DOI:10.12441/spyswjs.20260322001 [文章编号] 1673-1689(2026)04-0038-13

基于组合赋权与遗传算法的复合藕汁工艺优化及风味分析

赵佳欣[1,2,3,4,5,6] 韩延超[2,3,4,5,6] 陈慧芝[2,3,4,5,6] 刘瑞玲[2,3,4,5,6] 殷 明[2,3,4,5,6] 庞 杰[1]
郜海燕[2,3,4,5,6] 陈杭君[2,3,4,5,6*]

(1. 福建农林大学食品科学学院,福建 福州 350002; 2. 浙江省农业科学院食品科学研究所,浙江 杭州 310021; 3. 浙江省农业科学院全省生鲜食品智慧物流与加工重点实验室,浙江 杭州 310021; 4. 浙江省农业科学院农业农村部蔬菜采后保鲜与加工重点实验室(省部共建),浙江 杭州 310021; 5. 浙江省农业科学院农业农村部果品采后处理重点实验室,浙江 杭州 310021; 6. 浙江省农业科学院中国轻工业果蔬保鲜与加工重点实验室,浙江 杭州 310021)

摘要:【目的】针对藕汁风味单一及易沉淀等问题,研究配方优化工艺及其对风味成分的影响。**【方法】**以藕汁为主料,辅以石斛叶汁、苹果汁、白砂糖及黄原胶。基于单因素试验,利用层次分析法与熵权法构建多指标评价体系;采用响应面法结合遗传算法优化配方,并通过气相离子迁移谱(GC-IMS)、电子鼻及电子舌进行风味表征。**【结果】**复合藕汁的最优配方为:铁皮石斛叶汁添加质量分数24%、黄原胶添加质量分数0.14%、白砂糖添加质量分数6%。在此条件下复合藕汁的综合评分为0.947±0.028,预测值与实测值高度吻合。风味分析显示,与对照组相比,优化组中醛类、酮类等关键挥发性风味物质占比显著增加;电子鼻和电子舌证实优化组香气清新协调,刺激性气味减弱,苦味降低且鲜味与丰富度提升。**【结论】**该配方实现了复合藕汁增香、祛苦及物理稳定性的协同提升。

关键词:藕汁;层次分析法;熵权法;遗传算法;风味;综合评分

Process Optimization and Flavor Analysis for Composite Lotus Root Juice Based on Combined Weighting and Genetic Algorithm

ZHAO Jiaxin[1,2,3,4,5,6] *HAN Yanchao*[2,3,4,5,6] *CHEN Huizhi*[2,3,4,5,6] *LIU Ruiling*[2,3,4,5,6] *YIN Ming*[2,3,4,5,6]
PANG Jie[1] *GAO Haiyan*[2,3,4,5,6] *CHEN Hangjun*[2,3,4,5,6*]

(1. College of Food Science, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 2. Institute of Food Science, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310021, China; 3. Zhejiang Key Laboratory of Intelligent Food Logistic and Processing, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310021, China; 4. Key Laboratory of Postharvest Preservation and Processing of Vegetables (Co-construction by Ministry and Province), Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310021, China; 5. Key Laboratory of Fruit Postharvest Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310021, China; 6. Key Laboratory of Fruit and Vegetable Preservation and Processing of China Light Industry, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310021, China)

Abstract: [**Objective**] This study aimed to optimize the formulation and investigate the flavor profile of composite lotus root juice, addressing the limitations of monotonous flavor and physical instability (precipitation).

基金项目:国家特色蔬菜产业技术体系项目(CARS-24-E-01);浙江省"三农九方"科技协作计划项目(2024SNJF034)。
通信作者:陈杭君(1976—),男,博士,研究员,博士研究生导师,主要从事农产食品采后处理与利用研究。E-mail:spshangjun@sina.com
收稿日期:2026-03-22 **修回日期:**2026-04-08

[**Method**] The composite lotus root juice was prepared with lotus root juice as the primary ingredient and supplemented with *Dendrobium officinale* leaf juice, apple juice, white granulated sugar, and xanthan gum. On the basis of single-factor experiments, a multi-index evaluation system was constructed through the analytic hierarchy process and the entropy weighting method. The formulation was optimized *via* response surface methodology coupled with a genetic algorithm. Furthermore, multi-dimensional flavor characterization was performed by gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS), electronic nose, and electronic tongue. [**Result**] The optimal formulation for the composite lotus root juice was composed of 24% (mass fraction) *Dendrobium officinale* leaf juice, 0.14% (mass fraction) xanthan gum, and 6% (mass fraction) white granulated sugar. The comprehensive sensory score of the composite lotus root juice prepared with the optimal formulation reached 0.947±0.028, with a high degree of consistency between the predicted and experimental values. Flavor analysis indicated that compared to the control group, the optimized formulation exhibited significant increases in the proportions of key volatile flavor compounds, particularly aldehydes and ketones. Electronic sensor and electronic tongue confirmed that the optimized group possessed a fresh and harmonious aroma with reduced pungent odors. Additionally, bitterness was effectively suppressed, while umami and richness were significantly enhanced. [**Conclusion**] The optimized formulation achieves the synergistic improvement in aroma enhancement, bitterness reduction, and physical stability.

Keywords: lotus root juice; analytic hierarchy process; entropy weight method; genetic algorithm; flavor; comprehensive score

莲藕是我国特色的水生蔬菜，富含蛋白质、维生素、黄酮等营养物质[1-5]，兼具清热生津、健脾养胃等功效[6-7]，是复合饮料的理想基底。苹果酸甜适口，含果胶、维生素C等，可改善风味与营养[8-9]。铁皮石斛叶为铁皮石斛副产物，富含多糖和生物碱等活性成分，具有抗氧化及免疫调节潜力[10-11]。因此，将三者复合利用对于提升资源利用效率及开发兼具营养与风味的饮品具有现实意义。

然而，复合藕汁在加工与贮藏过程中普遍存在稳定性差和风味不足的问题。在加工过程中，莲藕组织中多酚类物质在酶促作用下易发生褐变，导致色泽劣变及风味下降[12]；同时，体系中胶体颗粒及不溶性组分易聚集沉降，进而引发分层现象，显著影响产品外观品质与货架期稳定性[13]。此外，该类复合体系涉及原料配比、稳定剂添加及工艺参数等多因素协同作用，同时需兼顾感官品质、营养保持与理化稳定性等多维指标，传统单因素或经验优化方法难以实现整体最优。

针对多指标优化问题，层次分析法（analytic hierarchy process，AHP）可以对评价指标进行结构化分解和主观赋权[14]；熵权法（entropy weight method，EWM）则能基于数据离散程度确定权重，两者结合可提升综合评价的可靠性[15-17]。在工艺优化方面，响应面法（response surface methodology，RSM）可建立工艺参数与综合品质之间的数学模型，但易受局部最优限制。而遗传算法（genetic algorithm，GA）具备全局寻优能力[18]，可弥补其不足。基于此，以莲藕为主体，配合铁皮石斛叶和苹果开发复合藕汁，构建AHP-EWM综合评价模型，并结合RSM与GA进行多目标优化；在此基础上对优化产品的风味特征进行分析，以系统评价工艺优化对产品品质的影响。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

铁皮石斛叶：浙江寿仙谷医药股份有限公司；莲藕：杭州湾里糖莲藕专业合作社；苹果：浙江省杭州市上城区有果儿果业经营部；黄原胶：河南高萃生物科技有限公司；硫酸、盐酸、苯酚：上海凌峰化学试剂有限公司；NaOH：上海麦克林生化科技有限公司。

色差仪：CM-5型，日本Konica Minolta公司；数显式手持糖度仪：PAL-1型，日本Atago公司；电子舌味觉分析系统：SA-402B型，日本INSENT公司；电子鼻：FOX3000型，法国Alpha MOS公司；气相离子迁移谱：FlavourSpec®型，德国G.A.S.公司；静态顶空自动进样装置：PAL3-RSI系列II型，瑞士CTC Analytics AG公司。

