

红茶发酵过程中品质评价技术研究进展

Research progress of quality evaluation technology in black tea fermentation process

夏长杙¹ 冉乾松² 李 芮¹ 刘亚兵³

XIA Chang-yi¹ RAN Qian-song² LI Rui¹ LIU Ya-bing³

(1. 安顺学院, 贵州 安顺 561000; 2. 贵州农业职业学院, 贵州 贵阳 551400;

3. 贵州省茶叶研究所, 贵州 贵阳 550006)

(1. Anshun College, Anshun, Guizhou 561000, China; 2. Guizhou Vocational College of Agriculture, Guiyang, Guizhou 551400, China; 3. Tea Research Institute of Guizhou Province, Guiyang, Guizhou 550006, China)

摘要: 发酵是红茶特征品质形成的关键环节, 快速准确地评判红茶发酵度, 对于红茶加工至关重要。文章综述了近年来人工感官评价技术、生化成分检测技术、智能仿生技术、数据融合技术以及智能仿生设备等评价技术在红茶发酵品质评价中的应用现状, 并对智能仿生技术在未来红茶发酵评价中的应用趋势进行了展望。

关键词: 红茶发酵; 人工感官; 成分检测; 模式识别; 智能仿生技术

Abstract: Fermentation is the key to the formation of characteristics and quality of black tea. It is very important to evaluate the fermentability of black tea quickly and accurately. In this paper, the application of artificial sensory evaluation technology, biochemical component detection technology, intelligent biomimetic technology, data fusion technology and intelligent biomimetic equipment in the evaluation of black tea fermentation quality in recent years was reviewed, and the development trend of intelligent biomimetic technology in the evaluation of black tea fermentation in the future was prospected.

Keywords: black tea fermentation; artificial sense; component detection; pattern recognition; intelligent bionic technology

红茶是世界上消费量最大的饮料之一, 因其独特风味和潜在健康益处, 长期以来备受关注^[1]。红茶生产工艺包括: 萎凋、揉捻、发酵和干燥。不同制造工艺直接影响成品茶质量, 尤其是发酵环节^[2]。它关系到红茶特征

颜色、香气、滋味^[3-4]。因此, 适当发酵对于控制红茶质量尤为重要。

人工感官评价、理化分析和智能仿生技术评价是目前评价红茶发酵度的主要技术手段(图 1)。人工感官评价是红茶发酵判别常用方法, 主要评估发酵叶外观和香气。这种评估方法主观性强, 容易受到环境、经验和生理状况等外部因素影响。与人工感官评价不同, 传统化学分析方法, 包括气相色谱法和高效液相色谱法等基于仪器检测关键成分而获得客观准确的结果。然而, 该法复杂、耗时且具破坏性。而智能仿生技术一定程度上代替了人工感官评价, 其出发点是智能识别和响应发酵过程中复杂和不确定性问题^[5], 可以对红茶发酵过程中色、香、味等进行客观反映。

文章对人工感官、成分检测、智能仿生技术等评价技术在红茶发酵过程中研究进展及未来发展趋势进行综述, 以为红茶生产加工提供理论依据。

1 感官评价

目前, 在红茶发酵过程中, 判别红茶发酵是否适度, 主要通过观察发酵叶色泽、香气等进行人工感官评价, 凭借长期制茶经验来预测发酵程度和感官品质。目前中国茶叶感官品质评价主要依据 GB/T 23776—2018, 茶滋味主要是茶叶可溶性成分(如多酚类化合物、氨基酸化合物、糖类化合物)综合配比形成滋味, 感官评价是目前国内外茶叶界广泛认同的茶叶品质鉴别方法^[6], 研究者通常根据审评成品红茶所呈现的感官体验, 来判断红茶发酵程度。马玉青等^[7]研究了不同发酵程度对大叶种红茶香气品质的影响, 发现发酵 5 h 的比发酵 4 h 的花香和果香更明显; 刘亚芹等^[8]根据茶汤是否具有青涩感来判断红茶发酵是否不足或发酵适度。统一使用感官术语和描述词, 能准确表达味觉感官体验。随着感官审评技术发

基金项目: 贵州省科技支撑计划项目(编号: 黔科合支撑[2020]1Y009 号)

作者简介: 夏长杙, 男, 安顺学院讲师, 博士。

通信作者: 刘亚兵(1991—), 男, 贵州省茶叶研究所助理研究员, 硕士。E-mail: lybgz628@163.com

收稿日期: 2022-09-04 **改回日期:** 2022-12-23

展,国内外已建立描述性分析、定量描述等诸多感官分析方法和标准等^[9]。然而当前感官术语还有待完善,有些术语语义不明确、词义混淆、组合词汇过多等^[10]。因此,研究人员开始将目光从新投入到发酵的具体过程中,确定并比较不同发酵程度茶叶色泽变化特征,确定最佳发酵工艺。尹杰等^[11]通过红茶发酵过程中发酵叶色泽变化研究,发现工夫红茶在发酵 3.5 h 时甜香明显,叶色由黄绿、带红梗到红明亮,能满足工夫红茶品质特征要求;钟兴刚等^[12]研究表明红茶发酵在 6~8 h 时,香气花蜜甜香渐浓,叶色黄红色、金毫满披;Ghosh 等^[13]通过设置不同发酵时间观测红茶发酵体系香气特征变化,在不同嗅闻周期获得连续数据建立递归 Elman 网络,在早期阶段预测红茶最佳发酵时间,结果表明该网络可以在红茶发酵过程中预测最佳周期。通过大量的研究比对建立数据库,递归 Elman 网络在一定程度上提高了红茶发酵品质评价,但无法避免因个体、环境差异对结果影响,人工感官结果客观性、重现性、可控性较差。

