

茶叶生产装备自动化与智能化技术研究进展与展望

高一聪¹ 许晨¹ 林琼² 王淑花² 魏喆³

(1. 浙江大学流体动力基础件与机电系统全国重点实验室, 杭州 310058; 2. 浙江工业大学机械工程学院, 杭州 310014;
3. 沈阳工业大学机械工程学院, 沈阳 110870)

摘要: 茶产业是我国传统特色优势产业,大数据、物联网、云计算等新一代信息技术与农业的融合促进了茶产业向智能化转型与升级,在茶叶全产业链赋能增效中发挥重要作用。本文在概述了茶产业智能化技术体系的基础上,围绕种植、加工、检测和销售等4方面总结了国内外信息技术在茶产业智能化中应用的研究成果,分析了茶产业实现智能化的关键技术。最后对茶产业智能化未来发展方向进行展望,建议增强茶产业信息技术基础设施建设、加强人机协作智能茶机设备研发、重视茶叶种植加工大模型开发、提升大数据分析助力茶叶销售能力,为更好利用信息技术进行茶产业升级奠定基础。

关键词: 茶产业; 茶叶自动化加工; 茶叶智能检测; 信息技术

中图分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2024)07-0001-14

OSID:



Tea Production Equipment Automation and Intelligent Technology Research Progress and Prospects

GAO Yicong¹ XU Chen¹ LIN Qiong² WANG Shuhua² WEI Zhe³

(1. State Key Laboratory of Fluid Power and Mechatronic Systems, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China

2. College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China

3. School of Mechanical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: Tea industry is a traditional characteristic advantageous industry in China, and the integration of new generation information technology and agriculture, such as big data, Internet of things, cloud computing, etc., promotes the transformation and upgrading of the tea industry to intelligence, and plays an important role in empowering and increasing the efficiency of the whole tea industry chain. On the basis of an overview of the tea industry intelligent technology system, the domestic and international research was summarized based on the application of information technology in the tea industry intelligence around the four aspects of planting, processing, testing and sales, and the key technologies to achieve intelligence in the tea industry was analyzed. Finally, it was looked forward to the future development direction of tea industry intelligence, and suggested to enhance the tea industry information technology infrastructure construction, strengthen the research and development of intelligent tea machine equipment for human-machine collaboration, pay attention to the development of tea planting and processing models, and enhance the ability of big data analysis to help tea sales, in order to lay the foundation for better use of information technology for tea industry upgrading.

Key words: tea industry; tea automatic processing; tea intelligent testing; information technology

0 引言

我国茶文化历史悠久,最早可追溯至4 000多

年前,并且我国茶叶种类繁多,据不完全统计有1 000余种,分为绿茶、红茶、黄茶、黑茶、白茶、青茶等六大类。近年来随着生物科技不断发展,科研人

收稿日期: 2023-12-17 修回日期: 2024-01-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(52375272)、浙江省教育厅科研项目(Y202249547)、浙江工业大学研究生教改项目(2022316)、国家资助博士后研究人员计划项目(GZB20230339)和湖州市自然科学基金项目(2021YZ07)

作者简介: 高一聪(1982—),男,副教授,博士,主要从事机械产品创新设计和4D打印研究,E-mail: gaoyicong@zju.edu.cn

通信作者: 林琼(1980—),女,讲师,博士,主要从事装备数字化设计研究,E-mail: waglin@zjut.edu.cn

员发现,茶不仅是口味独特的绝佳饮品,还具有很高的药用价值,茶叶中的活性成分具有抗癌、杀菌抗毒、降血糖、抗过敏、延缓衰老、降脂减肥、预防口腔疾病等功效^[1-3]。据统计,我国茶叶总产量占全球总产量的 50%,茶叶出口量达到 $3.552 \times 10^6 \text{ t}$ ^[4],但茶叶种植、生产、检测和销售等环节中,除加工环节机械化程度较高,其他环节机械化、信息化、智能化作业水平还较低^[5-6]。另一方面大数据、物联网、人工智能等信息技术赋能现代农业,茶产业的技术和装备的智能化是全产业链中重要的一环,也是茶产

业发展的关键^[7-8]。因此,开展茶产业智能化研究,对建立高效低损的茶产业智能化技术体系具有重要意义。

本文对国内外信息技术在茶产业智能化研究的种植、加工、检测和销售 4 方面应用进行梳理,如图 1 所示,对茶园智能化养护、鲜叶智能化采摘、茶叶智能化初制、茶叶智能化精制、鲜叶品质质量检测与分级、茶叶加工过程质量检测、茶叶智能化销售等进行重点探讨,最后对基于新一代信息技术的茶产业智能化未来研究趋势加以展望。

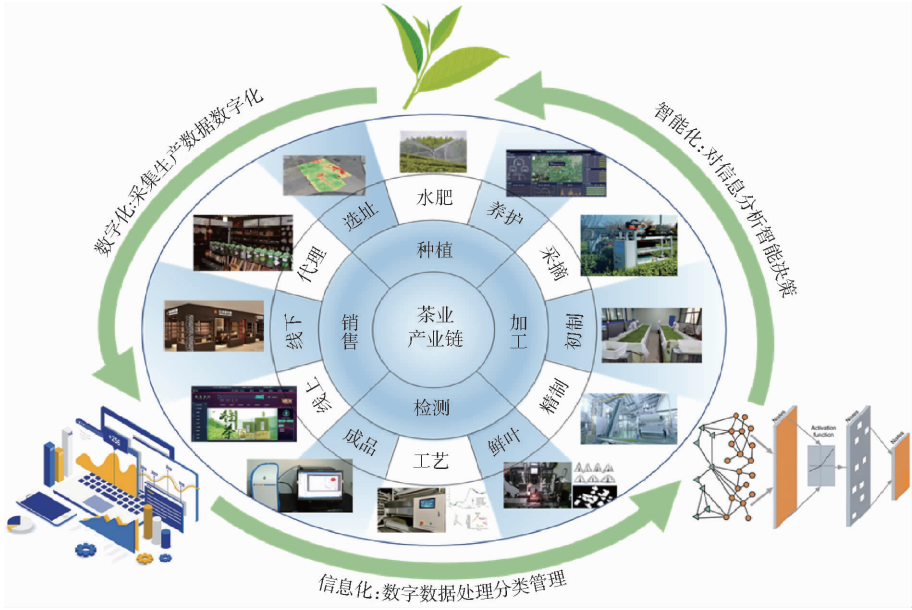


图 1 基于信息技术的茶产业链

Fig.1 Tea industry chain based on information technology

1 茶产业现状

1.1 全球茶叶种植分布与规模

全球茶叶种植主要集中在中国、印度、肯尼亚、斯里兰卡、越南、印度尼西亚、土耳其、缅甸、孟加拉和乌干达(图 2),这 10 个国家茶叶种植面积占全球茶叶种植总面积的 94.0%,其中中国茶叶种植面积为 $3.165 \times 10^7 \text{ hm}^2$,占全球茶叶种植总面积的 62.1%;印度茶叶种植面积为 $6.37 \times 10^6 \text{ hm}^2$,占全球茶叶种植总面积的 12.5%;肯尼亚茶叶种植面积为 $2.69 \times 10^6 \text{ hm}^2$,占全球茶叶种植总面积的 5.3%^[9]。

1.2 我国茶叶种植分布与规模

我国地域辽阔,茶叶主要分布于 $18^{\circ} \sim 37^{\circ} \text{N}$ 、 $95^{\circ} \sim 122^{\circ} \text{E}$,从区域划分来看,我国有江南、江北、西南、华南共 4 个国家一级茶叶产区,以及勐海县、湄潭县、安溪县、安化县、福鼎市、信阳市浉河区、新昌县、武夷山市、松阳县、横县十大茶叶县^[10]。近年来,中国茶园面积持续扩大,茶叶年产量也整体呈正

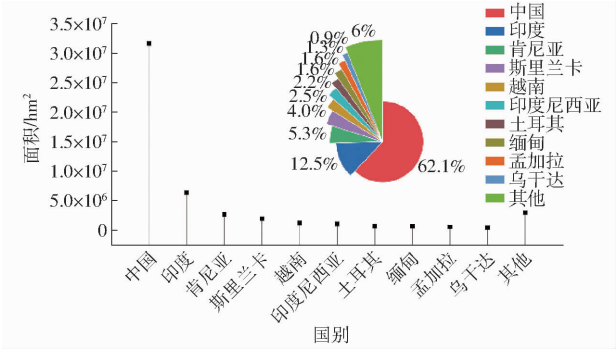


图 2 2020 年全球茶叶种植面积分布

Fig.2 Global tea planting area in 2020

增长态势,面积及产量规模常年居全球首位。其中,云南、贵州、四川、湖北、福建、湖南等省的茶园面积超过 $2.0 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ^[11],如图 3 所示。

1.3 茶产业智能化技术体系

茶产业智能化技术包括种植、加工、检测、销售 4 方面。种植包括选址、水肥、养护等环节;生产加工中存在采摘、粗加工、精加工等环节,每个环节都有相应的智能化技术解决方案;检测环节贯穿整个

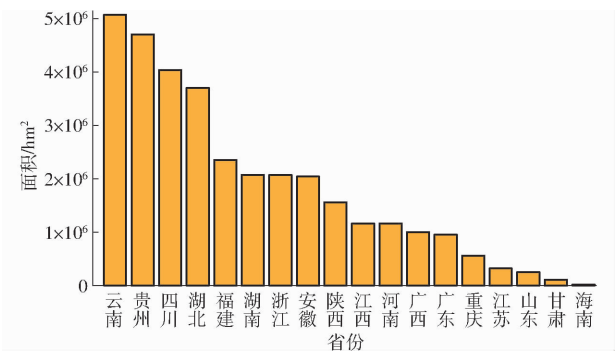


图 3 中国茶叶种植面积统计图

Fig. 3 Statistical map of tea planting area in China

加工环节,为各部分提供智能化检测手段,确保最终的产品质量;最后的销售端有线上、线下、代理 3 种渠道。基于信息技术的茶产业智能化技术体系如图 4 所示。

2 种植智能化技术

茶叶的种植是茶产业的源头,在全产业链中有着至关重要的作用,新一代信息技术中以物联网、大数据以及人工智能为代表的智能化技术赋能茶叶种植^[12]。茶叶种植的智能化系统是将信息技术融入