1.2 方法

1.2.1 莲藕复合果蔬汁制备工艺流程

莲藕、苹果、铁皮石斛叶前处理→去核→切片→打浆→过滤→调配→装罐→灭菌→莲藕复合果蔬汁。

1.2.2 样品前处理

莲藕去皮切块榨汁，70 ℃糊化 20 min 后过滤；苹果去皮、去核，盐水浸泡后榨汁并于 70 ℃灭酶；铁皮石斛叶榨汁过滤，以藕汁为基准，复配后于 85 ℃巴氏杀菌 10 min 制得成品。

1.2.3 单因素试验设计

除考察因素外，其余因素保持固定。以苹果汁添加质量分数 25%、铁皮石斛叶汁添加质量分数 25%、黄原胶添加质量分数 0.10%、白砂糖添加质量分数 4% 为基础配方，分别改变苹果汁添加质量分数（15%、20%、25%、30%、35%），铁皮石斛叶汁添加质量分数（15%、20%、25%、30%、35%），黄原胶添加质量分数（0、0.05%、0.10%、0.15%、0.20%），白砂糖添加质量分数（0、2%、4%、6%、8%）进行单因素试验，以多糖质量浓度、沉淀率、色泽、固酸比及感官评分为指标，采用 AHP-EWM 赋权计算综合得分。

1.2.4 遗传算法优化试验

采用 Box-Behnken 响应面模型并结合 Python 构建 GA 进行求解。GA 参数设置为：种群规模 200、交叉概率 0.8、变异概率 0.05、迭代 300 代。以铁皮石斛叶汁添加质量分数 20%（上限 30%）、黄原胶添加质量分数 0.10%（上限 0.20%）、白砂糖添加质量分数 4%（上限 8%）为初始值，综合评分作为适应度函数。通过精英保留与轮盘赌选择、交叉和变异完成迭代更新，最终输出全局最优适应度及其对应因素组合。

1.2.5 莲藕铁皮石斛复合汁品质指标的测定

色泽用色差仪检测，以 L^*、a^*、b^* 值表征；可溶性固形物用数显糖度计检测；总酸按 GB 12456—2021 中的方法测定，并计算固酸比；离心沉淀率参考肖丹虹等[19]的方法测定；多糖采用苯酚-硫酸法测定[11]。

1.2.6 感官评价

参照张卓等[20]的方法，由 20 名经过培训的食品专业学生组成评定小组，遵守饮食禁忌后，根据表 1 对不同处理的复合藕汁进行感官评分。

表 1 感官评价标准

Table 1 Sensory evaluation criteria

因素	评分标准	得分/分
色泽	色泽均匀，呈自然深绿色	7~9
	色泽较均匀，呈黄绿色	4~6
	颜色偏黄色，不均匀或有杂色	0~3
气味	香气协调，具有莲藕清香、苹果果香及铁皮石斛淡香	7~9
	香气较协调，复合香气略显不足或轻微单一	4~6
	香气较淡或略有异味	0~3
口感	口感顺滑细腻，柔和协调	7~9
	口感略显粗糙或发涩	4~6
	口感粗糙，令人不适	0~3
甜度	甜度适中，恰到好处	7~9
	甜度稍淡或稍浓	4~6
	甜度不足，有生涩、明显苦味，或过甜发腻	0~3
形态	无分层、无沉淀，光泽自然	7~9
	轻微沉淀或分层但不影响整体感观沉淀较多，分层明显	4~6
		0~3

1.2.7 风味分析

为进一步评价优化配方对复合藕汁整体风味品质的影响，系统解析其挥发性风味物质及味觉特征的变化，作者设置 3 组样品进行对比分析。无石斛对照组（dendrobium-free control group，DF 组）是在最优配方基础上不添加铁皮石斛叶汁的对照样品（黄原胶添加质量分数 0.14%、白砂糖添加质量分数 6%）；最优配方组（optimal formulation group，OPT 组）采用 RSM-GA 耦合寻优确定理论最佳参数组合（铁皮石斛叶汁添加质量分数 24%、黄原胶添加质量分数 0.14%、白砂糖添加质量分数 6%）；邻近验证组（near-optimal points，NOP 组）在最优配方基础上对因素水平进行小幅调整（铁皮石斛叶汁添加质量分数 27%、黄原胶添加质量分数 0.14%、白砂糖添加质量分数 6%），其余组分保持一致。采用电子舌、电子鼻及 GC-IMS 对上述样品进行多维度风味表征。

1）电子舌分析：参考 Liu 等[21]的方法进行测定。采用 C00、AE1、CA0、CT0 和 AAE 传感器，分别进行苦、涩、酸、咸、鲜的测定。测定前，传感器需要依次在清洗液和 2 种参比液中完成洗涤和归零。检测时记录 30 s 样品先味值以及清洗后的 30 s 回味值。每份样本重复 4 次，剔除初始异常值后取平均数。

2）电子鼻分析：参考卢可燕等[22]的方法并稍加修改。5 g 样液装入 50 mL 离心管，在 60 ℃下平衡富集 30 min。通过顶空取样模式进行检测，设定传感器自清洗时间 60 s，进样流量 400 mL/min，进样时间 5 s。系统每 1 s 采样一次，总分析时长 80 s。

3）GC-IMS分析：参考彭择等[23]的方法并稍加修改。取5 mL复合藕汁置于20 mL顶空瓶中密封。孵化温度50 ℃、时间15 min，振荡转速500 r/min，进样针温度85 ℃，进样量500 μL。分析采用高纯N_2作为载气和漂移气（漂移管温度45 ℃），柱温设为60 ℃，总运行时间30 min。载气流速首先从2 mL/min保持2 min，8 min内升至10 mL/min，随后12 min线性升至100 mL/min，并保持10 min。

1.2.8　AHP-EWM法计算权重

结合饮料产品品质评价特点及相关研究报道，并经食品专业人员讨论确定指标重要性顺序为：感官评价>固酸比>色泽=沉淀率>多糖质量浓度。采用1~9标度法进行两两比较评分，建立判断矩阵，见表2。

表2　判断矩阵评分及一致性检验

Table 2　Scoring of judgment matrix and consistency test

指标	多糖质量浓度	沉淀率	色泽	固酸比	感官评价	特征向量	λ_{max}	C_I	C_R
多糖质量浓度	1	1/3	1/3	1/5	1/7	0.05			
沉淀率	3	1	1	1/2	1/4	0.13			
色泽	3	1	1	1/2	1/4	0.13	5.031 0	0.007 8	0.006 9
固酸比	5	2	2	1	1/2	0.24			
感官评价	7	4	4	2	1	0.45			

采用方根法计算AHP权重。依据公式（1）~（2）计算的判断矩阵求得特征向量并进行归一化处理，再根据公式（3）~（4）计算矩阵的最大特征值λ_{max}和一致性比值C_R。当C_R<0.1时表明矩阵数值设置以及权重系数可靠。最后根据式（5）确定各评价指标的权重值。

$$\overline{\boldsymbol{W}_i}=5\sqrt{\prod_{j=1}^{5}b_{ij}}\quad i=1,2,3,4,5 \tag{1}$$

式中：

$\overline{\boldsymbol{W}_i}$——归一化前多糖质量浓度、沉淀率、色泽、固酸比、感官评价的权重向量元素；

b_{ij}——判断矩阵内第i行指标对第j列指标的重要程度。

$$\boldsymbol{W}_i=\frac{\overline{\boldsymbol{W}_i}}{\sum_{i=1}^{5}\overline{\boldsymbol{W}_i}}\quad i=1,2,3,4,5 \tag{2}$$

式中：

$\boldsymbol{W}_i$——归一化后多糖质量浓度、沉淀率、色泽、固酸比、感官评价的权重向量元素；

$\overline{\boldsymbol{W}_i}$——归一化前多糖质量浓度、沉淀率、色泽、固酸比、感官评价的权重向量元素。

$$\lambda_{max}=\sum_{i=1}^{5}\frac{(\boldsymbol{BW})_i}{5\boldsymbol{W}_i}\quad i=1,2,3,4,5 \tag{3}$$

