

响应面法优化茶叶籽仁霉变色选工艺

陈 斌,陈丽娟,唐建新,边晓东,郑寨生,陈长卿,袁名安

(浙江省农业机械研究院,浙江 金华 321017)

摘要:为提升茶叶籽仁霉变色选精度,保证茶叶籽油原料质量,对茶叶籽仁进行霉变色选试验。以选净率和误选率为响应值,振动频率、灵敏度和病斑值为因素,采用响应面试验对茶叶籽仁霉变色选工艺进行优化。结果表明:各因素对选净率的影响程度大小依次为灵敏度、病斑值和振动频率,各因素对误选率的影响程度大小依次为病斑值、灵敏度和振动频率;茶叶籽仁霉变色选最佳工艺条件为振动频率 50 Hz、灵敏度 32、病斑值 47,在此条件下普洱茶叶籽仁和鸠坑茶叶籽仁的选净率分别为 98.6% 和 99.1%,误选率分别为 3.89% 和 4.34%,霉变率分别为 0.67% 和 0.54%;在振动频率 50 ~ 60 Hz、灵敏度 30 ~ 33、病斑值 40 ~ 47 条件下,选净率在 98% 以上,误选率在 5% 以下。综上,应用响应面试验对茶叶籽仁霉变色选工艺进行优化,有助于选择合理的色选工艺参数,提高茶叶籽仁选净率,降低误选率和霉变率。

关键词:茶叶籽仁;霉变色选;选净率;误选率;霉变率

中图分类号:TS222+.1;TS224.2 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2025)05-0005-06

Optimization for color sorting process of moldy tea seed kernel by response surface methodology

CHEN Bin, CHEN Lijuan, TANG Jianxin, BIAN Xiaodong, ZHENG Zhaisheng, CHEN Changqing, YUAN Ming'an

(Zhejiang Academy of Agricultural Machinery, Jinhua 321017, Zhejiang, China)

Abstract: In order to improve the color sorting precision of moldy tea seed kernel and ensure the quality of tea seed oil raw materials, color sorting experiments of moldy tea seed kernel were carried out. Using sorting net rate and error - sorting rate of tea seed kernel as the response, and vibration frequency, sensitivity and disease spot value as factors, the color sorting process of moldy tea seed kernel was optimized by response surface methodology. The results showed that sensitivity had the greatest impact on the sorting net rate, followed by disease spot value and vibration frequency. Disease spot value had the greatest impact on the error - sorting rate, followed by sensitivity and vibration frequency. The optimal process conditions for color sorting of moldy tea seed kernel were obtained as follows: vibration frequency 50 Hz, sensitivity 32, and disease spot value 47. Under these conditions, the sorting net rates of Pu'er tea seed kernel and Jiukeng tea seed kernel were 98.6% and 99.1% respectively, the error - sorting rates were 3.89% and 4.34% respectively, and the mildew rates were 0.67% and 0.54% respectively. Under the conditions of vibration frequency 50 - 60 Hz, sensitivity 30 - 33, and disease spot value 40 - 47, the sorting net rate was above 98%, and the error - sorting rate was below 5%. In conclusion, through the optimization of color sorting process of moldy tea seed kernel by response surface

methodology, reasonable process parameters can be selected to increase sorting net rate and reduce the error - sorting rate and mildew rate of tea seed kernel.

Key words: tea seed kernel; color sorting for mildew; sorting net rate; error - sorting rate; mildew rate

收稿日期:2024-02-07;修回日期:2024-11-25

基金项目:浙江省“尖兵”“领雁”研发攻关计划项目(2023C04010);金华市重点科技项目(2021-2-009)

作者简介:陈 斌(1990),男,工程师,硕士,研究方向为油脂加工(E-mail)601858978@qq.com。

通信作者:袁名安,高级农艺师(E-mail)33067988@qq.com。

茶叶籽是茶树的种子,为茶叶生产的副产品。茶叶籽仁(干基)中含有 25%~35% 的油脂,茶叶籽油中不饱和脂肪酸含量超过 80%,其中油酸含量高达 50%~68%,亚油酸含量达 20% 以上,茶叶籽油中还含有丰富的维生素 E、多酚、植物甾醇等有益脂质伴随物,具有很高的营养价值和保健功能^[1-2]。近年来,茶叶籽的加工技术受到越来越多的关注,相关研究涉及茶叶籽油的原料处理^[3]、提取工艺^[4-6]和精炼技术^[7-8]等方面。