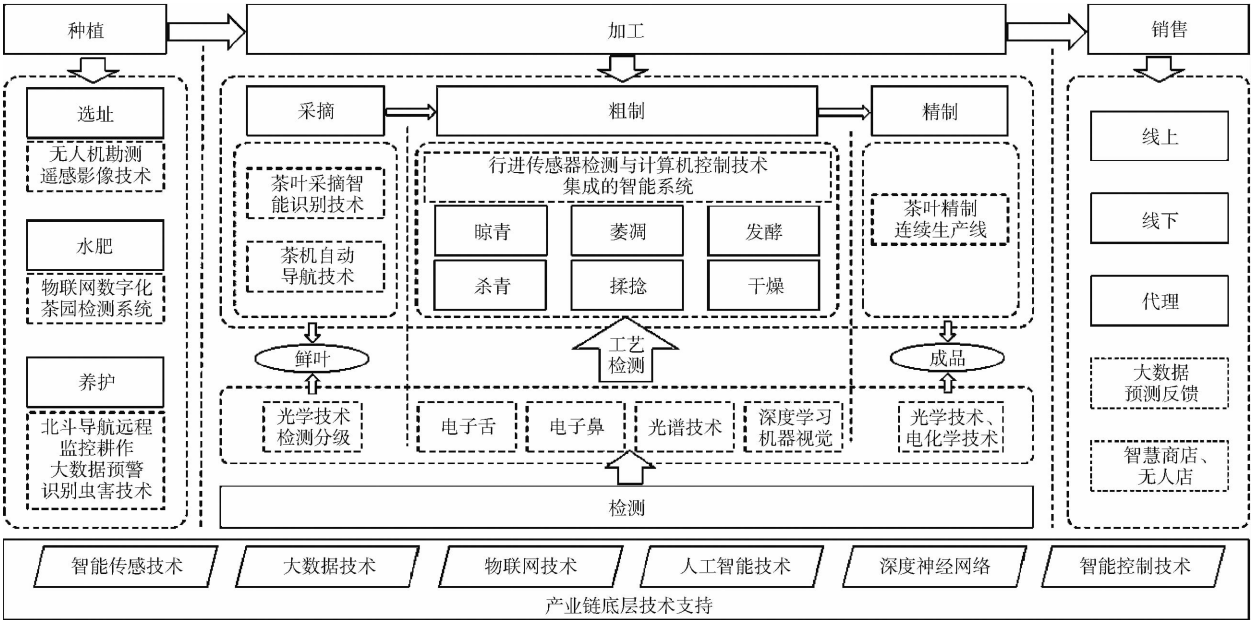


图 4 基于信息技术的茶产业智能化技术体系

Fig. 4 Intelligent technology system of tea industry based on information technology

到茶园选址、茶园水肥、茶园养护等方面的应用系统^[13]。

2.1 茶园智能化选址

茶树对生长过程中的温度、地形、光照等条件有严格的要求,茶叶种植地的选择会影响茶叶的最终品质。在温暖、湿润的山地种植茶叶,产量能得到大幅提升,所产茶叶的品质更优^[13]。蒋永泉^[14]分析了多遥感影像构建的多空间尺度数据,提取了茶园的物候特征和空间纹理特征,建立了茶园选址的最佳空间尺度和最佳时间窗口的模型。姜宇榕等^[15]利用地理信息系统技术分析了土壤、气象等茶叶生长的关键基础数据,建立了茶叶种植规划综合评价模型。杨鉴^[16]采用地统计分析、聚类分析、秩和检验等研究方法,分析了土壤锌资源空间分布的异质性和分布的影响因素,建立了“天然富锌茶”的最佳种植选址评判指标。综上,遥感、GIS 与智能统计分析技术相结合,可以根据茶园物候特征、土壤气候条件及土壤微量元素分布,建立茶园智能选址的时空

优化模型和综合评价体系,优化选择茶叶种植区域,提高资源利用效率。但茶园智能化选址需解决复杂生态系统动态变化、长期环境效应评估和微观地理要素精细刻画等关键问题。

2.2 茶园智能化水肥管理

传统种植主要凭经验决定施肥时间和施肥量,由于施肥过量、施肥手段不当,导致种植地区的土质破坏。在信息技术的支持下,结合茶园气象和茶园土壤监测系统的实时监测数据,根据茶树需水需肥规律,智慧水肥系统将按比例混合的水肥缓慢均匀地输送给茶树^[17-19]。史德林^[20]利用物联网数据采集技术,开发了一套基于精密传感网络控制的茶园水肥一体化智能系统。王银茂^[21]开发了数字化茶园检测系统,采集并记录了基础数据,建立了土壤养分水平与土壤电导率模型、土壤氮素转化模型以及春茶开采期预测模型。张冬菊等^[18]开发了水肥一体化物联网云平台系统,通过精准灌溉、精准施肥、智能管控,显著提高

了茶叶品质。总的来说,在茶园智能化水肥管理方面,物联网传感器可以实现对土壤与气象的实时监测,依据茶树生长需求精确调控水肥供给,有效防止过量施肥与土壤破坏,是提升茶叶品质的有效途径之一。但仍面临设备成本高昂、技术普及不均、数据精准度有待提升、个性化需求不匹配及农民技术培训等方面的挑战。

2.3 茶园智能化养护

茶园智能化养护包括:利用物联网监控、北斗卫星导航等技术,监控茶园土壤状态,适时进行茶园土壤机械化翻耕,改造土层、促进茶树生长,实现茶园耕作的智慧决策、实时调度;利用影像处理、计算机视觉等技术,实现病虫害发生情况的综合分析、远程诊断与鉴定、病虫害综合防治^[22]。新昌大佛龙井研究院研发了自带北斗导航、远程监控机器运行、远程统计作业面积的茶园掘耕机^[23]。药林桃等^[24]设计了基于实时动态技术全球定位系统(Real-time kinematic global positioning system, RTK-GPS)的智能微耕机导航系统,实现了作业区域全覆盖路径规划,为茶园智能耕作提供新方案。杨晨辉等^[25]设计了带有犁地深度传感器、土壤养分传感器、土壤墒情传感器、pH 值传感器的智能化翻耕机,实现了茶园耕作的同时采集土地信息,降低了信息采集的成本。茶树病虫害防治是无公害茶叶生产过程的关键环节,确保茶叶生产和质量安全。相关智能检测、消杀、防控技术如表 1 所示。秦华光^[26]研发了基于专家经验的茶园害虫智能化管理系统,采用了形态识别、图谱识别和检索识别等病虫害智能识别技术,实

现了茶园病虫害识别、虫害预测预报和茶园害虫防治决策。吴阿林等^[27]采用了误差反向传播算法(Back propagation algorithm, BPA)、支持向量机(Support vector machine, SVM)、分类与回归树(Classification and regression tree, CART)等机器学习算法,构建了茶树 5 种尺蠖害虫的三维空间结构知识库,实现了对害虫高准确率的认识。杨国国等^[28]建立了基于图像显著性分析和卷积神经网络的害虫识别模型,实现了对茶园 23 种常见害虫的识别。BHATT 等^[29]建立了基于卷积神经网络的茶树病虫害检测模型,实现了复杂背景、遮挡情况下茶叶健康状况的有效识别和病害定位。在茶园病虫害消杀方面,基于物联网和地理信息系统的天敌友好型杀虫灯智能控制平台,实现了茶尺蠖、茶小绿叶蝉等茶园害虫诱杀的实时监控更新和远程智能操控^[30]。无人机施药病虫害消杀可以实现智能规划、智能施肥,平均有效作业面积可达 40 hm²,作业效率高、消杀效果好^[31]。楚博等^[32]分析了无人机在茶园施药的雾滴沉积分布,定量评估了对小贯小绿叶蝉的防治效果。综合来看,物联网技术、北斗导航技术、计算机视觉、智能传感器监测以及先进的深度学习算法具有较好的应用前景,是实现精准土壤管理、智能机械作业路径规划、实时病虫害监测预警与智能识别、无人机精准施药的有效方法,是推动茶园耕作智慧化,提高茶叶生产和质量安全水平的可靠途径。但是,如何预测多因素耦合下害虫生态行为、优化极端天气影响下的茶园防护策略及持续改良土壤是茶园智能化养护中的主要挑战。

表 1 茶园病虫害防治技术

Tab.1 Tea plantation pest and disease control technology

技术类型	技术概括	关键技术	应用成果	主要优势
检测技术	智能识别系统	形态/图谱识别、检索识别、CNN、机器学习算法(BPA/SVM/CART)	实现多种害虫识别、预测预报、三维结构知识库构建	精准、智能化、高准确率
检测技术	数据分析与监测	大数据分析、AI 视觉监测	病虫害趋势预测、实时动态监控	数据驱动、实时响应
消杀技术	天敌友好型杀虫灯	物联网、GIS 系统	害虫诱杀实时监控、远程操控	环保、智能化管理
消杀技术	智能控制平台			
消杀技术	无人机施药	无人机路径智能规划、智能施肥	平均作业面积 40 hm ² , 高效消杀	高效作业、大面积覆盖
消杀技术	生物防治技术	引入天敌昆虫、微生物农药	绿色无公害消杀, 保护生态环境	可持续、环保安全
消杀技术	智能感应喷雾系统	自动感应调控	根据环境条件智能调整喷洒策略	节能环保、精准用药
防控新策略	基因编辑技术	改良茶树基因	提升茶树抗病虫害能力, 降低发生概率	源头治理、持久有效