式中：

λ_{max}——判断矩阵的最大特征值；

$\boldsymbol{B}$——判断矩阵；

$\boldsymbol{W}$——归一化后多糖质量浓度、沉淀率、色泽、固酸比、感官评价的权重向量；

$\boldsymbol{W}_i$——归一化后多糖质量浓度、沉淀率、色泽、固酸比、感官评价的权重向量元素。

$$C_R=\frac{\lambda_{max}-5}{4\times R_I} \tag{4}$$

式中：

C_R——一致性比值；

λ_{max}——判断矩阵的最大特征值；

R_I——随机一致指标。

$$\boldsymbol{W}^T=\left[W_1,W_2,\cdots W_j\right] \tag{5}$$

式中：

W_j——第j个指标的层次分析法权重；

$\boldsymbol{W}^T$——归一化后多糖质量浓度、沉淀率、色泽、固酸比、感官评价的权重向量的转置。

1.2.9　熵权法确定指标权重

共设置20个评价方案、5个评价指标，构建原始矩阵$\boldsymbol{X}=(x_{ij})_{20\times5}$，首先通过公式（6）~（8）对数据进行归一化处理，其中多糖质量浓度、色泽、感官评价为正向指标，沉淀率为负向指标，固酸比为适度指标，x_0为21.9[24]。

$$r_{ij}^{+}=\frac{x_{ij}-x_j^{min}}{x_j^{max}-x_j^{min}} \tag{6}$$

式中：

r_{ij}^{+}——第i次试验时第j个正向指标的归一化值；

x_{ij}——第i次试验时第j个指标的值；

x_j^{min}——该组原始数值中的极小值；

x_j^{max}——该组原始数值中的极大值。

$$r_{ij}^{-}=\frac{x_j^{max}-x_{ij}}{x_j^{max}-x_j^{min}} \quad (7)$$

式中：

r_{ij}^{-}——第 i 次试验时第 j 个负向指标的归一化值；

x_{ij}——第 i 次试验时第 j 个指标的值；

x_j^{min}——该组原始数值中的极小值；

x_j^{max}——该组原始数值中的极大值。

$$r_{ij}^{0}=1-\frac{\left|x_{ij}-x_0\right|}{\max\left|\left(x_j^{max}-x_0\right),\left(x_0-x_j^{min}\right)\right|} \quad (8)$$

式中：

r_{ij}^{0}——第 i 次试验时第 j 个适度指标的归一化值；

x_{ij}——第 i 次试验时第 j 个指标的值；

x_j^{min}——该组原始数值中的极小值；

x_j^{max}——该组原始数值中的极大值；

x_0——适度指标的最适值。

再通过公式（9）进行标准化处理，依据公式（10）~（11）计算信息熵及各指标的熵权。

$$u_{ij}=\frac{r_{ij}}{\sum_{i=1}^{20}r_{ij}} \quad (9)$$

式中：

u_{ij}——第 i 个对象中第 j 个指标的标准化值；

r_{ij}——第 i 个对象中第 j 个指标的归一化值。

$$e_j=-\frac{1}{\ln 20}\sum_{i=1}^{20}u_{ij}\ln u_{ij} \quad (10)$$

式中：

u_{ij}——第 i 个对象中第 j 个指标的标准化值；

e_j——当 $u_{ij}=0$，$u_{ij}\ln u_{ij}=0$ 时，第 j 个指标的信息熵。

$$A_j=\frac{1-e_j}{5-\sum_{j=1}^{5}e_j} \quad (11)$$

式中：

e_j——当 $u_{ij}=0$，$u_{ij}\ln u_{ij}=0$ 时，第 j 个指标的信息熵；

A_j——熵权。

1.2.10 综合权重的确定

采用 AHP-EWM 综合赋权法，通过公式（12）~（13）计算各指标的综合权重。

$$d_j=aA_j+bW_j \quad (12)$$

式中：

d_j——组合赋权后的综合权重；

A_j——熵权；

W_j——AHP 权重；

a、b——比例系数，且 $a+b=1$，本研究取 $a=b=0.5$。

$$Z=\sum_{i=1}^{20}r_{ij}\times d_j \quad (13)$$

式中：

Z——综合评分；

r_{ij}——第 i 个对象中第 j 个指标的归一化值；

d_j——组合赋权后的综合权重。

1.3 数据处理

采用 Excel 2020 进行数据整理，Design-Expert 13 完成响应面设计，Origin 2024 进行绘图与统计分析，并结合 Python 分别绘制 PCA 和 GA 图。

2 结果与讨论

2.1 单因素试验结果

苹果汁富含有机酸[25]和芳香成分，可用来调节糖酸比[26]并掩盖铁皮石斛叶草腥味。如表 3 所示，当苹果汁添加质量分数低于 25% 时，可能是由于有机酸和芳香成分不足，对铁皮石斛叶草腥味的掩盖效果有限，复合藕汁整体风味偏淡，草腥味较为明显，感官评分较低；当添加质量分数高于 25% 时，沉淀率和感官接受度的改善效果趋于平缓，综合评分为 0.421~0.520，无明显提升。故确定苹果汁添加质量分数为 25%。

铁皮石斛叶汁富含多糖、黄酮等活性成分[27]，适度添加有助于风味和营养的提升，但随着其添加质量分数的增加，体系中酚类物质质量分数升高，易引发色泽加深和酸涩感增强，从而降低感官接受度。因此，综合评分随铁皮石斛叶汁添加质量分数增加呈先升后降趋势，当铁皮石斛叶汁添加质量分数为 25% 时达到峰值，超过该水平则褐变明显、口感偏涩[28]，接受度降低，故选铁皮石斛叶汁添加质量分数 20%、25%、30% 为响应面水平。

黄原胶可通过与多糖和蛋白质相互作用形成网络结构[29]，从而有效减少淀粉、纤维颗粒的沉降，改善复合藕汁的悬浮稳定性，减少沉淀现象的发生[30]。当添加质量分数达到 0.15% 时，复合藕汁的稳定性得到显著改善，沉淀率下降，分层现象减少；过量则口感黏腻、厚重，并可能影响苹果汁和莲藕的香气释放，导致风味品质下降[31]。故选黄原胶添加质量分数 0.10%、0.15%、0.20% 为响应面优化水平。

表3　单因素试验指标与权重值

Table 3　Indicators and weighting values of single-factor experiments

优化因素	添加质量分数/%	多糖质量浓度/(mg/mL)	沉淀率/%	色泽	感官评价/分	固酸比	综合评分
苹果汁	15	0.59	0.46	0.37	0.65	0.37	0.455±0.033^{ab}
	20	0.51	0.41	0.40	0.77	0.36	0.471±0.036^{ab}
	25	0.51	0.53	0.36	0.86	0.42	0.520±0.011^{a}
	30	0.44	0.51	0.34	0.72	0.36	0.454±0.020^{ab}
	35	0.38	0.67	0.34	0.52	0.33	0.421±0.020^{b}
铁皮石斛叶汁	15	0.50	0.72	0.58	0.63	0.41	0.531±0.015^{c}
	20	0.72	0.69	0.51	0.77	0.44	0.586±0.017^{b}
	25	1.00	0.68	0.46	1.00	0.48	0.684±0.015^{a}
	30	0.74	0.52	0.28	0.67	0.54	0.525±0.023^{c}
	35	0.53	0.54	0.00	0.52	0.33	0.368±0.010^{d}
黄原胶	0	0.38	0.00	0.88	0.00	0.31	0.282±0.009^{d}
	0.05	0.92	0.60	0.63	0.48	0.38	0.533±0.018^{b}
	0.10	0.94	0.83	0.48	0.70	0.47	0.617±0.039^{a}
	0.15	0.87	1.00	0.51	0.95	0.41	0.691±0.040^{a}
	0.20	0.20	0.29	0.39	0.62	0.35	0.384±0.034^{c}
白砂糖	0	0.00	0.43	0.41	0.21	0.00	0.204±0.019^{d}
	2	0.24	0.51	0.42	0.53	0.12	0.359±0.031^{c}
	4	0.53	0.68	0.49	1.00	0.36	0.601±0.020^{b}
	6	0.67	0.96	1.00	0.96	0.98	0.711±0.030^{a}
	8	0.83	0.75	0.18	0.64	0.75	0.572±0.047^{b}
AHP法权重		0.05	0.13	0.13	0.45	0.24	
EWM法权重		0.22	0.16	0.22	0.17	0.23	
AHP-EWM法权重		0.14	0.14	0.18	0.31	0.23	

