

高育森, 任金波, 林婷, 等. 响应面法优化高品质茶叶木炭烘焙参数 [J]. 福建农业学报, 2024, 39 (2): 225–236.

GAO Y S, REN J B, LIN T, et al. Response Surface-optimized Tea Charcoal Baking [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2024, 39 (2): 225–236.

响应面法优化高品质茶叶木炭烘焙参数

高育森, 任金波, 林婷, 吴传宇

(福建农林大学机电工程学院, 福建 福州 350002)

摘要:【目的】优化茶叶的木炭烘焙工艺, 为高品质茶叶木炭烘焙提供理论参考依据, 为茶叶烘焙智能化提供基础。【方法】利用模糊数学矩阵分析原理, 以模糊感官综合评价分作为响应值, 烘焙温度、摊平厚度、烘焙时间为自变量, 设立三因素三水平试验组合, 拟合线性回归模型, 通过响应面法对茶叶木炭烘焙工艺进行优化, 并通过实际烘焙试验进行验证; 测量茶叶主要香气成分含量、主要生化成分含量, 分析试验工艺对茶叶品质的影响, 进一步验证二次回归模型的可靠性。【结果】结合实际修整后的最佳组合参数: 烘焙温度为 82 ℃、摊平厚度为 3 cm、烘焙时间为 126 min; 茶叶主要香气成分有反-橙花叔醇、法尼烯、植物醇、吲哚, 其含量多少与香气等级相符; 主要生化成分有茶多酚、可溶性糖、氨基酸、咖啡碱, 其含量多少与汤色、滋味等级相符, 感官评价结果与评价体系相吻合。【结论】建立的高品质茶叶木炭烘焙工艺的感官评价标准合理, 感官评价模型可靠性强, 试验结果能够真实地反映木炭烘焙最佳工艺。

关键词: 茶叶烘干; 模糊数学; 感官评价; 响应面设计

中图分类号: TS272

文献标志码: A

文章编号: 1008-0384 (2024) 02-0225-12

Response Surface-optimized Tea Charcoal Baking

GAO Yusen, REN Jinbo, LIN Ting, WU Chuanyu

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Fujian Agriculture and Forestry University,
Fuzhou, Fujian 350002, China)

Abstract: 【Objective】Charcoal baking in processing tea was optimized. 【Methods】Fuzzy sensory evaluation score was used as the criterion in a 3-factors-3-levels response surface experiment to optimize the temperature (*A*), leaves spreading thickness (*B*), and time (*C*) of the tea baking with burning charcoal. A linear regression model was established for the process. Actual and theoretical sensory evaluations on the resulting tea were compared to determine the effect of the baking on tea quality and reliability of the quadratic regression model in predicting the result. 【Results】The optimized charcoal baking spread tea leaves 3 cm thick and held at 82 ℃ for 126 min. The main aromatics in the baked tea included trans-nerol, farnesene, plant alcohol, and indole in contents corresponded to the rated grade. The major biochemicals were tea polyphenols, soluble sugars, amino acids, and caffeine in contents reflected the color and taste of the brewed tea. The sensory panel and the fuzzy evaluation on the tea yielded agreeable results. 【Conclusion】The fuzzy sensory evaluation model appeared to be applicable for determining the process conditions of tea charcoal baking.

Key words: Tea charcoal baking; fuzzy mathematical model; sensory evaluation; response surface experiment

0 引言

【研究意义】中国是茶叶的主要生产国, 2023 年中国茶叶产量 355 万 t, 同比增产 6.1%^[1]。茶

叶主要有红茶、绿茶、青茶、黄茶、白茶等品种。安溪铁观音是最具代表性的青茶之一, 具有优良品质和深厚文化底蕴, 在市场竞争中占据优势。烘焙是浓香铁观音初制的最后一道工序, 在整个浓香铁

收稿日期: 2023-05-23 修回日期: 2023-08-21

作者简介: 高育森 (1990—), 男, 硕士, 实验师, 主要从事茶叶加工储藏及茶叶烘焙设备研究, E-mail: 864810175@qq.com

基金项目: 福建省教育厅项目 (JAT210088、JAT200097)

观音的加工过程中起着关键性的作用。通过烘焙进一步蒸发水分,有利于贮藏,且在烘焙的过程中,茶叶发生化学作用,如美拉德反应、氧化作用等,增强茶叶的香气、滋味、汤色等^[2-4]。木炭烘焙作为传统的烘焙方法,具有良好的吸附性,能够吸附硫化物等化学物质,大大提高茶叶的品质,受消费者喜爱^[5-6]。然而,木炭烘焙温度控制难,烘焙工艺复杂,烘焙的过程主要以人工观察为主,劳动强度大,效率低^[7]。【前人研究进展】目前关于提升茶叶烘干工艺的研究很多,如通过不同烘干方法^[8]、利用烘干设备监测烘干工艺^[9]、利用 PSO-Elman 算法来预测茶叶烘干含水率^[10]、茶叶烘焙温湿度预测^[11]、静电喷雾干燥^[12]等。Han 等^[13]通过优化柑橘的生产工艺,来确定厚度和干燥方式对陈皮茶品质的影响;Pashazadeh 等^[14]采用模糊数学评价优化了玫瑰花茶的干燥工艺。感官评价具有简单、直接、方便等优点,但容易受到个人的喜好、心理等方面影响,主观性强,评价结果稳定性差。感官评价属性之间具有一定的模糊性,模糊数学的主要研究对象就是模糊问题,它可以将各个模糊属性做量化处理,在感官评价中引入模糊数学,可以将各个感官属性做量化,降低感官评价结果的主观性,更客观、准确地评价食品的品质。模糊数学感官评价结合 Design-Expert 软件的分析方法,在食品加工、食品配方领域得到广泛的应用^[15-18],如葛根饮料的配比^[19]、沙棘饼干烘焙工艺^[20]、玉米酒的配方^[21]、复合茶饮料配方^[22]、即食海参产品加工工艺^[23]等的优化。【本研究切入点】目前尚未见采用模糊数学方法对于茶叶木炭烘干参数优化的相关研究。【拟解决的关键问题】为了能够更客观、更稳定、更准确地对木炭烘焙工艺参数进行优化,提供更可靠的理论基础,运用模糊感官评价方法,建立模糊评价与木炭烘干工艺参数的关系,并在此基础上,利用 Design-Expert 软件进行优化分析,建立回归模型,寻找烘干的最佳工艺,以期为高品质的茶叶木炭烘干工艺提供可靠的理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验材料:浓香型铁观音(半成品,由安溪县祥华乡茶农提供)。

主要设备:茶叶木炭烘干机(泉州东盛机械有限公司);燃气式茶叶杀青机(泉州长盛茶叶机械有限公司);茶叶揉捻机(泉州长盛茶叶机械有限公司);茶叶包揉机(泉州长盛茶叶机械有限公

司);茶叶成型速包机(泉州永锋茶叶机械);6890N-5975B 气相色谱-质谱联用仪(美国 Agilent 公司);2695-2998 高效液相色谱仪(美国 Agilent 公司);手动固相微萃取装置(美国 Supelco 公司)。

1.2 试验方法

1.2.1 茶叶的制作

试验用鲜茶为春季安溪县祥华乡铁观音,采摘标准为茶叶开面两叶或三叶,采摘时间为 2021 年 5 月 12 日 12:00-15:00,天气晴。采摘后的鲜叶进行萎凋→做青→杀青→揉捻→初烘→包揉→复烘→复包揉捻→定型→清新型铁观音烘干^[24],取烘干后的半成品 20 kg。根据试验设计进行烘焙试验,每个试验组烘焙为一层托盘。

