

网络出版时间:2021-12-11 09:37 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2022.06.012
网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20211209.0926.015.html

基于 AHP-熵权法的甜叶菊叶片远红外干燥工艺优化

姜春慧¹, 万芳新¹, 谢永清², 赵永彪¹, 李武强¹, 邱进栋², 黄晓鹏¹

(1 甘肃农业大学 机电工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2 甘肃省农业工程技术研究院, 甘肃 武威 733000)

【摘 要】 【目的】优化甜叶菊叶片远红外干燥的工艺参数,为甜叶菊叶片干制产业的发展提供参考。【方法】以甜叶菊叶片中莱鲍迪苷 A(RA)、甜菊苷(STV)、总苷、莱鲍迪苷 C(RC)、莱鲍迪苷 B(RB)、莱鲍迪苷 F(RF)、杜尔可苷 A(DA)和甜菊双糖苷(SX)含量的综合评分为考察指标,利用 AHP-熵权法确定各糖苷的权重系数,通过 Box-Behnken 响应面正交试验考察干燥温度、辐照距离、料层厚度 3 个因素的影响,通过综合评分优化确定并验证甜叶菊叶片的远红外干燥工艺参数。【结果】利用 AHP-熵权法得到甜叶菊叶片中 RA、STV、RC、RB、RF、DA、SX 和总苷的复合权重 Q_j 分别为 0.35、0.21、0.09、0.05、0.07、0.03、0.05 和 0.14;Box-Behnken 响应面优化分析表明,所建立的回归模型均显著,3 个试验因素对各糖苷综合评分影响大小依次为辐照距离>料层厚度>干燥温度;甜叶菊叶片远红外干燥的最优工艺参数为干燥温度 55℃、辐照距离 180 mm、料层厚度 21 mm,在此条件下,各糖苷综合评分为 96.54 分,试验值与预测值的误差仅为 1.84%。【结论】确定的甜叶菊叶片远红外干燥优化工艺准确可靠,可在甜叶菊叶片干制产业中推广使用。

【关键词】 甜叶菊叶片;远红外干燥;干燥工艺;AHP-熵权法;响应面法优化

【中图分类号】 TS242.9 【文献标志码】 A 【文章编号】 1671-9387(2022)06-0101-09

Optimization of far-infrared drying process of *Stevia rebaudiana* leaves based on AHP-entropy weight method

JIANG Chunhui¹, WAN Fangxin¹, XIE Yongqing², ZHAO Yongbiao¹,
LI Wuqiang¹, QIU Jindong², HUANG Xiaopeng¹

(1 College of Mechanical and Electronical Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;
2 Gansu Agricultural Engineering Technology Research Institute, Wuwei, Gansu 733000, China)

Abstract: 【Objective】 This study optimized the process parameters of far-infrared drying of *Stevia rebaudiana* leaves to improve *Stevia* drying industry. 【Method】 The comprehensive scores of rebaudioside A (RA), stevioside (STV), total glycosides, rebaudioside C (RC), rebaudioside B (RB), and rebaudioside F (RF), dulcoside A (DA) and steviol diglycoside (SX) contents were used as indicators. The AHP-entropy weight method was used to determine the weight coefficient of each glycoside, and the Box-Behnken response surface method was used to examine the effects of drying temperature, irradiation distance and material layer thickness. Then, the far-infrared drying process parameters of *Stevia* leaves were determined and validated through comprehensive score optimization. 【Result】 The composite weights (Q_j) of RA, STV, RC, RB, RF, DA, SX and total glycosides of *Stevia* obtained by the AHP-entropy weight method were 0.35, 0.21, 0.09, 0.05, 0.07, 0.03, 0.05 and 0.14 respectively. Box-Behnken response surface optimization

【收稿日期】 2021-08-02
【基金项目】 甘肃农业大学青年导师基金项目(GSAU-QDFC-2020-14);甘肃省重点研发计划项目(17YF1NH051)
【作者简介】 姜春慧(1998—),女,山东菏泽人,在读硕士,主要从事农产品加工技术与装备研究。E-mail:jchjcq1018@163.com
【通信作者】 黄晓鹏(1975—),男,甘肃临洮人,教授,博士,博士生导师,主要从事农产品加工技术与装备研究。
E-mail:huangxp@gsau.edu.cn

analysis showed that the established regression models were all significant with importance in decreasing order of irradiation distance>material thickness>drying temperature on all glycoside. The optimal process parameters for *Stevia* far-infrared drying included drying temperature 55 ℃,irradiation distance 180 mm, and material thickness 21 mm. Under these conditions, the comprehensive score of each glycoside was 96.54,and the error between the test value and the predicted value was only 1.84%.【Conclusion】The optimized far-infrared drying process of *Stevia* leaves was accurate and reliable,and can be popularized in the drying industry of *Stevia* leaves.