注：不同小写字母表示同一因素的不同组别间差异显著（P<0.05）。

白砂糖可缓冲铁皮石斛叶汁及苹果汁带来的酸涩味，改善复合藕汁的口感并提升感官接受度。结果表明，综合评分随添加质量分数呈先升后降趋势，白砂糖质量分数6%时达到最大值，此时酸甜协调，既能有效掩盖酸涩味，又能保持原料特色风味，同时沉淀率较低、色泽均一。当白砂糖质量分数高于6%时，糖度过高导致口感甜腻，接受度降低[32]，且可能通过提高体系黏度以及改变组分间相互作用促使颗粒沉降，略掩盖功能性风味；当白砂糖质量分数低于6%时，酸涩味调节不足，口感偏酸。综合分析确定白砂糖添加质量分数4%、6%、8%为响应面优化水平。

2.2　响应面试验结果与分析

2.2.1　回归方程方差分析

根据单因素试验结果，将苹果汁质量分数固定为25%，选取铁皮石斛叶汁、黄原胶和白砂糖的添加质量分数为响应面因素，以综合评分为指标开展三因素三水平优化试验，因素与水平见表4。响应面优化试验结果见表5。对试验数据进行拟合得到响应面模型的回归方程：Y=0.948 4−0.012 0A−0.029 1B−0.013 6C+0.004 2AB+0.003 3AC−0.019 0BC−0.044 7A^2−0.114 5B^2−0.085 9C^2。通过对试验数据进行方差分析，二次回归模型的P<0.000 1，失拟项的P值为0.071 7（>0.05），结果见表6。这表明模型对试验数据的拟合程度良好[33]，试验误差极小，可以用于响应值的预测与分析。模型的确定系数R^2=0.994 3，调整系数R^2_{adj}=0.987 0，说明该模型能解释98.70%响应值的变化，具有较高的预测准确性。此外，根据F值分析，各单因素对综合评分的影响均为极显著，且影响程度为黄原胶添加质量分数>白砂糖添加质量分数>铁皮石斛叶汁添加质量分数。

表4　响应面试验因素水平设计

Table 4　Factors and levels of response surface test

水平	因素		
	铁皮石斛叶汁添加质量分数（A）/%	黄原胶添加质量分数（B）/%	白砂糖添加质量分数（C）/%
−1	20	0.10	4
0	25	0.15	6
1	30	0.20	8

表5 响应面试验设计与结果

Table5 Response surface methodology design and test results

组别	因素			综合评分
	A	*B*	*C*	
1	25	0.10	8	0.776
2	20	0.15	8	0.822
3	25	0.15	6	0.955
4	30	0.10	6	0.802
5	20	0.10	6	0.832
6	30	0.15	8	0.802
7	25	0.15	6	0.940
8	25	0.10	4	0.781
9	25	0.15	6	0.952
10	30	0.20	6	0.755
11	25	0.20	8	0.677
12	25	0.15	6	0.949
13	25	0.20	4	0.758
14	20	0.20	6	0.768
15	25	0.15	6	0.946
16	30	0.15	4	0.807
17	20	0.15	4	0.840

表6 响应面试验方差分析表

Table6 Response surface test variance analysis table

方差来源	平方和	自由度	均方	*F*值	*P*值	显著性
模型	0.115 1	9	0.012 8	136.21	<0.000 1	**
A	0.001 2	1	0.001 2	12.27	0.009 9	**
B	0.006 8	1	0.006 8	72.31	<0.000 1	**
C	0.001 5	1	0.001 5	15.82	0.005 3	**
AB	0.000 1	1	0.000 1	0.77	0.409 4	
AC	0.000 0	1	0.000 0	0.45	0.523 8	
BC	0.001 4	1	0.001 4	15.39	0.005 7	**
A^2	0.008 4	1	0.008 4	89.64	<0.000 1	**
B^2	0.055 2	1	0.055 2	587.67	<0.000 1	**
C^2	0.031 1	1	0.031 1	331.43	<0.000 1	**
残差	0.000 7	7	0.000 1			
失拟项	0.000 5	3	0.000 2	5.24	0.0717	
纯误差	0.000 1	4	0.000 0			
总值	0.115 7	16				

注：“*”为差异显著（$P<0.05$）；“**”为差异极显著（$P<0.01$）。

2.2.2 响应面分析

如图1所示，铁皮石斛叶汁添加质量分数、黄原胶添加质量分数和白砂糖添加质量分数对综合评分的响应面图均呈开口向下的曲面，等高线呈椭圆形分布，说明各因素均存在显著二次效应。*AB*与*AC*交互作用的曲面变化较为平缓，等高线图形规则，表明交互影响较弱；而*BC*组合的响应面起伏明显、等高线拉伸程度较大，表明黄原胶与白砂糖之间存在显著交互作用。

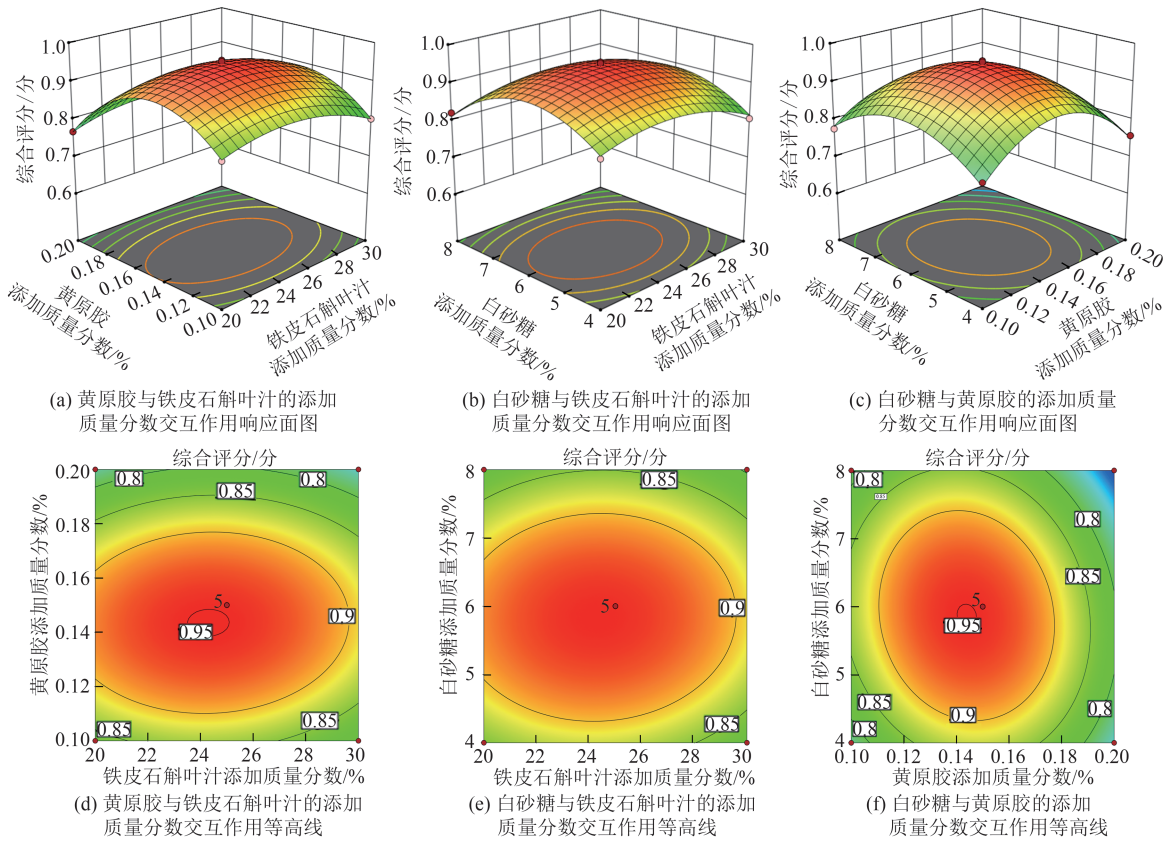
糖与增稠剂具有协同增稠效应[34]，在适宜范围内，提高白砂糖添加质量分数可增加可溶性固形物含量，通过氢键作用促进黄原胶分子链缠结和网络结构形成，从而增强体系黏度与均一性，改善口感与稳定性，提高综合评分。但当两者添加质量分数过高时，体系黏度过大，易出现发黏及甜感失衡等问题，反而降低感官接受度。