1.2.2 单因素试验设计

参考前人研究^[25-28],选择烘焙温度、烘焙时间、摊平厚度为试验因素,3 次重复,优化木炭烘焙最优参数。

(1) 烘焙温度筛选。取半成品 0.5 kg,均匀摊平在托盘上 2 cm,放置木炭烘干机内烘焙 3 h,20 位评茶师对茶叶滋味、香气、外形、汤色、叶底、色泽等 6 个评价指标进行感官评价,探讨不同烘焙温度(75、80、85、90、95 ℃)对茶叶感官评分的影响。

(2) 摊平厚度筛选。取半成品 0.5 kg,均匀摊平在托盘上,放置木炭烘干机内,80 ℃烘焙 3 h。20 位评茶师对茶叶滋味、香气、外形、汤色、叶底、色泽等 6 个评价指标进行感官评价,探讨不同摊平厚度(2、4、6、8、10 cm)对茶叶感官评分的影响。

(3) 烘焙时间筛选。取半成品 0.5 kg,均匀摊平在托盘上 2 cm,放置木炭烘干机内,在 80 ℃的温度下进行烘焙,20 位评茶师对茶叶滋味、香气、外形、汤色、叶底、色泽等 6 个评价指标进行感官评价,探讨不同烘焙时间(1、2、3、4、5、6 h)对茶叶感官评分的影响。

1.2.3 响应面法优化烘焙参数

为了精准确定茶叶烘焙参数,选取烘干温度(80、85、90 ℃)、摊平厚度(2、4、6 cm)、烘干时间(2、4、6 h)3 个因素作为试验数值,利用 Design Expert 8.06 软件中 Box-Behnken Design 原理,以模糊数学感官评价成绩为响应值,建立三因素三水平试验处理模型(表 1),优化试验茶叶烘焙工艺。

1.2.4 模糊数学感官评价确定

(1) 感官评价因素及人员建立。参考毕继才

等^[29]的方法及 GB/T 23776—2018 茶叶感官审评方法^[30]、GB/T 14487—2017 茶叶感官审评术语^[31]并作修改，采用外形（ u_1 ）、叶底（ u_2 ）、滋味（ u_3 ）、香气（ u_4 ）、汤色（ u_5 ）、色泽（ u_6 ）6 个因素作为衡量烘干茶叶感官评价的指标，建立模糊感官评价因素集，即 $U=\{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6\}$ 。感官评审团由 20 位具有高级评茶师职业资格的人员组成，在感官评价前不吸烟、不喝酒、不吃东西，以免影响口感，每次评价时间间隔 10 min 以上，且评价时不做任何的讨论及交流。用优、良、中、差 4 个等级

表 1 试验因素水平设计方案 Table 1 Experimental factor levels			
因素水平 Factor level	烘焙温度 Baking temperature/℃	摊平厚度 Thickness of spread/cm	烘焙时间 Baking time/h
−1	80	2	1
0	85	4	2
1	90	6	3

的评语进行打分，评价结果以百分制计算。评分标准如表 2。

表 2 茶叶感官评价标准
Table 2 Sensory evaluation criteria on tea

等级 Grade	分数范围 Score content	外形 Appearance	叶底 Brewed tea leaves	滋味 Taste	汤色 Color of the tea liquids	香气 Aroma	色泽 Color of tea leaves
优 Excellent	80~100	肥壮、圆实、重实	肥厚、软亮、均整、红边明、有余香	醇厚、鲜爽、回甘、音韵明显	金黄、清澈	浓郁持久	翠绿、乌润、砂绿明
良 Good	60~80	较肥壮、结实	尚软亮、均整、有红边、稍有余香	醇厚、尚鲜爽、音韵明	深金黄、清澈	浓郁持久	乌润、砂绿较明
中 Fair	20~60	略肥壮、略结实	稍软亮、略均整	醇和鲜爽、音韵稍明	橙黄、深黄	尚清高	乌润、有砂绿
差 Poor	0~20	卷曲、尚结实	稍均整、带褐红色	醇和、音韵轻微	深橙黄、清黄	清纯平正	乌绿、稍带褐红色

（2）评价等级集确立。用优（ v_1 ）、良（ v_2 ）、中（ v_3 ）、差（ v_4 ）4 个等级进行茶叶感官评价，评语集 $V=\{v_1, v_2, v_3, v_4\}$ ，其中 $80\leq v_1\leq 100$ ， $60\leq v_2<80$ ， $20\leq v_3<60$ ， $0\leq v_4<20$ ；在计算分析中 v_1 、 v_2 、 v_3 、 v_4 取平均值作为计算茶叶评价等级值，即评价等级集 $A=\{a_1, a_2, a_3, a_4\}=\{90, 70, 40, 10\}$ 。

（3）因素权重集确立。根据用户调查法^[32]进行权重集的确定。选取 20 名身体健康、感知正常、对茶叶品质熟练且有喝茶习惯的人员，对茶叶的外形、叶底、滋味、香气、汤色、色泽等 6 个因素进行权重的调查，每个被调查人员对这 6 个因素进行打分，最后统计 20 名被调查人员的 6 个因素总分数，各个因素总分数与整体总分数相除为各因素的权重，表 3 为调查统计结果，从表 3 得出茶叶的权重集 $W=\{w_1, w_2, w_3, w_4, w_5, w_6\}=\{0.1, 0.1, 0.3, 0.25, 0.15, 0.1\}$ ，其中 w_1 、 w_2 、 w_3 、 w_4 、 w_5 、 w_6 分别对应外形（ u_1 ）、叶底（ u_2 ）、滋味（ u_3 ）、香气（ u_4 ）、汤色（ u_5 ）、色泽（ u_6 ）的权重值。

（4）综合评价体系的确定。由 20 位高级评茶师根据感官评价标准及感官评语对 17 组处理烘焙的茶叶进行评价，以每个因素的评语对应的人数除以评定总人数所组成的矩阵作为模糊矩阵 R 。用权重集

W 与模糊矩阵合成表示为模糊关系评价集 T ，即 $T=W\times R$ ，则对应的第 i 样品相应的模糊关系评价集 $T_i=W\times R_i$ 。用评价等级集 A 与模糊关系评价集 T 成为最后模糊感官评价分 F ，则对应的第 i 样品模糊感官评审评价分为 $F_i=A\times T_i$ 。分值越高即可认定为品质最好，相应的工艺被认为最佳^[33-36]。

1.3 茶叶主要香气成分指标测定

1.3.1 香气成分提取

采用顶空固相微萃取法结合 GC-MS 分析（HS-SPME/GC-MS）方法，结合参考文献^[37]略作变动。准确称取磨碎好的茶叶粉末 5.00 g，放入 20 mL 顶空瓶中，盖上顶空瓶盖，放置 60 ℃ 恒温水浴 20 min。用固相微萃取头（65 μm PDMS/DVB），顶空萃取 30 min，然后快速取出固相微萃取头插入 240 ℃ 的色谱进样口进行热解吸（10 min），根据各化合物峰面积百分比与定标物峰面积之比得出香气成分相对含量，每组试验进行 3 次重复测量，取平均值。

顶空固相微萃取条件：顶空平衡温度 90 ℃，平衡时间 50 min，进样体积 1.5 μL，加压力 20 psi，加压时间 0.5 min，进样时间 1 min。

色谱条件：DB-5 MS 石英毛细管柱（30 m×0.25 mm，0.25 μm）；进样口温度 240 ℃，不分流进样，

表 3 评价茶叶烘干因素权重分布
Table 3 Statistics of weight distribution of various factors in tea baking