3 茶叶智能化加工

3.1 茶叶智能化采摘

名优茶对鲜叶采摘要求十分严格,传统的机械采茶会伤害茶叶嫩梢,无法保证采摘规格的一致性。

茶叶智能采摘机器利用自动导航技术和茶叶采摘智能识别技术,实现了嫩芽识别和三维定位采摘^[33]。王先伟等^[34]改进了基于视觉的即时定位与地图构建算法(Oriented FAST and rotated BRIEF simultaneous localization and mapping 2, ORB -

SLAM2),设计了采茶机器人的碰撞检测算法与路径规划算法,实现了采茶机在室外环境下导航避障及路径规划。王焜^[35]设计了三自由度并联机构和末端采摘器,建立了机器人仿真模型,实现了机器人轨迹仿真,提高了采茶机的效率和稳定性。秦广明等^[36]开发了自走式智能田间采茶机器人,通过图像处理系统获取嫩芽采摘点,带动机器手实现了茶叶采摘。张修^[37]结合图像的三维重构技术,开发了“一目多位”式的三维立体视觉系统,提高了采茶机器人识别芽叶的能力,实现了 90% 以上的图像匹配度。汤一平等^[38]提出了基于机器视觉的茶陇识别与采茶机导航的方法,实现了茶陇位置的准确识别,解决了采茶机老嫩叶一刀切的问题。智能采茶识别技术如图 5 所示,智能采茶机器人典型设计设备如表 2 所示。以上研究表明,利用自动导航与识别,结合图像处理技术、视觉算法优化,实现室外避障导航、嫩芽精准定位,解决机械采摘伤叶与规格不一问题,提高采摘效率与识别精度,在室外茶

园采摘上取得较好的实践效果,但面对复杂茶园环境与精细化需求,如何强化智能采茶机器人在各类地形中的高精度、稳定性及自适应性,仍是待解的技术难题。

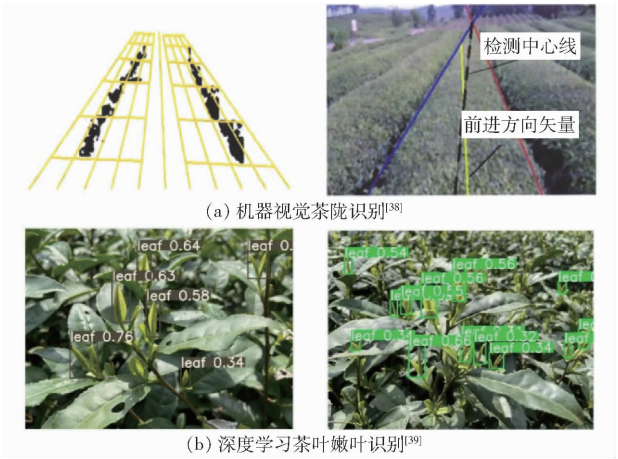


图 5 基于视觉技术的茶鲜叶采摘技术
Fig. 5 Technology of picking fresh tea leaves based on visual technology

表 2 智能采茶机器人
Tab. 2 Intelligent tea plucking robot

设备名称	实物图	性能指标
第五代名优茶采茶机器人(浙江理工大学) ^[40]		深度卷积神经网络识别茶叶,识别准确率大于 86%;双目摄像头精准定位芽叶,采茶成功率大于 60%
KJ4N 乘用型采茶机(川崎茶机) ^[41]		采收作业效率为 0.2 ~ 0.7 hm ² /h;机器行距为 1 550 ~ 1 900 mm;整机集成修剪、修边、采摘等功能
高原山地茶叶采摘机器人(云南农业大学) ^[42]		离线采摘识别平均准确率大于 94.52%,检测速度为 8.6 f/s ^[43] ;爬坡斜度大于 50°,履带式自适应底盘;PID 闭环控制,多机械臂同步采摘

3.2 茶叶智能化初制

3.2.1 茶叶智能杀青

杀青是绿茶、黄茶、黑茶、乌龙茶、普洱茶、部分红茶等的初制工序,通过高温破坏和钝化鲜叶中的氧化酶活性,抑制鲜叶中的茶多酚等的酶促氧化、蒸发鲜叶部分水分,使茶叶变软,便于揉捻成形,同时散发青臭味,促进良好香气的形成^[44]。董春旺等^[45]建立了光谱和图像多源信息融合的绿茶杀青水分含量预测方法,实现了绿茶杀青叶水分含量的快速无损检测和杀青质量精准把控。郝朝会等^[46]建立了基于红外辐射干制的自适应模糊控制模型,实现了滚筒式红外茶叶杀青机温度精准调控。曹成茂等^[47]建立系统整体的模糊控制与温度的模糊 PID 控制相结合的控制方法,实现了茶叶杀青环节

的智能控制和杀青的恒温控制。智能化茶叶杀青设备结构与控制原理如图 6 所示。

3.2.2 茶叶智能揉捻

揉捻是塑造茶叶外形的一道工序,通过外力将叶片揉破变轻,卷转成条,这样更便于冲泡,同时挤溢部分茶汁附在茶叶表面上,提高茶香浓度。姜淑华^[50]、李杰等^[51]研发了智能化茶叶揉捻控制系统,实现了加料、加压、揉捻、出料精准监测和自动控制。赵进等^[52]开发了茶叶智能揉捻系统,实现了茶叶状态、揉捻压力数字化监测和设备的自动、遥控智能化控制。智能化茶叶揉捻设备如图 7 所示。

3.2.3 茶叶智能干燥

干燥是茶叶初加工最后一道工序,通过高温制止酶活性、进一步降低茶叶的含水率和提高茶叶香气。

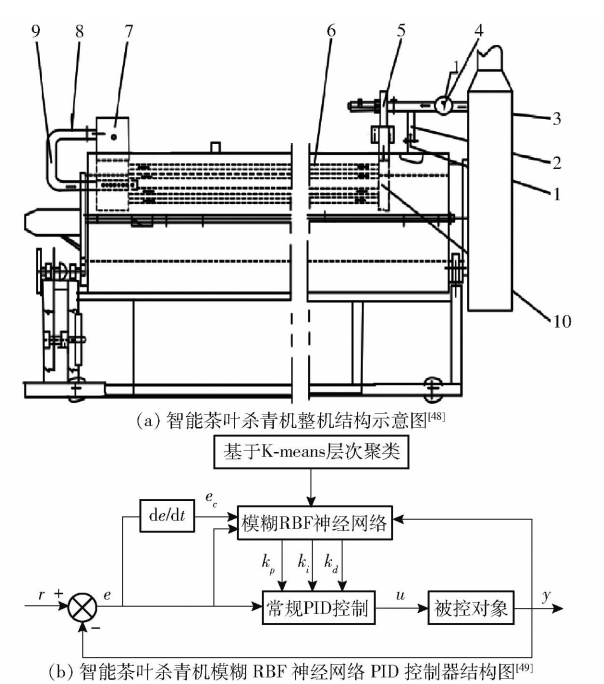
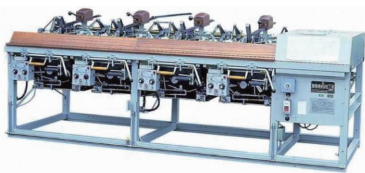


图 6 智能茶叶杀青设备

Fig. 6 Intelligent tea fixation machine

1. 连接装置 2. 热空气连接管 3. 蒸汽连接管 4. 蒸汽调节装置
5. 高温风机 6. 初段连接管 7. 加热装置 8. 温度表 9. 终端连接管 10. 出口连接管



(a) 茶叶智能揉捻机^[53]



(b) 连续式茶叶智能揉捻机组

图 7 智能化茶叶揉捻设备

Fig. 7 Intelligent tea kneading equipment

李兵等^[54]设计了基于动态矩阵控制-比例积分微分控制算法 (Dynamic matrix control - proportional integral derivative control, DMC - PID) 的茶叶远红外烘干控制系统,实现了电加热远红外辐射板的精确控制。许福桥^[55]开发了基于物联网技术的便携型茶叶烘干控制系统,实现自动上料、下料和茶叶均匀加热等功能。林大煜^[56]、吴晓强等^[57]开发了茶叶智能烘干机恒温控制系统,实现了热风炉排烟量自动调节和烘干温度恒定控制,保证了茶叶烘干品质,降低了能量消耗。浙江春江茶叶机械有限公司研发了链板式智能茶叶烘干机^[58]、斗式碧螺春智能烘干机^[59],配备

了烘干智能控制系统,实现了智能控温控风。川崎茶机研发了 60K 型智能茶叶干燥机,智能化投茶,使得茶叶烘干均匀,最大化地保持茶香和干燥度,整体节能 55% 以上。

综上所述,茶叶智能化初制包括智能杀青、揉捻及干燥技术。智能杀青利用红外光谱辐射技术、图像识别与多模态控制算法,如模糊控制、PID 控制等,实现实时监测茶叶水分含量、精准控温,确保杀青质量;智能揉捻技术通过研发智能控制系统,精准监控加料、揉捻力度,有效塑造茶叶形态并优化茶汁溢出,提升茶香浓度;智能干燥采用智能控制算法,精准控制红外烘干、热风炉排烟量,确保均匀加热,降低含水率,保留茶叶香气,同时也注重节能降耗。然而,针对不同茶类特性和初制工艺需求,研发更为个性化、一体化的智能初制解决方案,提高智能设备在多因素耦合下自适应性、鲁棒性和精准度,是亟待解决的难题。