2.3 遗传算法寻优预测结果

利用遗传算法对响应面模型进行全局寻优，其进化曲线如图2所示。最佳适应度在迭代初期迅速增加，随后进入平台期并稳定在0.951 5附近。同时，群体平均适应度随迭代次数增加不断提升，在迭代至约260次后，平均适应度与最佳适应度的差值缩小至0.001以内；至290次迭代后与最佳适应度趋于一致，这说明算法具有良好的收敛性和稳定性[35]，能成功迭代寻优到最佳配方，即铁皮石斛叶汁添加质量分数为24.31%，黄原胶添加质量分数为0.14%，白砂糖添加质量分数为5.87%，该条件下的综合评分为0.951 5。

2.4 验证试验

基于RSM-GA构建优化模型，作者预测最优配方的综合评分，并通过验证试验加以检验。模型预测结果显示，响应面法的预测最优配方为铁皮石斛叶汁添加质量分数24.29%、黄原胶添加质量分数0.14%、白砂糖添加质量分数5.86%，其预测综合评分为0.951 5。遗传算法的预测最优配方为铁皮石斛叶汁添加质量分数24.31%、黄原胶添加质量分数0.14%、白砂糖添加质量分数5.87%，预测综合评分同样为0.951 5。考虑到实际生产过程中的可操作性，对理论最优参数组合适度修正为铁皮石斛叶汁添加质量分数24%、黄原胶添加质量分数0.14%、白砂糖添加质量分数6%，并开展验证试验。验证结果显示，修正条件下响应面法与遗传算法的实测综合评分分别为0.947±0.019与0.947±0.028，与预测值0.951 5的偏差均为0.47%，差异较小，表明所建立的RSM-GA模型具有较好的预测精度与可靠性。



(a) 黄原胶与铁皮石斛叶汁的添加质量分数交互作用响应面图　(b) 白砂糖与铁皮石斛叶汁的添加质量分数交互作用响应面图　(c) 白砂糖与黄原胶的添加质量分数交互作用响应面图

(d) 黄原胶与铁皮石斛叶汁的添加质量分数交互作用等高线　(e) 白砂糖与铁皮石斛叶汁的添加质量分数交互作用等高线　(f) 白砂糖与黄原胶的添加质量分数交互作用等高线

图 1　各因素交互作用对复合藕汁综合评分的响应面图和等高线图

Fig. 1　Response surface and contour plots of the interactive effects between various factors on the comprehensive score of composite lotus root juice

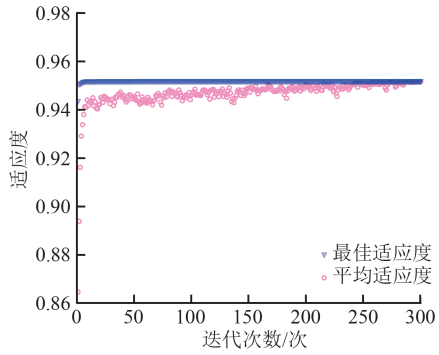


图 2　GA 迭代寻优结果

Fig. 2　Iterative optimization results of GA

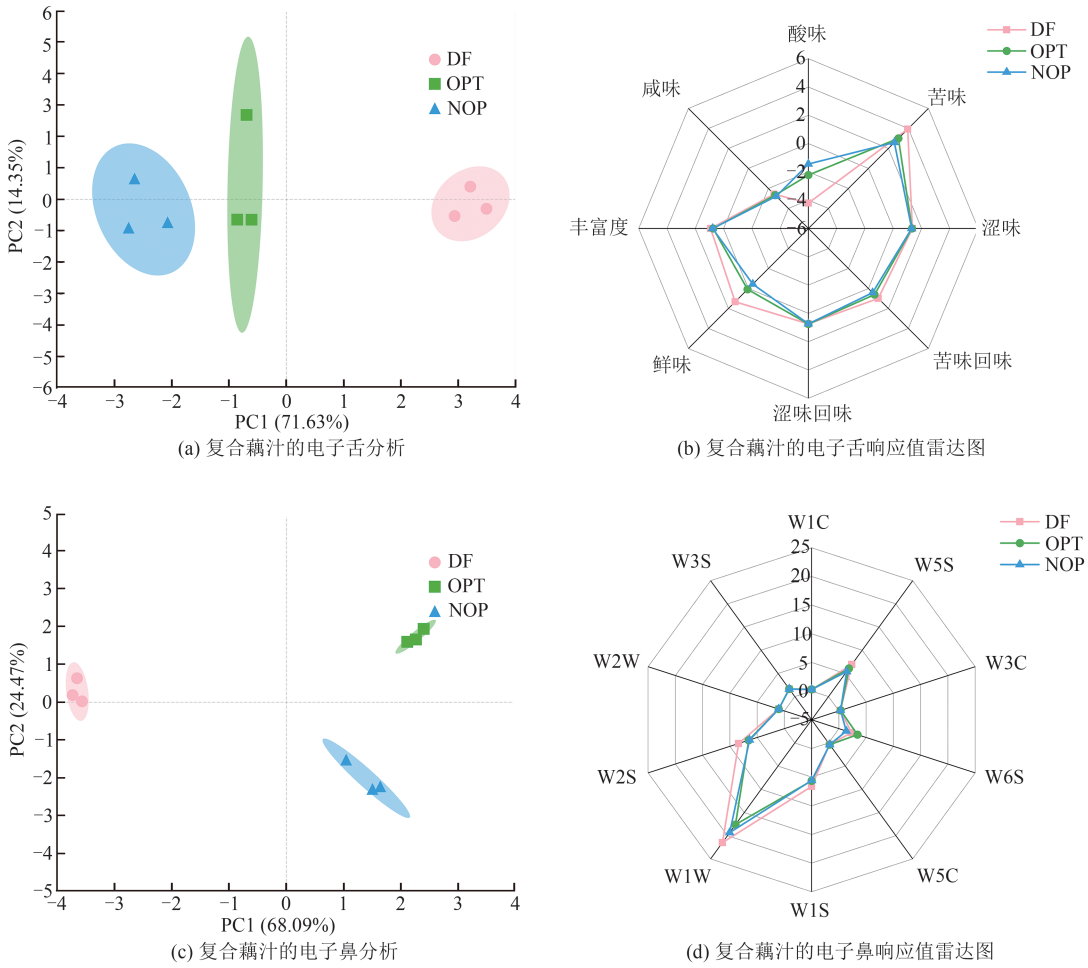
2.5　风味分析

2.5.1　电子舌分析结果

采用电子舌对 DF 组、OPT 组和 NOP 组进行主成分分析，结果见图 3。各处理样品在整体味觉特征上差异明显。PC1 和 PC2 的方差贡献率分别为 71.63% 和 14.35%，累计解释率达 85.98%，表明前 2 个主成分已能较全面反映味觉信息。图中 3 组复合藕汁分布清晰、无重叠，说明电子舌对不同配方样品具有良好的区分能力。结合雷达图分析，3 组样品的整体味觉轮廓较为相似，表明优化配方成功保留了复合藕汁的原有风味特征。但在具体味觉属性上存在一定差异，其中，OPT 组在各味觉指标上的分布更为均衡，未出现单一味感的明显偏高或偏低，整体风味协调性优于 DF 组和 NOP 组。与 DF 组相比，OPT 组苦味及苦味回味响应值未显著升高，仍处于较低水平，说明经响应面与遗传算法优化后，铁皮石斛叶汁的加入未引起明显苦味累积。与 NOP 组相比，OPT 组酸味强度更加适中，同时在鲜味上保持较高水平。总体来看，OPT 组在引入功能性原料的同时，实现了对苦味和酸味的有效调控，显著提升了复合果蔬汁的整体风味品质，验证了优化策略在感官层面的可行性。

2.5.2　电子鼻分析结果

电子鼻主成分分析结果表明，OPT 组在图中聚类最为紧密、置信椭圆范围最小，表明其气味特征重复性好、工艺稳定性强；同时在 PC2 轴上与 NOP 组明显分离，说明其在部分关键挥发性成分上具有差异