评选人编号 Selector number	外形 Appearance (u_1)	叶底 Brewed tea leaves (u_2)	滋味 Taste (u_3)	香气 Aroma (u_4)	汤色 Color of the tea liquids (u_5)	色泽 Color of tea leaves (u_6)
1	1	2	3	2	2	0
2	1	0	2	2	3	2
3	2	1	3	1	2	1
4	0	1	4	3	1	1
5	1	1	3	3	1	1
6	1	0	3	4	1	1
7	0	1	3	3	2	1
8	1	0	4	1	2	2
9	2	1	3	2	1	1
10	1	1	2	3	1	2
11	2	1	2	2	2	1
12	0	1	4	4	1	0
13	1	2	3	2	1	1
14	1	2	2	3	0	2
15	1	1	2	3	2	1
16	2	1	3	3	1	0
17	1	1	3	2	1	2
18	1	1	4	2	2	0
19	0	1	4	3	1	1
20	1	1	3	2	3	0
总分 Total score	20	20	60	50	30	20
权重 Weights	0.10	0.10	0.30	0.25	0.15	0.10

柱流量 1 mL·min⁻¹，载气为高纯氮气（99.999%），柱温升温程序：初始温度 50 ℃ 维持 3 min，以 3 ℃·min⁻¹ 升温至 90 ℃，维持 5min，以 5 ℃·min⁻¹ 升至 150 ℃，维持 5 min；10 ℃·min⁻¹ 升至 220 ℃，保持 5 min。

质谱条件：电离方式 EI+；电离能量 70 eV；离子源温度 220 ℃；接口温度 240 ℃；扫描时间 1~60 min；扫描范围 40~400 m/z。

1.3.2 茶叶生化成分测定

采用 GB/T 8314—2013 茶游离氨基酸总量的测定^[38]，GB/T 8313—2018 茶叶中茶多酚和儿茶素类含量的检测方法^[39]、蒽酮比色法^[40]、GB/T 8312—2013 茶咖啡碱测定方法^[41] 分别测定茶样中的游离氨基酸、茶多酚、可溶性糖、咖啡碱含量。

1.4 数据分析

采用 Excel 2017 与 SPSS 16.0 对试验所得数据进行统计分析处理，每个样品茶叶进行 3 次重复试验，取平均值。

2 结果与分析

2.1 不同烘干参数对茶叶感官指标的单因素分析

2.1.1 烘焙温度对茶叶感官品质评价的影响

如图 1 可知，在一定范围内，随着温度的增加，感官评价分增加，温度再增加时，感官评价分

反而下降，表现为 80 ℃>85 ℃>90 ℃>75 ℃>95 ℃。这是由于在一定温度范围内茶叶随着烘焙温度的升高，茶叶内部的醇类、酮类、芳香族类等物质含量逐渐升高^[42]。当温度越高时，茶叶快速产生焦糖化反应，烘焙后的茶叶外形不结实，较脆，汤色呈深，有炭焦味，所以整体的感官评价分较低。

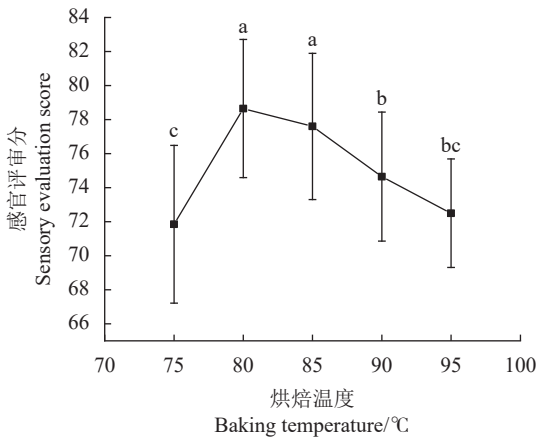


图 1 烘焙温度对茶叶感官品质评价影响
Fig. 1 Effect of baking temperature on sensory quality of tea

2.1.2 摊平厚度对茶叶感官品质评价的影响

如图 2 可知，随着摊平厚度的增加，感官评价分呈下降的趋势，即 2 cm>4 cm>6 cm>8 cm>10 cm；摊平厚度越厚，茶叶受热越不均匀，表现为茶叶上层受热更好，下层受热不均，茶叶整体外形形状、

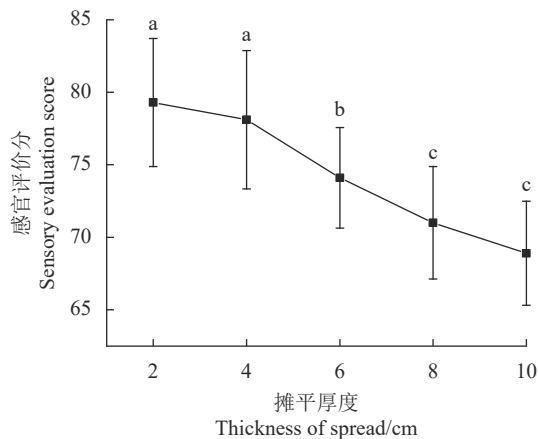


图2 摊平厚度对茶叶感官品质评价影响

Fig. 2 Effect of leaves spreading for baking on sensory quality of tea

色泽不均，茶叶感官评价分相对低。

2.1.3 烘焙时间对茶叶感官品质评价的影响

如图3可知，烘焙时间在0~3 h时，随着时间的延长感官评价分处于上升的趋势，在3 h时感官评价分最大，而后随着时间的延长，感官评价分处于下降趋势，即3 h>2 h>1 h>4 h>5 h>6 h。这是由于食品进行的美拉德或者焦糖化反应程度加深导致颜色变更深^[43]，所以茶汤变得更深黄，外形更松，感官评价分更低。

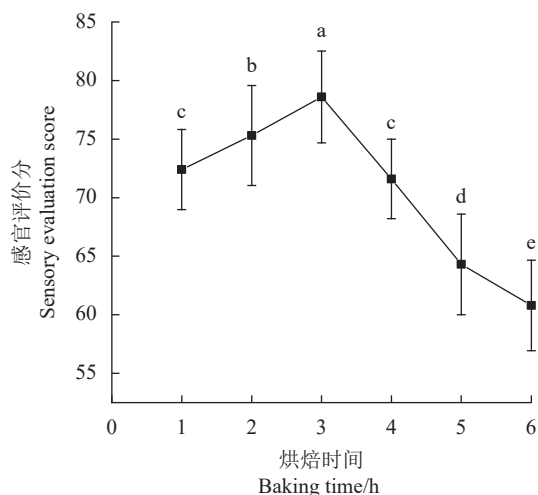


图3 烘焙时间对茶叶感官品质评价影响

Fig. 3 Effect of baking time on sensory quality of tea

2.2 茶叶木炭烘焙后模糊数学感官综合评价

由20位高级评茶师（男性）对17种不同烘焙处理的茶叶按外形、叶底、滋味、香气、汤色、色泽6个因素进行评价，根据评价等级高低顺序进行票数统计，不同茶样感官评价等级票数见表4。从表中可以看出不同茶叶感官评价等级票数结果之间存在着差异，只用人工感官评价求平均值法来确立茶叶品质，主观性强，误差大，评价标准不合理。采用模

糊感官评价法，能够综合考虑评定的其他因素，保证试验结果的可靠性。

2.3 Box-Behnken 响应面优化及回归方程分析

采用 Design-expert 8.0.6 中 Response surface 的 Box-Behnken Design 模块对茶叶木炭烘焙参数进行设计试验：以烘焙温度（A）、摊平厚度（B）、烘焙时间（C）为自变量，建立三因素三水平试验组合，以模糊感官评价分F作为响应值，模糊感官评价分最高为优化目标进行优化，设计组合方案及结果见表5。