2 化学成分检测技术

红茶发酵过程中茶叶色泽发生显著变化,这种现象是茶多酚动态转化为茶黄素、茶红素等色素的结果^[14]。因此,研究人员开始应用物理和化学等方法对红茶发酵过程中化学成分检测,相较于感官审评检测结果更加客观、准确。茶叶化学组分分析中通常使用化学计量分析方法,包括线性判别分析、主成分分析和聚类分析、偏最小二乘法等。目前,茶叶化学组分分析评价常用检测手段主要包括紫外—可见分光光度计(UV)和高效液相色谱(HPLC)^[15]、超高效液相色谱(UPLC)^[16]、液相色谱—质谱联用(LC-MS)^[17]、气相色谱—质谱联用(GC-MS)^[18]、超高效液相色谱—四极杆—飞行时间质谱

(UPLC-Q-TOF/MS)^[19]等高新技术仪器,也常被用于红茶发酵程度研究。不同发酵程度红茶中差异代谢物含量不同,Tan 等^[19]利用 UPLC-Q-TOF/MS 全面分析茶叶在不同发酵时间下代谢物变化规律,绘制化合物动态变化图;马玉青等^[7]研究表明,发酵 5 h 红茶中具有果香、甜香的芳香化合物含量高于发酵 4 h;桂安辉^[20]研究表明表儿茶素(EC)和茶褐素(TB)在茶叶中含量具有线性变化规律,可据此区分发酵不足、适度和过度 3 种红茶样品。因此,根据发酵过程中化学物质种类、含量,以及其呈味、呈香味觉表征确定最佳发酵程度。

然而,茶叶组分数据获取过程繁琐、耗时、效率低且结果获取困难^[21];同时理化检测物质种类有限,理化检测基本需要特殊前处理,与感官审评冲泡条件相差甚远,因此理化检测成分含量不能准确表征感官体现。而且检测仪器成本高,难以实现快速检测。

3 智能仿生技术

传统感官审评和成分检测方法相对成熟。由于红茶发酵体系较复杂,目前无法准确、快速获取客观数据;随着仿生技术的发展,如视觉电子眼、味觉电子舌、嗅觉电子鼻等^[6]。在一定程度上弥补了感官审评因主观性强、成分检测前处理复杂等不足。因此,研究者将智能仿生技术应用于红茶发酵研究(表 1),进一步发展了红茶发酵过程中品质化学研究,对红茶发酵体系在线监控起着至关重要的作用。

3.1 计算机视觉系统

红茶在发酵过程中伴随着色泽变化,当发酵接近最佳点时,颜色强度差越来越小,使得感官评价更加困难^[22]。因此,借助机器视觉采集系统对红茶发酵体系色泽数字化提取,形成图像特征,实现颜色信息量化和准确

表 1 智能仿生技术在红茶发酵中应用的优缺点

Table 1 Advantages and disadvantages of intelligent bionic technology in black tea fermentation

分类依据	常见传感器	优点	局限性	主要应用	参考文献
视觉仿生技术	计算机视觉技术	清晰度高,可获得连续多维图像序列	对环境光线要求较高	发酵叶色泽、形态、发酵过程精度控制	[22—23]
	近红外光谱技术	扫描快、不污染样品、适用范围广	对特征吸收峰识别有一定难度,不同检测点吸收峰重叠等	发酵理化成分在线检测判定	[24—25]
	高光谱技术	无损、绿色、高效,预测单物质含量	数据量大,相邻波长图像高度相关,存在多余和干扰信息	发酵程度分类判别、对成分含量进行预测	[26—27]
嗅觉仿生技术	电子鼻	灵敏性、选择性高、操作简单	不同检测对象需不同传感器	同类发酵挥发性风味的检测、分类和预测	[28—30]
	嗅觉可视化技术	范围广、精度高、对环境湿度影响小,通过视觉呈现	适宜光照,对环境要求较高	同类发酵挥发性风味的检测、分类和预测	[31—32]
味觉仿生技术	电子舌	检测速度快、灵敏度高,阈值低	温度波动及某些物质吸附作用干扰产生试验误差	基本味觉进行分类识别、样品分类识别、发酵过程在线监控	[33—35]

描述^[23],具有高清晰度、连续多维图像、无损、快速等优势。

目前已将计算机视觉系统(Cas)用于红茶发酵过程适度识别,Borah等^[36-37]建立了一种检测系统用于检测红茶发酵程度。以样品红、绿和蓝(RGB)颜色空间(DPV)值低于0.3为最适发酵。而不同粒径大小发酵叶在发酵过程中RGB存在颜色差。粒径越大氧化速度越慢,达到DPV标准值越长。因此,Singh等^[38]利用图像颜色信息(RGB和灰度级),提出茶叶质量指数(TQI)(粒径、周长、面积和平均颜色适当权重);这种评价方法可以很好地区分发酵茶的质量差异。同时,Dong等^[39]采用机器视觉技术检测红茶发酵过程中颜色在RGB、Lab和HSV空间中的变化,指出颜色特征与质量指数显著相关。但红茶发酵是在一定温度以及高湿高雾环境下进行,当发酵环境湿度达到一定程度时,水蒸气容易附着在机械镜片上,导致机械镜片不能实时采集发酵叶图像,因此不能一直追踪整个红茶发酵过程,需要对设备进行一定程度改进加装除雾排湿装置等。