Key words:*Stevia rebaudiana* leaves;far infrared drying;drying process;AHP-entropy weight method;response surface method optimization

甜叶菊(*Stevia rebaudiana* (Bertoni) Hemsl)是菊科、甜叶菊属多年生草本植物,于 20 世纪 80 年代引入我国,在北京、河北、江苏、福建和甘肃等地均有种植^[1]。甜叶菊叶片甜度高、热量低,具有生津止渴、降血压和促进新陈代谢等功效^[2-3]。由于甜叶菊叶片中的糖分可被糖尿病人食用,其常代替蔗糖作为食品添加剂和药用甜味辅助剂^[4-6]。然而新鲜甜叶菊叶片中水分较多,很容易因贮藏或加工方式选用不当而发生霉变。因此,选择适宜的加工方式对甜叶菊叶片的综合利用具有重要意义。

干燥是甜叶菊叶片产地加工的重要环节,当其含水率降至 10% 以下时,货架期明显延长^[7-9]。目前,甜叶菊的干燥主要采用晒干和阴干,但存在耗时间长和受环境影响大等不足,不利于甜叶菊的产业化生产,故热风干燥、喷雾干燥和冷冻干燥等现代干燥方法逐渐被应用到甜叶菊叶片的加工中。刘旺星等^[10]利用红外-热风联合干燥技术加工甜叶菊,发现联合干燥法能明显降低能耗,提高干燥效率,并且很好地保证了物料的品质。Periche 等^[11]评估了不同干燥方法(阴干、热风干燥和冷冻干燥)对甜叶菊叶片抗氧化剂和甜菊糖苷的影响,发现热风干燥是较适宜的干燥方法。Chranioti 等^[12]比较了喷雾干燥、冷冻干燥和真空干燥对甜菊醇糖苷的影响,发现喷雾干燥所得的甜菊醇糖苷具有最佳的物理化学特性和感官品质。纵观现有关于甜叶菊叶片干燥的研究成果发现,有关甜叶菊干燥技术的研究还处于探索阶段,尚未确定一种经济可行、干燥品质高、可工业化推广应用的干燥工艺。

远红外干燥也是当今产品加工中常用的干燥方法,具有干燥速率高、热损失小和易于控制等优点。其原理为当红外线的发射频率与被干燥物料分子的固有频率一致时,物料内部分子产生共振,将吸收的辐射能转变为热能,从而使物料内水分蒸发,实现干燥。现已广泛应用于金银花、当归和菊苣叶等^[13-16]

物料的加工。但尚未见将远红外干燥技术应用于甜叶菊叶片干燥的报道。Box-Behnken 法综合了试验设计和数学建模,能够直观地观察试验因素对加工工艺影响的显著程度,通过 AHP-熵权法计算各个指标的权重并计算考察指标,所得优化的试验参数具有更高的参考价值,已应用于铁皮石斛、蜜麦麸、玄参等^[17-19]物料的加工工艺优化。

本研究基于课题组前期对于甜叶菊叶片干燥处理的单因素试验研究结果^[20],利用 AHP-熵权法确定各糖苷的权重,以糖苷的综合评分为考察指标,研究不同试验因素的显著性程度,以期确定甜叶菊叶片的最优干燥工艺,为甜叶菊叶片的产业化发展提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验所用甜叶菊叶片收获于甘肃省农业工程技术研究院甜叶菊栽培基地,品种为“甘甜 1 号”。清洗沥干后,选择外表无损伤、尺寸相当的叶片作为试验材料。参照 GB 5009.3—2016《食品安全国家标准食品中水分的测定》^[21]测得甜叶菊叶片的初始含水率为 70%。

1.2 仪器设备

YHG-300-S 型远红外快速恒温干燥箱,上海博泰实验设备有限公司;Agilent 1100 型高效液相色谱仪,美国安捷伦公司;AUW 220D 型电子天平,日本岛津公司;KQ-300 VDE 型三频数控超声波清洗机,昆山市超声仪器有限公司。

1.3 试验方法

远红外干燥箱预热 30 min 后,称量外形完整、尺寸相当、清洗沥干的甜叶菊叶片(100±2) g 放入干燥箱中进行干燥处理。当甜叶菊叶片的含水率降至 10%时,停止试验^[22]。每组试验均重复 3 次,结果取平均值。干燥结束后将甜叶菊叶片取出,冷却

后密封于自封袋中,以备后续其他指标的测量。

1.3.1 干基含水率(M_C)的计算 甜叶菊干基含水率的计算公式为:

$$M_C = \frac{(M_t - M_d)}{M_d} \quad (1)$$

式中: M_C 为干基含水率,%; M_t 为 t 时刻甜叶菊叶片的质量,g; M_d 为甜叶菊叶片的干质量,g。

1.3.2 HPLC 测定方法的建立 选用高效液相色谱法测定甜叶菊叶片中各糖苷的含量。色谱条件:色谱柱为 Agilent Eclipses XDB-B-C18 反相色谱柱(250 mm×4.6 mm,5 μm);流动相:乙腈-磷酸钠缓冲液(体积比 32:68);流动相流速:1.0 mL/min,检测波长 210 nm,进样量 5 μL,柱温 40 ℃。

1.3.3 混合标准品溶液的制备 称取适量莱鲍迪苷 A(RA)、甜菊苷(STV)、莱鲍迪苷 C(RC)、莱鲍迪苷 B(RB)、莱鲍迪苷 F(RF)、杜尔可苷 A(DA)、甜菊双糖苷(SX)标准品于 10 mL 容量瓶中,用体积分数 80%甲醇溶液溶解定容至刻度,即得甜叶菊混合标准品溶液,于 2~4 ℃ 冰箱冷藏。

1.3.4 标准溶液的制备 称取 0.05 g(精确到 0.001 g)RA、STV 标准品,分别置于 50 mL 容量瓶中,用乙腈水溶液溶解后定容至刻度,得到 RA、STV 标准溶液。

1.3.5 试样溶液的制备 称取远红外干燥后的甜叶菊粉末 0.05 g(精确到 0.001 g),置于 50 mL 具塞锥形瓶中,加入体积分数 80%甲醇 20 mL,密塞,称其质量。浸泡 1 h,超声处理(功率 50 W,频率 40 kHz)45 min,放冷至室温后称质量,用体积分数 80%甲醇溶液补足质量,摇匀、高速离心(4 ℃、5 000 r/min)后取上清液过微孔滤膜得试样溶液。

