过程监测能力和预警能力,为道地药材的科学化栽培提供精准数据支撑^[35-38]。廖敏等^[39]通过无线传感器网络,采集大棚内川贝母灌溉用水信息,由智能控制系统决策输出用于不同区域的川贝母变量灌溉控制方案,实现川贝母按需灌溉控制。满足不同年份、不同季节、不同土壤条件和种植密度的贝母生长需水要求,减少成本损失。方清茂等^[40]利用通用分组无线服务技术(general packet radio service, GPRS)网络和溯源检测设备,监测暗紫贝母准确的生态因子数据,反映贝母不同生长与栽培的环境下生态因子的动态变化,发现野生环境的土壤湿度和伴生植被更有利于减少病虫害发生,而大棚种植需要更加精细的智能化管理,推动暗紫贝母栽培的科学化进程。彭城等^[10]利用最大熵模型(maximum entropy model, MAXENT)和综合性地理信息系统(Arc information system, ArcGIS)对红花的生态因子进行分析,制定了红花规范化栽培种植技术规范。

同时遥感技术通过结合地理信息系统(geographic information system, GIS)、全球定位系统,可用于优化川产道地药材资源利用及指导、规划药材生产实践等方面^[41-42]。在资源普查方面,四川省第四次全国中药资源普查通过融合遥感技术与地面调查,根据天然植被情况布设样地,每个县级单元至少设置36个样地,并根据不同植被设置样方大小。较第三次普查相比,中药资源数量增加了5 018种,野生中药材蕴藏量增加119倍,中药资源富集县(市)数量增加3倍^[43],显著提升了样地代表性和显著提升了川产道地药材资源调查的精度与效率。在生产区规划方面,四川省应用低空720°全景影像技术结合GIS构建了道地药材生产布局可视化分析平台,并基于药材种类及种植面积,展示四川省道地药材热力图,通过数据分析计算生产区药材的种类及种植面积^[44],促进土地资源合理化

分配与中药材资源可持续性利用。在川产道地药材暗紫贝母^[45]中,通过遥感和GIS技术对气温、海拔、降水等影响因子进行叠加和综合分析研究,可得到暗紫贝母的适宜区分布范围。同时在川木通、川芎、重楼、黄精等川产道地药材中也通过相应技术,分析得到了适宜区的分布范围^[46-48]。

4.2 大数据与人工智能

人工智能通过计算机模拟或实现人类学习行为,运用大量数据进行训练,从不同算法和数据中完成指令,其本质是一种模拟人脑神经系统处理复杂信息的数学模型和计算结构系统的人工神经网络(artificial neural network, ANN)^[49]。

人工神经网络常用于对植物病害的分类识别,实现病虫害的智能诊断,标准自动划定病害程度^[50-51],同时通过结合高效液相色谱法、指纹图谱技术等可用于鉴别药材的产地与种源,为选育优良品种提供技术支撑。利用大数据和人工智能可实现将评价中药标准的传统方式和传统路径转化为由机器自动读取、分析和判断的数据形态,如数字标准物质(digital reference sequence, DRS)是实物标准物质的数字化、数据化、互联网化及智能化形式。DRS存储了大量数据,建立中药材的性状、纹理和质地等性状模型和显微鉴别模型,对中药材进行数据化分类,为相近品种、易混淆品种以及不同产地中药饮片的鉴别搭建起可视化的专业分析平台,有力地推动中药标准迈向数字化新高度^[49-54]。彭成等^[10]通过大数据等智能农业技术,对不同种质的川产道地药材资源展开了深入研究,发现其存在差异性的功能基因,从中选育出半夏新品种“川半夏1号”、益母草新品种“川益1号”等新品种栽培,同时收集厚朴资源,建立了四川平武县建立厚朴种质资源圃,为筛选适宜栽培的厚朴优良种质资源研究和优良厚朴品种栽培奠定基础。王晓宇等^[55]利用机器视觉和电子舌技术,量化川芎的颜色和味觉特征,通过分光测色计分析粉末颜色的明度和黄蓝值,结合化学成分含量建立判别模型,替代传统人工感官评价,减少人为因素判断差异。赵军宁等^[56]首次实现对百种川产道地药材进行大规模转录组测序,建立川产道地药材植物基因型和药效功能预测模型,并基于“道地药材药理学”及“毒效多维评价与整合分析”评价新思路新方法,开展川产道地药材种子种苗质量标准、繁育技术规程和种子种苗质量检验规程,研制发布《川产道地药材认证通则》等系列地方和行

业标准,构建川产道地药材标准体系。“本草智库”通过利用先进的人工智能技术,高效地处理和
分析庞大的中药数据。同时,通过融入检索增强
技术,提升了模型在基础研究、中药种植、质量控
制、药物研发、智能制造等中药全产业链关键环节
的决策支持能力,目前已汇集了1 500万条中药材
基原物种的基因信息、3 000余万条中药成分与靶
点的相互作用信息等中药研究的底层数据,具备
中药知识提取与生成、中药产业一站式数字化服
务等功能^[57]。

4.3 无人机与遥感影像技术

无人机由无线电遥控设备和程序控制装置协
同操控,配备动力系统,可与遥感监测、传感器、全
球定位系统(global positioning system, GPS)定位
技术等前沿科技深度整合,展现出自动化操作、智
能运行及信息高效处理等显著优势^[58-59]。

通过搭载可见光、高光谱等多种不同类型传
感器,无人机能够精准识别影像中药用植物的种
类、分布面积以及适宜其生长的生境。尤其适用
于对分散、不规则、细碎化的局部区域中药材进
行监测,在人工获取信息难度较大、卫星遥感信息
又不完整全面、分辨率要求较高的区域,无人机技
术展现出显著优势,为野生药用植物资源的勘探与
研究提供有力支持,拓展了调查范围与深度,提高
了数据获取的准确性和时效性^[59-61]。王成辉^[62]利
用无人机飞行拍摄得到川芎的可见光影像,进行
不同时期影像的川芎栽培面积提取研究,验证了
基于无人机遥感提取川芎不同时相的植被覆盖度
变化情况是评估川芎生长状态的潜在途径之一。
在现代农业生产中,无人机与智能设备的结合为
精准农业提供了有力支持,尤其在农药与肥料的
施用方面,实现了对资源浪费和环境污染的显著
降低^[63-64]。在四川丹棱县,无人机喷洒展现出极
高的效率,20 min内便能完成约1 300 m²油菜的喷
洒工作。并且精准高效地开展农药喷洒作业,通
过施用兼具防病抗病功能及营养补充效用的农
药,助力油菜苗恢复生长态势,促使其迅速回归
正常生长轨道。此外,在大规模消杀水稻病虫害
方面,无人机的应用同样成效斐然,不仅防控效
果出色,还具备省时、省力、省钱等多重优势^[65]。
四川邻水县积极推动农业数字化变革,将现代
科技广泛应用于田间管护工作,农户通过使用
植保无人机进行水稻统防统治,解决了常规人
工施用农药覆盖不均匀、防治效果差等问题^[66]。
在四川泸县现代