根据 Design-expert 8.0.6 数据分析软件对茶叶模糊感官评价结果进行分析，得到拟合回归方程如下：

$$F=74.37-2.56A-1.8B-2.89C+2.63AB-3.74AC-2.4BC-4.1A^2-2.69B^2-3.73C^2$$

回归方程的方差分析结果（表6）显示，二次模型 $P=0.0007<0.01$ ，表明获得的拟合回归方程差异极显著；相关系数 $R^2=0.9540$ ，校正后的判定系数 $R^2_{Adj}=0.8948$ ，说明模糊感官评价分F中95.4%由3个因变量引起，回归模型拟合良好，能够用该方程预测分析实际感官情况； $P=0.2251>0.05$ ，表明失拟项不显著，其他未知因素对模糊感官评价分影响较小，能够用该拟合回归方程来预存实际感官评价结果；变异系数 $CV=2.48\%$ ，表明本试验最后的感官评价结果可靠，精密度高；说明试验的可靠性和精密度较高。综上所述，二次回归方程模型拟合度好，试验可靠性强，可信度高，可以用该二次回归模型来确定茶叶木炭烘焙因素的最优组合，试验设计具有统计学意义^[44]。

同时， P_A 、 $P_C<0.01$ ，表现为差异极显著，说明烘焙温度和烘焙时间对茶叶模糊感官评价影响极显著， $0.01<P_B<0.05$ ，摊平厚度影响显著。由 $F_B=8.75<F_A=17.64<F_C=22.61$ ，表明在3个因素的取值范围内，影响茶叶模糊感官评价分响应值的排序为： $C>A>B$ ，即烘焙时间对茶叶模糊感官评价影响最大，烘干温度第二，摊平厚度最小。在两两因素的交互项AB、AC、BC中， $0.01<P_{AB}$ 、 $P_{BC}<0.05$ ， $P_{AC}<0.01$ ，且 $F_{BC}=8.75<F_{AB}=17.64<F_{AC}=22.61$ ，说明摊平厚度、烘焙时间、烘焙温度间有显著交互作用，两两交互作用对茶叶模糊感官评价影响顺序： $AC>BC>AB$ 。

2.4 响应面交互作用分析

对拟合的回归方程进行2D等高线和3D曲面分析，从图4(a)、(b)可以看出，沿烘焙温度向峰

表 4 不同茶样感官评价等级票数
Table 4 Sensory evaluation scores on tea samples

样品号 Sample No.	外形 Appearance				叶底 Brewed tea leaves				滋味 Taste				香气 Aroma				汤色 Color of the tea liquids				色泽 Color of the tea leaves			
	优	良	中	差	优	良	中	差	优	良	中	差	优	良	中	差	优	良	中	差	优	良	中	差
1	10	4	6	0	12	4	2	2	8	8	4	0	8	6	6	0	12	4	2	2	10	6	2	2
2	10	2	2	2	10	8	2	0	10	6	4	0	10	8	0	2	12	6	2	0	10	6	4	0
3	10	6	4	0	10	4	4	2	8	6	4	2	8	6	6	0	12	6	2	0	10	6	2	2
4	12	6	0	2	14	4	2	0	8	8	4	0	10	6	4	0	12	4	2	2	8	8	4	0
5	10	4	4	2	12	4	4	0	12	6	2	0	10	8	2	0	12	2	6	0	10	6	4	0
6	10	6	4	0	10	6	4	0	8	6	6	0	10	6	4	0	10	4	6	0	8	6	4	2
7	12	4	4	0	12	6	2	0	8	6	4	2	10	6	4	0	12	4	4	0	10	6	2	2
8	12	6	2	2	12	4	4	0	6	6	6	2	8	6	4	2	8	8	4	0	8	6	4	2
9	10	6	2	2	12	4	4	0	6	6	6	2	6	8	4	2	8	8	2	2	10	6	2	2
10	10	4	6	0	10	4	4	2	8	6	4	2	8	6	6	0	12	4	2	2	10	6	4	0
11	10	4	6	0	10	6	4	0	8	8	2	2	8	6	6	0	12	4	2	2	10	6	2	2
12	10	4	6	0	10	6	4	0	10	6	2	2	10	6	4	0	12	6	2	0	10	8	2	0
13	10	4	6	0	10	6	4	0	10	8	2	0	10	6	2	2	8	8	2	2	10	6	2	2
14	10	4	4	2	10	6	2	2	6	4	6	4	6	8	2	4	6	10	2	2	10	4	4	2
15	10	6	2	2	10	4	6	0	8	6	4	2	6	8	4	2	6	8	4	2	8	6	4	2
16	6	4	8	2	8	8	2	2	4	4	8	4	4	8	4	4	6	8	4	2	6	6	6	2
17	8	6	4	2	8	4	6	2	6	4	6	4	6	8	2	4	4	8	6	2	6	6	6	2

表 5 茶叶烘干条件设计组合
Table 5 Combinations of tea baking conditions

序号 Sample No.	烘焙温度 A Temperature/ ℃	摊平厚度 B Thickness/ cm	烘焙时间 C Baking time/h	理论模糊感官 评价分 F Theoretical fuzzy sensory evaluation score
1	0	-1	-1	71.30
2	0	0	0	74.45
3	0	1	-1	70.20
4	-1	-1	0	73.95
5	0	0	0	75.70
6	1	0	-1	71.25
7	0	0	0	72.30
8	-1	0	-1	67.80
9	1	1	0	66.45
10	-1	0	1	69.30
11	0	-1	1	70.50
12	0	0	0	75.55
13	0	0	0	73.85
14	1	-1	0	62.50
15	-1	1	0	67.40
16	1	0	1	57.80
17	0	1	1	59.80

值移动，与沿摊平厚度向峰值移动相比，烘焙温度效应面曲线较陡，等高线密度较高，说明烘焙温度对茶叶感官评价的影响较大。图（c）、（d）可以看出，沿烘焙时间向峰值移动，与沿烘焙温度向峰值移动相比，烘焙时间效应面曲线较陡，等高线密度较高，说明烘焙时间对茶叶感官评价的影响较大。图（e）、（f）可以看出，沿烘焙时间向峰值移动，与沿摊平厚度向峰值移动相比，烘焙时间效应面曲线较陡，等高线密度较高，说明烘焙时间对茶叶感官评价的影响较大。可以得出对茶叶感官评价影响大小顺序为：烘焙时间（A）>烘焙温度（C）>摊平厚度（B）。从图 4 整体来看，各 3D 曲面的坡度较为明显，等高线呈椭圆形状，并不断向椭圆中心聚集，即表明了两两交互因素有较为明显的交互作用，同时可以看出，各因素交互作用后形成的响应面曲线坡度顺序为：AC>BC>AB，等高线呈现椭圆的密集程度的顺序：AC>BC>AB，说明两两因素之间交互作用对茶叶感官评价影响大小顺序为：AC>BC>AB。整个响应面交互作用结果与二次模型方差分析结果一致。

表 6 响应面二次模型方差分析
Table 6 Variance analysis on response surface quadratic model

方差来源 Source of variance	平方和 Sum of square	自由度 Degree of freedom	均方 Mean square	F值 F value	P值 P value	显著性 Significance
模型 Model	429.67	9	47.74	16.11	0.000 7	**
烘焙温度 <i>A</i> Baking temperature	52.28	1	52.28	17.64	0.004 0	**
摊平厚度 <i>B</i> Thickness of spread	25.92	1	25.92	8.75	0.021 2	*
烘焙时间 <i>C</i> Baking time	66.99	1	66.99	22.61	0.002 1	**
<i>AB</i>	27.56	1	27.56	9.30	0.018 6	*
<i>AC</i>	55.88	1	55.88	18.86	0.003 4	**
<i>BC</i>	23.04	1	23.04	7.78	0.027 0	*
<i>A</i> ²	70.91	1	70.91	23.93	0.001 8	**
<i>B</i> ²	30.50	1	30.50	10.29	0.014 9	*
<i>C</i> ²	58.54	1	58.54	19.76	0.003 0	**
残差 Residual	20.74	7	2.96			
失拟项 Lack of fit	13.02	3	4.34	2.25	0.225 1	
纯误差 Pure error	7.72	4	1.93			
合计 Cor total	450.41	16				
	<i>R</i> ² =0.9540	<i>R</i> ² _{Adj} =0.894 8	<i>CV</i> =2.48%			

**为差异极显著 ($P<0.01$)；*为差异显著 ($0.01<P<0.05$)。
** means extremely significant difference ($P<0.01$); * means significant difference ($0.01<P<0.05$).