1.3.6 糖苷含量的测定 参照 GB 8270—2014^[23] 的方法测定甜叶菊中各糖苷的含量,分别对混合标准溶液、标准溶液和试样溶液进行色谱分析,记录峰面积,计算各糖苷含量。其中莱鲍迪苷 A(RA)含量的计算公式为:

$$\omega_a = \frac{M_r}{M} \times \frac{A_a}{A_r} \quad (2)$$

式中: ω_a 为莱鲍迪苷 A(RA)的含量,mg/g; M_r 为标准溶液中 RA 的含量,mg/g; M 为试样溶液中 RA 的含量,mg/g; A_a 为试样溶液色谱图中 RA 的峰面积值; A_r 为 RA 标准溶液色谱图中 RA 的峰面积值。

其余糖苷含量的计算公式为:

$$\omega_i = \frac{M_s}{M} \times \frac{f_i \times A_i}{A_s} \quad (3)$$

式中: ω_i 表示 STV、RB、RC、RF、DA、SX 糖苷的含

量,mg/g; M_s 表示标准溶液中 STV 的含量,mg/g; M 表示试样溶液中 STV 的含量,mg/g; f_i 表示各糖苷与甜菊苷试样的质量浓度比(RB/RC/RF/DA/SX 与 STV 的比值分别为 1,1.18,1.16,0.98,0.80); A_i 表示试样溶液色谱图中 i 组分的峰面积值; A_s 表示甜菊苷标准溶液色谱图中甜菊苷的峰面积值。

各糖苷含量之和即为试样中的甜菊总苷含量。

1.4 糖苷复合权重的计算

1.4.1 熵权法计算权重 熵作为客观赋权法的一种,不依赖于决策者的主观态度,评价过程的再现性较强^[24],目前已经在工程技术、社会经济等领域得到广泛应用^[25]。熵权法根据各指标的变异程度确定权重,所选指标的熵权系数变异程度越大,说明指标的重要程度越高^[26]。利用熵权法计算权重的步骤如下:

(1)无量纲化处理。因本试验所选指标为各糖苷的含量,其数值越大越好,故均选用正向指标。对于正向指标,无量纲化处理公式为:

$$X_{ij} = \frac{x_{ij} - m_j}{M_j - m_j} \quad (4)$$

式中: x_{ij} 表示第 i 次试验中 j 指标所得试验值; m_j 表示该组试验值中的最小值; M_j 表示该组试验值中的最大值。

(2)消零及去负数处理。由于无量纲化处理后数据的最小值为 0,为了使数据处理有意义,需按公式(5)对数据进行消零处理。即:

$$X_{ij} = X_{ij} + \alpha \quad (5)$$

式中: α 表示最接近试验值 X_{ij} 的最小值,为了保证数据的准确性, α 取较小值^[27],本文取 0.001。

(3)标准化处理。由于各糖苷含量在甜叶菊中的差异较大,为使评分更准确,需按公式(6)对指标进行标准化处理:

$$P_{ij} = \frac{X_{ij}}{\sum_{i=1}^n X_{ij}} \quad (6)$$

式中: P_{ij} 表示 i 次试验在 j 评价指标下的概率; n 表示试验组数。

(4)熵值计算。若所测指标的熵值越大,表明其离散程度越大,权重越高。若所测指标的熵值全部相等或变化程度不大,表明其在综合评价中的影响不显著,可将其剔除^[28-29]。熵值的计算公式为:

$$e_j = \frac{-1}{\ln n} \sum_{i=1}^n P_{ij} \ln(P_{ij}), 0 \leq e_j \leq 1 \quad (7)$$

式中: e_j 表示第 j 项指标的熵值。

(5)差异系数。对第 j 项指标而言,指标值的差异系数越大,表明该指标所占权重越大。其计算公式为:

$$g_j=1-e_j。$$

(8)

式中: g_j 表示第 j 项指标的差异系数。

(6)评价指标的权重。指标权重为评价甜叶菊品质优劣程度的重要依据,其计算公式为:

表 1 甜叶菊各糖苷含量指标的权重值

Table 1 Weight value of each glycoside content index of *Stevia rebaudiana*

权重指标 Entropy indicator	RA	STV	RC	RB	RF	DA	SX	总苷 Total glycosides
e_j	0.912 0	0.923 1	0.928 9	0.936 3	0.905 7	0.920 0	0.813 0	0.924 6
W_j	0.119 5	0.104 4	0.096 6	0.086 5	0.128 0	0.108 6	0.254 0	0.102 4

1.4.2 层次分析法(AHP)计算权重 层次分析法(AHP)是指将一个复杂的多目标决策问题分解成多个层次,并以此进行定性和定量分析,该方法使评价结果更具系统性和层次性^[30]。层次分析法计算指标权重的步骤为:

表 2 甜叶菊各糖苷含量指标权重的判断矩阵

Table 2 Judgment matrix of glycoside content index weights of *Stevia rebaudiana*

指标 Indicator	RA	STV	总苷 Total glycosides	RC	RB	RF	DA	SX	平均值(ω) Mean value	权重(A_ω) Weight
RA	1	2	3	4	5	5	7	9	0.326 5	2.752 6
STV	1/2	1	2	3	4	4	6	8	0.226 6	1.915 9
总苷 Total glycosides	1/3	1/2	1	2	3	3	5	7	0.155 5	1.301 3
RC	1/4	1/3	1/2	1	2	2	4	6	0.105 5	0.867 2
RB	1/5	1/4	1/3	1/2	1	1	3	5	0.070 3	0.567 5
RF	1/5	1/4	1/3	1/2	1	1	2	3	0.059 8	0.489 9
DA	1/7	1/6	1/5	1/4	1/3	1/2	1	2	0.033 8	0.272 8
SX	1/9	1/8	1/7	1/6	1/5	1/3	1/2	1	0.021 9	0.177 2