农业产业园的川产作物栽培体系中,无人机技
术的应用显著提升了农业植保作业效率。通过
田间布设的“四情”监测系统(墒情、苗情、灾
情、虫情)作为无人机植保的前端支持技术,实
时采集作物生理数据,并通过卫星遥感与地面
监测双重校准模型,可实现厘米级分辨率的田
间生长动态解析。无人机喷洒农药可在单作
业日内完成超过500亩麦田的病虫害防治任
务,相较于传统人工施药方式效率提升达30
倍以上^[67],带动产业发展走向智能化、高端化。

4.4 区块链与溯源技术

区块链通过将信息存储于区块中,顺序相
连以链的方式组合在一起,形成一种去中心化
的共享数据库。其具有极高的安全性,将其技
术特点应用到中药供应链中,可有效解决传统
中药从种植到流通环节中所存在的一系列问
题^[68-70]。

通过区块链技术,可保障中药产供销全生
命周期都处于有效监控之中,包括生产加工企
业对中药材的溯源、消费者对中药产品的溯
源以及监管机构对问题中药的溯源^[70]。在
第三代中药追溯平台中,通过借助防伪条码、
射频识别(radio frequency identification, RFID)、
互联网等技术手段,建立更加高效的中药生
产、销售、使用的一体化模式,提升中药材质
量,同时提供集数据采集、存储、分析、查
询的基础性平台,解决产业上下游信息差的
问题^[71-72]。将窄带物联网技术与RFID相
结合,能形成每个中药材的唯一身份标签,管
理员可以通过标签对中药材进行精准定位,当
出现问题中药产品或者问题环节时可精准定
位,链上被授权的监管主体可据此查找问题
根源,召回问题中药产品,保障药材质量的
可控性,完成对中药材质量的可靠溯源^[28,70]。
四川基于区块链、云和大数据等技术,通过
省级平台向上与国家中药材供应保障平台
对接,向下与溯源试点县级平台对接,实现
“国家平台—省级平台—县级平台”三级
平台数据互联互通。目前已完成省级中
药材溯源平台的建设和16个中药材溯源
试点县级平台的建设,参与省级溯源的
各类经营主体有256家、种植基地有387
个,涉及品种87种^[43]。在此基础上,借
助互联网、物联网、区块链等前沿智慧农
业技术,着力打造川产道地药材生产数
字化管理平台,面向四川中药产业高质
量发展示范项目的种植、加工企业,全
面提供覆盖全过程的第三方数字化管
理与服务。通过从源头实施全过程保
真控制,全力突破中药质量客观分
级评价、中

药质量防伪、中药安全预警、质量监管等关键技术瓶颈。进一步搭建具有自主知识产权的基于区块链技术的道地药材溯源服务平台,通过自动采集系统或工具完成交易,获得交易数据或溯源系统的源数据,确保中药产业链的信息不可篡改,并实现系统互信,为消费者提供放心药材消费指引,增强川产道地药材的核心竞争力^[73-74]。

综上所述,基于物联网、遥感、大数据、无人机

及区块链等核心技术,构建智慧栽培体系的闭环架构图(图 2),从纵向层级阐明了技术集成如何支撑“数据感知—智能决策—精准执行”的全链条协同;同时构建典型川产道地药材案例表(表 2),横向对比典型药材案例,凸显了不同技术组合在精准监测、资源优化、质量溯源等维度的差异化应用效果及其经济价值。

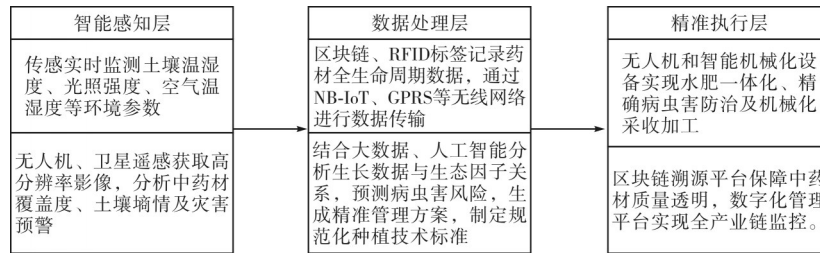


图 2 智慧川产道地药材栽培体系闭环架构图

Fig. 2 Closed loop architecture of the smart cultivation system of genuine medicinal materials produced in Sichuan

表 2 典型川产道地药材智慧农业案例

Tab. 2 Smart agriculture case: typical Sichuan-genuine medicinal materials

典型川产道地药材案例	核心技术应用	经济效益与成果
广元昭化区茯苓	“352”标准体系、物联网监测、区块链溯源、林药间作模式	1. 昭化区年种植茯苓 8 000 亩,产值 7 100 万元;2. 带动 3 万余人聚集产业链,实现人均年增收 3 000 元以上
宜宾兴文县淫羊藿	无人机技术空中监测,智慧化农业管理系统、中药材溯源平台	1. 采用现代化模式,在核心区建设 5 000 亩淫羊藿基地,辐射带动周边推广粮药套种发展中药材 25 000 亩;2. 联合高校团队开展技术合作,累计培养专业人才 200 余人次,其中技术骨干超百人
彭州川芎	标准化体系建设,采用国际标准制定(international organization for standardization, ISO)、DNA 条形码溯源、区域协同种植(彭什园区)、搭建“川芎之芯”特色农业气象监测站网收集数据,模型计算川芎农业种植气象风险指数	全国市场占有率 70%,年产值超百亿,国际标准助力出口,衍生精油、面膜等大健康产品
绵阳三台县麦冬	选育优良新品种、标准化种植、机械化自动采收、建立麦冬标准化种植可追溯基地,种植溯源基站和云平台	1. 全国最大的麦冬标准化种植基地,种植面积达 7 万余亩,产量占全国 70% 以上;2. 产品远销海外,总产值超过 40 亿元
金川秦艽	利用无人机搭载高清相机采集图像,并应用 YOLO (you only look once) 等深度学习模型进行物种自动识别与资源量统计	1. 调查效率:实现大规模、非破坏性的野生药用植物资源快速调查,极大提升效率;2. 精准管理:为稀有药用植物的资源保护、可持续利用和精准管理提供高科技手段
四川省多种道地药材(如川芎、川贝母、附子、麦冬、白芷、丹参等)	全产业链标准体系构建:针对不同药材,系统性地制定并发布一系列地方标准,包括《川产道地药材认证通则》、《生产技术规程》(白芷、附子、丹参、红花、杜仲等)、《种子种苗分级》(麦冬、川芎等)、《商品规格等级》(羌活、姜黄等)	1. 质量提升:通过标准规范生产过程,保障和提升道地药材质量;2. 产业升级:引领和推动道地药材产业向规范化、规模化发展,支撑四川“中医药强省”战略;3. 效益增长:标准化是实现优质优价、避免市场逆向淘汰的关键,最终提升产业整体效益