2.5 验证试验

根据拟合二次回归方程，在各因素的选取范围内，选择模糊感官评价成绩最大值，分析出最优烘干参数为第 12 组处理，即烘焙温度为 82.1 ℃，摊平厚度为 2.66 cm，烘焙时间为 2.12 h，理论模糊感官评价成绩最大为 75.54。为了检验该试验方法的可行性，对 17 个试验组进行烘焙试验，实际感官评价分如图 5 所示，可以看出，实际感官评价分与理论感官评价分的走势基本一致，都在第 12 组参数试验分值最高，说明所得回归模型能够较为准确地表达模糊感官评价成绩。结合实际烘干需要，调整烘干参数为烘焙温度为 82 ℃，摊平厚度为 3 cm，烘焙时间为 126 min，即为第 18 组处理，实际测得的模糊感官评价成绩为 82.50，与最优实际感官评价成绩 83.15 接近，说明可以用该参数替代最优组合参数。

2.6 茶叶香气成分及生化成分分析

2.6.1 茶叶香气成分分析

18 种烘焙参数组合样茶中都测到了相同的 23 种

主要香气化合物，选取了含量最高的前 4 种进行分析，由表 7 可知，每组样品中 4 种含量最多的香气成分为：反-橙花叔醇>法尼烯>植物醇>吡嗪，本次烘干的茶叶表现为橙花香，带有青臭味。这是由于反-橙花叔醇赋予茶叶的香气为橙花香，吡嗪使茶叶带有青臭味，反-橙花叔醇含量越高，橙花香越浓，吡嗪含量越高青臭味越浓^[45]。从总体的测量结果上看，随着感官评审成绩升高，反-橙花叔醇含量有提升趋势，吡嗪含量有下降趋势。

2.6.2 茶叶生化成分分析

由表 8 可知，18 种烘焙参数组合样茶中所测得的 4 种主要生化成分中，茶多酚、可溶性糖、氨基酸含量高，表现为茶汤鲜爽、甜醇、味较浓，香气持久。这是由于氨基酸含量高可以使茶汤鲜爽味浓，香气持久，茶多酚和可溶性糖含量高可以使茶汤甜醇。感官评审成绩低的相应的咖啡碱含量高，使茶汤带有苦涩^[46]。从总体上看，随着茶多酚、可溶性糖、氨基酸含量升高，咖啡碱含量下降，感官评审分数也逐渐升高。

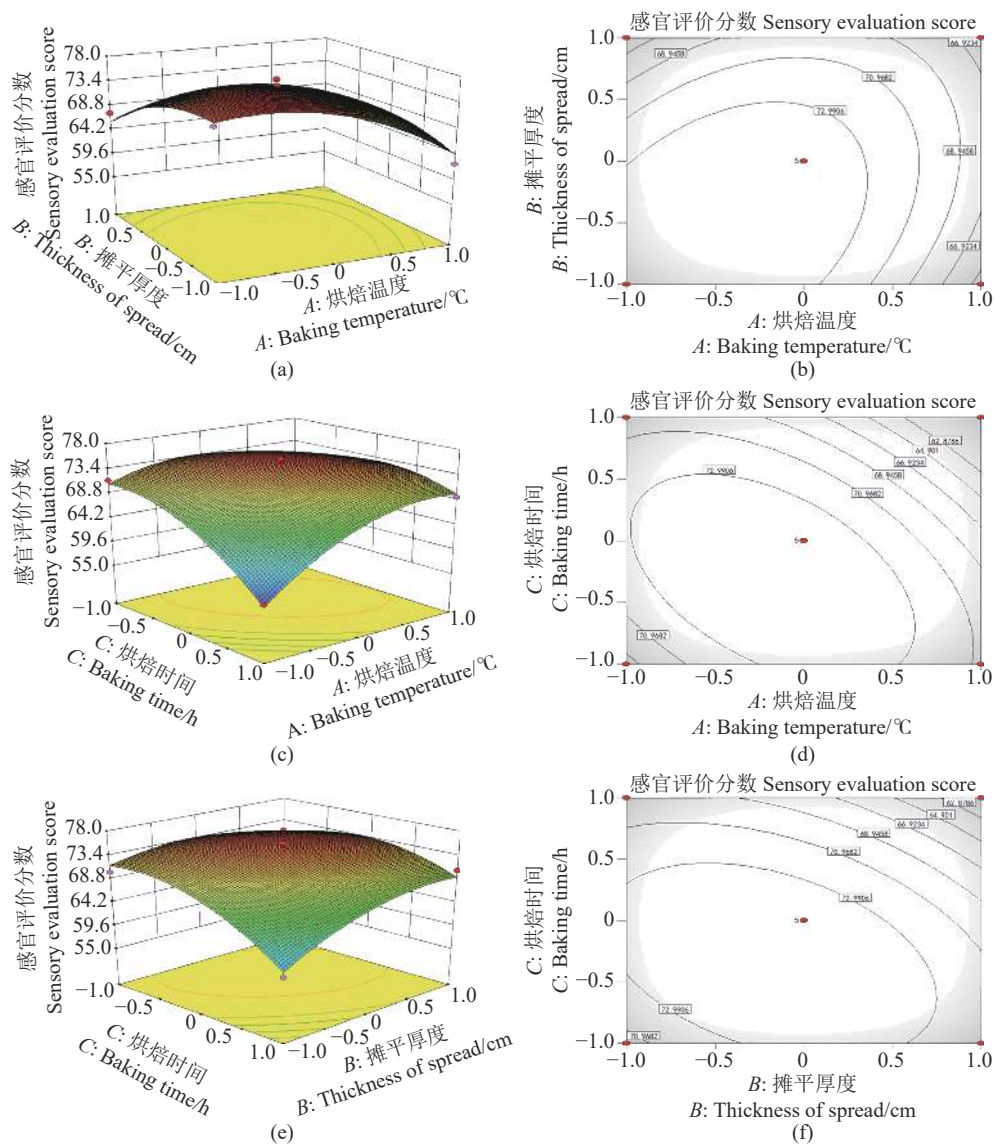


图 4 两两交互因素对感官评审成绩影响的等高线及响应面

Fig. 4 Contour and response surface on pairwise interaction factors affecting sensory evaluation scores

3 讨论与结论

随着社会的发展，人们对茶叶的品质需要越来越高，对铁观音的喜好由清香型向浓香型转变。烘焙在浓香型铁观音中至关重要，常见的烘焙为电烘焙。然而，电烘焙茶叶质量相对原始的木炭烘焙更差^[7]。为了提高茶叶的烘焙质量，木炭烘焙成了现在茶叶烘焙的首选。木炭烘焙是传统的烘焙方式，木炭燃烧不稳定，温度难以控制，自能控制难度大，烘焙过程主要以人工观察为主，主观程度高，效率低。优化木炭烘焙茶叶，提高茶叶的品质是市场消费的需求。

