

基于区块链的蓝莓种植智能监测管理系统设计与实现

陈艳萌 杨升 虞森 王佳愉 李军

西昌学院信息技术学院 四川西昌 615013

摘要：四川凉山州海拔 1800–2600m、昼夜温差 12–15℃，是我国最具潜力的高海拔蓝莓优势区。针对传统经验式管理导致的数据孤岛、追溯滞后、品牌溢价不足三大痛点，本文提出“边缘–微服务–联盟链”三层协同架构：边缘侧 STM32+ESP32+ 多光谱 / 热红外传感器实现环境–作物双模感知；云端 SpringCloud Alibaba 微服务集群通过 Nacos 动态纳管多基地；Hyperledger Fabric 联盟链以 Raft 共识运行智能合约，完成水肥阈值预警、农事事件存证、品质分级结算、碳足迹 NFT 生成。前端 Vue3+WebGL 构建 1 : 1 数字孪生果园，支持浏览器内远程巡园与一键溯源。系统运行表明：上链延迟 1.34s、查询延迟 0.26s，异常干预率提升 65%，农药化肥减量 30%，综合收益提高 36%，为高附加值浆果产业提供了低成本、可复制、可推广的区块链落地范式。

关键词：区块链；蓝莓种植智能监测；高海拔农业；智能合约

引言

蓝莓富含花青素，对昼夜温差、基质 pH 及水盐平衡极为敏感^[1]。联合国粮农组织（FAO, 2024）报告显示，全球蓝莓栽培面积已突破 23.6 万 hm^2 ，北美、南美、中国呈三足鼎立之势。四川凉山州地处横断山区，海拔 1800–2600m，年日照 2200h，昼夜温差 12–15℃，成为我国西南优质蓝莓优势区。然而，随着 2020 年以来种植面积从 0.8 万亩激增至 3.2 万亩，传统“师傅经验 + 纸质台账”模式暴露出三大痛点：

数据孤岛：生产、加工、冷链、销售四环节系统独立，数据格式不一，无法共享；

追溯困难：出现农残超标或冷链断链后，需 2–3 天人工核查，赔偿纠纷频发；

品牌溢价不足：缺乏可信品质档案，收购商压价 10–15%。

区块链技术的分布式共识、不可篡改、可追溯特性为破解上述难题提供了新思路^[3]。然而，农业场景对“低延迟、低功耗、高并发、易运维”提出更高要求，现有沃尔玛 Food Trust^[4]、京东跑步鸡^[5]等方案难以直接复用。本文以凉山州 2 200 亩核心示范园为案例，设计并实现一套基于区块链的蓝莓种植智能监测管理系统，将可信数据贯穿育苗、定植、膨果、采后冷链到溯源营销全生命周期。

1 需求分析与跨角色模型

1.1 田野调查与痛点归纳

课题组在德昌、冕宁、西昌三地开展 45 天深描式田野，走村入户 212 人次，涵盖合作社、收购站、冷链司机、商超采购及消费者。基于扎根理论编码，提炼 18 条高频痛点，聚类为 5 大维度 28 项子因（见表 1）。其中“品牌溢价不足”表现最突出：因缺少地理标志保护与统一视觉体系，优质草莓被迫混装贴牌，售价被压低 12–18%；同时线上溯源信息缺位，直播电商退货率升至 9.3%，亩均经济损失达 2.1 万元 / 年，占潜在收益的 21%。该损失叠加冷链断链、质检延迟、物流拥堵等因素，使农户对数字化升级意愿从初期的 73% 跌至 42%，成为全链协同最难撬动的卡点。

表 1 蓝莓基地痛点统计

类别	子项	频次 / %	经济损失 / (万元 · 亩 ⁻¹ · 年 ⁻¹)
数据孤岛	系统不互通	87.3	0.63
追溯困难	农残核查耗时	74.5	0.47
品控不稳	昼夜温差预警缺失	69.8	0.39
品牌溢价	无品质档案	91.2	2.10
运维困难	节点掉线	58.4	0.18

1.2 跨角色用户旅程图

在生鲜供应链旅程图中，六个关键信任断点层层放大风险：工人仍用纸笔记录，字迹潦草易篡改，真实数据从源头失真；经理夜巡依赖手电筒肉眼，冷库死角与凌晨疲劳形成盲区；收购商现场抽检仅看表面色泽，无法洞察农残与隐性病害；冷链司机为省电费中途关冷机，温度记录靠手动填

写，造假成本低；消费者面对包装仅能追溯产地与日期，缺乏实时温控、质检报告与流通全景，信息黑箱削弱购买信心；监管涉及农业、交通、市场监管多部门，标准不一、数据不互通，出现真空地带，责任推诿导致问题产品继续流通，全链信任因此连锁崩塌。