3.3 茶叶智能化精制

针对毛茶形态各异、品级不齐、夹杂不净和干湿不匀的问题,通过茶叶精制使茶叶品质规格化,提高茶叶的价值^[60]。茶叶精制通过筛分、切轧、风选、拣剔等工序,实现分号、除杂、分级、拼配,以形成一定规格、匀净的精制茶品质特征^[61]。徐捷^[62]提出了茶叶精制智能化控制方法,开发了现场可编程逻辑门阵列 (Field programmable gate array, FPGA) 与数字信号处理器 (Digital signal processor, DSP) 双核并行运行的茶叶辨识分选系统,实现了茶叶残次品迅速准确的剔除。陈笋^[63]提出了一种基于最小错误率贝叶斯决策的茶叶茶梗快速有效分拣方法,实现了茶叶茶梗图片快速选别。宋彦等^[64]提出了一种基于形状特征直方图的茶叶等级识别方法,识别精度达到了 95.71%。吴正敏等^[65]提出了一种茶叶形态特征的多特征向量分选方法,通过随机森林算法判定特征权重并进行茶叶特征选择,结合逻辑回归、决策树和支持向量机等智能算法对茶叶进行精确分类。安徽中科光电色选机械有限公司开发了基于傅里叶变换红外光谱技术和神经网络算法的分选系统,实现了茶叶中茶梗、黄叶精准自动分拣^[66]。综上所述,茶叶精制利用基于贝叶斯决策、红外光谱和神经网络技术已实现标准化除杂、分级及拼配,但由于茶叶品类形态多元、内在品质差异大,实际应用时,还需探索更智能、普适性强的茶叶精细化识别与处理技术,适应复杂的茶叶精制场景。

4 茶叶智能化检测

茶叶品质是其外形与内质的综合体现,对茶叶

品质的检测与评价尤为重要^[67]。茶叶的智能化检测主要分为 3 部分：茶叶采摘后的鲜叶检测；加工过程中的工艺检测；加工完成后的成品检测。茶叶智能检测技术如表 3 所示。

表 3 茶叶智能检测技术
Tab.3 Tea intelligent detection technology

检测阶段	检测目的	技术类型	检测参数
鲜叶检测	鲜叶分级	光谱分析(近红外)	含水率、粗纤维总量、全氮量
	嫩度分级	计算机视觉、深度神经网络	图像特征参数
工艺检测	摊放/萎凋程度监控	光谱分析(近红外)	特征波长、含水率
	杀青程度监控	感官模拟技术(电子鼻、机器视觉)	气味、色泽、纹理
	揉捻程度监控	数据融合、力学模型	多信息融合的揉捻效果
	发酵程度监控	光谱分析、化学计量法、智能算法	茶色素、儿茶素、酚氨比、TFs/TRs 比值
	干燥程度监控	光谱分析(近红外)、智能算法、深度神经网络	含水率
成品检测	外形鉴定	计算机视觉	纹理、色泽
	成分检测	光谱分析(近红外光)	茶多酚、咖啡碱、氨基酸等活性物质含量
	安全质检	光谱分析(激光诱导击穿)	重金属残留检测
	品质划分	感官模拟技术(电子舌、电子鼻)	多信息融合参数

4.1 鲜叶品质质量检测与分级

在茶叶加工过程中,对鲜叶质量等级的判定是确定加工过程技术参数的前提。不同质量、不同等级的原料只有采用相应的加工技术参数,才能实现产品加工质量的最优化。同时,对鲜叶等级和质量的在线科学快速评判,也是实现茶叶数字化和智能化加工的技术基础。王胜鹏等^[67]构建了以含水率、粗纤维总量和全氮量为依据的鲜叶质量的判断标准,建立了茶鲜叶原料质量的在线评价模型,提出了基于近红外光谱的茶鲜叶原料质量的评价方法。常春等^[68]分析了茶鲜叶图像的面积、周长、长轴长度、短轴长度等几何特征,构建了基于图像对比度、平滑度等纹理特征的 BP 神经网络模型,实现了茶鲜叶嫩度等级的准确分类。戴春霞等^[69]提取了高光谱图像感兴趣区域,建立了基于偏最小二乘回归的茶鲜叶的含水率预测模型,实现了基于高光谱的鲜叶新鲜程度的智能监控。上述应用通过测量含水率、粗纤维总量、全氮量等指标,结合光谱、图像分析技术,构建鲜叶质量智能评价与分级系统,有效指导茶叶产品划分。但实际生产中,依然面临着鲜叶品质实时监测的复杂性和多样性,诸如环境、内在生理变化等因素对评价模型的影响,亟需研发更为精准且鲁棒性强的综合评判技术和智能化设备,以适应更多元化、精细化的茶叶品质管理需求。茶叶鲜叶智能分级设备如表 4 所示。

4.2 茶叶加工过程质量检测

近年来,茶叶加工基础理论研究日渐深入,茶叶加工关键工序的工艺特性及在制品理化特征等日益明晰,利用光谱技术、电化学技术、机器视觉技术、电子鼻、电子舌等新技术检测茶叶品质质量的技术方法不断进步。新一代信息技术在摊放、萎凋、揉捻、

表 4 茶鲜叶分级设备
Tab.4 Fresh tea leaf grading equipment

设备名称	设备原理	实物图	主要技术指标
等直径滚筒式茶鲜叶分级机(江苏大学) ^[70]	滚筒式分级设备		分级率大于 90% ; 生产率 100 kg/h
鲜叶振动式分级机(浙江理工大学) ^[71]	振动式分级设备		综合筛分率大于 70% ; 名优茶原料筛分率大于 90%
美亚智能分拣机器人(合肥美亚光电技术股份有限公司) ^[72]	机器视觉分级设备		平均分类准确率大于 90% ; 支持一芽一叶、一芽二叶、一芽多叶筛分

杀青、发酵、干燥等茶叶加工关键加工工序广泛应用^[73]。

4.2.1 摊放程度分析与检测

摊放是茶叶加工的重要工序,摊青叶含水率是判断摊放程度的重要质量参数,直接影响摊放过程品质成分的转化,最终影响成品茶质量。王胜鹏等^[74]提出了一种基于近红外光谱预测绿茶摊青叶含水率的方法,通过将鲜叶样品近红外光谱全部转化为成对的数据点,建立了基于联合区间偏最小二乘法的含水率预测模型,实现了绿茶摊青叶含水率的快速预测。LIU 等^[75]提出了变量组合总体分析遗传算法(Variable combination population analysis – genetic algorithm, VCPA – GA)和近红外光谱的茶叶摊放含水率预测方法,提取了摊放茶叶的特征波长,建立了基于偏最小二乘法和支持向量的回归预测模型。

4.2.2 萎凋程度检测与判别

萎凋作为红茶加工过程中的首道工序,其过程伴随含水率和叶绿素含量逐渐下降,叶片失水收缩并产生茶黄素,导致萎凋叶外观和颜色发生较大变化。TING 等^[76]提出了一种基于卷积神经网络(Convolutional neural network, CNN)置信度的萎凋叶含水率检测方法,提取了茶叶图像中与水分相关的信息,建立了泛化性较好的检测模型。WANG 等^[77]开发了基于近红外光谱、电子眼和比色传感阵列的多技术融合系统,实现了红茶叶萎凋过程中萎凋程度的数字化监控和评估。SHEN 等^[78]开发了基于 Elman 神经网络(Elman recurrent neural network, ENN)的萎凋叶含水率预测模型,提高了模型的抗干扰能力和训练效率,实现了萎凋叶含水率便携、准确、快速、无损的预测方法。

4.2.3 杀青程度判别与控制

杀青是通过短时高温钝化叶内酶活性,抑制鲜叶中多酚类物质氧化,以防止叶片红变,同时使叶内部分水分蒸发、散发青气、叶子变蔫变软,为后续揉捻做形创造条件。蒋建军等^[79]分析了不同锅温下 PEN3 电子鼻传感器的响应值与杀青品质的关系,研制了嵌入 PEN3 电子鼻的气味在线检测装备,开发了基于气味在线检测技术的绿茶锅式杀青系统。吴鑫等^[80]提出了基于机器视觉的微波杀青过程制品色泽和纹理特征实时监测的方法,开发了杀青叶含水率、茶多酚和氨基酸含量的在线检测系统。

4.2.4 揉捻程度检测与判别

揉捻是茶叶外形塑造和利于冲泡的关键工序。近年来揉捻研究主要集中在揉捻数字化方面,初步建立了揉捻程度的评价方法及揉捻机数字化控制策略。刘飞^[81]研究了工夫红茶揉捻过程中揉捻压力及制品主要化学特性、基本物理特性、外观纹理、力学特性、电学特性、光学特性、显微结构的变化,提出了基于多信息融合的揉捻成条率判定方法。徐海卫等^[82]分析了揉捻叶在揉桶中的受力情况,建立了桶式揉捻机揉捻过程中的揉捻叶受力模型,实现了茶叶揉捻加工的数字化作业。

4.2.5 发酵质量检测 and 程度判别

发酵是茶叶品质形成的关键工序,此过程伴随氧化、聚合、缩合等一系列生化反应,主要影响红茶、普洱茶的特定品质形成。董春旺等^[83]以不同发酵时序下的在制品为研究对象,结合近红外光谱技术、化学计量学方法和不同智能算法,建立了红茶发酵中茶色素、儿茶素和酚氨比等关键理化成分及感官品质评分的定量分析模型,实现了数字化生产中的发酵成分在线检测。邓余良等^[84]建立了基于近红