3.2 光谱技术

3.2.1 近红外光谱 近红外光谱技术(NIRS)运用于物质吸收光谱非可见光区域,近红外吸收光谱间接反映物质成分内部结构信息,不同位置波峰反映内部分子结构,峰强度反映物质浓度。近红外光谱具有快速、方便、无损等优点^[24-25],Dong等^[40-42]利用近红外光谱技术用于红茶发酵品质控制,综合评价红茶发酵过程中茶色素、多酚等含量及比例,建立偏最小二乘(PLS)预测模型和非线性支持向量回归法(SVR)预测模型。张彬^[26]设计了发酵过程中茶多酚含量监测系统,指出蚁群偏最小二乘(ACO-PLS)模型,可以通过红外光谱数据准确预测发酵过程中的茶多酚含量,并且进一步区分发酵程度。近红外光谱技术能实时追踪红茶发酵叶中品质成分的含量,预判终端产品品质特征。最终结合人工感官评价,可以准确预估发酵叶中品质成分含量与人工感官表征之间的对应关系。

3.2.2 高光谱技术 高光谱成像技术是将被测样品光谱信息和图像信息相结合,利用数据信息将三维数据立方体图像转化为二维平面图像,形成复杂模型的无损检测技术^[27]。目前高光谱成像技术在红茶发酵方面已有应用,研究成果主要集中在红茶发酵判别和发酵过程中相关成分定量预测两方面。杨崇山等^[43]利用高光谱成像仪采集轻度、中度发酵和发酵过度3种发酵高光谱数据,结果表明所建模型识别率分别为83.33%,91.67%,91.67%,在红茶发酵过程中品质成分预测上。Yang等^[44]利用高光谱成像仪采集结合非线性支持向量回归法(SVR)和随机森林算法(RF)建立关键理化成分定量预测

模型。非线性模型(RF,SVR)性能明显优于线性模型(PLS),茶色素、儿茶素、酚氨比和可溶性糖基于特征波长非线性模型剩余预测偏差(RPD)值均大于2,模型能用于以上指标预测;Dong等^[45]将高光谱技术与化学计量学方法相结合,构建儿茶素含量预测模型。结果表明,极限学习机(ELM)对儿茶素总量和表儿茶素没食子酸酯(ECG)预测精度分别达到0.989和0.994,SVR模型对表没食子儿茶素(EGC)、儿茶素(C)、EC和表没食子儿茶素没食子酸酯(EGCG)的预测精度分别达到0.972,0.993,0.990,0.994。

综上所述,高光谱成像技术可以有效区分发酵时间,直观展示红茶不同时间关键品质指标分布,在线监控红茶发酵过程中品质成分动态变化,从而更加精准地掌控红茶发酵状态。高光谱技术将是未来红茶发酵检测的重要手段。但由于高光谱硬件价格较高,以及光谱反射易受环境因素等干扰,目前还不能在实践生产中大规模使用,仅使用于实验室。

3.3 电化学技术

3.3.1 电子舌 电子舌主要由传感器阵列、信号处理和模式识别系统组成,利用传感器阵列模拟人类味蕾组织对液体样品的味道进行检测^[33-35],与传统液相色谱等精密仪器相比具有响应时间短、灵敏度高、重复性好、检测速度快及误差小等特点^[46-48]。据报道^[49],电子舌已被用于监测与样品发酵相关的化学变化,通过定性和定量检测来判断各种食品的发酵程度。Ghosh等^[50]探索了伏安电子舌在监控红茶发酵过程中的应用。发现从电子舌分析获得的最佳发酵时间使得能够相对于参考估计值以0.97相关性检测不同茶样品。偏最小二乘回归(PLSR)预测电子舌发酵曲线与主成分分析(PCA)测定发酵曲线非常一致,所有茶样品平均相关性达0.85。预测剖面观测最佳发酵时间(OFTs)也与实际OFTs产生了0.96相关性。这表明伏安电子舌可用于监测茶叶的发酵过程,并获得最佳发酵的指示。

然而,电子舌所采用的化学传感器在处理食品样品时会遇到显著的基质效应^[51]。且电子舌的另一个限制是传感器的传感材料,尤其是生物材料的寿命相对较短。它要求用户经常检查电子舌的性能^[52]。电子舌也普遍用于白酒的检测,但传统的感应传感阵列极易被乙醇所干扰,存在一定的缺陷^[53]。

3.3.2 电子鼻 红茶发酵过程会产生一系列挥发性物质。电子鼻传感器能够检测发酵过程中挥发性物质浓度偏差,并产生信号转导后续变化。使用电子鼻在发酵过程中进行在线香气分析,可以成功检测出识别最佳时期所需峰值^[28]。Bhattacharyya等^[29-30]利用4个金属氧化物半导体(MOS)传感器组成的电子鼻,用于检测红茶最

佳发酵时间进行系列研究。并用比色试验和制茶师评估结果来交叉验证电子鼻结果,发现电子鼻对发酵中挥发性物质与时间内在机制呈现与比色数据和人类嗅觉表达机制精确匹配。Sharma 等^[54]探究不同湿度环境下红茶最佳发酵时间,指出电子鼻对发酵中香气产生序列时间峰,与制茶师对发酵香气产生序列感知高度吻合,研究表明电子鼻完全可以用于监控红茶发酵过程中挥发性物质散发模式,具有很高的准确性、可靠性和可重复性。电子鼻科学性使其成为自动化发酵监控过程有力候选。