(a) 复合藕汁的电子舌分析　(b) 复合藕汁的电子舌响应值雷达图

(c) 复合藕汁的电子鼻分析　(d) 复合藕汁的电子鼻响应值雷达图

图 3　复合藕汁风味特征的多维感知差异及判别分析

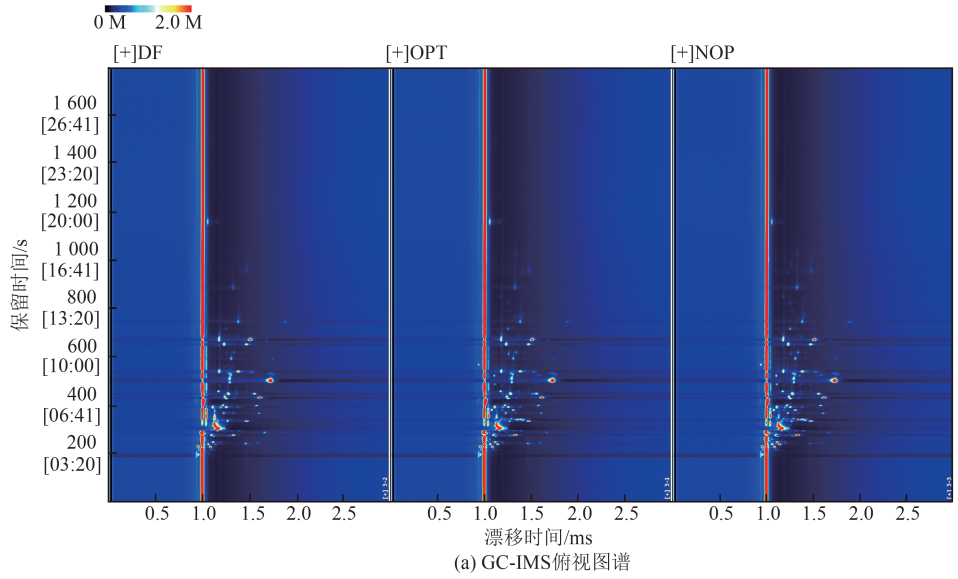
Fig. 3　Multidimensional sensory differences and discriminant analysis of flavor characteristics of composite lotus root juice

化优势，形成了独特且稳定的气味指纹。结合雷达图分析可见，OPT 组在 W1W 和 W2W 传感器上的响应值低于 DF 组，表明优化后有效减弱了硫味及刺激性气味，使整体香气更加清新协调；在 W1S 和 W3S 等与烷类、脂肪族化合物相关的传感器上则保持稳定响应，既避免香气失衡，又维持了果蔬汁应有的自然果香与层次感，体现出较优的气味品质与应用潜力。

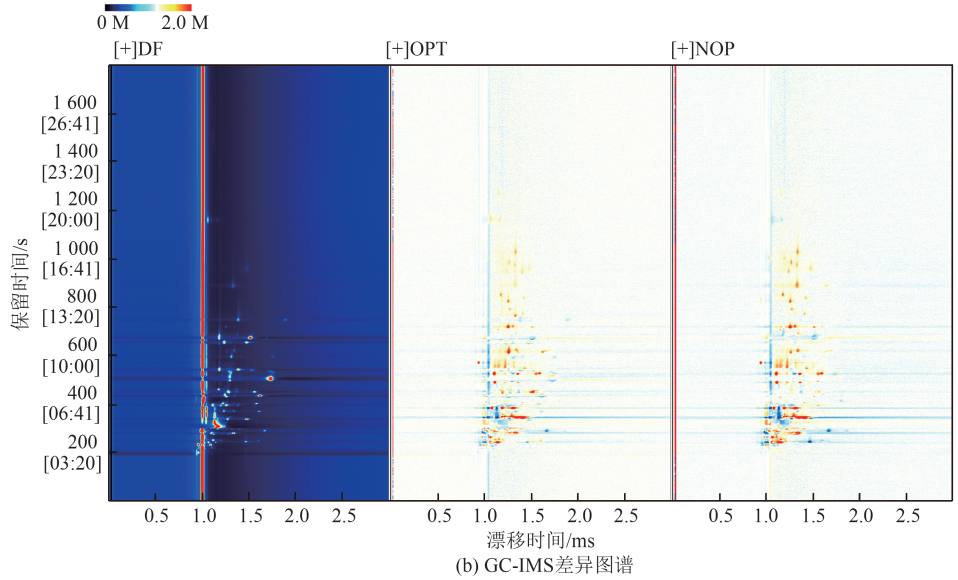
2.5.3　GC-IMS 分析结果

采用 GC-IMS 对配方优化前后复合果蔬汁的挥发性成分进行动态分析，结果见图 4。DF 组信号主要分布于保留时间 200~400 s 区域，整体强度较低；OPT 组与 NOP 组信号斑点明显增多，并扩展至 400~800 s、漂移时间 1.10~1.80 ms，说明铁皮石斛叶汁的加入丰富了挥发性物质组成。以 DF 组为参照构建差异图谱，红色斑点表示 OPT 组或 NOP 组中升高的成分，蓝色为降低或消失的组分[36]。在 200~600 s、1.25~1.60 ms 核心区域，OPT 组红色信号最为密集且响应强度最高，表明优化后醇类、醛类及部分酯类物质增加；蓝色信号可能与低沸点成分挥发或多酚与基质相互作用导致的信号减弱有关。

如图 5 所示，3 组样品中酯类和醛类为主要挥发性成分，总占比超过 70%。其中酯类占比 47%~50%，赋予产品果香和甜香[37]；醛类占比 23%~26%，因阈值低[38]，对整体香气贡献显著。与 DF 组相比，OPT 组酯类占比略降，醛类占比升高，酮类占比由约 2% 增至 5%，酸类保持适中，体现出核心成分增强且比例协调的优化特征；与 NOP 组相比，OPT 组在具体化合物组成上更为合理，潜在异味成分减少。铁皮石斛叶汁的加入促进了醛类的增加，这可能与引入绿叶气味挥发物及脂质氧化生成短链醛有关[39]。同时其活性成分可能抑制醛向醇的转化，使醛类得到保留。酯类多样性提升增强了产品香气层次感，酮类增加改善了青草气息，醇类适度降低则避免刺激性增强。



(a) GC-IMS俯视图谱



(b) GC-IMS差异图谱

图 4　复合藕汁中挥发性风味物质的GC-IMS分析

Fig. 4　GC-IMS analysis of volatile flavor compounds in composite lotus root juice

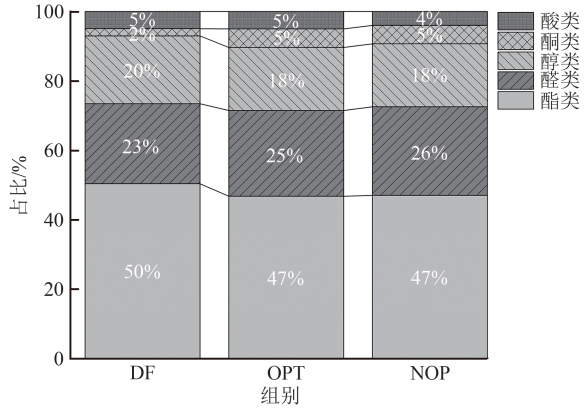


图 5　复合藕汁中各类挥发性化合物占比变化

Fig. 5　Changes in the proportions of various volatile compounds in composite lotus root juice

2.6　相关性分析

利用皮尔逊相关性分析进一步阐明复合藕汁中挥发性组分与电子舌及电子鼻响应的关系，结果见图6。醛类和酮类物质与苦味、涩味以及电子鼻W1W、W2W（对硫化物敏感）传感器均呈现显著负相关，表明醛酮类物质可能有助于减弱体系中的苦涩感并抑制硫类刺激性气味。酯类与W1C、W3C及W5C等对芳香族和极性分子敏感的传感器呈显著负相关，表明其在一定程度上可能掩蔽杂味信号；但酯类与苦味、涩味指标呈正相关，说明其过量积累可能同步增强感官上的苦涩感，导致整体风味变得冗杂且缺乏协调性。综上，不同挥发性组分对