(2)计算结果的一致性检验。由于层次分析法属于主观赋权法,受决策者经验的影响较大。为保证所得权重的准确性,需按公式(10)~(12)对所得数据进行一致性检验^[30]。

$$\lambda_{\max}=\frac{\sum_{i=1}^m A_{\omega}}{m} \omega ;$$

(10)

$$CI=(\lambda_{\max}-m)/(m-1);$$

(11)

$$CR=CI/RI。$$

(12)

式中: $\lambda_{\max}$ 表示矩阵的最大特征值; ω 表示各指标按列归一化后的算术平均值; A_ω 表示各指标权重值; m 表示指标个数; CI 、 RI 为一一致性指标; CR 表示检验系数。根据指标个数查表得 RI 值为 1.41^[32]。

通过计算得: $\lambda_{\max}=8.237\ 5$, $CI=0.033\ 9$, $CR=0.024\ 1$,其中 CR 小于 0.1,说明所选指标适宜,符合一致性检验要求。

$$W_j=\frac{g_j}{\sum_{i=1}^m g_j}。$$

(9)

式中: W_j 表示第 j 项指标的权重值; m 表示试验指标个数。

根据式(9),最终得到各指标的权重值如表 1 所示。

(1)甜叶菊中各成分权重的赋值。根据文献[31],将甜叶菊各糖苷的优先顺序($RA>STV>$ 总苷 $>RC>RB=RF>DA>SX$)作为权重并予以量化,依此构建判断矩阵,同时对各指标按列进行归一化处理,所得权重系数如表 2 所示。

1.4.3 复合权重 AHP 法考虑了上层指标对下层指标的依存和反馈,但受决策者的影响较大。熵权法虽然不依赖于决策者的主观态度,但未考虑各指标之间的相关性,使得所得权重可能会与实际不符。为保证各糖苷权重的准确性,避免任何一种指标权重结果的影响,本研究利用 AHP-熵权法综合考虑糖苷的权重^[33]。复合权重的计算公式为:

$$Q_j=\frac{W_jA_\omega}{\sum_{i=1}^m W_jA_\omega}。$$

(13)

式中: Q_j 表示 AHP-熵权法所得复合权重值; W_j 表示用熵权法所得各成分的权重值; A_ω 表示用层次分析法所得各成分的权重值。

由公式(13)计算可得, RA 、 STV 、 RC 、 RB 、 RF 、 DA 、 SX 、总苷的复合权重 Q_j 分别为 0.35、0.21、0.09、0.05、0.07、0.03、0.05 和 0.14。

1.5 甜叶菊叶片远红外干燥最优工艺的 Box-Behnken 试验设计

基于前期的单因素试验结果^[20],以干燥温度(X_1)、辐照距离(X_2)、料层厚度(X_3)为试验因素,以前文所得复合权重为依据,计算各糖苷的综合评分,并将其作为响应值,利用 Box-Behnken 响应面设计试验,确定甜叶菊叶片远红外干燥的最优工艺参数

表 3 甜叶菊叶片远红外干燥最优工艺参数响应面优化试验方案

水平 Level	因素 Factor		
	干燥温度/℃ Drying temperature	辐照距离/mm Irradiation distance	料层厚度/mm Material thickness
	X_1	X_2	X_3
−1	50.00	120.00	16.00
0	55.00	180.00	22.00
1	60.00	240.00	28.00

2 结果与分析

2.1 甜叶菊叶片干燥工艺优化的响应面试验结果

甜叶菊叶片远红外干燥最优工艺参数的响应面试验结果如表 4 所示。

通过 Design-Expert 8.0.6 软件对表 4 的数据进行回归拟合,得到综合评分(Y)对干燥温度(X_1)、辐照距离(X_2)、料层厚度(X_3)的回归方程为:

$$Y = -903.737\ 43 + 30.296\ 79X_1 + 0.645\ 96X_2 + 104.895\ 22X_3 - 2.615\ 33 \times 10^{-5} X_1X_2 - 0.907\ 02X_1X_3 + 0.032\ 968X_2X_3 - 0.258\ 36$$

表 4 甜叶菊远红外干燥工艺响应面优化试验结果

序号 No.	$X_1/^\circ\text{C}$	X_2/mm	X_3/mm	糖苷含量/(mg · g ⁻¹) Glycoside content								综合评分 General score
				RA	STV	RC	RB	RF	DA	SX	总苷 Total glycosides	
1	50.00	120.00	22.00	6.21	6.71	1.34	0.32	0.38	0.20	0.05	15.21	77.89
2	50.00	240.00	22.00	7.07	6.22	1.24	0.45	0.44	0.22	0.04	15.68	80.59
3	50.00	180.00	16.00	6.78	7.49	1.30	0.51	0.51	0.18	0.05	17.36	86.58
4	50.00	180.00	28.00	8.16	6.42	1.08	0.37	0.41	0.31	0.04	16.79	85.13
5	55.00	120.00	28.00	6.25	7.03	1.29	0.48	0.46	0.19	0.04	15.74	80.21
6	55.00	240.00	28.00	8.36	6.46	1.02	0.49	0.48	0.27	0.05	17.13	88.26
7	55.00	240.00	16.00	6.58	6.83	1.35	0.57	0.59	0.28	0.05	16.25	85.70
8	60.00	180.00	28.00	6.55	6.13	1.13	0.39	0.42	0.33	0.04	14.99	77.33
9	55.00	120.00	16.00	7.45	6.63	1.22	0.35	0.40	0.15	0.04	16.24	81.60
10	60.00	180.00	16.00	8.73	6.85	1.04	0.37	0.41	0.19	0.04	17.63	87.85
11	60.00	120.00	22.00	7.81	6.34	1.27	0.28	0.36	0.23	0.04	16.33	82.35
12	60.00	240.00	22.00	7.95	6.57	1.11	0.42	0.43	0.16	0.05	16.69	85.02
13	55.00	180.00	22.00	7.96	7.33	1.21	0.55	0.57	0.21	0.05	17.88	91.88
14	55.00	180.00	22.00	8.28	7.13	1.12	0.56	0.58	0.26	0.05	17.98	92.73
15	55.00	180.00	22.00	8.73	6.99	1.17	0.60	0.65	0.32	0.05	18.51	96.51
16	55.00	180.00	22.00	8.86	7.35	1.14	0.59	0.61	0.24	0.05	18.84	96.83
17	55.00	180.00	22.00	8.81	7.33	1.18	0.52	0.53	0.25	0.05	18.67	95.37