智慧技术通过多维度数据融合与智能决策,推动川产道地药材从粗放种植向精准化、标准化转

型。展现了物联网、生物技术等现代科技与传统药材种植的深度融合,以亩产效益提升、全产业链延

伸和国际化突破,为乡村振兴提供了“以药富农”的生动实践,展现出传统栽培所不具有的强劲优势。

5 现存问题及未来发展方向

5.1 现存问题

5.1.1 基础设施落后,技术应用适配受限 目前,我国智慧农业的根基尚显薄弱,基础研究与技术积累程度不足。在互联网、物联网、大数据、云计算、人工智能以及“5S”等支撑现代信息技术运用的相关基础设施建设在川产道地药材产区普遍滞后,设施建设跟不上发展速度。与此同时,农业科技推广力度欠缺,种植户对先进技术应用了解不足,相应的技术措施成本居高不下,这些都成为智慧农业技术在川产道地药材中应用的难题。依据前瞻产业研究院2023年3月发布的《中国智慧农业发展前景预测与投资战略规划分析报告》,截至2022年末,国内涉足智慧农业领域的企业数量约为14700家,然而在这些企业中,专业化的智慧农业大型领军企业屈指可数^[75]。四川部分区域已将智慧农业技术与智能化农机设备相结合,在道地药材的产质提升方面取得了显著成效,实现了经济效益与生态效益协同发展。然而,智慧农业技术的广泛应用仍面临诸多瓶颈。

智慧农业技术高度依赖于先进硬件设施,例如传感器、无人机等高投入产品,同时数字化、信息化、集约化平台的运营维护成本也不容小觑,这使得智慧农业技术在川产道地药材栽培中的渗透率偏低,整体应用仍处于初级阶段。部分智慧农业技术尚未成熟与稳定,适用场景受限,智能设备的精准度和可靠性有待提升,病虫害识别算法的准确率还需进一步优化。如,四川部分山区由于基础设施薄弱加上多云雾天气、地形崎岖破碎、作物种植结构复杂等自然因素,物联网设备的部署和信号覆盖面临诸多困难,致使传感器、智能设备等无法正常运转或数据传输中断,严重影响了智慧农业系统的运行效率与稳定性,大幅增加了建设与运营成本。同时应用无人机、传感器识别与提取中药材存在光学遥感数据获取困难、识别特征不清晰、观测尺度模糊等问题,进一步导致数据采集与分析能力滞后,难以实现精准的中药材栽培管理。

5.1.2 数据孤岛与标准化体系不完善 当前,川产道地药材栽培中智慧农业技术的应用面临数据整合与标准化建设的双重挑战。在数据治理层面,多源数据(包括种植环境、流通溯源等)因缺乏统一

的管理与分析平台,导致跨系统交互困难,形成显著的数据孤岛现象。不同产区和企业的信息系统独立运行,核心企业的专属管理系统与外部平台之间缺乏对接机制,致使种植数据与市场信息难以实现跨区域流动。部分产区虽部署了物联网监测设备,但因数据格式不兼容,基础数据利用率不足,直接影响种植决策的科学性与产业链协同效率。与此同时,数据安全与隐私保护问题尤为突出,区块链存储的农户、供应商等参与者身份信息存在泄露风险,可能引发非法信息交易或隐私侵权事件;涉及商业机密的生产成本、价格策略等敏感数据因缺乏分级加密机制,易在共享过程中被滥用。

此外,尽管四川已发布59项省级中医药地方标准,但智慧农业关键环节仍存在空白。仿野生栽培缺乏环境参数阈值、生物量控制等量化规范,机械化采收设备的作业损耗率与操作标准尚未统一,导致智慧化种植模式推广受阻。目前,智慧农业在川产道地药材栽培中的标准化建设相对滞后,缺乏统一的技术标准、数据标准和质量标准,导致技术推广成本增加,不同厂商与产区间难以形成统一的标准体系。因此,道地药材质量不稳定,质量一致性指标波动幅度较大,不利于川产道地药材产业的规范化和标准化发展,进一步加剧了技术推广与产业升级的阻力。

5.1.3 复合型人才缺乏 智慧农业技术在川产道地药材中的核心矛盾体现在技术需求与人才供给方面的结构性失衡。智慧农业的推进高度依赖兼具农业知识与信息技术能力的复合型人才,涉及农业、计算机、通信、数据分析等多学科领域的知识和技术,需要既懂农业又懂技术的复合型人才来进行系统的开发、维护和应用。但基层农技人员对物联网、区块链等新兴技术的掌握程度普遍有限,缺乏相关的技术培训和指导,技术应用效果不佳,导致技术应用与生产需求脱节。同时,高校与企业的产学研合作尚未完全打通,如陈士林院士团队研发的“本草智库”大模型在基层的实际应用场景仍待拓展,需进一步加强复合型人才培养与完善产学研协同机制,推动科研机构与企业共建技术转化平台,将实验室成果嵌入田间场景。

5.2 未来发展方向

5.2.1 推动技术融合与全产业链数字化 在川产道地药材产业数字化转型进程中,物联网、人工智能与区块链等核心技术的深度融合正推动全产业

链智能化发展。通过部署多维环境传感器与植物生理监测设备,结合智能算法构建“环境感知生长模型智能决策”闭环系统,实时、精准监测和分析药材生长环境和生理状态;应用无人机、智能农机等设备,开展精准施肥、施药、采摘等作业,实现水肥精准调控和病虫害预警,最大限度优化药材生长环境,提高资源利用率与生产效率和质量。进一步构建完善技术适配度评价体系,通过涵盖地形复杂度、气候因子和设备成本等维度,综合分析适用于不同区域应用的智能机器设备与技术,以解决四川地形复杂、难以简单推广机械化的问题。探索区块链技术在药材供应链中的深度应用,采用联盟链架构,确保种植、加工、流通等全环节数据上链存证,实现质量追溯的全程透明化和不可篡改,推动“国家一省一县”三级平台数据互通,扩大溯源品种至全部86种川产道地药材。

智慧农业推动川产道地药材产业与其他相关产业的深度融合发展,通过纵向整合与横向延伸形成全产业链的智慧化发展模式。在纵向层面,通过与制药企业、医疗机构、科研机构等的紧密合作,建立“种植基地-制药企业-科研机构”协同创新平台,推动种质优选、规范化种植与有效成分提取技术标准化的系统对接,实现川产道地药材从种植到研发、生产、销售、应用的无缝对接,提高产业整体效益和竞争力;在横向层面,借助电商平台、冷链物流等现代服务业的发展,拓展川产道地药材的销售渠道和市场范围,促进产业的规模化和品牌化发展。

5.2.2 加强政策引导与多元主体参与 政府需要充分发挥财政资金的杠杆作用,建立多元投入机制,统一规划智慧农业发展的政策方针,加大对智慧农业的政策扶持。利用财政补贴、创新项目专项资金等方式重点支持智慧农业基础设施建设,建立新型智能化设备研发清单。如,针对四川丘陵地形特点开发小型轻量化种植机械,并通过购置补贴降低种植户智能化机器使用门槛,提升川芎、麦冬等道地药材的种植效率与标准化水平。不断提高当前智慧农业基础设施建设水平。