外光谱和化学计量学方法的红茶发酵过程茶黄素和茶红素比值(TFs/TRs)的线性和非线性预测模型,实现了发酵品质的数字化快速评价。

4.2.6 干燥程度检测与判别

干燥过程是茶叶加工的最后一道工序,随着茶叶水分散失、外形固定,茶叶内含成分发生系列理化反应,是形成茶叶色泽、香气以及滋味的重要过程。吴继忠等^[85]采用了近红外光谱分析技术,分析了茶叶干燥过程水分含量,建立了基于全光谱偏最小二乘回归(Partial least squares regression, PLS)模型、遗传偏最小二乘模型(Genetic algorithm - partial least squares, GA - PLS)、竞争性自适应加权抽样偏最小二乘模型(Competitive adaptive reweighted sampling - partial least squares, CARS - PLS)的含水率监测模型,实现了茶叶干燥过程品质的数字化、智能化监控。赵丽清等^[86]将热风干燥过程中的烘干温度、滚筒转速、烘干初始含水率、预测时间作为输入,含水率作为输出,结合了多元线性回归、BP 神经网络、Elman 神经网络以及粒子群优化的 Elman 神经网络(Particle swarm optimization - Elman neural network, PSO - ENN)算法,建立了烘干过程茶叶含水率预测模型。

以上研究表明,茶叶加工过程质量检测应用近红外光谱、机器视觉、电子鼻、神经网络等先进技术,有效地解决了茶叶从摊放至干燥各阶段品质参数的量化评估难题,实现了含水率、叶绿素、茶色素、茶多酚等关键成分含量的实时监测与精确控制,提升了茶叶加工的质量管理水平和生产效率。尽管如此,当前仍面临一些待解决的问题:环境变化、原料差异等因素对检测结果的影响尚未完全消除,需要进一步优化算法提升模型在复杂环境下的鲁棒性和准确性;茶叶品质形成的多因素交互作用机制尚不清晰,需深入研究探索,构建茶叶全品质预测模型;智能化设备和技术在中小规模茶企中的普及率有待提高,需降低成本、简化操作,符合中小规模茶企的实际需求。因此,茶叶加工过程质量检测领域,需进一步跨学科交叉融合,研发更为高效智能的检测技术,强化对茶叶内在品质变化动态规律的认知,确保茶叶品质的标准化和一致性。

4.3 茶叶成品质量检测

茶叶成品品质评价方法主要分为感官审评、成分分析检测。感官审评是茶叶成品品质评价的基本方法,具有方便、直观、快捷等特点,但感官审评具有一定的主观性;成分分析检测是借助分析仪器对茶叶的内含成分进行检测的方法,结果更加准确客观,但成本高、时间长、对样品破坏性大。近年来,基于

机器视觉、光谱技术、电化学方法的质量检测技术以快速、无损、客观的优点在茶叶成品检测方面应用广泛^[66,87]。LADDI 等^[88]建立了茶叶品质的机器视觉感官品质评价模型。DONG 等^[89]提取不同品质茶样的纹理和色泽等图像特征,采用偏最小二乘法和自适应极限学习机算法,建立了针芽形绿茶外形感官品质的预测评价模型。余洪等^[90]基于茶叶外形品质的评茶师审评结果,将 72 个茶样分成 4 个等级,建立了茶叶品质的机器视觉最小二乘支持向量机(Least squares support vector machine, LSSVM)分级模型。GUO 等^[91]提出了集成近红外光谱和群体智能算法的绿茶活性成分定量检测方法。LIU 等^[92]提出了一种基于红外光谱的普洱茶多组分定量分析方法。HUANG 等^[93]通过可见-近红外光谱结合化学计量学建立了通用光谱模型,实现了不同品种、不同叶位茶叶的儿茶素和咖啡碱含量的快速准确测定。WANG 等^[94]利用近红外光谱技术结合化学计量学方法建立跨类别识别模型,实现了红茶、黑茶、乌龙茶、绿茶等不同茶类的茶多酚、咖啡碱和游离氨基酸含量的精准预测。HIDAYAT 等^[95]提出了电子鼻-SVM-线性模型结合信号预处理的方法,实现了不同品牌 and 不同生产批次红茶样品的质量等级的区分。LIU 等^[96]建立了电子鼻结合神经网络的多任务模型,构建了基于排序差异和算法(Sum of ranking difference, SRD)与偏最小二乘判别分析(Partial least squares discriminant analysis, PLS-DA)的茶叶分类模型,实现了有机绿茶的等级分类和质量评价。CHEN 等^[97]研发了一种基于惰性金属传感器和多频大幅度脉冲扫描系统的新型智能伏安式电子舌系统,实现了不同等级的祁门红茶的鉴别。REN 等^[98]构建了基于蚁群算法(Ant colony optimization, ACO)的最小二乘支持向量机模型(Least squares support vector machine, LS-SVM),实现了滇红工夫红茶的智能检测,精度达到了 99.14%。

5 茶叶智能化销售

随着互联网、大数据、云计算等新技术的快速发展和新消费时代的来临,传统茶叶销售迫切需要转型升级^[99]。利用智慧化的手段为消费者提供更便捷优质的消费体验,借助于现代计算机技术和互联网技术的发展,可以更直接高效地培育市场,增加消费群体基数,从而带动全产业链协同发展^[100]。张书峰^[101]提出了基于计算机技术的无人智能茶店的设计方案。李珊枝^[102]结合云计算架构、大数据技术和云平台技术,提出了基于云计算架构的茶叶销

售大数据云平台建设方案。黄俊毅^[103]开展了年轻群体的问卷调查,提出了数字服务深度融合线上、线下和供应链的茶叶新零售模式。杭州茶厂与天猫通过线上+线下的数据打通建立“新零售茶馆”,互动派样机、云货架、新一代智能零售贩卖机进驻茶叶门店,打造基于数据分析的茶点推荐及试吃等^[100]。浙茶集团微智慧店采用人工智能(Artificial intelligence, AI)、物联网(Internet of Things, IoT)、大数据分析等技术,搭建了无人茶叶零售购物场景,构建了无人店线下购物流程,实现了高效便捷购物,帮助提升客户购物体验^[100]。同时,国内众多服务于终端市场的茶馆也是茶产业链条中另外一个重要的销售环节。茶楼连锁品牌的手机茶馆 APP 为消费者提供便捷的消费服务,同时也营造了一种全新的具有中国茶文化特色的生活方式。

6 茶产业智能化发展总结及展望

国家“十四五”规划和 2035 年远景目标纲要提出“加快发展智慧农业,推进农业生产经营和管理服务数字化改造,构建面向农业农村的智能化综合信息服务体系”。目前,茶产业的数字化、智能化呈现积极发展的趋势,主要表现在连接、分析和智能 3 种能力的快速提升,即利用互联网、物联网技术集成了线下资源与线上资源,茶园管理、茶叶加工实现远程监控管理,茶叶成品一品一码食品溯源;利用大数据处理分析技术制定茶园养护杀虫措施、茶叶加工工艺参数,提高了科学性和效率;利用人工智能技术为茶园种植管理、茶叶生产加工、产品推广销售等提供计算分析和智能决策支持。国内外研究人员已对茶叶鲜叶品质质量检测与分级、茶叶粗制工艺检测、精制等开展了大量的研究工作,但茶园种植中水肥管理、病虫害防治的智能化程度较低,以及不同品种、时令茶叶属性的差异化导致的茶叶养护、采摘、加工等方面的智能化研究还处于理论分析与试验阶段,面向工程化应用和产业化实施需要继续深入研究。另一方面,我国茶产业正处于由传统生产技术向现代技术转型的阶段,应用大数据、物联网、人工智能等新一代信息技术还存在诸多挑战,例如茶叶种植、加工、销售数据共享机制等政策法规亟待建设和完善,茶叶相关科研投入以及相关领域人才储备也需要加强。

研究表明茶产业中信息收集、智能决策、精准作业等核心技术是未来重点发展方向,在未来发展中着重关注以下方面。

(1) 增强茶产业新一代信息技术基础设施建设。茶产业人工智能的发展离不开海量数据积累以

及网络实时响应。茶园、工厂基础设施不够完善,数据获取成本很高,极大地限制了人工智能技术在茶产业链生态链场景中应用的广度和深度。提高茶产业链中智能传感器等基础设备供给水平,建设生产信息化和数字化工程,出台数据共享机制等,为茶叶智能机械装备的产业化应用提供基础和条件。

(2)加强人机协作智能茶机设备研发。《中国制造 2025》将农机装备作为重点发展的十大领域之一,明确农机装备信息化、智能化的重点发展方向。茶叶品种多、工艺参数复杂、消费市场个性化。现有名优茶机在使用过程中存在不适应作业环境、人机协作差、生产效率低等问题。在采摘作业中,枝叶遮挡容易导致目标未被识别,研发人机协作技术,将视觉系统遗漏的进行人为标记,改善智能采茶机的适用性,实现全部鲜叶的识别定位;由于茶园环境非结构化,受限于现有的人工智能水平,尚无法实现完全自主控制的茶园管理机器人,研发基于人机协作的茶园耕作施肥机器人,以提高作业效率,减轻人工作业强度迫在眉睫。研发新一代灵活、稳健、兼容、互联的人机协作智能茶机,打造多模式、可交互操作的协作系统,与现有茶产业加工系统一起组合并协调工作,推动茶产业生产力发展。

(3)重视茶叶种植加工大模型开发。生成型预训练变换模型(Chat generative pre-trained transformer, ChatGPT)等人工智能大模型将赋能茶产业。茶产业知识查询:人工智能大模型可以准确理解用户的各类问题,通过对大量茶产业资料和实践经验的学习,准确提供针对性的建议和解决方案,帮助茶农更高效地应对生产中的挑战;茶机装备控

制:通过与物联网设备和自动化系统相结合,大模型可以协助茶农实现对茶机的远程监控,可通过大模型提升自动采茶机、翻耕机等装备人机交互能力,降低茶农工作强度。人工智能大模型可以帮助分析、处理和预测茶叶种植、加工过程中的各种影响因素,提供更加精准的决策支持,并可以根据反馈不断优化和完善,实现精益种植、精细加工、精准销售。

(4)提升大数据助力茶叶销售能力。通过实时采集、分析茶园管理、生产加工全过程,积累了海量数据,精准掌握茶叶生长环境、品质特性以及市场需求等关键信息。大数据技术可帮助构建全面的茶叶质量追溯体系,使得每一片茶叶从种植到销售都能实现数据可视化,增强消费者对茶叶品质的信任度。此外,通过对市场销售数据、消费者购买行为及偏好等大数据进行深度挖掘和预测分析,茶企能够更准确地定位目标消费群体,制定精细化营销策略,优化产品结构,打造符合个性化消费需求的茶叶产品。同时,借助大数据驱动的精准营销手段,如基于用户画像的推荐系统,能有效提高茶叶产品的市场转化率,拓宽销售渠道,进一步提升茶叶销售额和品牌影响力。

综上,茶产业与新一代信息技术深度融合,以科技创新为支撑、以市场需求为引领、以数字经济为目标,通过机械自动化、大数据信息工程、物联网和人工智能等多学科交叉,促进现有茶叶加工技术向数字化和智能化方向转型与升级,为茶业全产业链赋能增效,实现茶叶加工数字化精准调控,有效提高产品的科技含量和附加值,推动茶产业高质量发展。

参 考 文 献

[1] 耿莲莲. 浅谈中国茶叶发展的历史节点[J]. 福建茶叶, 2020, 42(7): 1-2.