(表 3)。甜叶菊中糖苷综合评分的计算公式为:

$$Y_j = \sum_{i=1}^m \frac{(100Q_iX_j)}{X_{j\max}}。$$
 (14)

式中: Y_j 表示 8 种成分指标所得综合评分; X_j 表示第 j 列成分所测试验值。

用 Design-Expert 8.0.6 软件对数据进行分析。对所得优化条件进行 3 次验证试验。

$$X_1^2 - 1.872\ 10 \times 10^{-3} X_2^2 - 15.910\ 72 X_3^2。$$
 (15)

表 5 为回归方程(15)的方差分析结果。由表 5 可以看出, X_1^2 、 X_2^2 和 X_3^2 的 P 值均小于 0.05,这说明 X_1^2 、 X_2^2 和 X_3^2 对综合评分的影响较为显著。综合考虑发现,甜叶菊远红外干燥优化试验中各因素对综合评分的影响大小为:辐照距离>料层厚度>干燥温度。所得回归模型显著,失拟项不显著,说明此方程可靠性高,并且其决定系数 R^2 值为 0.878 9, R^2_{adj} 为 0.723 1,说明模型的拟合程度较好,准确性高。

表 5 甜叶菊叶片远红外干燥工艺参数回归方程的方差分析

Table 5 Variance analysis of the regression equations of the far-infrared drying process parameters of *Stevia rebaudiana* leaves

变异来源 Source of variation	平方和 Sum of square	自由度 Degree of freedom	均方值 Mean square	F 值 F value	P 值 P value
模型 Model	559.39	9	62.15	5.64	0.016 3
X_1	0.69	1	0.69	0.063	0.809 1
X_2	38.39	1	38.39	3.49	0.104 2
X_3	14.57	1	14.57	1.32	0.287 8
X_1X_2	0.000 2	1	0.000 2	0.000 02	0.996 4
X_1X_3	20.57	1	20.57	1.87	0.214 1
X_2X_3	3.91	1	3.91	0.36	0.569 9
X_1^2	175.65	1	175.65	15.95	0.005 2
X_2^2	191.25	1	191.25	17.36	0.004 2
X_3^2	66.62	1	66.62	6.05	0.043 5
残差 Residual	77.10	7	11.01	3.78	0.115 9
失拟项 Lack of fit	56.99	3	19.00		
误差项 Pure errors	20.11	4	5.03		
校正决定系数 R^2 Corrected correlation determination		0.878 9			
校正相关系数 R^2_{adj} Corrected correlation coefficient		0.723 1			
变异系数/% CV		3.83			