政策工具应着力激发多元主体参与动能,对个体种植户及基层生产组织进行财政专项补贴和农业保险机制,为智慧农业技术应用的风险提供缓冲,让智能化设备优先平稳进入到智慧农业行业市场,提高农业生产效率及农业产能。同时,大力支持个体种植户加入专业合作社开展组织模式和经营模式创新,打造新型的智慧农业合作社,进一步

探索“企业+合作社+农户”的联合模式,通过减免部分税收、以奖代补、先建后补、贷款贴息等方式,让社会资本进入中药材产业,助力智慧农业技术的应用。并对在中药材生产关键技术研发与突破上取得重大成果的科研团队给予奖励,鼓励产学研用合作,促进高校智能化成果进一步落地落实。

5.2.3 聚力品牌发展与市场需求 川产道地药材产业面临历史性发展机遇,其资源禀赋与市场需求的驱动为智慧农业技术应用创造了广阔应用机会。四川省中药资源优势显著,中药资源蕴藏量、品种数、道地药材品种数量和国家GAP基地认证数量均为第一,但全省尚缺综合产值高、道地性状显著、知名度高的代表性品种,如“浙八味”“四大怀药”等中药名品。86种道地药材中仅川芎、麦冬等10个兼具市场潜力与道地特性的品种形成初步开发体系。这种“多而杂”的产业格局亟待通过智慧农业技术赋能实现结构性优化,构建“品质—品牌—市场”的价值传导机制。品牌发展需进一步结合智慧农业技术,推进区块链溯源系统与物联网监测设备的深度整合,实现从土壤成分分析、种植过程监控到质量检测认证的全生命周期数字化管理,强化“川药”品牌可信度。

针对市场需求演变,智慧农业技术应重点服务于产业链升级与附加值提升。消费升级催生的“中药+”新业态要求产业突破传统种植框架,通过数据驱动实现中药产业联合发展。建议构建中药材产业数字孪生系统,整合气候数据、市场供需、物流信息等多维数据源,为食药同源产品开发、康养旅游线路设计等提供决策支持,特别是在药膳开发、中医文化体验等细分领域形成差异化竞争优势。在国际市场开拓方面,智慧农业技术输出将成为“川药”全球化的重要抓手。借助“一带一路”合作框架,四川可依托川芎等品种的ISO标准制定经验,建立道地药材国际标准数据库。通过智能温室、水肥一体化等智能设施农业技术,在保持道地性的同时实现跨区域适应性种植。建议重点对接香港中药材商贸平台,运用数字孪生技术构建“虚拟药材市场”,实时同步国际质量标准与检测数据,破解传统中药材出口面临的技术性贸易壁垒。

智慧农业在川产道地药材中的应用正从局部试点向全域渗透,但需突破技术、成本与人才等关键问题瓶颈。未来应聚焦技术创新升级、产业融合发展、政策协同与国际合作等方面,促进智慧农业

在川产道地药材栽培中的深入应用,构建“科技赋能—产业升级—生态保护”三位一体的发展模式,助力川产道地药材迈向新高度。

6 结论

智慧农业与川产道地药材的深度融合,正推动传统种植模式向“精准化—数字化—可持续化”的现代化体系转型。未来需聚焦技术、标准与生态的协同突破:通过物联网、人工智能与区块链技术的深度耦合,破解四川复杂地形下的技术适配难题;加快推进数据信息共享、种植规范与质量追溯标准,推动产业链一体化完善;依托“一带一路”框架下的国际合作,输出川芎等品种的 ISO 国际标准经验,建立道地药材数字化认证体系,抢占国际竞争高地。同时,强化政府、企业、个体协同助力中药材种植领域智能化发展,培育兼具农学与信息技术的复合型人才,推动科研成果向田间转化,并探索可持续发展路径。这一转型不仅将重塑川产道地药材“品质—品牌—市场”的价值链条,更可为中药现代化与乡村振兴提供四川模板,为全球传统农业数字化转型贡献东方智慧。

参考文献:

- [1] 黄镇海,覃诗航,江韬. 乡村振兴战略背景下智慧农业发展路径分析[J]. 智慧农业导刊, 2024, 4(4): 24-28.
HUANG Z H, QIN S H, JIANG T. An analysis of the development path of smart agriculture in the context of rural revitalization strategy [J]. Journal of Smart Agriculture, 2024, 4(4): 24-28. (Ch).
- [2] 李吉莹,杨汉祥. 乡村振兴背景下中药种植产业的创新发展[J]. 农村经济与科技, 2024, 35(18): 38-40.
LI J Y, YANG H X. Innovative development of traditional Chinese medicine planting industry under the background of rural revitalization [J]. Rural Economy and Science-Technology, 2024, 35(18): 38-40. (Ch).
- [3] 李宏亮,谷童玮,张国伟. 中药种植新技术赋能乡村振兴[J]. 河北农业, 2023(8): 11-13.
LI H L, GU T W, ZHANG G W. New technology of traditional Chinese medicine planting can revitalize the countryside[J]. Hebei Agriculture, 2023(8): 11-13. (Ch).
- [4] 丰志培,张然,彭代银. “互联网+”与中药产业升级的协同融合研究[J]. 中草药, 2018, 49(24): 5980-5984.
FENG Z P, ZHANG R, PENG D Y. Integration of “Internet +” and upgrade of Chinese materia Medica industry [J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2018, 49(24): 5980-5984. (Ch).
- [5] 李道亮. 农业 4.0——即将到来的智能农业时代[J]. 农学学报, 2018, 8(1): 215-222.
- [6] LI D L. Agriculture 4.0, the approaching age of intelligent agriculture [J]. Journal of Agriculture, 2018, 8(1): 215-222. (Ch).
- [6] 张梦宇. 乡村振兴战略下智慧农业发展路径研究[J]. 中国农机装备, 2025(2): 128-130.
ZHANG M Y. Study on development path of smart agriculture under strategy of rural revitalization [J]. China Agricultural Machinery Equipment, 2025(2): 128-130. (Ch).
- [7] 中华人民共和国农业农村部. 农业农村部关于印发《“十四五”全国农业农村信息化发展规划》的通知 [EB/OL]. (2022-02-22) [2025-06-01] https://www.moa.gov.cn/govpublic/SCYJXXS/202203/t20220309_6391175.htm.
Ministry of Agriculture and Rural Affairs, the People's Republic of China. Circular of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs on printing and distributing the Fourteenth Five-Year Plan for national information technology development in agriculture and rural areas [EB/OL]. (2022-02-22) [2025-05-05] https://www.moa.gov.cn/govpublic/SCYJXXS/202203/t20220309_6391175.htm. (Ch).
- [8] 国务院. 国务院关于印发中医药发展战略规划纲要(2016—2030年)的通知 [EB/OL]. (2016-02-22) [2025-05-05]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2016-02/26/content_5046678.htm.
The State Council of the People's Republic of China. Circular of the State Council of the People's Republic of China on issuing the outline of the strategic plan for the development of traditional Chinese medicine (2016-2030) [EB/OL]. (2016-02-22) [2025-05-05]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2016-02/26/content_5046678.htm. (Ch).
- [9] 郑玉清,曾金香,林锦霞,等. 经典名方中川芎的本草考证[J]. 中国中药杂志, 2021, 46(16): 4293-4299.
ZHENG Y Q, ZENG J X, LIN J X, et al. Herbal textual research on Chuanxiong Rhizoma in Chinese classical prescriptions [J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2021, 46(16): 4293-4299. (Ch).
- [10] 彭成,裴瑾,谢晓芳,等. 川产道地药材品质控制与产业化关键技术应用的研究思路与实践[J]. 中药与临床, 2022, 13(3): 1-6.
PENG C, PEI J, XIE X F, et al. Research ideas and practice on the application of key technologies for quality control and industrialization of genuine medicinal materials produced in Sichuan [J]. Pharmacy and Clinics of Chinese Materia Medica, 2022, 13(3): 1-6. (Ch).
- [11] 安秋菊,黄斌翰,田春尧,等. 川贝母的本草考证与 DNA 条形码鉴定研究[J]. 华西药学杂志, 2022, 37(2): 218-222.
AN Q J, HUANG B H, TIAN C Y, et al. Study on herbal textual research and DNA barcode identification of Fritillaria cirrhosa [J]. West China Journal of Pharmaceutical Sciences, 2022, 37(2): 218-222. (Ch).
- [12] 李莉娅,蒲婧哲,张亚中,等. 川贝母本草考证与鉴别研究进展[J]. 甘肃中医药大学学报, 2023, 40(5): 86-93.