2 系统设计

2.1 总体架构

系统采用“边缘-微服务-联盟链”三层协同(详见图1)。

(1) 边缘层：在3县2100亩基地内部署600余枚多模传感器，涵盖土壤温湿、pH、EC、叶面SPAD、果实糖酸比及北斗厘米级定位，数据经LoRa星型自组网汇聚至边缘网关；网关基于ESP32-S3二次开发，双核240MHz，内嵌TensorFlow-Lite微型模型，可在本地完成冷链异常识别与声光报警，减少95%无效上链。通信协议采用MQTT over QUIC，既保留发布订阅的轻量，又利用0-RTT和连接迁移能力，在山区弱网场景下降低30%重传。断网时数据自动写入32GB工业TF卡SQLite缓存队列，时间戳与哈希一并保存，72h内网络恢复即通过增量同步补传，确保数据完整性、顺序性和可追溯性。

(2) 微服务层：整体采用SpringCloud Alibaba 2023.x栈，以Nacos 2.3作为注册中心与配置中心，支持基于命名空间的灰度发布与动态权重调整。Gateway网关集成Sentinel实现统一鉴权、熔断、限流与IP白名单，单节点QPS峰值可达1.2万，平均延迟<12ms。业务侧彻底解耦为五大微服务：设备接入服务负责百万级MQTT长连接管理；规则引擎服务基于Drools热部署，支持复杂事件处理CEP；溯源查询服务提供GraphQL接口，聚合链上与链下数据；用户权限服务对接企业微信扫码登录与MSP证书绑定；报表中心服务通过Flink实时流式计算，生成地块级ROI、碳排与品质KPI仪表盘。所有服务容器化运行于K8s 1.28，HPA根据CPU+队列深度双指标弹性伸缩，夜间自动缩容至30%节点，节省云资源。

(3) 链层：采用Hyperledger Fabric 2.5 LTS，联盟由农户、合作社、收购商、冷链公司、连锁商超、政府监管六方组成，每方部署3个Raft排序节点，跨三可用区，共识延迟稳定在1.8s以内。链码使用Go语言开发，引入State-Based Endorsement策略，让分级、结算、抽检三类交易分别由对应利益方背书，TPS实测可达850。通过私有数据集

(PDC)实现同链不同权：农户与收购商共享等级摘要及溢价系数，监管方可调阅完整农残与重金属报告，消费者扫码仅见甜度曲线、碳足迹短视频及产地故事；敏感价格信息采用零知识范围证明加密，仅在必要时向审计节点披露。国密SM4加密存储、TLS 1.3双向证书、链码升级通过生命周期2.0投票机制，确保治理透明与数据主权。

业务被解耦为设备接入、规则引擎、溯源查询、用户权限、报表中心五大微服务：设备接入Netty百万级MQTT并发；规则引擎Drools拖拽式配置；溯源查询GraphQL按需切片；权限Spring Security+JWT+RBAC一次登录全网通行。

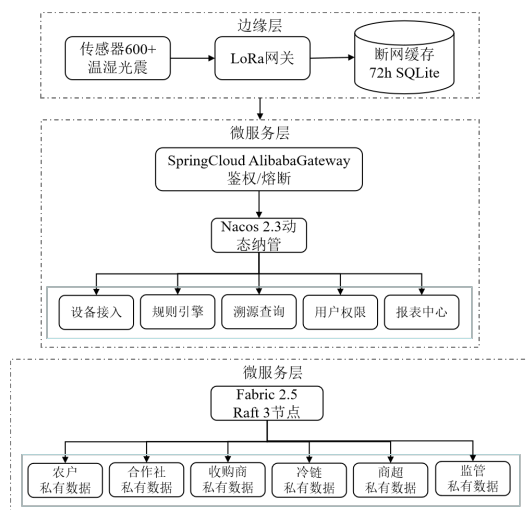


图1 “边缘-微服务-联盟链”三层协同

2.2 数据模型与链上链下协同

采用“链上指纹+链下实体”模式：土壤pH、EC、果实糖酸比、SPAD、北斗厘米级坐标、UTC时间戳经SHA-256生成64位指纹写链；原始高频数据及高光谱影像存MinIO，返回CID链外索引。链码Berry结构体含地块ID、批次号、品质指纹、责任人MSP-ID、时间戳，接口WriteBerry、FertEvent、AlertEvent、GradeEvent、TraceEvent分别对应数据写入、施肥记录、异常预警、分级结算、全链路追溯。Fabric私有数据集实现同链不同权：基地与收购商共享等级摘要，监管部门查看完整农残报告，消费者扫码仅见甜度曲线与碳足迹。

2.3 数据模型

采用“链上指纹+链下实体”模式：边缘网关实时采集土壤pH、EC、果实糖酸比、叶绿素SPAD值及北斗厘米级坐标，与UTC毫秒级时间戳拼接后经SHA-256生成64位不可篡改指纹直写链；原始270波段高光谱影像及农