目前茶叶品质评价主要方法有仿宋斗茶^[47]、计算机视觉^[48]及电子鼻、电子舌以及可视化技术、风味嗅觉味觉双通道感知方法^[49]等，这些评价方法存

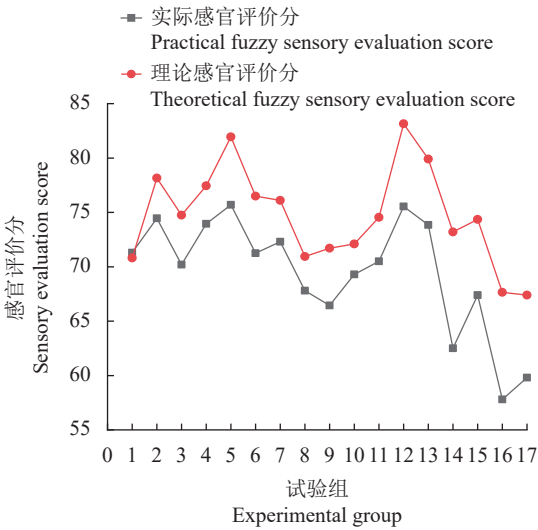


图 5 理论与实际感官评价分数对比

Fig. 5 Theoretical and actual sensory evaluation temperatures

表 7 不同烘焙处理茶叶主要香气成分含量
Table 7 Main aroma components of different tea samples baked in different conditions

试验序号 Sample No.	反-橙花叔醇 Trans-nerolidol/%	植物醇 Phytosterol/%	法尼烯 Farnesene/%	吲哚 Indole/%	实际模糊感官评价分(<i>F</i>) Actual fuzzy sensory evaluation score
1	13.28±0.29 efg	6.20±0.32 ef	8.24±0.38 bcde	4.66±0.15 ef	70.80
2	14.29±0.25 cd	7.37±0.33 cde	7.23±0.34 f	4.32±0.17 efg	78.15
3	12.99±0.27 g	6.19±0.25 f	8.26±0.28 bcde	5.16±0.26 d	74.75
4	13.92±0.39 cde	7.03±0.32 d	7.89±0.25 e	3.52±0.14 h	77.45
5	15.34±0.49 b	5.92±0.26 ef	7.92±0.37 de	3.12±0.13 h	81.95
6	13.58±0.30 defg	6.15±0.27 ef	8.61±0.23 bcde	3.34±0.15 h	76.50
7	14.10±0.24 cde	6.05±0.31 ef	8.08±0.16 cde	3.82±0.18 gh	76.10
8	12.07±0.23 hi	7.70±0.29 abcd	8.47±0.39 bcde	5.88±0.29 c	70.95
9	11.86±0.15 hij	7.86±0.30 abcd	8.31±0.30 bcde	6.22±0.29 bc	71.70
10	13.10±0.23 efg	6.00±0.29 ef	8.41±0.35 bcde	5.23±0.20 d	72.10
11	13.19±0.37 efg	7.88±0.12 abcd	8.05±0.36 cde	5.28±0.39 d	74.55
12	16.09±0.25 ab	6.09±0.27 ef	7.37±0.14 f	3.99±0.19 fg	83.15
13	14.06±0.54 cde	7.64±0.34 abcd	7.25±0.29 f	3.33±0.18 h	79.90
14	11.35±0.31 ij	7.70±0.35 abcd	8.36±0.31 bcde	7.33±0.36 a	73.20
15	12.18±0.52 hi	8.11±0.43 abcd	8.20±0.35 bcde	6.49±0.31 b	74.35
16	10.36±0.49 k	7.92±0.35 abcd	9.66±0.39 a	7.49±0.30 a	67.65
17	11.19±0.41 j	7.52±0.38 bcd	8.30±0.36 bcde	7.58±0.29 a	67.40
18	15.78±0.67 ab	5.90±0.27 ef	6.90±0.19 f	4.44±0.22 ef	82.50

表中同列数据后不同小写字母表示差异显著（ $P<0.05$ ）。表8同。
Data with different lowercase letters on same column indicate significant differences in content ($P<0.05$). Same for Table 8.

表 8 不同烘焙处理茶叶主要生化成分含量
Table 8 Main biochemicals in sampled teas

试验序号 Sample No.	茶多酚 Tea polyphenol/%	可溶性糖 Soluble sugar/%	氨基酸 Amino acid/%	咖啡碱 Caffeine/%
1	23.59±0.82 c	5.83±0.25 defgh	1.73±0.12 hij	1.98±0.08 ij
2	24.87±0.51 b	6.23±0.30 bcd	2.04±0.07 f	1.53±0.07 k
3	23.61±0.44 c	5.71±0.15 defg	1.80±0.03 gh	2.35±0.12 h
4	24.82±0.31 b	5.63±0.28 defg	2.38±0.12 e	1.97±0.09 ij
5	26.22±0.36 a	5.60±0.26 defg	3.18±0.13 c	1.24±0.06 l
6	23.51±0.46 c	5.77±0.17 defg	1.74±0.07 ghi	2.03±0.07 ij
7	24.01±0.38 c	5.77±0.31 defg	2.26±0.11 e	1.97±0.09 ij
8	21.24±0.48 d	6.21±0.22 bcde	1.59±0.03 ijk	3.04±0.13 fg
9	21.81±0.49 d	5.52±0.25 efgh	1.45±0.07 ijk	3.36±0.12 e
10	23.24±0.44 c	5.84±0.25 cdefg	1.76±0.09 gh	3.15±0.10 fg
11	23.61±0.41 c	6.00±0.22 bcde	1.83±0.09 gh	2.95±0.10 g

续上表

试验序号 Sample No.	茶多酚 Tea polyphenol/%	可溶性糖 Soluble sugar/%	氨基酸 Amino acid/%	咖啡碱 Caffeine/%
12	26.57±0.86 a	6.64±0.26 a	3.55±0.10 a	1.09±0.05 l
13	24.83±0.42 b	5.90±0.14 cdefg	2.57±0.09 d	1.80±0.07 j
14	20.03±0.55 ef	5.19±0.16 hi	1.36±0.11 k	4.20±0.21 c
15	21.65±0.34 d	5.47±0.09 efgh	1.60±0.04 hijk	3.84±0.09 d
16	18.84±0.41 f	4.64±0.10 k	1.06±0.06 l	4.78±0.17 a
17	19.31±0.35 ef	5.05±0.15 i	1.21±0.04 l	4.52±0.15 b
18	26.00±0.37 a	6.22±0.32 bcd	3.39±0.13 b	1.44±0.06 k

在一些局限性，如仿宋斗茶以点茶为主，因素比例固定，主观性强；计算机视觉、电子鼻、电子舌以及可视化技术主要从茶叶的单因素或多因素联合评价茶叶的品质，没有系统性。风味嗅觉味觉双通道感知是针对绿茶提出的实验测定与感官评价相结合建立的模型，针对性强，操作较繁琐。为了能更好地提升茶叶品质，同时为实现茶叶烘焙更为智能化，本研究用模糊感官评价方法对烘干茶叶的影响因素进行量化，建立了木炭烘焙参数的模糊数学感官评价模型，确定了茶叶木炭烘焙参数的最佳工艺为：烘焙温度 82 ℃、摊平厚度 3 cm、烘焙时间 126 min。用最佳工艺进行试验，验证了该组合在木炭烘干机上烘焙的茶叶品质好；同时通过测定各试验样品的木炭烘焙茶叶的主要香气含量、生化成分含量，与建立的感官评价因素相符，反向验证了提出模型参数的合理性，进一步证实了该模型的可靠性。

但是本研究提出的最佳烘焙组合未在其他木炭烘焙设备上试验，也存在一定的局限性，可以进一步在其他木炭烘焙设备上试验，验证该组合参数的烘焙效果。同时，可以采用模糊优化算法对模糊数据进行优化，提高烘焙参数的精度。若试验效果良好，可以将该模型与人工智能相结合，通过自能控制烘干设备，实现烘焙的全自动化，从而提升木炭茶叶烘焙效率，减低人工成本。

参考文献：

[1] 国家统计局. 2023 年国民经济和社会发展统计公报 [EB/OL]. [2024-02-29]. https://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202402/t20240228_1947915.html.
[2] 刘志, 张永志, 周铁锋, 等. 不同烘干方式对茶叶中稳定同位素特征及其产地溯源的影响 [J]. 核农学报, 2018, 32 (7): 1408–1416.
LIU Z, ZHANG Y Z, ZHOU T F, et al. Effects of different drying techniques on stable isotopic characteristics and traceability of tea [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2018, 32(7): 1408–1416. (in Chinese)