原料处理在茶叶籽油加工过程中尤为重要,合适的原料处理方式可以提高茶叶籽出油率和茶叶籽油质量。目前国内外学者主要对茶叶籽破壳^[9]、壳仁清选^[10]等原料处理技术进行了研究,对茶叶籽仁霉变筛选的研究相对较少。茶叶籽采收时节如遇下雨,或存在含水率较高、储存不当等情况,易出现霉变腐烂,因此有必要去除霉变籽,以提高茶叶籽油质量。目前应用色选机去除霉变籽是茶叶籽仁霉变筛选的主要方法,色选工艺参数是影响茶叶籽仁霉变筛选的重要因素,对于提高茶叶籽质量和茶叶籽油品质具有重要作用。因此,对茶叶籽仁霉变色选工艺参数的研究和优化具有重要意义。

色选过程中,调节振动频率可改变色选机流量。流量过大,通道内的茶叶籽仁料层过厚,影响 CCD 传感器对异色颗粒信号的正常捕捉,选净率降低;流量过小,茶叶籽仁不能铺满通道,在通道内出现翻滚跳动,同样影响色选精度,同时影响作业效率。病斑值是指物料上的坏点面积,大部分茶叶籽仁异色面积相对较小,病斑值设定偏高,坏点面积小的茶叶籽仁就会被漏选,影响色选效果。灵敏度是指色选机对物料颜色差异的识别能力,对茶叶籽仁霉变色选效果有显著影响。因此,本文以选净率和误选率为响应值,以振动频率、病斑值和灵敏度为考察因素,对茶叶籽仁霉变色选工艺进行优化,以期提高茶叶籽仁霉变色选效果,为色选工艺参数的合理选择提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

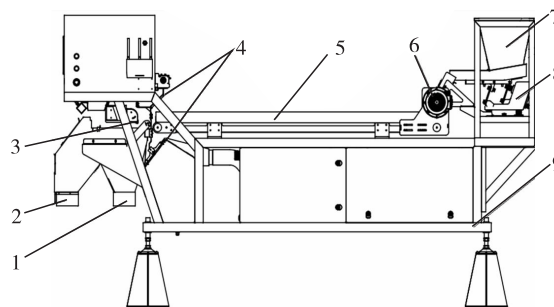
茶叶籽,于 2022 年 11—12 月收集自金华市农科院茶树基地,模拟储藏后霉变率升高,经烘干、脱壳后得茶叶籽仁,其含水率为 6.7%,仁中含壳率为 1.4%,碎仁率为 3.1%。

LG1 履带式色选机,安徽中科光电色选机械有限公司;ME3002 电子天平(0.01 g),上海精密仪器仪表有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 茶叶籽仁的霉变色选

茶叶籽仁霉变色选机结构如图 1 所示。茶叶籽仁从色选机顶部料斗进入设备,通过振动器的振动均匀分布在输送带上,由输送带传送至分选室内的观察区,并从 CCD 传感器和背景板间穿过。CCD 传感器接收来自茶叶籽仁反射和透射形成的合成光,传输到图像识别模块和工控机进行识别运算,给出判决信号,经控制系统处理后产生输出信号,驱动高速喷阀动作,将霉变的茶叶籽仁吹进接料斗的废料腔内,未霉变茶叶籽仁则继续下落至接料斗的成品腔内,从而达到茶叶籽仁霉变色选的目的。试验重复 3 次,结果取平均值。



注:1. 废品出料口; 2. 合格品出料口; 3. 高速喷阀; 4. CCD 传感器; 5. 输送带; 6. 电机; 7. 进料斗; 8. 振动器; 9. 机架

Note: 1. Unqualified product discharge port; 2. Qualified product discharge port; 3. High-speed spray valve; 4. CCD sensor; 5. Conveyor belt; 6. Motor; 7. Feeding device; 8. Vibrator; 9. Rack

图 1 色选机结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of color sorter

1.2.2 选净率测定

色选机正常运转 30 min 后,每隔 10 min 从合格品出料口取 1 次样,每次不少于 500 g,共取 3 次,将 3 次样品合并后,按 GB/T 5491—1985《粮食、油料检验 扦样、分样法》分样,至少取 500 g 样品,参照 GB/T 5494—2008《粮油检验 粮食、油料的杂质、不完善粒检验》拣出异色粒,称质量,按式(1)计算选净率(X)。

$$X = \left(1 - \frac{W_m}{W_z}\right) \times 100\% \quad (1)$$

式中: W_m 为异色粒质量, g; W_z 为色选试样质量, g。

1.2.3 误选率测定

色选机正常运转 30 min 后,每隔 10 min 从废品出料口取 1 次样,每次取样 0.5 min,共取 3 次,将 3 次样品合并后,按 GB/T 5491—1985 分样,至少取 500 g 样品,参照 GB/T 5494—2008 拣出正常粒,称

质量,按式(2)计算误选率(K)。

$$K=\frac{W_h}{W_b}\times 100\%$$

(2)