然而,MOS 传感器选择性有限;为了促进目标气体吸收,需要在高温下操作。同时,对茶呈香化合物较低选择性可能导致预测最佳发酵时间误差。

3.4 嗅觉可视化的应用

嗅觉可视化传感工作原理是,当挥发性气体作用于相应气体敏感显色剂后会产生显色反应,根据显色变化来确定相应挥发物含量,嗅觉可视化技术还涉及到配位键等分子之间强制相互作用,在系统中作用与生物嗅觉细胞极为相似^[31]。能够将嗅觉信息转化成视觉信息,从而更直观、更生动地描述出测试样品气味特征^[32]。嗅觉可视化具有灵敏度高,选择性好,不受湿度影响,便捷、快速、成本低且样品不需前处理等优势。

目前,嗅觉可视化技术已被应用于茶叶质量分析。丁煜函等^[55]将嗅觉可视化技术应用于眉茶等级分类,构建了嗅觉可视化模型,实现了眉茶等级分类。其构建的支持向量机(SVM)分类模型对测试集分类正确率达到了 93.3%。陈琳等^[56]对嗅觉可视化技术在红茶发酵程度判定中应用可行性进行了探索,结合 Fisher 判别构建了红茶发酵程度判别模型,实现了不同发酵程度的红茶样品分类,正确率达 90.74%。嗅觉可视化技术结合视觉可视化,可以实现红茶发酵程度判定,在一定程度上推动了从单一检测技术向多技术融合的方向发展。

4 多传感器信息融合技术的应用与微型化

4.1 数据融合技术的应用

红茶发酵可以使用现代无损检测技术进行智能评估。此类技术通常包括电子舌、机器视觉和嗅觉可视化,这些技术主要通过模拟人类味觉、视觉和嗅觉实现样品快速质量检测。而计算机视觉系统只能提供茶叶的外观信息,电子舌只能检测滋味,电子鼻只能检测香气,近红外光谱只能获得茶叶的单点光谱信息等。然而,发酵涉及一系列复杂化学变化,这些变化会导致茶叶颜色、香气和味道发生相当大变化。依赖单一技术将导致忽略样本其他方面,从而难以获得样本总体信息。因此,多种技术融合已成为检测茶叶样品各种特征的一种新的替代方法。Jin 等^[57]通过融合近红外光谱(FT-NIR)和计算机视

觉(CVS),成功地评估了不同发酵程度红茶。该方法表现出比单一技术更优越的性能,大大提高了评估模型的准确性。然而多传感技术融合带来了数据量增加问题,对原始数据产生了更多冗余和噪声。因此,将数据融合技术引入到红茶发酵研究中,可以综合不同来源信息,提高检测精度。主要融合策略有数据层融合、特征层融合和决策层融合 3 种^[6]。

Jin 等^[58]分析了不同发酵程度的红茶样品的茶多酚含量,将发酵程度分为了初分、不充分、中度和过度四类,同时采集上述样品图像数据、红外光谱数据,比较了图像数据、红外光谱数据、图像数据和红外光谱融合数据,采用 K 近邻(KNN)、狄利克雷分布(LDA)和 SVM 3 种方法建立分类模型;分析了两种图像和红外光谱数据融合方法对 3 种建模方法预测精准度影响,第一种融合方法将集对分析(SPA)法筛选出的茶多酚含量相关光谱特征波长、Pearson 相关分析法提取图像数据中 H 、 S 、 a^* 、 b^* 特征值合并到一个矩阵中,第二种融合方法为直接采用 PCA 法提取光谱特征波长和图像数据;最后指出基于 PCA 特征提取数据融合方法结合 SVM 建模方法分类准确率最高。An 等^[59]利用高光谱成像技术采集发酵叶片感官信息(包括味觉、视觉和嗅觉),采用不同数据融合方法(低层、低层主成分分析、中层主成分分析)结合 SVM 建立发酵程度判别模型。结果表明,采用数据融合策略模型性能优于基于单一信息模型。使用中级 PCA 数据融合方法表现出最好性能,其正确分类率(CCR)、精确度和召回率分别为 95%,100%,100%。说明数据融合策略能提高模型性能。然而,在使用数据融合时设备成本高昂,目前,大多数研究仅侧重于提高模型准确性和传感器数量,增加了成本,并使生产商难以接受^[60-61]。

4.2 仿生技术微型化

台式仿生传感系统体积庞大且不可移动,目前仅局限于实验室应用及工业条件下离线使用,在生产线等场合、工业过程在线评估仍然是一项挑战。微型仿生传感系统结构紧凑、携带方便、成本效益高,在分析成品茶质量方面取得了良好效果^[62-63]。Jin 等^[57]研究了低成本微近红外光谱和实验室制造计算机视觉系统,采用层次聚类分析结合感官评价对不同发酵程度样品进行分组,建立了主成分分析 SVM 模型及茶黄素含量预测支持向量机模型,研究结果表明:微近红外光谱与 CVS 相结合是一种便携式、低成本红茶发酵质量评价工具。Dong 等^[40]利用便携式近红外光谱结合化学计量学,开发了一种确定茶黄素和茶红素比率(TF/TR)的独特模型用于评价红茶发酵程度,该模型预测确定系数达 0.893。Zareef 等^[25]利用便携式近红外光谱监控红茶发酵,结合多元化学计量学快速筛选酚类物质,构建了多酚类含量预测模型,模

型校准相关系数和预测相关系数分别达 0.979 和 0.969。同时降低了物质检测限度,阿魏酸物质最低检测限度达 70.2 $\mu\text{g/g}$ 。同样,当采用电子鼻系统来实时监控发酵过程时,存在许多挑战。Tozlu 等^[64]开发了一种电子鼻系统,以期用于红茶发酵在线检测。这对实现红茶发酵机械化、自动化、低成本化和智能化具有重要意义。