[3] 操晓亮, 张峰, 柴国壁, 等. 基于感官导向的铁观音茶叶特征香气的分析、重构及在卷烟加香中的应用 [J]. 中国烟草学报, 2021, 27 (4): 10–19.
CAO X L, ZHANG F, CHAI G B, et al. Analysis and reconstitution of characteristic aromas in Tie Guanyin tea based on sensory-oriented separation and its application in cigarette flavoring [J]. *Acta Tabacaria Sinica*, 2021, 27(4): 10–19. (in Chinese)
[4] 项应萍, 徐邢燕, 刘国英, 等. 乌龙茶烘焙技术研究进展 [J]. 亚热带农业研究, 2019, 15 (3): 211–216.
XIANG Y P, XU X Y, LIU G Y, et al. Research advances in oolong tea baking technology [J]. *Subtropical Agriculture Research*, 2019, 15(3): 211–216. (in Chinese)
[5] 谢振邦. 闽南乌龙茶烘焙技术初探 [J]. 南方农业, 2019, 13 (6): 81–83.
XIE Z B. Preliminary study on baking technology of Minnan oolong tea [J]. *South China Agriculture*, 2019, 13(6): 81–83. (in Chinese)
[6] 苏成家. 不同焙火工艺对乌龙茶品质的影响 [J]. 现代食品, 2018, (15): 167–169,174.
SU C J. Effects of different roasting processes on oolong tea quality [J]. *Modern Food*, 2018(15): 167–169,174. (in Chinese)
[7] 高育森, 任金波, 李梅娟, 等. 基于模糊 PID 控制的茶叶炭焙烘焙机设计与试验 [J]. 食品与机械, 2021, 37 (3): 96–101.
GAO Y S, REN J B, LI M J, et al. Design and test of tea charcoal roasting machine based on fuzzy PID control [J]. *Food & Machinery*, 2021, 37(3): 96–101. (in Chinese)
[8] 俞梦瑶, 禹利君, 徐帅, 等. 不同烘干处理对茶叶中霉菌的控制及感官品质的影响 [J]. 茶叶通讯, 2020, 47 (2): 267–274.
YU M Y, YU L J, XU S, et al. Effects of different drying treatments on the control of mould in tea and the sensory quality of tea [J]. *Journal of Tea Communication*, 2020, 47(2): 267–274. (in Chinese)
[9] 徐文娟. 基于 DCS 的茶叶烘干机工艺监控研究 [J]. 农机化研究, 2020, 42 (10): 239–242.
XU W J. Research of monitoring system on tea drying process based on DCS [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2020, 42(10): 239–242. (in Chinese)
[10] 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 L Q, DUAN D Y, YIN Y Y, et al. Prediction of tea drying

- moisture content based on PSO Elman algorithm [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(19): 284–292. (in Chinese)
- [11] 赵合胜. 基于灰色预测和 SVM 的茶叶烘焙温湿度预测 [J]. 西安文理学院学报 (自然科学版), 2018, 21 (5): 64–67.
- ZHAO H S. Prediction of the baking temperature and humidity of tea based on grey prediction and support vector machine(SVM) [J]. *Journal of Xi'an University (Natural Science Edition)*, 2018, 21(5): 64–67. (in Chinese)
- [12] WANG C, LI J, ZHANG Y, et al. Effects of electrostatic spray drying on the sensory qualities, aroma profile and microstructural features of instant Pu-erh tea [J]. *Food Chemistry*, 2022, 373(Pt B): 131546.
- [13] HAN J H, KIM D, CHUN J Y. Effect of thickness and drying method on properties of dried tangerine tea [J]. *Journal of the Korean Society of Food Science and Nutrition*, 2022, 51(3): 245–253.
- [14] PASHAZADEH H, ZANNOU O, KOCA I. Modeling and optimization of drying conditions of dog rose for preparation of a functional tea [J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2021, 44(3): e13632.
- [15] STIEFENHOFER P. Evaluating pedagogical quality of learning activities using fuzzy evaluation mappings: The case of pedagogical games of mathematical proof [J]. *Applied Mathematics*, 2022, 13(5): 432–452.
- [16] ATAEI NUKABADI F, HOJJATOLESLAMY M, ABBASI H. Optimization of fortified sponge cake by nettle leaves and milk thistle seed powder using mixture design approach [J]. *Food Science & Nutrition*, 2020, 9(2): 757–771.
- [17] OMAR S M, ABDALLA F I, ABDELGAWAD N M. Preparation and optimization of fast-disintegrating tablet containing naratriptan hydrochloride using D-optimal mixture design [J]. *AAPS PharmSciTech*, 2018, 19(6): 2472–2487.
- [18] RIVERO R C, ARCHAINA D A, BUSQUET C M, et al. Development of a honey-based powder ingredient using a mixture design: Botanical origin effect and hydration properties [J]. *LWT*, 2021, 147: 111446.
- [19] 刘加友, 陈兵兵, 王振斌, 等. 模糊数学和响应面在葛根乳酸菌饮料感官评定中的应用 [J]. 中国食品学报, 2017, 17 (1): 224–229.
- LIU J Y, CHEN B B, WANG Z B, et al. Application of fuzzy mathematics and response surface in sensory assessment of kudzu root beverage [J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2017, 17(1): 224–229. (in Chinese)
- [20] 崔立柱, 付依依, 刘士伟, 等. 基于模糊数学感官评价法沙棘饼干烘焙工艺优化 [J]. 食品工业科技, 2021, 42 (15): 163–169.
- CUI L Z, FU Y Y, LIU S W, et al. Optimization for baking process of sea-buckthorn biscuits based on sensory evaluation of fuzzy mathematics [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(15): 163–169. (in Chinese)
- [21] 崔莉, 李大婧, 高小女, 等. 基于模糊数学感官评价和混料设计的低度甜糯米酒原料配方优化 [J]. 核农学报, 2015, 29(1): 106–112.
- CUI L, LI D J, GAO X N, et al. Mixture design of maize wine raw material recipe based on fuzzy mathematic sensory evaluation [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2015, 29(1): 106–112. (in Chinese)
- [22] 钟凯, 罗易萍, 张天天, 等. 基于模糊数学法复合茯砖茶饮料配方优化及其香气品质分析 [J]. 茶叶通讯, 2021, 48 (1): 114–123.
- ZHONG K, LUO Y P, ZHANG T T, et al. Formulation optimization and aroma quality analysis of compound fuzhuan brick tea beverage based on fuzzy mathematics [J]. *Journal of Tea Communication*, 2021, 48(1): 114–123. (in Chinese)
- [23] SUN J F, YANG T S, LIU Q, et al. Optimization of key technology for instant sea cucumber processing through fuzzy evaluation and response surface methodology [J]. *American Journal of Biochemistry and Biotechnology*, 2017, 13(2): 99–110.
- [24] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 茶叶分类: GB-T 30766-2014 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [25] 盛金凤, 王雪峰, 雷雅雯, 等. 干燥温度和切片厚度对柿子片干燥特性与品质影响 [J]. 食品研究与开发, 2022, 43 (3): 58–65.
- SHENG J F, WANG X F, LEI Y W, et al. Effect of temperature and thickness on the drying characteristics and quality of persimmon slices [J]. *Food Research and Development*, 2022, 43(3): 58–65. (in Chinese)
- [26] 朱燕芳, 郝燕, 陈建军, 等. 河西走廊葡萄叶幕厚度对果实品质的影响 [J]. 中外葡萄与葡萄酒, 2022, (6): 71–75.
- ZHU Y F, HAO Y, CHEN J J, et al. Effects of canopy thickness of grapevine on berry quality in Hexi corridor [J]. *Sino-Overseas Grapevine & Wine*, 2022(6): 71–75. (in Chinese)
- [27] 张璐, 熊双丽, 李安林, 等. 油炸温度和时间对小酥肉品质的影响 [J/OL]. 食品工业科技: 1–12[2024-03-11]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023050031>.
- ZHANG L, XIONG S L, LI A L, et al. Effect of frying temperature and time on the quality of small crispy meat [J/OL]. *Science and Technology of Food Industry*: 1–12[2024-03-11]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023050031>.
- [28] 孙晓慧, 陈兰海, 刘娟, 等. 不同焙烤温度和时间对榛子坚果仁品质的影响 [J]. 安徽农业科学, 2021, 49 (21): 184–188.
- SUN X H, CHEN L H, LIU J, et al. Effects of different baking temperature and time on kernel quality of hazelnut nut [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2021, 49(21): 184–188. (in Chinese)
- [29] 毕继才, 林泽原, 李洋, 等. 基于模糊数学综合评价法优化椒麻鸡片调理食品的开发 [J]. 中国调味品, 2021, 46 (2): 93–96, 101.
- BI J C, LIN Z Y, LI Y, et al. Optimization of prepared food of chicken slices with pepper based on fuzzy mathematics compound evaluation method [J]. *China Condiment*, 2021, 46(2): 93–96, 101. (in Chinese)
- [30] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 茶叶感官审评方法: GB/T 23776—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [31] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 茶叶感官审评术语: GB/T 14487—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [32] 邵蕾, 许铭强, 孟新涛, 等. 模糊数学感官评价与响应面法优化法兰西西梅静磁场解冻工艺 [J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13 (22): 7381–7390.
- SHAO L, XU M Q, MENG X T, et al. Optimization of magnetic field