2.2 各因素间交互作用对甜叶菊叶片中糖苷综合评分的影响

利用 Design-Expert 8.0.6 软件对试验数据进

行回归分析,得到辐照距离与干燥温度、料层厚度与干燥温度及辐照距离与料层厚度交互作用的等高线和响应面如图 1 所示。

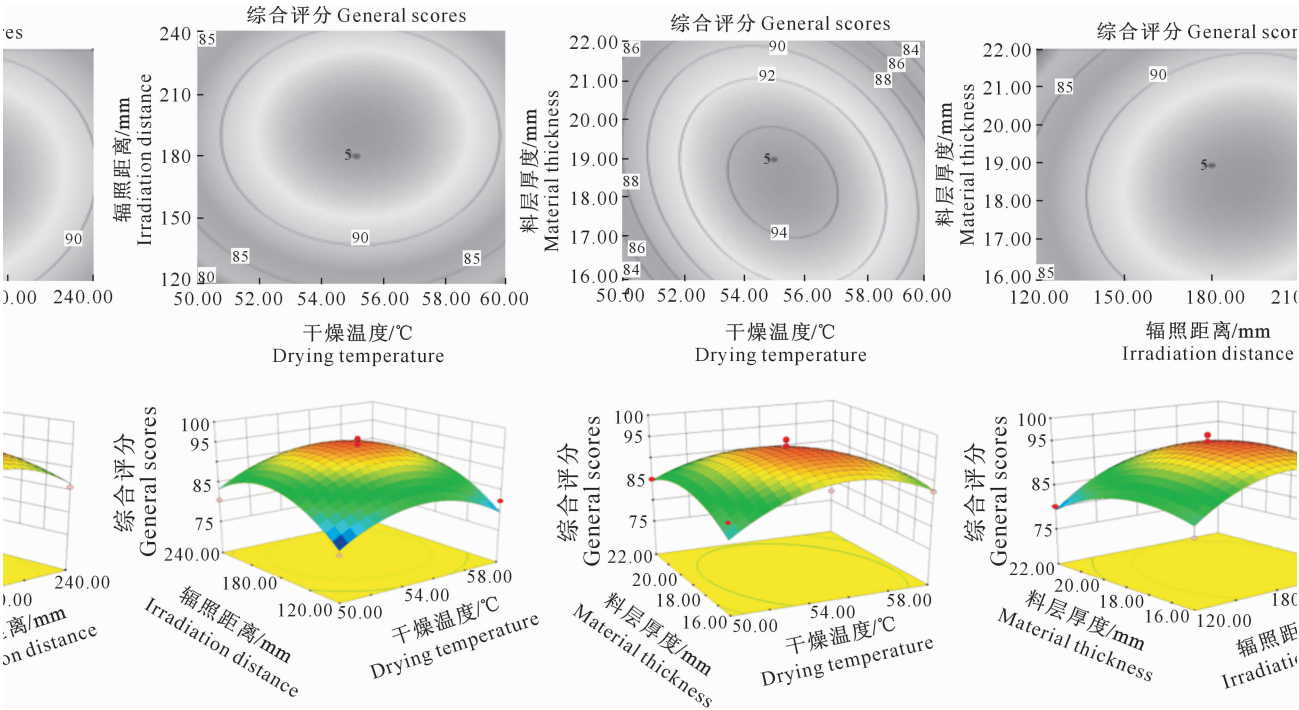


图 1 各因素交互作用对甜叶菊叶片中糖苷综合评分的影响

Fig.1 Effects of the interaction of various factors of far-infrared drying of *Stevia* leaves on comprehensive score

由图 1 可以看出,干燥温度、辐照距离、料层厚度两两交互作用得到的等高线均接近椭圆,说明所选因素的交互作用对甜叶菊叶片干燥过程影响显

著。其中料层厚度和干燥温度的交互作用对综合评分影响较大,当料层厚度为 22 mm 时,随着干燥温度的升高,综合评分先升高后降低,在 55 °C 时综合

评分超过 90 分,这可能是因为温度升高使物料中的水分含量降低,糖苷稳定性增强;但当温度超过临界值时,部分糖苷受热分解,导致综合评分降低;干燥温度为 55 ℃时,随着料层厚度的增大,综合评分呈现先升高后降低的趋势,这可能是因为远红外线的辐射强度与料层厚度的耦合作用影响了甜叶菊的干燥速率。料层厚度较小时,甜叶菊叶片的水分散失较快,糖苷稳定性较差;随着料层厚度的增加,远红外线对物料干燥速率的影响加大;当料层厚度超过临界值时,单位质量甜叶菊叶片获得的辐射强度减弱,从而导致干燥时间延长,糖苷分解,综合评分降低。

表 6 甜叶菊远红外干燥最优工艺参数验证试验结果

试验序号 No.	糖苷含量/(mg · g ⁻¹) Glycoside content								综合评分 General score
	RA	STV	RC	RB	RF	DA	SX	总苷 Total glycosides	
1	8.75	7.56	1.18	0.63	0.59	0.28	0.04	19.03	96.97
2	8.66	7.72	1.19	0.60	0.61	0.30	0.03	19.11	96.36
3	8.68	7.40	1.17	0.59	0.58	0.26	0.05	18.73	96.25
均值 Mean	8.70	7.56	1.18	0.61	0.59	0.28	0.04	18.96	96.54
误差/% Error	1.72	3.52	2.54	5.46	2.26	2.38	0.00	2.60	1.84

3 结 论

本研究将远红外干燥技术应用于甜叶菊叶片的加工,基于 AHP-熵权法确定各糖苷权重,采用 Box-Behnken 响应面法进行甜叶菊叶片的远红外干燥工艺优化,所得结论如下:

1)通过 AHP 法和熵权法复合加权,得到甜叶菊叶片各糖苷(RA、STV、RC、RB、RF、DA、SX、总苷)的复合权重(Q_j)分别为 0.35,0.21,0.09,0.05,0.07,0.03,0.05 和 0.14。本研究将主客观赋权法相结合,所得权重更为科学合理,可应用于甜叶菊叶片干燥工艺参数的优化。

2)以干燥温度、辐照距离、料层厚度为试验因素,各糖苷的综合评分为响应值,利用 Box-Behnken 响应面法优化甜叶菊的干燥工艺,发现回归分析所得模型显著,不同试验因素对综合评分的影响从大到小依次为辐照距离、料层厚度、干燥温度。

3)通过响应面分析,得到甜叶菊叶片远红外干燥的最优工艺参数为干燥温度 55 ℃、辐照距离 180 mm、料层厚度 21 mm。验证试验与预测结果误差仅为 1.84%,说明优化工艺参数准确性高,优化结果可靠,可用于甜叶菊叶片远红外干燥的产业化生产。

2.3 甜叶菊叶片干燥的最佳工艺参数及验证

运用 Design-Expert 8.0.6 软件确定远红外干燥甜叶菊的最优工艺参数为干燥温度 55.26 ℃,辐照距离 189.03 mm,料层厚度 21.00 mm,此时对应的综合评分为 94.95 分。考虑到实际操作,将其调整为干燥温度 55 ℃、辐照距离 180 mm、料层厚度 21 mm,在此条件下进行 3 次验证试验,试验结果如表 6 所示。由表 6 可以看出,验证试验所得综合评分的平均值为 96.54 分,试验值与预测值的误差仅为 1.84%,说明响应面优化所得工艺参数准确性高,可为甜叶菊叶片的产后加工提供技术参考。

[参考文献]

[1] 陈 叶,郝宏杰,王治江,等.不同处理对甜叶菊种子出苗率和幼苗生长的影响研究 [J].种子,2012,31(4):102-104.
Chen Y,Hao H J,Wang Z J,et al. Study on the effects of different treatments on the seedling rate and seedling growth of *Stevia* seed [J]. Seeds,2012,31(4):102-104.