5 智能仿生技术在红茶加工中的应用

近年来,随着科学技术发展和人工成本提高,茶叶加工逐渐向机械化、标准化方向发展。仿生技术在茶叶采摘^[65]、加工^[66]及品质评价中代替人工感官,加速了茶产业机械化发展进程。原料是影响红茶品质质量的关键因素之一,宁井铭等^[67]扫描获取了祁门红茶鲜叶到最后成品中毛茶叶样品的近红外光谱,利用 PLS 法建立了祁门红茶鲜叶至成品的判别模型,该模型能够准确预测祁门红茶鲜叶至成品的氨基酸、儿茶素含量。宁井铭等^[68]提出了一种利用红茶萎凋阶段采集高光谱数据的方法,建立了 LDA 萎凋程度判别模型和 PLS 定量预测模型,以测量萎凋过程中儿茶素与氨基酸比率。结果表明,LDA 模型识别率达到了 94.64%。儿茶素与氨基酸比例预测集(RP)为 0.876 5。Wang 等^[69]整合 NIRS、CAS 和电子眼(E-eye)技术用于评估红茶萎凋程度,采用 SVM 对低层和 中层数据融合建模,其模型准确率达 97.50%。这为红茶加工过程中茶叶品质在线监控提供了理论依据。

6 总结与展望

目前感官审评仍是茶叶加工过程评价最基本的方式。自理化分析检测发展以来,新老仪器更换推动了仪器发展。从基础理化检测到高效液相色谱、质谱、核磁共振等,强大仪器能够获得高精度数据,但门槛高、操作难度大。智能仿生技术在一定程度上展现了其绝对的优势。然而,智能仿生技术设备成本昂贵,传感器适应性不强,持续更新传感器阵列价格普遍较高;同时,智能仿生技术还需结合先进数据处理方法,目前主成分分析、聚类分析、偏最小二乘分析、人工神经网络、遗传算法等数据处理方法比较成熟,但从检测精度、检测速度和效率综合分析来看,这些算法不一定是最好的。因此,新的数据处理方法还有待开发;设备组合还有待进一步改进。

智能仿生技术发展方向:① 多技术联合应用与多数据融合技术分析,目前在味觉、嗅觉、视觉方面已得到应用,但是触觉仿生技术未见 在红茶发酵过程中得以体现。② 仪器微型化,这有利于消费者和从业者使用。③ 将各种智能仿生技术整合到特定加工设备中。加工机械化、智能化以及标准化将促进茶产业发展进程。

参考文献

[1] NAVEED M, BIBI J, KAMBOH A A, et al. Pharmacological values

and therapeutic properties of black tea (*Camellia sinensis*): A comprehensive overview[J]. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 2018, 100: 521-531.

[2] CHEN L, LIU F, YANG Y F, et al. Oxygen-enriched fermentation improves the taste of black tea by reducing the bitter and astringent metabolites[J]. *Food Research International*, 2021, 148: 110613.

[3] MUTHUMANI T, KUMAR R S S. Influence of fermentation time on the development of compounds responsible for quality in black tea[J]. *Food Chemistry*, 2007, 101(1): 98-102.

[4] 崔宏春, 张建勇, 赵芸, 等. 发酵条件对红茶茶色素形成的影响研究进展[J]. *食品与机械*, 2022, 38(8): 227-233.

CUI H C, ZHANG J Y, ZHAO Y, et al. Research progress on the influence of fermentation conditions on the formation of black tea pigment[J]. *Food & Machinery*, 2022, 38(8): 227-233.

[5] 贾梦伟, 张姝, 周顺风, 等. 环境响应水凝胶的非对称结构设计 与智能仿生[J]. *材料导报*, 2022, 36(12): 175-183.

JIA M W, ZHANG J, ZHOU S F, et al. Asymmetric structural design and intelligent bionics of environment-responsive hydrogels [J]. *Materials Review*, 2022, 36(12): 175-183.

[6] 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 Q, OUYANG J, LIU C W, et al. Research progress of tea quality evaluation technology[J]. *Tea Science*, 2022, 42(3): 316-330.

[7] 马玉青, 方成刚, 夏丽飞, 等. 不同发酵程度对重萎凋“云抗 10 号”红茶香气成分的影响[J]. *西南农业学报*, 2020, 33(4): 760-768.

MA Y Q, FANG C G, XIA L F, et al. Effects of different fermentation degrees on aroma components of heavily withered "Yunkang No. 10" black tea [J]. *Southwest Agricultural Journal*, 2020, 33(4): 760-768.

[8] 刘亚芹, 王辉, 杨霁虹, 等. 基于滋味成分变化的祁门红茶发酵程度差异研究[J]. *茶叶通讯*, 2022, 49(2): 193-201.

LIU Y Q, WANG H, YANG Y H, et al. Research on the difference of fermentation degree of Qimen black tea based on the change of taste components[J]. *Tea Communication*, 2022, 49(2): 193-201.

[9] 杨晨. 基于代谢组学的不同花色种类白茶滋味品质研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2018: 1-6.

YANG C. Research on the taste and quality of white tea with different flower colors based on metabolomics[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2018: 1-6.

[10] 张颖彬, 刘翔, 鲁成银. 中国茶叶感官审评术语的形成与发展现状[J]. *茶叶科学*, 2019, 39(2): 123-130.

ZHANG Y B, LIU Y, LU C Y. The formation and development status of Chinese tea sensory evaluation terms [J]. *Tea Science*, 2019, 39(2): 123-130.

[11] 尹杰, 范仕胜, 宋勤飞, 等. 工夫红茶发酵过程中的品质变化 [J]. *四川农业大学学报*, 2012, 30(4): 415-418.