- thawing process of *Prunus domestica* L. by fuzzy mathematical sensory evaluation and response surface method [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2022, 13(22): 7381–7390. (in Chinese)
- [33] 刘士伟, 王成祥, 段盛林, 等. 基于模糊数学感官评价的杂粮馒头配方优化及低 GI 验证 [J]. 食品工业科技, 2022, 43 (21): 375–380.
- LIU S W, WANG C X, DUAN S L, et al. Research on formula optimization and low-GI verification of coarse grain steamed bread based on fuzzy mathematics sensory evaluation [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(21): 375–380. (in Chinese)
- [34] 郑玲燕, 杨婷婷, 王旭, 等. 基于感官评价的常见菜心品质分级方法建立 [J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14 (4): 50–56.
- ZHENG L Y, YANG T T, WANG X, et al. Establishment of quality grading method of common flowering Chinese cabbage based on sensory evaluation [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2023, 14(4): 50–56. (in Chinese)
- [35] 张剑林, 殷娜, 陈言谔, 等. 模糊数学评价法优化驴奶奶啤稳定性的预处理参数及香气成分分析 [J]. 中国酿造, 2021, 40 (1): 75–81.
- ZHANG J L, YIN N, CHEN Y R, et al. Optimization of pretreatment parameters of donkey milk beer stability and aroma components analysis with fuzzy mathematics evaluation [J]. *China Brewing*, 2021, 40(1): 75–81. (in Chinese)
- [36] 王瑞花, 张文娟, 陈健初, 等. 基于模糊数学综合评价法优化红烧肉制作工艺 [J]. 食品工业科技, 2015, 36 (6): 274–278.
- WANG R H, ZHANG W J, CHEN J C, et al. Optimization of braised pork processing based on fuzzy mathematic evaluation [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2015, 36(6): 274–278. (in Chinese)
- [37] 陈林, 林清霞, 张应根, 等. 不同风味类型铁观音乌龙茶香气组成化学模式识别研究 [J]. 茶叶科学, 2018, 38 (3): 253–262.
- CHEN L, LIN Q X, ZHANG Y G, et al. Aroma profiling of tieguanyin oolong tea with different flavor characteristics based on chemical pattern recognition [J]. *Journal of Tea Science*, 2018, 38(3): 253–262. (in Chinese)
- [38] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 茶 游离氨基酸总量的测定: GB/T 8314—2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [39] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 茶叶中茶多酚和儿茶素类含量的检测方法: GB/T 8313—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [40] 罗红玉, 王奕, 吴全, 等. 光质萎凋对不同茶树品种红茶品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2021, 42 (10): 15–21.
- LUO H Y, WANG Y, WU Q, et al. Effect of withering light-wave bands on different varieties black tea quality [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(10): 15–21. (in Chinese)
- [41] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 茶 咖啡碱测定: GB/T 8312—2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [42] 聂攀, 曾辉, 陆军, 等. 焙烤温度对藜麦理化特性的影响 [J]. 食品研究与开发, 2022, 43 (14): 105–111.
- NIE P, ZENG H, LU J, et al. Effects of baking temperature on the physicochemical properties of quinoa [J]. *Food Research and Development*, 2022, 43(14): 105–111. (in Chinese)
- [43] 王丹, 况丹妮, 刘若阳, 等. 焦糖化与美拉德反应中 DDMP、HMF 及糠醛的生成研究 [J]. 食品工业科技, 2022, 43 (12): 100–107.
- WANG D, KUANG D N, LIU R Y, et al. Formation of DDMP, HMF and furfural in caramelization and Maillard reaction [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(12): 100–107. (in Chinese)
- [44] 丛懿洁, 张慧云. 模糊数学法结合响应面法优化木糖醇无花果桑葚果粒酸奶工艺 [J]. 食品研究与开发, 2021, 42 (2): 127–135.
- CONG Y J, ZHANG H Y. Optimization of fermentation process of xylitol fig mulberry fruit yogurt using fuzzy mathematics method combined with response surface method [J]. *Food Research and Development*, 2021, 42(2): 127–135. (in Chinese)
- [45] 舒心, 高彦祥. 茶叶挥发性成分提取及其香气特征分析研究进展 [J]. 食品工业科技, 2022, 43 (15): 469–480.
- SHU X, GAO Y X. Research progress on extraction of volatile compounds and analysis of aroma characteristics in tea [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(15): 469–480. (in Chinese)
- [46] 占琪, 任洪涛, 杨雪梅, 等. 电焙和炭焙武夷岩茶与常规烘焙铁观音香气成分分析 [J]. 云南农业大学学报 (自然科学), 2018, 33 (1): 113–119.
- ZHAN Q, REN H T, YANG X M, et al. Analysis on the aroma components in Wuyi rock tea with baking of electric and charcoal and conventional baking tieguanyin oolong tea [J]. *Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science)*, 2018, 33(1): 113–119. (in Chinese)
- [47] 郑慕蓉, 谢寿桂, 秦荣基, 等. 基于仿宋斗茶与茶叶感官审评的茶叶品质对比评价 [J]. 武夷学院学报, 2024, 43 (1): 54–62.
- ZHENG M R, XIE S G, QIN R J, et al. Analysis on the quality evaluation of the tea in imitating of song dynasty tea competition and modern tea sensory evaluation [J]. *Journal of Wuyi University*, 2024, 43(1): 54–62. (in Chinese)
- [48] 金山峰, 王冬欣, 黄俊仕, 等. 基于计算机视觉的茶叶品质在线评价系统 [J]. 食品工业科技, 2021, 42 (14): 219–225.
- JIN S F, WANG D X, HUANG J S, et al. Online evaluation system of tea quality based on computer vision [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(14): 219–225. (in Chinese)
- [49] 牛帅. 绿茶品质风味嗅觉味觉双通道感知方法研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2021.
- NIU S. Study on olfactory and gustatory dual channel perception method for green tea quality and flavor [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2021. (in Chinese)

(责任编辑: 张梅)