- LI L Y, PU J Z, ZHANG Y Z, et al. Research progress on herbal textual research and identification of *Fritillariae Cirrhosae Bulbus* [J]. *Journal of Gansu University of Chinese Medicine*, 2023, 40(5): 86-93. (Ch).
- [13] 罗俊, 刘宇, 刘波, 等. 四川中药材产业发展现状及建议 [J]. *四川农业与农机*, 2023(5): 18-19.
- LUO J, LIU Y, LIU B, et al. Present situation and suggestions on the development of Chinese herbal medicine industry in Sichuan [J]. *Sichuan Agriculture and Agricultural Machinery*, 2023(5): 18-19. (Ch).
- [14] 规范种植提升品质, 出川出海做大市场“链条”里看中医药大省进阶路 [EB/OL]. (2024-08-16) [2025-05-06]. <https://www.sc.gov.cn/10462/10464/10797/2024/8/16/42e90a0dbb0b4dfb8ec8ea2334c7e2a2.shtml>. Standardized cultivation improves quality, expanding domestic and global markets: the advancement of a major traditional Chinese medicine province along the industrial chain [EB/OL]. (2024-08-16) [2025-05-06]. <https://www.sc.gov.cn/10462/10464/10797/2024/8/16/42e90a0dbb0b4dfb8ec8ea2334c7e2a2.shtml>. (Ch).
- [15] WANG Y, GOU Y, ZHANG L, et al. Levels and health risk of pesticide residues in Chinese herbal medicines [J/OL]. *Frontiers in Pharmacology*, 2022, 12 [2025-05-06]. <https://doi.org/10.3389/fphar.2021.818268>.
- [16] KOWALSKA G. Pesticide residues in some Polish herbs [J/OL]. *Agriculture*, 2020, 10(5) [2025-05-06]. <https://doi.org/10.3390/agriculture10050154>.
- [17] 许艳秋, 王广成, 高立明, 等. 麦冬种植中植物生长调节剂使用情况、残留现状及影响综述 [J]. *农药学学报*, 2021, 23(6): 1073-1084.
- XU Y Q, WANG G C, GAO L M, et al. Review on uses, residues and effects of plant growth regulators in the cultivation of *Ophiopogon japonicus* [J]. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 2021, 23(6): 1073-1084. (Ch).
- [18] YUE J Q, LI Z M, ZUO Z T, et al. Evaluation of ecological suitability and quality suitability of *Panax notoginseng* under multi-regionalization modeling theory [J/OL]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13 [2025-05-06]. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.818376>.
- [19] 杨涛, 凌宁, 李晓晓, 等. 四川根茎类中药材生产全程机械化现状与展望 [J]. *中国实验方剂学杂志*, 2022, 28(9): 248-257.
- YANG T, LING N, LI X X, et al. Current situation and outlook of mechanization in production of rhizome-type Chinese herbal medicines in Sichuan Province [J]. *Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae*, 2022, 28(9): 248-257. (Ch).
- [20] 郑依婷. 中江县芍药种植户生产效率及影响因素研究 [D]. 绵阳: 西南科技大学, 2022.
- ZHENG Y T. Study on production efficiency and influencing factors of peony planters in Zhongjiang County [D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2022. (Ch).
- [21] 卢立宇, 陈冬虎. 四川省中药材种植业高质量发展路径研究 [J]. *农业科技创新*, 2025(1): 13-15.
- LU L Y, CHEN D H. Study on high-quality development path of Chinese herbal medicine planting in Sichuan Province [J]. *The Farmers Consultant*, 2025(1): 13-15. (Ch).
- [22] 杨浩雄, 孔丹. 中药材在流通过程中质量安全控制政策梳理 [J]. *中国中医药信息杂志*, 2017, 24(7): 7-10.
- YANG H X, KONG D. Analysis on policies of quality safety control of Chinese materia medica in circulation [J]. *Chinese Journal of Information on Traditional Chinese Medicine*, 2017, 24(7): 7-10. (Ch).
- [23] 李瑞琦, 吴翠, 徐靓, 等. 基于传统性状客观化分析的川贝母质量评价 [J]. *中国药学杂志*, 2020, 55(1): 14-18.
- LI R Q, WU C, XU L, et al. Quality evaluation of *Fritillariae cirrhosae* Bulbus based on traditional character analysis [J]. *Chinese Pharmaceutical Journal*, 2020, 55(1): 14-18. (Ch).
- [24] 崔治家, 马艳珠, 张小荣, 等. 川贝母化学成分和药理作用研究进展及质量标志物的预测分析 [J]. *中草药*, 2021, 52(9): 2768-2784.
- CUI Z J, MA Y Z, ZHANG X R, et al. Research progress on chemical components and pharmacological effects and predictive analysis on quality markers of *Fritillariae Cirrhosae* Bulbus [J]. *Chinese Traditional and Herbal Drugs*, 2021, 52(9): 2768-2784. (Ch).
- [25] 江影. 智慧农业技术在农作物栽培中的应用与效果分析 [J]. *农业工程技术*, 2024, 44(20): 85-86.
- JIANG Y. Application and effect analysis of intelligent agricultural technology in crop cultivation [J]. *Agricultural Engineering Technology*, 2024, 44(20): 85-86. (Ch).
- [26] 岑丹文. “互联网+”时代中药种植业的经济发展研究 [J]. *粮食科技与经济*, 2020, 45(4): 144-145.
- CEN D W. Study on the economic development of traditional Chinese medicine planting in the “Internet Plus” era [J]. *Grain Science and Technology and Economy*, 2020, 45(4): 144-145. (Ch).
- [27] 陈英杰, 严辉. 科技赋能中药资源产业绿色低碳高质量发展研究及展望 [J]. *现代管理科学*, 2024(3): 56-61.
- CHEN Y J, YAN H. Research and prospect of green, low-carbon and high-quality development of Chinese medicine resource industry empowered by science and technology [J]. *Modern Management Science*, 2024(3): 56-61. (Ch).
- [28] 王力梅, 唐攀, 范靖, 等. 窄带物联网技术在中药种植智能监管中的探索研究 [J]. *成都中医药大学学报*, 2020, 43(3): 48-51; 56.
- WANG L M, TANG P, FAN J, et al. Exploring research on NB-IoT technology in intelligent regulation of Chinese medicinal plantation [J]. *Journal of Chengdu University of Traditional Chinese Medicine*, 2020, 43(3): 48-51; 56. (Ch).
- [29] 张然. 基于“互联网+”的道地药材供应链质量管理优化研究 [D]. 合肥: 安徽中医药大学, 2020.
- ZHANG R. Quality management optimization of Chinese