[2] 王璐, 邢东辉. 茶叶中的功能性成分及其保健功效[J]. 福建茶叶, 2023, 45(3): 20-22.

[3] 李清光, 李晓钟, 周惠明. 茶叶品种与产地识别技术研究进展[J]. 食品科学, 2011, 32(13): 341-344.
LI Qingguang, LI Xiaozhong, ZHOU Huiming. Research progress of identification technologies for tea varieties and geographical origins[J]. Food Science, 2011, 32(13): 341-344. (in Chinese)

[4] 程云洁, 卜雨欣. 中国对“一带一路”沿线国家茶叶出口贸易的网络拓扑结构特征分析[J]. 价格月刊, 2023(1): 59-67.

[5] 黄藩, 王云, 熊元元, 等. 我国茶叶机械化采摘技术研究现状与发展趋势[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(12): 48-51.

[6] 刘韦华, 翁俐. 茶叶机械化加工装备技术发展趋势研究[J]. 福建茶叶, 2022, 44(1): 29-31.

[7] 杨俊, 马霆, 郭丹. 提升数字能力赋能智慧农业发展[J]. 华中农业大学学报, 2023, 42(5): 282-288.
YANG Jun, MA Ting, GUO Dan. Enhancing digital capabilities to empower development of smart agriculture[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2023, 42(5): 282-288. (in Chinese)

[8] 应诗怡, 向永胜, 陆莹. 新零售业态下茶叶智慧生态体系构筑研究——以杭州艺福堂公司为例[J]. 中国经贸导刊, 2021(5): 120-121.

[9] 全球茶叶产量、消费量及进出口贸易分析:中国茶叶产量全球排名第一_智研咨询[EB/OL]. [2023-10-07]. <https://www.chyxx.com/industry/202201/993208.html>.

[10] 茶小普. 中国四大茶产区[EB/OL]. (2021-04-16)[2023-10-07]. <https://zhuanlan.zhihu.com/p/365308788>.

[11] 中国茶叶流通协会:2022年中国茶叶产销形势报告 | 互联网数据资讯网-199IT | 中文互联网数据研究资讯中心-199IT[EB/OL]. (2023-04-20)[2023-12-15]. <https://www.199it.com/archives/1588832.html>.

[12] 疏再发, 吉庆勇, 金晶, 等. 智慧茶园技术集成与应用[J]. 中国茶叶, 2022, 44(3): 10-16, 20.
SHU Zaifa, JI Qingyong, JIN Jing, et al. Integration and application of intelligent tea garden technology[J]. China Tea,

2022, 44(3): 10 – 16, 20. (in Chinese)

[13] 乔明明, 田斐, 任勇攀, 等. 信息技术在茶叶种植中的应用探究[J]. 南方农业, 2022, 16(8): 225 – 227.

[14] 蒋永泉. 基于多源遥感数据茶园识别及其识别精度尺度效应研究[D]. 昆明: 云南师范大学, 2021.
JIANG Yongquan. Research on the identification of tea plantations based on multi-source remote sensing data and its recognition accuracy scale effect[D]. Kunming: Yunnan Normal University, 2021. (in Chinese)

[15] 姜宇榕, 何国松, 韩冰华, 等. 基于 GIS 的赤壁市茶叶种植适宜性评价研究[J]. 科技创新与应用, 2019(12): 45 – 48.

[16] 杨鉴. 贵州省茶园土壤锌的空间异质性及影响因素[D]. 贵阳: 贵州大学, 2022.
YANG Jian. Spatial heterogeneity and influencing factors of soil zinc in tea plantation in Guizhou Province[D]. Guiyang: Guizhou University, 2022. (in Chinese)

[17] 杨清霖. 幼龄茶园滴灌施肥技术研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2019.
YANG Qinglin. Study on fertigation technology in young tea garden[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2019. (in Chinese)

[18] 张冬菊, 夏鸽飞, 朱登平, 等. 茶园智慧水肥一体化系统设计与应用分析[J]. 南方农业, 2020, 14(17): 176 – 178.

[19] 陈伯文, 阳小民. 茶园水肥一体化技术与自动控制灌溉系统技术应用与推广[J]. 湖南水利水电, 2023(6): 64 – 66.

[20] 史德林. 基于精密传感网络控制的茶园水肥一体化控制策略[J]. 当代农机, 2023(8): 61 – 62, 65.

[21] 王银茂. 茶园土壤养分水平与开采期的数字化预测研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
WANG Yinmao. Research on digital prediction of soil nutrient level in tea garden and the starting time of picking[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021. (in Chinese)

[22] 陈义勇, 黎健龙, 周波, 等. 茶园生境智慧管控技术助推广东茶产业可持续健康发展[J]. 广东农业科学, 2020, 47(12): 193 – 202.
CHEN Yiyong, LI Jianlong, ZHOU Bo, et al. Promotion of the sustainable and healthy development of Guangdong tea industry through habitat intelligent management and control technologies in tea garden[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2020, 47(12): 193 – 202. (in Chinese)

[23] 山地茶园多功能履带式掘耕机上市发布[EB/OL]. [2024 – 01 – 02]. https://www.sohu.com/a/www.sohu.com/a/589171734_482413.

[24] 药林桃, 罗翔, 曹晓林, 等. 基于 RTK – GPS 的智能微耕机导航系统[J]. 农机化研究, 2021, 43(9): 78 – 82.
YAO Lintao, LUO Xiang, CAO Xiaolin, et al. Automatic navigation system of micro tillage machine based on RTK – GPS[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(9): 78 – 82. (in Chinese)

[25] 杨晨辉, 张君雁. 一种便于信息采集的智能化翻耕机: CN201621196405.8[P]. 2017 – 07 – 25.

[26] 秦华光. 茶园害虫智能化 WEB 管理系统的设计与实现[D]. 北京: 中国农业科学院, 2008.
QIN Huaguang. Design and realization of intelligent WEB management system of pests in tea gardens[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2008. (in Chinese)

[27] 吴阿林, 周孝贵, 肖强. 茶树尺蛾科典型害虫成虫智能识别技术研究[J]. 浙江科技学院学报, 2014, 26(3): 192 – 198.
WU Alin, ZHOU Xiaogui, XIAO Qiang. Study on technique for intelligent identification of typical geometridae adults in tea tree[J]. Journal of Zhejiang University of Science and Technology, 2014, 26(3): 192 – 198. (in Chinese)

[28] 杨国国, 鲍一丹, 刘子毅. 基于图像显著性分析与卷积神经网络的茶园害虫定位与识别[J]. 农业工程学报, 2017, 33(6): 156 – 162.
YANG Guoguo, BAO Yidan, LIU Ziyi. Localization and recognition of pests in tea plantation based on image saliency analysis and convolutional neural network[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(6): 156 – 162. (in Chinese)

[29] BHATT P, SARANGI S, PAPPULA S. Detection of diseases and pests on images captured in uncontrolled conditions from tea plantations[C]//THOMSSON J A, MCKEE M, MOORHEAD R J. Autonomous air and ground sensing systems for agricultural optimization and phenotyping IV. Baltimore, United States: SPIE, 2019: 33.

[30] 不喷农药也能防虫害, 西湖区 1.1 万亩茶园有了智能防控“管家”[EB/OL]. [2023 – 11 – 22]. https://www.sohu.com/a/www.sohu.com/a/416318288_671633.

[31] 田志伟, 薛新宇, 李林, 等. 植保无人机施药技术研究现状与展望[J]. 中国农机化学报, 2019, 40(1): 37 – 45.
TIAN Zhiwei, XUE Xinyu, LI Lin, et al. Research status and prospects of spraying technology of plant-protection unmanned aerial vehicle[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(1): 37 – 45. (in Chinese)

[32] 楚博, 罗逢健, 罗宗秀, 等. 茶园应用植保无人飞机的可行性评价[J]. 茶叶科学, 2021, 41(2): 203 – 212.
CHU Bo, LUO Fengjian, LUO Zongxiu, et al. Feasibility evaluation of the application of unmanned aerial vehicle for tea plant protection[J]. Journal of Tea Science, 2021, 41(2): 203 – 212. (in Chinese)

[33] 王小勇, 汤丹丹. 茶叶采摘技术及采茶机械研究进展[J]. 茶叶学报, 2022, 63(4): 275 – 282.
WANG Xiaoyong, TANG Dandan. Research progress on mechanical tea plucking[J]. Journal of Tea, 2022, 63(4): 275 – 282. (in Chinese)

[34] 王先伟, 吴明晖, 周俊, 等. 采茶机器人导航避障及路径规划研究[J]. 农业装备与车辆工程, 2019, 57(12): 121 – 124.
WANG Xianwei, WU Minghui, ZHOU Jun, et al. Research on tea picking robot’s navigation, barrier avoidance and path planning[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2019, 57(12): 121 – 124. (in Chinese)

[35] 王焜. 采茶机器人运动学分析及仿真[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2019.
WANG Kun. Kinematics analysis and simulation of tea picking robot[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2019. (in Chinese)

[36] 秦广明, 赵映, 肖宏儒, 等. 4CZ – 12 智能采茶机器人设计及田间试验[J]. 中国农机化学报, 2014, 35(1): 152 –

156,169.