YIN J, FAN S S, SONG Q F, et al. Quality change of Gongfu black tea during fermentation [J]. *Journal of Sichuan Agricultural*

- University, 2012, 30(4): 415-418.
- [12] 钟兴刚, 黄怀生, 黎娜, 等. 不同萎凋和发酵处理对“汝城白毛茶”加工红茶品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(4): 137-144.
- ZHONG X G, HUANG H S, LI N, et al. Effects of different withering and fermentation treatments on the quality of black tea processed by "Rucheng Baimao tea"[J]. Food and Fermentation Industry, 2022, 48(4): 137-144.
- [13] GHOSH S, TUDU B, BHATTACHARYYA N, et al. A recurrent Elman network in conjunction with an electronic nose for fast prediction of optimum fermentation time of black tea[J]. Neural Computing and Applications, 2019, 31(2): 1 165-1 171.
- [14] WANG H J, SHEN S, WANG J J, et al. Novel insight into the effect of fermentation time on quality of Yunnan Congou black tea [J]. LWT-London Weekend Television, 2022, 155: 112939.
- [15] 费璠, 张梓莹, 胡松, 等. HPLC 同时检测红茶中儿茶素和茶黄素含量[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(5): 275-280.
- FEI F, ZHANG Z Y, HU S, et al. Simultaneous determination of catechins and theaflavins in black tea by HPLC [J]. Food and Fermentation Industry, 2022, 48(5): 275-280.
- [16] 潘海波. 茶黄素的 UPLC 分析及其对人卵巢癌细胞抑制作用和机制的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018: 17-24.
- PAN H B. UPLC analysis of theaflavin and its inhibitory effect and mechanism on human ovarian cancer cells [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018: 17-24.
- [17] 李伟, 张春燕, 李凤, 等. 超高效液相色谱-串联质谱法同时测定茶叶中儿茶素和茶黄素[J]. 现代预防医学, 2019, 46(22): 4 179-4 184.
- LI W, ZHANG C Y, LI F, et al. Simultaneous determination of catechins and theaflavins in tea by ultra-high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry[J]. Modern Preventive Medicine, 2019, 46(22): 4 179-4 184.
- [18] 乔阳. 基于 GC-MS 及电子鼻的云南红茶香气成分的研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2016: 20-38.
- QIAO Y. Research on aroma components of Yunnan black tea based on GC-MS and electronic nose [D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2016: 20-38.
- [19] TAN J F, DAI W D, LU M L, et al. Study of the dynamic changes in the non-volatile chemical constituents of black tea during fermentation processing by a non-targeted metabolomics approach [J]. Food Research International, 2016, 79: 106-113.
- [20] 桂安辉. 工夫红茶发酵过程中挥发性物质及品质成分变化研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016: 35-43.
- GUI A H. Research on the changes of volatile substances and quality components during fermentation of Gongfu black tea[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2016: 35-43.
- [21] 温立香, 张芬, 何梅珍, 等. 茶叶品质评价技术的研究现状[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(15): 197-204.
- WEN L X, ZHANG F, HE M Z, et al. Research status of tea quality evaluation technology[J]. Food Research and Development, 2018, 39(15): 197-204.
- [22] CHEN Q S, ZHANG D L, PAN W X, et al. Recent developments of green analytical techniques in analysis of tea's quality and nutrition[J]. Trends in Food Science & Technology, 2015, 43(1): 63-82.
- [23] DAO D H, TANG N C, PHAM B T. Monitoring and evaluating the fermentation level of black tea using the random forest model[C]// International Conference on Engineering Research and Applications. [S.l.]: Springer, Cham, 2021: 739-753.
- [24] OUYANG Q, ZHAO J W, CHEN Q S. Measurement of non-sugar solids content in Chinese rice wine using near infrared spectroscopy combined with an efficient characteristic variables selection algorithm[J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2015, 151: 280-285.
- [25] ZAREEF M, CHEN Q, OUYANG Q, et al. Rapid screening of phenolic compounds in congou black tea (Camellia sinensis) during in vitro fermentation process using portable spectral analytical system coupled chemometrics [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2019, 43(7): e13996.
- [26] 张彬. 基于光学传感器技术的红茶通氧发酵过程在线监测研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2017: 41-56.
- ZHANG B. Research on online monitoring of black tea oxygenation fermentation process based on optical sensor technology[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2017: 41-56.
- [27] 刘飞, 李春华, 龚雪蛟, 等. 高光谱成像技术在茶叶中的应用研究进展[J]. 核农学报, 2016, 30(7): 1 386-1 394.
- LIU F, LI C H, GONG X J, et al. Research progress on the application of hyperspectral imaging technology in tea[J]. Journal of Nuclear Agriculture, 2016, 30(7): 1 386-1 394.
- [28] BHATTACHARYA N, SETH S, TUDU B, et al. Detection of optimum fermentation time for black tea manufacturing using electronic nose[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2007, 122 (2): 627-634.
- [29] BHATTACHARYA N, BANDYOPADHYAY R, BHUYAN M, et al. Electronic nose for black tea classification and correlation of measurements with "Tea Taster" marks[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2008, 57(7): 1 313-1 321.
- [30] SHARMA M, GHOSH D, BHATTACHARYA N. Electronic nose: A new way for predicting the optimum point of fermentation of black tea[J]. Int JEng Sci Invent, 2013, 2: 56-60.
- [31] 邹小波, 赵杰文, 殷晓平, 等. 嗅觉可视化技术在白酒识别中的应用[J]. 农业机械学报, 2009, 40(1): 110-113.
- ZOU X B, ZHAO Z J, YAN X P, et al. Application of olfactory visualization technology in liquor identification [J]. Journal of Agricultural Machinery, 2009, 40(1): 110-113.
- [32] CHEN Q, SUN C, OUYANG Q, et al. Classification of different varieties of Oolong tea using novel artificial sensing tools and data fusion [J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 60 (2):