[2] 黄建平,杨巧玲,洪伟敏,等.国产甜叶菊叶中甜叶菊甙的提取分离 [J].中草药,1984,15(8):43.
Huang J P,Yang Q L,Hong W M,et al. Extraction and separation of stevioside from domestic *Stevia* leaves [J]. Chinese Herbal Medicine,1984,15(8):43.

[3] 沈秀丽,胡昌林.一种新的糖源植物:甜叶菊 [J].中国甜菜,1994(3):58-60.
Shen X L,Hu C L. A new sugar source plant: *Stevia* [J]. Chinese Sugar Beet,1994(3):58-60.

[4] 侯福银,陈应江,丁海荣,等.浅析甜叶菊产品开发及应用进展 [J].农业技术与装备,2016(7):32-33,36.
Hou F Y,Chen Y J,Ding H R,et al. Analysis on the development and application progress of *Stevia* products [J]. Agricultural Technology and Equipment,2016(7):32-33,36.

[5] 王 珺,李 霞,张红梅,等.甜叶菊高产栽培及生理特性研究进展 [J].中国糖料,2017,39(2):62-64,74.
Wang J,Li X,Zhang H M,et al. Research progress on high-yield cultivation and physiological characteristics of *Stevia* [J]. China Sugar,2017,39(2):62-64,74.

[6] 周玉丽,崔广荣,胡能兵,等.甜叶菊甲基磺酸乙酯离子诱变及耐盐变异体的 SRAP 检测 [J].中草药,2014,45(24):3612-

3617.
Zhou Y L, Cui G R, Hu N B, et al. *In vitro* mutagenesis of *Stevia* ethyl methanesulfonate and SRAP detection of salt-tolerant variants [J]. Chinese Herbal Medicine, 2014, 45 (24): 3612-3617.

[7] 郭翠容. 甜叶菊质量标准研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
Guo C R. Research on *Stevia* quality standards [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2014.

[8] 丁海荣, 洪立洲, 赵宝泉, 等. 甜叶菊主要用途及当前生产中存在的问题 [J]. 中国糖料, 2016, 38(6): 77-78, 80.
Ding H R, Hong L Z, Zhao B Q, et al. The main uses of *Stevia* and the current problems in production [J]. China Sugar, 2016, 38(6): 77-78, 80.

[9] 蒋小钰. 中国甜菊糖产业的技术经济分析 [J]. 科技广场, 2012 (8): 190-197.
Jiang X Y. Technical and economic analysis of China's *Stevia* industry [J]. Science and Technology Plaza, 2012(8): 190-197.

[10] 刘旺星, 陈雄飞, 胡淑芬, 等. 甜叶菊红外-热风联合干燥工艺优化 [J]. 食品工业科技, 2019, 40(22): 212-216, 233.
Liu W X, Chen X F, Hu S F, et al. *Stevia* infrared-hot air combined drying process optimization [J]. Food Industry Science and Technology, 2019, 40(22): 212-216, 233.

[11] Periche A, Castelló M L, Heredia A, et al. Influence of drying method on steviol glycosides and antioxidants in *Stevia rebaudiana* leaves [J]. Food Chemistry, 2015, 172: 1-6.

[12] Chranioti C, Chanioti S, Tzia C. Comparison of spray, freeze and oven drying as a means of reducing bitter aftertaste of steviol glycosides (derived from *Stevia rebaudiana* Bertoni plant); evaluation of the final products [J]. Food Chemistry, 2016, 190: 1151-1158.

[13] 李晓芳, 刘云宏, 马丽婷, 等. 远红外辐射温度对金银花干燥特性及品质的影响 [J]. 食品科学, 2017, 38(15): 69-76.
Li X F, Liu Y H, Ma L T, et al. The influence of far-infrared radiation temperature on the drying characteristics and quality of flos *loniceræ* [J]. Food Science, 2017, 38(15): 69-76.

[14] 李武强, 万芳新, 罗 燕, 等. 当归切片远红外干燥特性及动力学研究 [J]. 中草药, 2019, 50(18): 4320-4328.
Li W Q, Wan F X, Luo Y, et al. Far-infrared drying characteristics and kinetics of *Angelica* slices [J]. Chinese Herbal Medicine, 2019, 50(18): 4320-4328.

[15] 闫梦真, 王瑞生, 王金淼, 等. 星点设计-响应面法优选菊苣叶干燥方法和炮制工艺 [J]. 中草药, 2021, 52(7): 1957-1964.
Yan M Z, Wang R S, Wang J M, et al. Star point design-response surface method to optimize the drying method and processing technology of *Chicory* leaves [J]. Chinese Herbal Medicine, 2021, 52(7): 1957-1964.

[16] 郭 盛, 段金廛, 吴达维, 等. 干燥方法对何首乌块根中多元功效物质转化的影响 [J]. 中草药, 2014, 45(4): 498-503.
Guo S, Duan J A, Wu D W, et al. The effect of drying methods on the transformation of multi-functional substances in the roots of *Polygonum multiflorum* [J]. Chinese Herbal Medicine, 2014, 45(4): 498-503.

[17] 臧 琛, 聂其霞, 王国华, 等. Box-Behnken 响应面法优化铁皮石斛的真空冷冻干燥工艺 [J]. 中国实验方剂学杂志, 2018, 24(10): 15-20.
Zang C, Nie Q X, Wang G H, et al. Box-Behnken response surface method to optimize the vacuum freeze-drying process of *Dendrobium candidum* [J]. Chinese Journal of Experimental Formulas, 2018, 24(10): 15-20.