- medicine supply chain based on "Internet Plus"[D]. Hefei: Anhui University of Chinese Medicine, 2020. (Ch).
- [30] 朱嘉漫. 老字号玩出新花样, 科技立企开启中医药发展新篇章 [EB/OL]. (2025-02-24) [2025-05-10]. https://www.zjwy.gov.cn/art/2025/2/24/art_1229184764_59336525.html.
ZHU J S, Time-honored brands embrace new vitality; technology-driven enterprises usher in a new chapter for traditional Chinese medicine development[EB/OL]. (2025-02-24) [2025-05-10]. https://www.zjwy.gov.cn/art/2025/2/24/art_1229184764_59336525.html. (Ch).
- [31] 唐雯霖. 科技赋能产业振兴农民增收[N]. 玉溪日报, 2024-12-17(3).
TANG W L. Science and technology empower industrial revitalization and farmers' income growth[N]. Yuxi Daily, 2024-12-17(3). (Ch).
- [32] 丁陆军. 涪源: 以 GAP 驱动中药材产业转型升级[N]. 甘肃经济日报, 2025-05-06(003).
DING L J. Weiyuan; driving transformation and upgrading of traditional Chinese medicinal materials industry through GAP [N]. Gansu Economic Daily, 2025-05-06 (003). (Ch).
- [33] 于超凡, 常雅惠, 汪憬, 等. 中药种植现状与发展新思路[J]. 中医药管理杂志, 2021, 29(17): 211-213.
YU Y F, CHANG Y H, WANG J, et al. The current situation and new ideas for the development of Chinese medicine planting [J]. Journal of Traditional Chinese Medicine Management, 2021, 29(17): 211-213. (Ch).
- [34] 聂鹏程, 张慧, 耿洪良, 等. 农业物联网技术现状与发展趋势[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2021, 47(2): 135-146.
NIE P C, ZHANG H, GENG H L, et al. Current situation and development trend of agricultural Internet of Things technology[J]. Journal of Zhejiang University (Agriculture & Life Sciences), 2021, 47(2): 135-146. (Ch).
- [35] LI X H, LI M Z, LI J Y, et al. Wearable sensor supports in-situ and continuous monitoring of plant health in precision agriculture era [J]. Plant Biotechnology Journal, 2024, 22(6): 1516-1535.
- [36] 刘霄宇. 基于物联网技术的智慧农业系统设计与实现[J]. 中国农机装备, 2025(2): 76-78.
LIU X Y. Design and implementation of smart agriculture system based on internet of things technology [J]. China Agricultural Machinery Equipment, 2025(2): 76-78. (Ch).
- [37] ZHONG L, GUO X, DING M, et al. SHAP values accurately explain the difference in modeling accuracy of convolution neural network between soil full-spectrum and feature-spectrum [J/OL]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 217 [2025-05-06]. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.108627>.
- [38] HE J Y, CHEN K, PAN X B, et al. Advanced biosensing technologies for monitoring of agriculture pests and diseases: A review[J/OL]. Journal of Semiconductors, 2023, 44(2) [2025-05-06]. <https://doi.org/10.1088/1674-4926/44/2/023104>.
- [39] 廖敏, 粟超. 大棚种植川贝母分区变量灌溉系统研制[J]. 农业工程学报, 2021, 37(16): 108-116.
LIAO M, SU C. Development of the partition variable irrigation system for greenhouse planting *Fritillaria cirrhosa* [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(16): 108-116. (Ch).
- [40] 方清茂, 王洪苏, 吴萍, 等. 川产道地药材暗紫贝母生态因子的动态监测研究[J]. 世界中医药, 2023, 18(17): 2430-2434.
FANG Q M, WANG H S, WU P, et al. Dynamic monitoring on the ecological factors of *Fritillaria unibracteata* in Sichuan[J]. World Chinese Medicine, 2023, 18(17): 2430-2434. (Ch).
- [41] 张江平, 翟传佳, 李欣柔, 等. 我国药用植物资源调查方法及资源监控机制研究进展[J]. 亚热带植物科学, 2020, 49(3): 234-242.
ZHANG J P, ZHAI C J, LI X R, et al. Advances in research methods and monitoring mechanism of traditional medicinal plant resources in China [J]. Subtropical Plant Science, 2020, 49(3): 234-242. (Ch).
- [42] 赵贵萍, 邹洁, 陈佳颖, 等. 高光谱遥感技术在药用植物研究中的应用现状分析[J]. 中国实验方剂学杂志, 2022, 28(22): 239-248.
ZHAO G P, WU J, CHEN J Y, et al. Analysis of application status of hyperspectral remote sensing technology in medicinal plant research: a review[J]. Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae, 2022, 28(22): 239-248. (Ch).
- [43] 方清茂, 李青苗, 周毅, 等. 基于第四次全国中药资源普查的四川省中药资源调查报告[J]. 世界科学技术-中医药现代化, 2024, 26(8): 1946-1958.
FANG Q M, LI Q M, ZHOU Y, et al. Investigation report of the species and reserves of Chinese materia medica resources in Sichuan based on the 4th Chinese Materia Medica Resource Inventory [J]. World Science and Technology-Modernization of Traditional Chinese Medicine, 2024, 26(8): 1946-1958. (Ch).
- [44] 华桦, 田韦韦, 马昊好, 等. 药用植物生物信息数据库及生产布局可视化分析平台(以川产道地药材为例)[J]. 中国中药杂志, 2024, 49(8): 1989-1995.
HUA H, TIAN W W, MA J Y, et al. Bioinformatics database and production layout visual analysis platform of medicinal plants: a case study of Dao-di medicinal materials in Sichuan Province [J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2024, 49(8): 1989-1995. (Ch).
- [45] 方清茂, 彭文甫, 董永波, 等. 基于遥感与GIS技术的川产道地药材川贝母适宜区研究——以暗紫贝母为例[J]. 世界中医药, 2020, 15(2): 214-218.
FANG Q M, PENG W F, DONG Y B, et al. Study on the suitable distribution regions of fritillariae cirrhosae Bulbus produced in Sichuan based on remote sensing and GIS—a case