- 781-787.
- [33] REN G X, LI T H, WEI Y M, et al. Estimation of Congou black tea quality by an electronic tongue technology combined with multivariate analysis[J]. *Microchemical Journal*, 2021, 163: 105899.
- [34] DENG X J, HUANG G H, TU Q, et al. Evolution analysis of flavor-active compounds during artificial fermentation of Pu-erh tea[J]. *Food Chemistry*, 2021, 357: 129783.
- [35] GUEDES M D V, MARQUES M S, GUEDES P C, et al. The use of electronic tongue and sensory panel on taste evaluation of pediatric medicines: A systematic review [J]. *Pharmaceutical Development and Technology*, 2021, 26(2): 119-137.
- [36] BORAH S, BHUYAN M. Non-destructive testing of tea fermentation using image processing[J]. *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 2003, 45(1): 55-58.
- [37] BORAH S, BHUYAN M. A computer based system for matching colours during the monitoring of tea fermentation[J]. *Int J Food Sci Technol*, 2005, 40(6): 675-682.
- [38] SINGH G, KAMAL N. Machine vision system for tea quality determination-Tea quality index (TQI) [J]. *IOSR Journal of Engineering*, 2013, 3(7): 46-50.
- [39] DONG C W, LIANG G Z, HU B, et al. Prediction of Congou black tea fermentation quality indices from color features using non-linear regression methods[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 10535.
- [40] DONG C W, LI J, WANG J J, et al. Rapid determination by near infrared spectroscopy of theaflavins-to-thearubigins ratio during Congou black tea fermentation process[J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2018, 205: 227-234.
- [41] 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 C W, LIANG G Z, AN T, et al. Establishment of a rapid detection model for sensory quality and components of black tea by near-infrared spectroscopy[J]. *Chinese Journal of Agricultural Engineering*, 2018, 34(24): 306-313.
- [42] DONG C W, ZHU H K, WANG J J, et al. Prediction of black tea fermentation quality indices using NIRS and nonlinear tools[J]. *Food Science and Biotechnology*, 2017, 26(4): 853-860.
- [43] 杨崇山, 董春旺, 江用文, 等. 基于高光谱的工夫红茶发酵品质程度判别方法[J]. *光谱学与光谱分析*, 2021, 41(4): 1 320-1 328.
- YANG C S, DONG C W, JIANG Y W, et al. A hyperspectral method for determining the fermentation quality of Gongfu black tea[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2021, 41(4): 1 320-1 328.
- [44] YANG C S, ZHAO Y, AN T, et al. Quantitative prediction and visualization of key physical and chemical components in black tea fermentation using hyperspectral imaging[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 141: 110975.
- [45] DONG C W, YANG C S, LIU Z Y, et al. Nondestructive testing and visualization of catechin content in black tea fermentation using hyperspectral imaging [J]. *Sensors*, 2021, 21(23): 8 051-8 063.
- [46] PODRAZKA M, BACZYNSKA E, KUNDYS M, et al. Electronic tongue: A tool for all tastes[J]. *Biosensors*, 2017, 8(1): 3-27.
- [47] ROSS C F. Considerations of the use of the electronic tongue in sensory science[J]. *Current Opinion in Food Science*, 2021, 40: 87-93.
- [48] ESBENSEN K, KIRSANOV D, LEGIN A, et al. Fermentation monitoring using multisensor systems: Feasibility study of the electronic tongue[J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2004, 378(2): 391-395.
- [49] CETO X, VOELCKER N H, PRIETO-SIMON B. Bioelectronic tongues: New trends and applications in water and food analysis[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2016, 79: 608-626.
- [50] GHOSH A, BAG A K, SHARMA P, et al. Monitoring the fermentation process and detection of optimum fermentation time of black tea using an electronic tongue[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, 15(11): 6255-6 262.
- [51] TAN J Z, XU J. Applications of electronic nose (e-nose) and electronic tongue (e-tongue) in food quality-related properties determination: A review[J]. *Artificial Intelligence in Agriculture*, 2020, 4: 104-115.
- [52] 代良超, 乌日娜, 陶冬冰, 等. 智能仿生食品发酵中的应用及研究进展[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(19): 14-21.
- DAI L C, WU R N, TAO D B, et al. Application and research progress of intelligent bionics in food fermentation [J]. *Food Industry Science and Technology*, 2022, 43(19): 14-21.
- [53] SHARMILAN T, PREMARATHNE I, WANNIARACHCHI I, et al. Electronic nose technologies in monitoring black tea manufacturing process [J]. *Journal of Sensors*, 2020, 2 020: 3073104.
- [54] SHARMA P, GHOSH A, TUDU B, et al. Monitoring the fermentation process of black tea using QCM sensor based electronic nose[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2015, 219: 146-157.
- [55] 丁煜函, 葛东营, 荆磊, 等. 基于嗅觉可视化技术的眉茶等级分类方法[J]. *食品科学*, 2022, 43(24): 335-341.
- DING Y H, GE D Y, XING L, et al. Classification method of eyebrow tea based on olfactory visualization technology[J]. *Food Science*, 2022, 43(24): 335-341.
- [56] 陈琳, 叶阳, 董春旺, 等. 基于嗅觉可视化技术的工夫红茶发酵程度判定方法[J]. *茶叶科学*, 2017, 37(3): 258-265.
- CHEN L, YE Y, DONG C W, et al. Judgment method of fermentation degree of Gongfu black tea based on olfactory visualization technology[J]. *Tea Science*, 2017, 37(3): 258-265.
- [57] JIN G, WANG Y J, LI L Q, et al. Intelligent evaluation of black tea fermentation degree by FT-NIR and computer vision based on data fusion strategy [J]. *LWT-London Weekend Television*, 2020,