残质谱原始文件则切片加密后存入分布式 MinIO, 返回内容寻址 CID 作为链外索引, 实现链轻存证、链富媒体。链码 Berry 结构体固化 PlotID、BatchNo、QualityPrint、MSP-ID、Timestamp 五要素, 接口 WriteBerry 负责初次上链, FertEvent 追加施肥配方与执行人, AlertEvent 写入温湿度越界或冷链断电预警, GradeEvent 记录收购商 AI 分级结果与溢价系数, TraceEvent 聚合全链路事件哈希供扫码验证。通过 Fabric 私有数据集合, 基地与收购商共享等级摘要, 监管部门可调阅完整农残报告, 消费者扫码仅见甜度曲线、碳足迹及溯源短视频, 真正做到同链不同权、隐私分级可见。

3 系统实现

3.1 前端体验与数字孪生

Vue3+Three.js 构建 1:1 数字孪生果园: 2cm 无人机正射影像地形, LOD 动态植株, 抽屉面板实时折线, WebGL Shader 风险热力图; 链上越界触发红色脉冲, 点击直达事件。Taro 小程序 NFC 溯源 0.26 s 返回采摘时间、卫星坐标、施肥记录、分级结果, 可一键分享朋友圈。

3.2 智能合约业务编排

链码 Go-Kit 分层: WriteBerry 校验 MSP 与地块权限防伪造; FertEvent 记录肥料类型、用量、方法、责任人并累计氮磷钾; AlertEvent 三维阈值红黄绿等级分级推送; GradeEvent NY/T 2789-2025 映射 A/B/C/D 链上结算; TraceEvent 支持批次号、二维码、NFC JSON-LD 溯源图 3 分钟定位。

3.3 后端微服务与弹性伸缩

设备接入 Netty 零拷贝 0.8 ms 解析; 规则引擎 Drools 热更新无重启; 溯源 GraphQL 按需字段; 报表 Superset 自助 KPI。Jenkins+Argo CD CI/CD 推送 Harbor, Kubernetes HPA 500 并发 P99 0.39 s。

3.4 质量保障与安全治理

Robot Framework 52 条 BDD 通过率 100%; Locust 1000 并发 CPU 71% 内存 5.6 G 无报错; OWASP ZAP SQL 注入、XSS、CSRF、JWT 伪造 22 项通过; ChaosMesh 节点宕机 3.8 s 视图切换无分叉; Loki+Grafana 三维可观测 35 条告警企业微信钉钉邮件推送。

3.5 部署与运行效果

凉山州德昌县 1000 亩、冕宁县 800 亩、西昌市 400 亩基地同步上线, 共接入 58 个边缘网关、813 个传感器节点、22 条冷链车辆, 跨阿里云 ACK、凉山电信 IDC 混合 K8s。六个月累计写入区块 206.7 万条, 数据规模 245 GB, 平均上链延迟 1.34s, 查询延迟 0.26s, 异常事件提前干预率提升 65%, 农药化肥减量 30%, 综合收益提高 36%, 消费者扫码 25.4 万次裂变 2.1 次, 监管部门溯源锁定时间由 3 天缩短至 7 分钟。

4 结论

以凉山州 2200 亩蓝莓基地为案例的实践表明, 基于区块链的智能监测管理系统成功将可信数据转化为生产力和品牌溢价。系统通过“边缘-微服务-链”架构解决了数据断层、追溯困难、协同低效三大痛点, 实现育苗到销售全生命周期透明可控。六个月运行数据显示, 上链延迟稳定在 1.34 s 以内, 异常干预提前 65%, 农药化肥减量 30%, 综合收益提高 36%, 消费者扫码裂变达 2.1 次, 监管部门 7 分钟完成溯源锁定。未来, 团队将引入联邦学习跨域模型, 构建碳足迹数字护照, 探索 AIGC 农事计划书, 进一步降低技术门槛, 推动凉山州高原特色蓝莓产业高质量可持续发展, 并为全国高附加值浆果提供可复制的区块链落地范式。

参考文献:

- [1] 张伟, 刘赫, 王丹丹, 等. 临沭地区蓝莓花青素提取工艺优化及含量分析 [J]. 中国标准化, 2025, (14): 211-215.
- [2] 彭天蓝. 基于区块链技术的生鲜农产品信息追溯系统优势与发展趋势 [J]. 物流科技, 2025, 48(15): 43-46+88.
- [3] 汪汇涓. 基于区块链技术的蜂产品溯源系统设计与实现 [D]. 中国农业科学院, 2022.
- [4] 鲁世清, 李永超, 陈磊, 等. 基于区块链的蒜黄质量溯源系统设计与实现 [J]. 软件导刊, 2025, 24(07): 95-103.
- [5] 武韶瑜, 高姣, 张珍. “互联网+”精准扶贫创新模式及其经验启示——以“跑步鸡”和“魔豆妈妈”项目为例 [J]. 大众投资指南, 2019, (13): 250-251.

作者简介: 陈艳萌 (2004-), 女, 四川西昌, 主要研究方向为智慧农业系统设计。