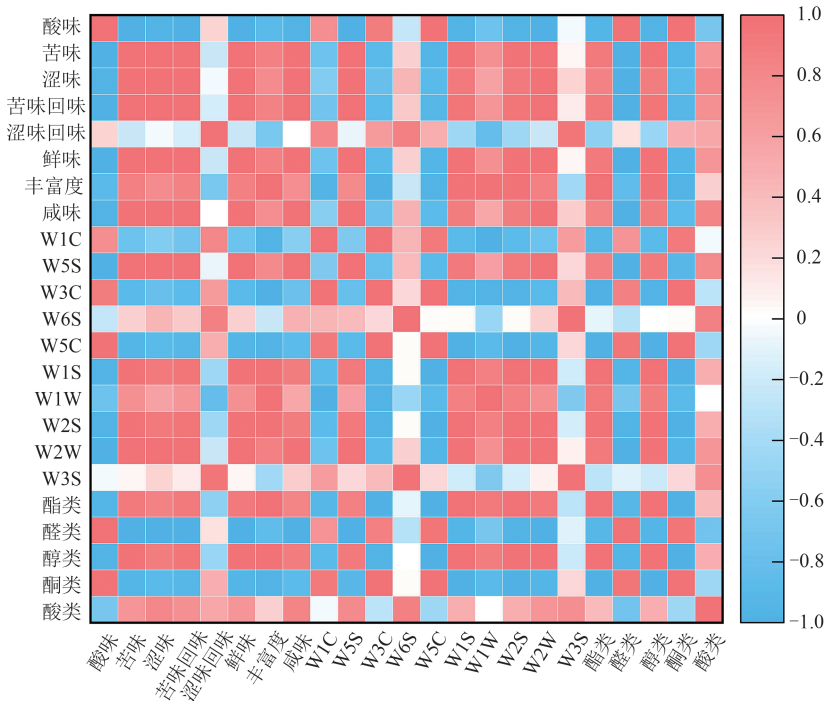


图 6　复合藕汁挥发性组分与电子舌及电子鼻响应指标的相关性热图

Fig. 6　Correlation heatmap between volatile components and electronic tongue and nose responses in composite lotus root juice

复合藕汁风味的贡献具有明显差异，其中醛酮类有助于提升风味协调性，而酯类则需在含量上进行合理控制，以优化整体口感。

3　结论

以 AHP-EWM 构建综合评分模型，在单因素试验基础上结合 RSM-GA 对铁皮石斛叶苹果复合藕汁进行优化，得到最优配方是铁皮石斛叶汁添加质量分数 24%、黄原胶添加质量分数 0.14%、白砂糖添加质量分数 6%，此条件下制备的复合藕汁综合评分为 0.947±0.028。此外，电子鼻、电子舌及 GC-IMS 分析也显示，优化配方在保持果汁风味骨架稳定的同时增强了醛类和酮类挥发性物质的贡献，形成协调的“草本-果香”复合风味特征，为功能性复合饮品配方优化提供了参考。

参考文献

[1] 牛丽影，顾艳阳，胡丽丽，等. 莲藕汁饮品研发现状与趋势[J]. 农产品加工，2021(4)：77-79.
NIU L Y，GU Y Y，HU L L，et al. Research development and prospect of lotus root drinks[J]. Academic Periodical of Farm Products Processing，2021(4)：77-79.（in Chinese）

[2] 冯凯，赵书平，吴鹏，等. 水生蔬菜种业发展现状及建议[J]. 江苏农业科学，2022，50(18)：245-249.
FENG K，ZHAO S P，WU P，et al. Present situation and suggestion of aquatic vegetable seed industry development [J]. Jiangsu Agricultural Sciences，2022，50(18)：245-249.（in Chinese）

[3] 程婷婷，惠小涵，尚欣欣，等. 10 个产地莲藕营养成分分析与品质综合评价[J]. 食品工业科技，2021，42(8)：320-325.
CHENG T T，XI X H，SHANG X X，et al. Nutrient composition analysis and quality comprehensive evaluation of lotus root in 10 producing areas [J]. Science and Technology of Food Industry，2021，42(8)：320-325.（in Chinese）

[4] SHOWKAT Q A，RATHER J A，JABEEN A，et al. Bioactive components，physicochemical and starch characteristics of different parts of lotus（*Nelumbo nucifera* Gaertn.）plant：a review[J]. International Journal of Food Science & Technology，2021，56(5)：2205-2214.

[5] DONG W Y，LIU X T，YI Y，et al. Evaluation of pre-harvest nutrient composition and functional active substances in various lotus roots [J]. Foods，2024，13(14)：2297.

[6] 张春洁，Mohamed Hawali Bata Gouda，王俊豪，等. 海藻酸钠复合天然化学物质涂膜对鲜切莲藕保鲜效果的影响[J]. 江苏农业学报，2021，37(1)：175-184.
ZHANG C J，BATA GOUDA M H，WANG J H，et al. Effects of sodium alginate and natural chemical composite coating on quality of fresh-cut lotus root during storage[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences，2021，37(1)：175-184.（in Chinese）

[7] 孙海娟，李洁，刘义满，等. 不同品种莲藕加工制汁适宜

性评价[J]. 食品科学技术学报，2023，41(2)：164-174.
SUN H J，LI J，LIU Y M，et al. Juice processing suitability evaluation for different varieties of lotus root[J]. Journal of Food Science and Technology，2023，41(2)：164-174.(in Chinese)

[8] 范迎宾，孔瑾. 苹果山药山楂复合果蔬浆饮料的研制[J]. 保鲜与加工，2019，19(4)：101-106.
FAN Y B，KONG J. Development of compound fruit vegetable pulp beverage from apple，Chinese yam and hawthorn[J]. Storage and Process，2019，19(4)：101-106.(in Chinese)

[9] 王蕙颖，陈润梓，杜佩霓，等. 苹果梨复合果汁工艺优化及其品质测定[J]. 食品与营养科学，2025，14(6)：812-821.
WANG H Y，CHEN R Z，DU P N，et al. Process optimization and quality analysis of apple-pear mixed juice[J]. Hans Journal of Food and Nutrition Science，2025，14(6)：812-821.(in Chinese)

[10] 林雨晴，陆胜民，周万怡，等. 铁皮石斛叶多糖结构及其益生性质初探[J]. 浙江农业学报，2022，34(11)：2504-2511.
LIN Y Q，LU S M，ZHOU W Y，et al. Preliminary investigation about structure and probiotic properties of polysaccharides from *Dendrobium officinale* leaves[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis，2022，34(11)：2504-2511.(in Chinese)

[11] 陈润杰，房祥军，陈慧芝，等. 反向传播神经网络优化杨梅果渣与铁皮石斛叶混合冻干粉的制备工艺[J]. 食品与发酵工业，2026，52(2)：156-164.
CHEN R J，FANG X J，CHEN H Z，et al. Optimization of preparation process of mixed freeze-dried powder from *Myrica rubra* pomace and *Dendrobium officinale* leaves using genetic algorithm-backpropagation neural network[J]. Food and Fermentation Industries，2026，52(2)：156-164.(in Chinese)

[12] 刘军波. 全藕粉饮料加工工艺及贮藏稳定性研究[D]. 无锡：江南大学，2011.

[13] 李黎，郑展，李书艺，等. 超声预处理对莲藕汁品质的影响[J]. 食品工业科技，2026，47(7)：141-150.
LI L，ZHENG Z，LI S Y，et al. Effect of ultrasound pretreatment on the quality of lotus root juice[J]. Science and Technology of Food Industry，2026，47(7)：141-150.(in Chinese)

[14] 孙人杰，田茂雨，何琴，等. 层次分析-熵权法评价结合正交试验优化铁皮石斛颗粒配方工艺[J]. 食品工业科技，2024，45(8)：227-234.
SUN R J，TIAN M Y，HE Q，et al. Optimization of *Dendrobium officinale* granule formula process by combining analytic hierarchy process and entropy weight method with orthogonal experiment[J]. Science and Technology of Food Industry，2024，45(8)：227-234.(in Chinese)

[15] 冯利梅，陈艳琰，乐世俊，等. 基于层次分析-熵权法的中药质量标志物量化辨识方法研究：以芍药甘草汤为例[J]. 药学学报，2021，56(1)：296-305.
FENG L M，CHEN Y Y，LE S J，et al. Quantitative identification of TCM Q-markers based on analytical hierarchy and the entropy weight comprehensive method by taking Shaoyao Gancao decoction as an example[J]. Acta Pharmaceutica Sinica，2021，56(1)：296-305.(in Chinese)

[16] ZOU J Q，LI P F. Modelling of litchi shelf life based on the entropy weight method[J]. Food Packaging and Shelf Life，2020，25：100509.