- study of *Fritillaria unibracteata* [J]. *World Chinese Medicine*, 2020, 15(2): 214-218. (Ch).
- [46] 董丽君, 尚雪, 文路军, 等. 基于遥感与GIS技术的四川道地药材川木通分布研究——以小木通为例[J]. *世界科学技术-中医药现代化*, 2015, 17(11): 2398-2404.
DONG L J, SHANG X, WEN L J, et al. Study on suitable distribution areas of kawa kimichi produced in Sichuan Province based on remote sensing and GIS: a case study of *Clematis arandii* [J]. *Modernization of Traditional Chinese Medicine and Materia Medica-World Science and Technology*, 2015, 17(11): 2398-2404. (Ch).
- [47] 王璃, 魏建和, 陈士林, 等. 基于GIS的川芎产地适宜性分析[J]. *中国现代中药*, 2006, 8(6): 7-9.
WANG L, WEI J H, CHEN S L, et al. Suitability evaluation of *Ligusticum chuanxiong*'s producing area based on TCMGIS- I [J]. *Modern Chinese Medicine*, 2006, 8(6): 7-9. (Ch).
- [48] 方清茂, 彭文甫, 吴萍, 等. 川产道地药材生产区划研究进展[J]. *中国中药杂志*, 2020, 45(4): 720-731.
FANG Q M, PENG W F, WU P, et al. Research progress on production districts of Sichuan Dao-di herbs [J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2020, 45(4): 720-731. (Ch).
- [49] 王淑红, 李君瑶, 郭子瑜, 等. 传统中药标准的数字化新形态[J]. *中国药学杂志*, 2024, 59(24): 2396-2406.
WANG S H, LI J Y, GUO Z Y, et al. New digital form of traditional Chinese medicine standard [J]. *Chinese Pharmaceutical Journal*, 2024, 59(24): 2396-2406. (Ch).
- [50] 汪进. 基于卷积神经网络的柑橘叶片病害识别研究[D]. 武汉: 中南民族大学, 2022.
WANG J. Research on citrus leaf disease identification based on convolutional neural network [D]. Wuhan: South-Central University for Nationalities, 2022. (Ch).
- [51] 陈烁. 基于深度学习的农作物病斑影像分割方法研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2024.
CHEN S. Study on crop disease image segmentation based on deep learning [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2024. (Ch).
- [52] 马双成, 王莹, 魏锋. 我国中药质量控制模式十年来的实践与探索[J]. *中国药学杂志*, 2023, 58(1): 2-9.
MA S C, WANG Y, WEI F. Progress and exploration of quality control model of traditional Chinese medicine in the past decade [J]. *Chinese Pharmaceutical Journal*, 2023, 58(1): 2-9. (Ch).
- [53] 胡继藤, 刘基华, 陈富钦, 等. 基于HPLC图谱和化学计量学方法对不同产地与种源陈皮的鉴别研究[J]. *今日药学*, 2019, 29(6): 383-386.
HU J T, LIU J H, CHEN F Q, et al. Discrimination of *Pericarpium Citri Reticulatae* from different species and habitats based on HPLC and chemometric methods [J]. *Pharmacy Today*, 2019, 29(6): 383-386. (Ch).
- [54] 徐雅静, 俞捷, 余远盼, 等. 人工智能在中药材及饮片鉴别领域的应用[J]. *中华中医药学刊*, 2022, 40(8): 47-50.
XU Y J, YU J, YU Y P, et al. Application of artificial intelligence in identification of Chinese medicinal materials and pieces [J]. *Chinese Archives of Traditional Chinese Medicine*, 2022, 40(8): 47-50. (Ch).
- [55] 王晓宇, 罗冰, 郭俊霞, 等. 川芎品质特征的快速鉴别[J]. *中成药*, 2021(1): 137-144.
WANG X Y, LUO B, GUO J X, et al. Rapid characteristics identification of *Ligusticum chuanxiong* quality [J]. *Chinese Traditional Patent Medicine*, 2021(1): 137-144. (Ch).
- [56] 赵军宁. 一种快速检测中药综合毒性的生物测试方法. CN103868916A[P]. 2014-06-18.
ZHAO J N. A biological assay for rapid detection of comprehensive toxicity of traditional Chinese Medicine, CN103868916A[P]. 2014-06-18. (Ch).
- [57] 李莎莎. 科技创新推动川派中医药全产业链发展[EB/OL]. (2024-04-11)[2025-05-11]. <https://www.sc.gov.cn/10462/10464/10797/2025/4/11/bca89f69ffff44d89a2a58804c0689a4.shtml>.
LI S S. Empowered by scientific and technological innovation: promoting the whole-industry-chain development of Sichuan traditional Chinese Medicine [EB/OL]. (2024-04-11)[2025-05-11]. <https://www.sc.gov.cn/10462/10464/10797/2025/4/11/bca89f69ffff44d89a2a58804c0689a4.shtml>. (Ch).
- [58] 曹众, 单常峰, 杨承磊, 等. 无人机在智慧农业方面的应用[J]. *现代农业科技*, 2021(11): 157-158;162.
CAO Z, SHAN C F, YANG C L, et al. Application of UAV in smart agriculture [J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2021(11): 157-158;162. (Ch).
- [59] 樊锦雅, 李廷菊, 古锐, 等. 智慧农业在青藏高原药材资源保护与产业发展的应用探讨[J]. *中药与临床*, 2024, 15(2): 1-8.
FAN J Y, LI T J, GU R, et al. Discussion on the application of smart agriculture in the protection of medicinal resources and industrial development of the Qinghai-Xizang Plateau [J]. *Pharmacy and Clinics of Chinese Materia Medica*, 2024, 15(2): 1-8. (Ch).
- [60] 谢彩香, 陈士林. 无人机在药用植物多级遥感资源调查中的应用[C]//全国农业遥感技术研讨会论文集. 西宁: 中国农业科技协会, 2009: 244-249.
XIE C X, CHEN S L. Application of drones in multi-level remote sensing resource surveys of medicinal plants [C]// Proceedings of the National Symposium on Agricultural Remote Sensing Technology. Xining: China Association for the Promotion of Agricultural Science and Technology, 2009: 244-249. (Ch).
- [61] 汪娟. 基于卫星遥感影像数据对园参种植分布和面积变化的研究[D]. 长春: 长春中医药大学, 2020.
WANG J. Study on planting distribution and area change of panax ginseng based on satellite remote sensing data [D]. Changchun: Changchun University of Chinese Medicine, 2020. (Ch).