QIN Guangming, ZHAO Ying, XIAO Hongru, et al. 4CZ-12 intelligent tea harvest robot design and field experiment[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2014, 35(1): 152-156,169. (in Chinese)

- [37] 张修. 智能采茶机器人的茶叶视觉特征识别方法研究[D]. 上海:上海交通大学, 2020.

ZHANG Xiu. Research on tea recognition method based on machine vision features for intelligent tea picking robot[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2020. (in Chinese)

- [38] 汤一平, 王伟羊, 朱威, 等. 基于机器视觉的茶陇识别与采茶机导航方法[J]. 农业机械学报, 2016, 47(1): 45-50.

TANG Yiping, WANG Weiyang, ZHU Wei, et al. Tearidge identification and navigation method for tea-plucking machine based on machine vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1): 45-50. (in Chinese)

- [39] 付昊. 基于深度学习的茶叶嫩芽检测和采摘研究[D]. 杭州:浙江科技学院, 2022.

FU Hao. Research on detection and picking of tea shoots based on deep learning[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Science and Technology, 2022. (in Chinese)

- [40] 科技前沿|机器人也能采茶了? 难度堪比“农田里绣花”_澎湃号·政务_澎湃新闻[EB/OL]. [2023-12-15]. https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_22721712.

- [41] 乘用型采茶机 KJ4N-浙江川崎茶业机械有限公司[EB/OL]. [2023-12-15]. <http://www.zjcqej.com/pd.jsp?id=37>.

- [42] 全球首例高原山地采茶机器人无网络环境下实现茶叶采摘识别-云南农业大学[EB/OL]. [2023-12-15]. <https://www.ynau.edu.cn/info/1170/23964.htm>.

- [43] ZHANG S, YANG H, YANG C, et al. Edge device detection of tea leaves with one bud and two leaves based on ShuffleNetv2-YOLOv5-Lite-E[J]. Agronomy, 2023, 13(2): 577.

- [44] 百度百科_杀青[EB/OL]. [2023-12-15]. <https://baike.baidu.hk/item/%E6%9D%80%E9%9D%92/9675227>.

- [45] 董春旺, 刘中原, 杨明, 等. 基于多源信息融合的绿茶杀青叶水分含量智能感知方法[J]. 食品科学, 2022, 43(20): 242-251.

DONG Chunwang, LIU Zhongyuan, YANG Ming, et al. Intelligent sensing method for detecting moisture content in fixed tea leaves for green tea based on multi-source information fusion[J]. Food Science, 2022, 43(20): 242-251. (in Chinese)

- [46] 郝朝会, 孙传祝, 苏夏侃. 自适应模糊 PID 控制在茶叶杀青机中的应用[J]. 农机化研究, 2013, 35(2): 201-204.

HAO Chaohui, SUN Chuazhu, SU Xiakan. Application study of adaptive fuzzy PID control used in green removing of tea[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013, 35(2): 201-204. (in Chinese)

- [47] 曹成茂, 吴正敏, 梁闪闪, 等. 茶叶杀青机双模糊控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(7): 259-265.

CAO Chengmao, WU Zhengmin, LIANG Shanshan, et al. Design and experiment of double fuzzy control system for tea cylinder water-removing machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 259-265. (in Chinese)

- [48] 吕浩华. 汽-热-风耦合滚筒式茶叶杀青机的设计与试验研究[D]. 泰安:山东农业大学, 2023.

LÜ Haohua. Design and experimental study of steam-heat-air coupling drum tea fixation machine[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2023. (in Chinese)

- [49] 潘玉成, 刘宝顺, 黄先洲, 等. 茶叶杀青机模糊 RBF 神经网络 PID 温控系统设计与试验[J]. 茶叶科学, 2019, 39(2): 139-149.

PAN Yucheng, LIU Baoshun, HUANG Xianzhou, et al. Design and experiment of the temperature control system of the fuzzy RBF neural network PID in tea fixing machine[J]. Journal of Tea Science, 2019, 39(2): 139-149. (in Chinese)

- [50] 姜淑华. 茶叶揉捻机的集成数字化控制系统设计[J]. 福建茶叶, 2016, 38(11): 157-158.

- [51] 李杰, 赵丽清, 宋志禹, 等. 茶叶揉捻机组: CN201922430258.6[P]. 2020-09-08.

- [52] 赵进, 张越, 赵丽清, 等. 茶叶揉捻机组自动控制系统设计[J]. 中国农机化学报, 2019, 40(2): 140-144.

ZHAO Jin, ZHANG Yue, ZHAO Liqing, et al. Design of automatic control system for tea disc-roller[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(2): 140-144. (in Chinese)

- [53] 精揉机-浙江川崎茶业机械有限公司[EB/OL]. [2023-12-15]. <http://www.zjcqej.com/pd.jsp?id=23>.

- [54] 李兵, 孙长应, 李为宁, 等. 基于 DMC-PID 串级控制的茶叶远红外烘干机设计与试验[J]. 茶叶科学, 2018, 38(4): 410-415.

LI Bing, SUN Changying, LI Weining, et al. Design and experiment of tea far infrared dryer based on DMC-PID cascade control[J]. Journal of Tea Science, 2018, 38(4): 410-415. (in Chinese)

- [55] 许福桥. 一种基于物联网的烘干效率高的便捷型茶叶烘干机: CN201820547191.7[P]. 2019-04-26.

- [56] 林大煜. 节能型烘干机及其节能装置监测系统的研究[D]. 厦门:华侨大学, 2013.

LIN Dayu. The research of energy-saving tea dryer and the monitoring system of energy-saving device[D]. Xiamen: Huaqiao University, 2013. (in Chinese)

- [57] 吴晓强, 李亚莉, 周红杰, 等. 基于模糊 PID 的茶叶烘干机恒温控制系统研究[J]. 食品与机械, 2015, 31(4): 111-113,255.

WU Xiaoqiang, LI Yali, ZHOU Hongjie, et al. Research on control system of tea constant temperature drying machine based on fuzzy PID[J]. Food & Machinery, 2015, 31(4): 111-113,255. (in Chinese)

- [58] 烘干机-常规产品-浙江春江茶叶机械有限公司[EB/OL]. [2023-10-19]. <http://www.zjcjcyjx.com/?cp/105.html>.

- [59] 6CH-941 碧螺春烘干机(3斗)-常规产品-浙江春江茶叶机械有限公司-[EB/OL]. [2023-12-23]. <http://www.zjcjcyjx.com/?cp/82.html>.