[18] 王儒桦, 应泽茜, 孙贝贝, 等. 基于 Box-Behnken 设计-响应面法优化蜜麦麸的制备工艺 [J]. 中草药, 2021, 52(12): 3538-3543.
Wang L H, Ying Z Q, Sun B B, et al. Optimization of the preparation process of honey wheat bran based on Box-Behnken design-response surface methodology [J]. Chinese Traditional and Herbal Medicine, 2021, 52(12): 3538-3543.

[19] 曲 彤, 袁培培, 张 琳, 等. 基于 AHP-熵权法结合 D-最优设计响应面法优化玄参蒸制工艺 [J]. 中草药, 2019, 50(10): 2325-2331.
Qu T, Yuan P P, Zhang L, et al. Optimization of *Radix scrophulariae* steaming process based on AHP-entropy weight method combined with D-optimal design response surface method [J]. Chinese Herbal Medicine, 2019, 50(10): 2325-2331.

[20] Huang X P, Li W Q, Wang Y M, et al. Drying characteristics and quality of *Stevia rebaudiana* leaves by far-infrared radiation [J]. LWT, 2021, 140: 110638.

[21] 国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准食品中水分的测定; GB 5009. 3—2016 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
National Health and Family Planning. National food safety standard determination of moisture in food: GB 5009. 3—2016 [S]. Beijing: China Standard Press, 2016.

[22] 国家药典委员会. 中国药典 [M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2020.
National Pharmacopoeia Commission. Chinese pharmacopoeia [M]. Beijing: China Medical Science and Technology Press, 2020.

[23] 国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准食品添加剂甜菊糖苷; GB 8270—2014 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
National Health and Family Planning. National food safety standard food additives *Steviol glycosides*: GB 8270—2014 [S]. Beijing: China Standard Press, 2015.

[24] 李 成, 吴 谦, 胡 满. 风险综合评价中指标权重确定方法对比研究 [J]. 石油工业技术监督, 2016, 32(1): 50-53, 57.
Li C, Wu Q, Hu M. Comparative study on the determination of index weights in comprehensive risk assessment [J]. Technical Supervision in the Petroleum Industry, 2016, 32(1): 50-53, 57.

[25] 冯彦辉. 用层次分析提升润滑质量的一个实例 [J]. 润滑油, 2019, 34(6): 1-6.
Feng Y H. An example of improving the quality of lubrication with analytic hierarchy process [J]. Lubricants, 2019, 34(6): 1-6.

[26] 曾海蓉, 李婷娜, 冉 倩, 等. 基于熵权法结合 Box-Behnken 响

应面法优化桂枝芍药知母颗粒复方提取工艺 [J]. 中草药, 2020, 51(1): 84-90.

Zeng H R, Li T N, Ran Q, et al. Optimization of the extraction process of Guizhi Shaoyao Zhimu granule compound based on entropy weight method combined with Box-Behnken response surface method [J]. Chinese Herbal Medicine, 2020, 51(1): 84-90.

[27] 陈玮莹. 江西电网 Z 供电分公司综合绩效评价研究 [D]. 南昌: 东华理工大学, 2019.

Chen W Y. Research on comprehensive performance evaluation of Jiangxi Power Grid Z Power Supply Branch [D]. Nanchang: East China University of Technology, 2019.

[28] 唐 石, 张继承, 李林凤. 复合系统视角下的我国粮食安全问题识别及评价 [J]. 统计与决策, 2016(7): 42-46.

Tang S, Zhang J C, Li L F. Identification and evaluation of our country's food security issues from the perspective of a composite system [J]. Statistics and Decision, 2016(7): 42-46.

[29] 蒋文恬. 我国商贸流通灰色关联产业结构优化效应研究 [J]. 商业经济研究, 2018(10): 172-175.

Jiang W T. Research on the optimization effect of grey related industrial structure of our country's commercial circulation [J]. Business Economics Research, 2018(10): 172-175.

[30] 张 琳, 周 欣, 闫 丹, 等. 基于 CRITIC-AHP 权重分析法结合 Box-Behnken 设计-响应面法优选陈皮饮片炮制工艺 [J]. 中草药, 2018, 49(16): 3829-3834.

Zhang L, Zhou X, Yan D, et al. Optimizing the processing technology of dried tangerine peel based on CRITIC-AHP weight analysis method combined with Box-Behnken design-response surface method [J]. Chinese Herbal Medicine, 2018, 49(16): 3829-3834.

[31] 杨全花. 甜叶菊化学成分、含量及其甜度的研究 [D]. 北京: 北京化工大学, 2012.

Yang Q H. Study on the chemical composition, content and sweetness of *Stevia* [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2012.

[32] 叶 琳, 邱龙辉. 虚拟世界中操纵技术的研究进展: I. 现有技术及分类 [J]. 计算机工程与应用, 2002(11): 77-78.

Ye L, Qiu L H. Research progress of manipulation technology in virtual world: I. Existing technology and classification [J]. Computer Engineering and Applications, 2002(11): 77-78.

[33] 付 洋, 程盛勇, 陈 慧, 等. 响应面法结合熵权法多指标优选蜘蛛香提取工艺 [J]. 中药材, 2021(2): 404-408.

Fu Y, Cheng S Y, Chen H, et al. Optimizing the extraction process of spider incense with multiple indexes by response surface method combined with entropy weight method [J]. Chinese Medicinal Materials, 2021(2): 404-408.