- [62] 王成辉. 基于无人机遥感的川芎栽培面积提取方法学研究[D]. 成都: 成都中医药大学, 2022.
WANG C H. Research on the methodology of extraction of the cultivated area of *Ligusticum Chuanxiong* Hort. based on UAV remote sensing[D]. Chengdu: Chengdu University of Traditional Chinese Medicine, 2022. (Ch).
- [63] 牟雪雷. 智能农药喷施系统的研究进展[J]. 农机使用与维修, 2023(8): 107-110.
MOU X L. Research progress of intelligent pesticide spraying system [J]. Farm Machinery Using & Maintenance, 2023(8): 107-110. (Ch).
- [64] 殷文豪. 枸杞智能喷药机控制系统的设计与实验[D]. 镇江: 江苏大学, 2021.
YIN W H. Design and experiment of control system of wolfberry intelligent spraying machine [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2021. (Ch).
- [65] 彭川, 陈科. 四川丹棱: 无人机精准洒药 助力春耕春管 [EB/OL]. (2023-02-08) [2025-05-11]. <https://finance.sina.com.cn/jjxw/2023-02-08/doc-imyeynxu3204875.shtml>.
PENG C, CHEN K. Danling, Sichuan: unmanned aerial vehicles apply precision spraying to boost spring plowing and management [EB/OL]. (2023-02-08) [2025-05-11]. <https://finance.sina.com.cn/jjxw/2023-02-08/doc-imyeynxu3204875.shtml>. (Ch).
- [66] 李勇, 甘子怡. 稳产增收提效 邻水县“科技管田”助农绘“丰”景[N]. 2023-08-11(3).
LI Y, GAN Z Y. Stable yield, higher income, greater efficiency: “Technology-Based Farm Management” in Linshui helps farmers embrace a bountiful harvest[N]. 2023-08-11(3).
- [67] 孙玥. 四川泸县: 农业新质生产力助力天府粮仓稳产增收 [EB/OL]. (2025-04-11) [2025-05-11]. http://szj.china.com.cn/2025-04/11/content_43080177.html.
SUN Y. Luxian, Sichuan: new quality productive forces in agriculture help secure stable yields and higher incomes for the “Tianfu Granary” [EB/OL]. (2025-04-11) [2025-05-11]. http://szj.china.com.cn/2025-04/11/content_43080177.html. (Ch).
- [68] 李莎莎. 无人机喷药、卫星精准巡田……今年春耕, 老“田把式”很悠闲 [EB/OL]. (2025-02-28) [2025-05-11]. <https://www.sc.gov.cn/10462/10464/10797/2025/2/28/43c95e1ea9ee40748881d0b9b14e6206.shtml>.
LI S S. Unmanned aerial vehicles spray pesticides and satellites conduct precision field patrols…Amid this year’s spring plowing, veteran farmers are taking it easy [EB/OL]. (2025-02-28) [2025-05-11]. <https://www.sc.gov.cn/10462/10464/10797/2025/2/28/43c95e1ea9ee40748881d0b9b14e6206.shtml>. (Ch).
- [69] 曾小青, 彭越, 王琪. 物联网加区块链的食品安全追溯系统研究[J]. 食品与机械, 2018, 34(9): 100-105.
ZENG X Q, PENG Y, WANG Q. Research on food safety traceability system based on IoT and blockchain technology [J]. Food & Machinery, 2018, 34(9): 100-105. (Ch).
- [70] 段一峰. 基于区块链技术的中药供应链体系研究[J]. 物流技术, 2022, 41(11): 105-108;138.
DUAN Y F. Research on traditional Chinese medicine supply chain system based on block chain technology [J]. Logistics Technology, 2022, 41(11): 105-108;138. (Ch).
- [71] 温川飙, 赵妹婷, 陈菊, 等. 基于区块链的第三代中药追溯平台构建研究[J]. 中国现代中药, 2017, 19(11): 1519-1522.
WEN C B, ZHAO S T, CHEN J, et al. Research for platform construction of the third generation of traceability for TCM based on the blockchain [J]. Modern Chinese Medicine, 2017, 19(11): 1519-1522. (Ch).
- [72] 王伟, 占伟江, 朱欣欣. 基于可信区块链的中药材追溯平台建设与应用[J]. 中国卫生信息管理杂志, 2023, 20(3): 346-351.
WANG W, ZHAN W J, ZHU X X. Practice of constructing a traditional Chinese medicine traceability system based on a trusted blockchain technology [J]. Chinese Journal of Health Informatics and Management, 2023, 20(3): 346-351. (Ch).
- [73] 华桦, 方清茂, 李青苗, 等. 中药监管科学驱动下的四川中药产业高质量发展新策略[J]. 世界科学技术-中医药现代化, 2023, 25(7): 2241-2247.
HUA H, FANG Q M, LI Q M, et al. New strategy of high-quality development of TCM industry in Sichuan driven by TCM regulatory science [J]. World Science and Technology-Modernization of Traditional Chinese Medicine, 2023, 25(7): 2241-2247. (Ch).
- [74] 吴方权, 刘亦驰, 胡骏涵. 一种基于区块链的去中心化数据聚合模型[J]. 粘接, 2025, 52(5): 151-154.
WU F Q, LIU Y C, HU J H. A blockchain-based decentralized data aggregation model [J]. Adhesion, 2025, 52(5): 151-154. (Ch).
- [75] 吴宗钊, 易春龙, 吴争光, 等. 我国智慧农业的发展现状、路径与对策建议[J]. 智慧农业导刊, 2024, 4(10): 1-4.
WU Z F, YI C L, WU Z G, et al. Development of smart agriculture in China: situation, path and countermeasures [J]. Journal of Smart Agriculture, 2024, 4(10): 1-4. (Ch).

Insights into the paths of industrial upgrading of Sichuan-genuine regional medicinal materials driven by smart agriculture

CHEN Ji¹, LIU Yao¹, LI Rui¹, WANG Xiaoqin², MA Riyong², HUANG Jin³, TIAN Mengliang¹

(1. College of agriculture, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China;

2. Baoxing County Department of Agriculture and Rural Affairs, Ya'an 625700, Sichuan, China;

3. School of Environmental and Ecological Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: As an important resource of traditional Chinese medicine culture, Sichuan-genuine medicinal materials face bottlenecks in traditional cultivation, such as waste of resources, low production efficiency and difficulties in quality tracking, which restrict industrial upgrading. Based on the background of the rapid development of smart agricultural technology, this paper systematically analyzes the innovative application of Internet of things, big data, artificial intelligence and blockchain technologies in the cultivation of authentic Sichuan medicinal materials. Combined with literature review and typical case studies, it discusses how to promote the transformation of medicinal material production from “experience driven” to “data driven” through accurate environmental monitoring, growth model construction, intelligent decision-making and whole chain traceability system. It is expected to promote the application of smart agricultural technology in the cultivation of Sichuan genuine medicinal materials, help Sichuan-genuine medicinal materials break through the limitations of traditional modes, and realize the coordinated development of quality optimization and ecological economy.

Key words: smart agriculture; Sichuan-genuine medicinal materials; cultivation; industrial upgrading