- [60] 王小勇, 庄翔宇, 方世辉. 浅谈茶叶精制机械的现状和发展[J]. 现代农业装备, 2021, 42(5): 73–77.
WANG Xiaoyong, ZHUANG Xiangyu, FANG Shihui. Present situation and development of tea refining machinery[J]. Modern Agricultural Equipments, 2021, 42(5): 73–77. (in Chinese)
- [61] 丁勇, 徐奕鼎, 雷攀登, 等. 茶叶精制主体设备的技术特性与应用[J]. 中国茶叶加工, 2012(1): 31–35.
DING Yong, XU Yiding, LEI Pandeng, et al. Technical characteristic and application of main tea refining machinery[J]. China Tea Processing, 2012(1): 31–35. (in Chinese)
- [62] 徐捷. 基于 DSP 和 FPGA 的茶叶色选机的研究与设计[D]. 天津: 天津大学, 2012.
XU Jie. The research and design of tea color sorter based on DSP and FPGA[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012. (in Chinese)
- [63] 陈笋. 基于多特征多分类器组合的茶叶茶梗图像识别分类研究[D]. 合肥: 安徽大学, 2014.
CHEN Sun. The study of tea-leaf and tea-stalk image recognition and classification based on multi-features and multi-classifiers [D]. Hefei: Anhui University, 2014. (in Chinese)
- [64] 宋彦, 谢汉垒, 宁井铭, 等. 基于机器视觉形状特征参数的祁门红茶等级识别[J]. 农业工程学报, 2018, 34(23): 279–286.
SONG Yan, XIE Hanlei, NING Jingming, et al. Grading Keemun black tea based on shape feature parameters of machine vision[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(23): 279–286. (in Chinese)
- [65] 吴正敏, 曹成茂, 王二锐, 等. 基于形态特征参数的茶叶精选方法[J]. 农业工程学报, 2019, 35(11): 315–321.
WU Zhengmin, CAO Chengmao, WANG Errui, et al. Tea selection method based on morphology feature parameters[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(11): 315–321. (in Chinese)
- [66] 刘奇, 欧阳建, 刘昌伟, 等. 茶叶品质评价技术研究进展[J]. 茶叶科学, 2022, 42(3): 316–330.
LIU Qi, OUYANG Jian, LIU Changwei, et al. Research progress of tea quality evaluation technology[J]. Journal of Tea Science, 2022, 42(3): 316–330. (in Chinese)
- [67] 王胜鹏, 宛晓春, 林茂先, 等. 基于水分、全氮量和粗纤维含量的茶鲜叶原料质量近红外评价方法[J]. 茶叶科学, 2011, 31(1): 66–71.
WANG Shengpeng, WAN Xiaochun, LIN Maoxian, et al. Estimating the quality of tea leaf materials based on contents of moisture, total nitrogen and crude fiber by NIR–PLS techniques[J]. Journal of Tea Science, 2011, 31(1): 66–71. (in Chinese)
- [68] 常春, 陈怡群, 肖宏儒, 等. 基于神经网络图像分析的智能鲜茶叶分选机[J]. 中国农机化学报, 2013, 34(1): 137–141.
CHANG Chun, CHEN Yiqun, XIAO Hongru, et al. Smart fresh tea sorter with neural network image analysis[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2013, 34(1): 137–141. (in Chinese)
- [69] 戴春霞, 刘芳, 葛晓峰. 基于高光谱技术的茶鲜叶含水率检测与分析[J]. 茶叶科学, 2018, 38(3): 281–286.
DAI Chunxia, LIU Fang, GE Xiaofeng. Detection and analysis of moisture content in fresh tea leaves based on hyperspectral technology[J]. Journal of Tea Science, 2018, 38(3): 281–286. (in Chinese)
- [70] 李建钢. 等直径滚筒式茶鲜叶分级机设计与试验[D]. 镇江: 江苏大学, 2016.
LI Jian'gang. Design and experiment of a uniform diameter roller screening machine for fresh tea leaves[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2016. (in Chinese)
- [71] 吕昊威. 机采茶鲜叶振动分级设备研制及试验研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2022.
LÜ Haowei. Development and experimental research on vibration grading equipment for machine-picked fresh tea leaves[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2022. (in Chinese)
- [72] 知识小百科. 从茶鲜叶到包装上市, 美亚拥有全过程分选检测解决方案[EB/OL]. (2020–08–24)[2023–12–23].
<https://zhuanlan.zhihu.com/p/196297696>.
- [73] 茶叶数字化加工研究现状-茶友网(原中国普洱茶网)[EB/OL]. [2023–12–15]. <https://www.puer.cn/zhishi/127958/>.
- [74] 王胜鹏, 郑鹏程, 桂安辉, 等. 基于近红外光谱技术的远安黄茶品质快速无损检测方法[J]. 华中农业大学学报, 2022, 41(1): 238–245.
WANG Shengpeng, ZHENG Pengcheng, GUI Anhui, et al. Fast and non-destructive quality evaluation of Yuan'an yellow tea based on near-infrared spectroscopy[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2022, 41(1): 238–245. (in Chinese)
- [75] LIU Z, YANG C, LUO X, et al. Research on the online rapid sensing method of moisture content in famous green tea spreading[J]. Journal of Food Process Engineering, 2021, 44(11): e13853.
- [76] TING A, HUAN Y, COHNGSHAN Y, et al. Black tea withering moisture detection method based on convolution neural network confidence[J]. Journal of Food Process Engineering, 2020, 43(7): e13428.1–e13428.10.
- [77] WANG Y, LIU Y, CUI Q, et al. Monitoring the withering condition of leaves during black tea processing via the fusion of electronic eye (E-eye), colorimetric sensing array (CSA), and micro-near-infrared spectroscopy (NIRS)[J]. Journal of Food Engineering, 2021, 300: 110534.
- [78] SHEN S, HUA J, ZHU H, et al. Rapid and real-time detection of moisture in black tea during withering using micro-near-infrared spectroscopy[J]. LWT, 2022, 155: 112970.
- [79] 蒋建军, 李臻峰, 宋飞虎. 基于气味在线检测的绿茶锅式杀青系统研究[J]. 食品与机械, 2021, 37(2): 111–118.
- [80] 吴鑫, 宋飞虎, 裴永胜, 等. 基于机器视觉的茶叶微波杀青中品质变化与预测研究[J]. 茶叶科学, 2021, 41(6): 854–864.
WU Xin, SONG Feihu, PEI Yongsheng, et al. Study on the tea quality changes and predictions during the microwave fixation process by machine vision[J]. Journal of Tea Science, 2021, 41(6): 854–864. (in Chinese)

- [81] 刘飞. 工夫红茶揉捻中理化特性变化及成条率评价方法研究[D]. 重庆:西南大学, 2014.
LIU Fei. Study on the change of physical and chemical properties and the evaluation method of twing rate during rolling process of Congou black tea[D]. Chongqing: Southwest University, 2014. (in Chinese)
- [82] 徐海卫, 谢驰, 曹江萍, 等. 茶叶揉捻压力的优化调节控制研究[J]. 中国测试, 2015, 41(10): 112 – 116.
XU Haiwei, XIE Chi, CAO Jiangping, et al. Research on the optimal regulation control of barreling pressure for the tea[J]. China Measurement & Testing Technology, 2015, 41(10): 112 – 116. (in Chinese)
- [83] 董春旺, 梁高震, 安霆, 等. 红茶感官品质及成分近红外光谱快速检测模型建立[J]. 农业工程学报, 2018, 34(24): 306 – 313.
DONG Chunwang, LIANG Gaozhen, AN Ting, et al. Near-infrared spectroscopy detection model for sensory quality and chemical constituents of black tea[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(24): 306 – 313. (in Chinese)
- [84] 邓余良, 胡强, 夏康炎, 等. 基于近红外的红茶发酵中 TFs/TRs 评价模型研究[J]. 现代农业装备, 2019, 40(4): 64 – 70.
DENG Yuliang, HU Qiang, XIA Kangyan, et al. Evaluation model by near-infrared spectroscopy of theaflavins and thearubigins ratio in black tea fermentation[J]. Modern Agricultural Equipments, 2019, 40(4): 64 – 70. (in Chinese)
- [85] 吴继忠, 王新宇, 蓝黄博恩, 等. 茶叶干燥过程水分含量的近红外光谱检测方法研究[J]. 农产品加工, 2018(18): 44 – 47.
WU Jizhong, WANG Xinyu, LAN Huangboen, et al. Study on estimating the water content of tea in drying process using near infrared spectroscopy technique[J]. Agricultural Products Processing, 2018(18): 44 – 47. (in Chinese)
- [86] 赵丽清, 段东瑶, 殷元元, 等. 基于 PSO – Elman 算法的茶叶烘干含水率预测[J]. 农业工程学报, 2021, 37(19): 284 – 292.
ZHAO Liqing, DUAN Dongyao, YIN Yuanyuan, et al. Prediction of tea drying moisture content based on PSO Elman algorithm [J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(19): 284 – 292. (in Chinese)
- [87] 童阳, 艾施荣, 吴瑞梅, 等. 茶叶外形感官品质的计算机视觉分级研究[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(5): 170 – 173.
- [88] LADDI A, SHARMA S, KUMAR A, et al. Classification of tea grains based upon image texture feature analysis under different illumination conditions[J]. Journal of Food Engineering, 2013, 115(2): 226 – 231.
- [89] DONG Chunwang, ZHU Hongkai, ZHAO Jiewen, et al. Sensory quality evaluation for appearance of needle-shaped green tea based on computer vision and nonlinear tools[J]. Journal of Zhejiang University—Science b, 2017, 18(6): 544 – 548.
- [90] 余洪, 吴瑞梅, 艾施荣, 等. 基于 PCA – PSO – LSSVM 的茶叶品质计算机视觉分级研究[J]. 激光杂志, 2017, 38(1): 51 – 54.
YU Hong, WU Ruimei, AI Shirong, et al. Study on computer vision classification of tea quality based on PCA – PSO – LSSVM [J]. Laser Journal, 2017, 38(1): 51 – 54. (in Chinese)
- [91] GUO Z, BARIMAH A O, SHUJAT A, et al. Simultaneous quantification of active constituents and antioxidant capability of green tea using NIR spectroscopy coupled with swarm intelligence algorithm[J]. LWT, 2020, 129: 109510.
- [92] LIU Z, XIE H L, CHEN L, et al. An improved weighted partial least squares method coupled with near infrared spectroscopy for rapid determination of multiple components and anti-oxidant activity of Pu – Erh tea[J]. Molecules, 2018, 23(5): 1058.
- [93] HUANG Y, DONG W, SANAEIFAR A, et al. Development of simple identification models for four main catechins and caffeine in fresh green tea leaf based on visible and near-infrared spectroscopy[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 173: 105388.
- [94] WANG J, WANG Y, CEHNG J, et al. Enhanced cross-category models for predicting the total polyphenols, caffeine and free amino acids contents in Chinese tea using NIR spectroscopy[J]. LWT, 2018, 96: 90 – 97.
- [95] HIDAYAT S N, TRIYANA K, FAUZAN I, et al. The electronic nose coupled with chemometric tools for discriminating the quality of black tea samples in situ[J]. Chemosensors, 2019, 7(3): 29.
- [96] LIU H, YU D, GU Y. Classification and evaluation of quality grades of organic green teas using an electronic nose based on machine learning algorithms[J]. IEEE Access, 2019, 7: 172965 – 172973.
- [97] CHEN X, XU Y, MENG L, et al. Non-parametric partial least squares-discriminant analysis model based on sum of ranking difference algorithm for tea grade identification using electronic tongue data[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2020, 311: 127924.
- [98] REN G, LI T, WEI Y, et al. Estimation of Congou black tea quality by an electronic tongue technology combined with multivariate analysis[J]. Microchemical Journal, 2021, 163: 105899.
- [99] 程园. 新零售背景下茶叶营销策略研究[J]. 福建茶叶, 2020, 42(12): 35 – 36.
- [100] 张士康. 中国智慧茶业概况与发展思考[J]. 茶叶通讯, 2020, 47(1): 1 – 5.
ZHANG Shikang. General situation and thinking on the development of China intelligent tea industry [J]. Tea Communication, 2020, 47(1): 1 – 5. (in Chinese)
- [101] 张书锋. 计算机技术下开发无人智能茶店的可行性分析[J]. 福建茶叶, 2018, 40(11): 23.
- [102] 李珊枝. 基于云计算架构的茶叶销售大数据云平台建设[J]. 福建茶叶, 2018, 40(12): 23.
- [103] 黄俊毅. 茶叶新零售的机遇与挑战——基于年轻群体的问卷调查[J]. 福建茶叶, 2020, 42(3): 51 – 52.