[17] 王欣，朱晶滢，邱景璇，等. 基于层次分析-熵权法和莫兰指数的畜禽产品风险分析[J]. 农业机械学报，2026，57(3)：387-399.
WANG X，ZHU J Y，QIU J X，et al. Risk analysis of livestock and poultry products based on analytic hierarchy process-entropy weight method and moran's I[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2026，57(3)：387-399.(in Chinese)

[18] 何国庆，石闪闪，赵勤勇. RBF神经网络与遗传算法相结合预测木薯淀粉酯最佳制备条件[J]. 中国食品学报，2013，13(11)：77-82.
HE G Q，SHI S S，ZHAO Q Y. Optimization of preparation of octenylsuccinic sub-gelatinized cassava starch based on RBFNN-GA[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology，2013，13(11)：77-82.(in Chinese)

[19] 肖丹虹，李萍，邓媛元，等. 基于响应面法优化双酶同步酶解的全豌豆乳的稳定性及营养特性研究[J]. 食品工业科技，2024，45(8)：235-246.
XIAO D H，LI P，DENG Y Y，et al. Study on the stability and nutritional properties of double enzyme simultaneous enzymatic hydrolysis of whole pea milk based on response surface method[J]. Science and Technology of Food Industry，2024，45(8)：235-246.(in Chinese)

[20] 张卓，祁建州，王晓萌，等. 红枣莲藕汁保健饮品的研制[J]. 现代食品，2021，27(7)：80-84，90.
ZHANG Z，QI J Z，WANG X M，et al. Development of health drink with jujube and lotus root juice[J]. Modern Food，2021，27(7)：80-84，90.(in Chinese)

[21] LIU X，ZHANG C，WANG H，et al. Ultrasonic treatment maintains the flavor of the melon juice[J]. Ultrasonics Sonochemistry，2023，92：106284.

[22] 卢可燕，苗泽钰，王宏勋，等. 冰温及冰水混合物贮藏对去皮莲藕贮藏及卤后品质的影响[J]. 核农学报，2024，38(10)：1930-1940.
LU K Y，MIAO Z Y，WANG H X，et al. Effects of ice temperature and ice-water mixture on storage quality of peeled lotus root and braised lotus root[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences，2024，38(10)：1930-1940.(in Chinese)

[23] 彭择，陈慧芝，牛犇，等. 基于气相色谱-离子迁移谱分析发酵对蓝靛果-蓝莓果汁挥发性风味物质的影响[J]. 食品科学，2025，46(16)：275-284.

PENG Z，CHEN H Z，NIU B，et al. Effect of fermentation on volatile flavor compounds in blue honeysuckle-blueberry juice mixture based on gas chromatography-ion mobility spectrometry［J］. Food Science，2025，46（16）：275-284.（in Chinese）

［24］聂继云，毋永龙，李海飞，等. 苹果品种用于加工鲜榨汁的适宜性评价[J]. 农业工程学报，2013，29（17）：271-278.
NIE J Y，WU Y L，LI H F，et al. Suitability evaluation of apple cultivars for fresh juice-processing ［J］. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering，2013，29（17）：271-278.（in Chinese）

［25］李维妮，张宇翔，魏建平，等. 益生菌发酵苹果汁工艺优化及有机酸的变化[J]. 食品科学，2017，38（22）：80-87.
LI W N，ZHANG Y X，WEI J P，et al. Optimization of fermentation of apple juice by probiotics and organic acids evolution during fermentation［J］. Food Science，2017，38（22）：80-87.（in Chinese）

［26］单露英，梁爽，刘梦柱，等. 天麻苹果复合饮料的研制及品质分析[J]. 农产品加工，2025（24）：25-30.
SHAN L Y，LIANG S，LIU M Z，et al. Development and quality analysis of *Gastrodia elata* and apple compound beverage［J］. Agricultural Products Processing，2025（24）：25-30.（in Chinese）

［27］周美玲，张志勇，郑新妹，等. 铁皮石斛叶浆添加量对挂面品质与抗氧化性的影响[J]. 美食研究，2024，41（4）：79-85.
ZHOU M L，ZHANG Z Y，ZHENG X M，et al. Effects of *Dendrobium officinale* leaf pulp addition on the quality and antioxidant properties of dried noodles［J］. Journal of Researches on Dietetic Science and Culture，2024，41（4）：79-85.（in Chinese）

［28］林玲莉，杨双艳，李汴生，等. 鲜铁皮石斛汁的提取及其紫色的形成和稳定[J]. 中国调味品，2025，50（8）：209-216.
LIN L L，YANG S Y，LI B S，et al. Extraction of fresh *Dendrobium officinale* juice and formation and stability of its purple color[J]. China Condiment，2025，50（8）：209-216.（in Chinese）

［29］QIU C Y，ZHAO M M，MCCLEMENTS D J. Improving the stability of wheat protein-stabilized emulsions：effect of pectin and xanthan gum addition ［J］. Food Hydrocolloids，2015，43：377-387.

［30］ALJEWICZ M，KEKLIK M，RECIO I，et al. Effect of polysaccharide-protein interactions on the multi-scale structure of hybrid micellar casein-xanthan gum systems ［J］. Food Hydrocolloids，2024，151：109833.

［31］李永生，来守萍，宋莎莎，等. 一种金针菇花生复合饮料的制备工艺研究[J]. 农产品加工，2022（1）：41-44.
LI Y S，LAI S P，SONG S S，et al. Study on formula technology of *Flammulina velutipes* peanut compound drink［J］. Farm Products Processing，2022（1）：41-44.（in Chinese）

［32］王润博，杨明坤，王林山，等. 响应面法优化红枣菊花复合乳饮料的配方研究[J]. 粮食加工，2025，50（6）：24-28.
WANG R B，YANG M K，WANG L S，et al. Study on the optimization of jujube chrysanthemum milk beverage by response surface methodology[J]. Grain Processing，2025，50（6）：24-28.（in Chinese）

［33］陈来欣，陈杭君，吴伟杰，等. 蟹粉狮子头加工及冻融品质的保持[J]. 中国食品学报，2026，26（1）：176-188.
CHEN L X，CHEN H J，WU W J，et al. Processing and freeze-thaw quality maintenance of crab meatballs［J］. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology，2026，26（1）：176-188.（in Chinese）

［34］杨茜然，李凌飞. 猕猴桃果酱的研制[J]. 食品与发酵科技，2014，50（3）：104-108.
YANG Q R，LI L F. Preparation of jam with kiwifruit ［J］. Sichuan Food and Fermentation，2014，50（3）：104-108.（in Chinese）

［35］CHEN Z H，XU X C，LIU H B. The successive approximation genetic algorithm （SAGA） for optimization problems with single constraint ［J］. Mathematics，2023，11（8）：1928.

［36］WANG D W，DENG Y N，CHEN X，et al. Elucidating the effects of *Lactobacillus plantarum* fermentation on the aroma profiles of pasteurized Litchi juice using multi-scale molecular sensory science[J]. Current Research in Food Science，2023，6：100481.

［37］江游仓，应佳淇，安会敏，等. 茉莉黄茶香气特征及其关键呈香成分解析[J]. 食品科学，2026，47（5）：186-193.
JIANG Y C，YING J Q，AN H M，et al. Aroma characteristics and key aroma components in jasmine yellow tea[J]. Food Science，2026，47（5）：186-193.（in Chinese）

［38］刘春晖，龙运忠，刘未未，等. GC-IMS分析不同杀菌方式对铁皮石斛饮料中挥发性物质的影响[J]. 食品与生物技术学报，2025，44（1）：88-98.
LIU C H，LONG Y Z，LIU W W，et al. Influences of sterilization methods on volatile organic compounds of *Dendrobium officinale* beverage by GC-IMS[J]. Journal of Food Science and Biotechnology，2025，44（1）：88-98.（in Chinese）

［39］UL HASSAN M N，ZAINAL Z，ISMAIL I. Green leaf volatiles：biosynthesis，biological functions and their applications in biotechnology［J］. Plant Biotechnology Journal，2015，13（6）：727-739.