- 125: 109216.
- [58] JIN G, WANG Y G, LI M H, et al. Rapid and real-time detection of black tea fermentation quality by using an inexpensive data fusion system[J]. *Food Chemistry*, 2021, 358: 129815.
- [59] AN T, HUANG W Q, TIAN X, et al. Hyperspectral imaging technology coupled with human sensory information to evaluate the fermentation degree of black tea[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2022, 366: 131994.
- [60] JANDRIC Z, TCHAIKOVSKY A, ZITEK A, et al. Multivariate modelling techniques applied to metabolomic, elemental and isotopic fingerprints for the verification of regional geographical origin of Austrian carrots[J]. *Food Chemistry*, 2021, 338: 127924.
- [61] ZHOU L, ZHANG C, QIU Z G, et al. Information fusion of emerging non-destructive analytical techniques for food quality authentication: A survey[J]. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2020, 127: 115901.
- [62] LI L Q, JIN S S, WANG Y J, et al. Potential of smartphone-coupled micro NIR spectroscopy for quality control of green tea [J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2021, 247: 119096.
- [63] WANG Y J, LI T H, LI L Q, et al. Evaluating taste-related attributes of black tea by micro-NIRS [J]. *Journal of Food Engineering*, 2021, 290: 110181.
- [64] TOZLU B H, OKUMUS H I. A new approach to automation of black tea fermentation process with electronic nose[J]. *Automatika: Journal for Control, Measurement, Electronics, Computing & Communications*, 2018, 59(3/4): 373-381.
- [65] 李杨, 董春旺, 陈建能, 等. 茶叶智能采摘技术研究进展与展望[J]. *中国茶叶*, 2022, 44(7): 1-9.
- LI Y, DONG C W, CHEN J N, et al. Research progress and prospect of intelligent tea picking technology[J]. *China Tea*, 2022, 44(7): 1-9.
- [66] 沈帅, 袁海波, 朱宏凯, 等. 茶叶数字化加工技术研究进展[J]. *中国茶叶*, 2022, 44(8): 1-8.
- SHEN S, YUAN H B, ZHU H K, et al. Research progress of tea digital processing technology[J]. *China Tea*, 2022, 44(8): 1-8.
- [67] 宁井铭, 颜玲, 张正竹, 等. 祁门红茶加工中氨基酸和儿茶素快速检测模型建立[J]. *光谱学与光谱分析*, 2015, 35(12): 3422-3426.
- NING J M, YAN L, ZHANG Z Z, et al. Establishment of a rapid detection model for amino acids and catechins in Qimen black tea processing[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2015, 35(12): 3422-3426.
- [68] 宁井铭, 孙京京, 朱小元, 等. 基于图像和光谱信息融合的红茶萎凋程度量化判别[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(24): 303-308.
- NING J M, SUN J J, ZHU X Y, et al. Quantitative discrimination of black tea withering degree based on fusion of image and spectral information [J]. *Chinese Journal of Agricultural Engineering*, 2016, 32(24): 303-308.
- [69] WANG Y W, LIU Y, CUI Q 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.

(上接第 95 页)

- [10] 包晓敏, 王思琪. 基于深度学习的目标检测算法综述[J]. *传感器与微系统*, 2022, 41(4): 5-9.
- BAO X M, WANG S Q. Survey of object detection algorithm based on deep learning [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2022, 41(4): 5-9.
- [11] HAN K, WANG Y, TIAN Q, et al. Ghostnet: More features from cheap operations[C]// *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Seattle: IEEE, 2020: 1580-1589.
- [12] ZHANG Y F, REN W, ZHANG Z, et al. Focal and efficient IOU loss for accurate bounding box regression [J/OL]. *Computer Science*. (2021-01-20) [2022-07-18]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2101.08158>.
- [13] HOU Q, ZHOU D, FENG J. Coordinate attention for efficient mobile network design[J/OL]. *Computer Science*. (2021-03-04) [2022-07-20]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2103.02907>.
- [14] HU J, SHEN L, SUN G. Squeeze-and-excitation networks[C]// *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Salt Lake City: Institute of Electrical and Electronics Engineering, 2018: 7132-7141.

(上接第 206 页)

- [24] 刘云宏, 李晓芳, 苗帅, 等. 南瓜片超声-远红外辐射干燥特性及微观结构[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(10): 277-286.
- LIU Y H, LI X F, MIAO S, et al. Drying characteristics and microstructures of pumpkin slices with ultrasound combined far-infrared radiation[J]. *Transactions of the CSAE*, 2016, 32(10): 277-286.
- [25] FERNANDES F A N, GALLO M I, RODRIGUES S. Effect of osmotic dehydration and ultrasound pre-treatment on cell structure: Melon dehydration [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2008, 41(4): 604-61.
- [26] 靳力为, 任广跃, 段续, 等. 超声预处理对杏片微波冻干过程中水分迁移的影响[J]. *食品与机械*, 2020, 36(8): 15-21, 81.
- JIN L W, REN G X, DUAN X, et al. Effect of ultrasonic pretreatment on water migration of apricot slices during microwave freeze-drying[J]. *Food & Machinery*, 2020, 36(8): 15-21, 81.