式中: W_h 为正常粒质量, g; W_b 为色选剔除物试样质量, g。

1.2.4 霉变率测定

按照 GB/T 5491—1985,取 500 g 茶叶籽仁,挑出霉变粒(凡肉眼清晰看出有霉菌感染、带霉斑的籽粒定为霉变粒),计算霉变率(发霉茶叶籽仁质量占检验茶叶籽仁质量的比例)。

2 结果与讨论

2.1 响应面试验

2.1.1 响应面试验设计及结果

灵敏度的调节范围为 0 ~ 100,其中 0 指茶叶籽仁都不被剔除,100 指茶叶籽仁都被剔除。在预试验的基础上,以振动频率、灵敏度和病斑值为影响因素,以选净率(X)和误选率(K)为响应值,进行响应面试验,探索适宜的茶叶籽仁霉变色选工艺参数。为便于分析工艺参数对茶叶籽仁霉变色选的影响,选用试验组数相对较少的 Box - Behnken 响应面试验设计方法^[11],应用 Minitab 软件设计响应面试验。响应面试验因素与水平如表 1 所示,Box - Behnken 中心组合试验设计及结果如表 2 所示。

表 1 响应面试验因素与水平

Table 1 Response surface methodology factors and levels

水平	f 振动频率/Hz	s 灵敏度	l 病斑值
-1	50	20	10
0	65	30	40
1	80	40	70

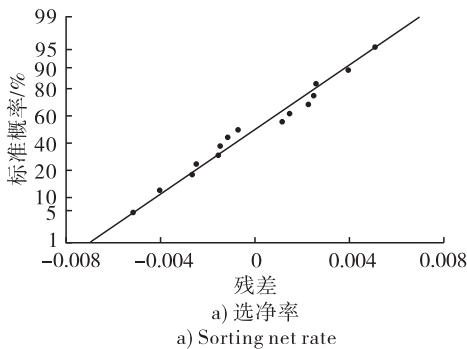


表 2 Box - Behnken 中心组合试验设计及结果

Table 2 Box - Behnken central composite design and response value

试验号	f	s	l	$X/\%$	$K/\%$
1	-1	-1	0	91.07	4.76
2	1	-1	0	88.94	7.37
3	-1	1	0	98.98	7.35
4	1	1	0	98.95	8.33
5	-1	0	-1	98.65	6.10
6	1	0	-1	98.39	6.07
7	-1	0	1	96.53	4.36
8	1	0	1	95.18	4.83
9	0	-1	-1	92.67	6.80
10	0	1	-1	99.38	10.87
11	0	-1	1	87.16	7.23
12	0	1	1	96.90	5.82
13	0	0	0	97.17	4.22
14	0	0	0	97.08	5.13
15	0	0	0	97.47	4.23

根据表 2 中的数据,应用 Minitab 软件对色选工艺参数进行拟合,获得选净率和误选率的回归方程: $X=73.63-0.229f+1.876s-0.0692l+0.0009f^2-0.00296s^2-0.0003l^2+0.0035fs-0.0006fl+0.0025sl$; $K=14.85+0.079f-0.993s+0.0188l+0.0002f^2+0.0238s^2+0.0009l^2-0.0027fs+0.0003fl-0.0046sl$ 。

2.1.2 适合性和显著性检验

2.1.2.1 适合性检验

通过残差分析,对回归方程进行适合性检验。如果残差呈正态分布,则图像呈直线状,表明所获得的回归方程是适合的^[11]。图 2 为选净率和误选率模型残差分析图。

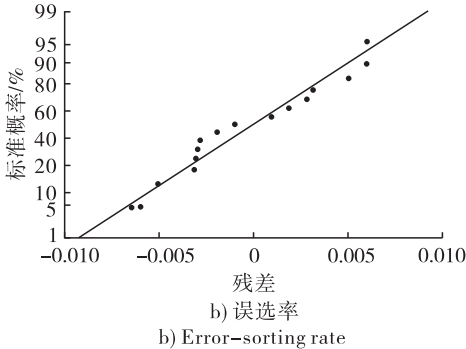


图 2 茶叶籽仁霉变色选参数模型残差分析图

Fig.2 Plot of residual analysis for color sort model of moldy tea seed kernel

由图 2 可知,选净率和误选率的残差分布均呈直线状,因此所建立的茶叶籽仁霉变色选模型适合,可用 2.1.1 建立的回归方程对茶叶籽仁霉变选净率和误选率进行分析及预测。

2.1.2.2 显著性检验

模型的方差分析和显著性检验是衡量模型设计合理性及预测能力的重要方式^[12]。对响应模型进行方差分析,结果如表 3 所示。

表 3 响应模型方差分析
Table 3 Variance analysis of response model

方差来源	选净率(X)					误选率(K)				
	自由度	平方和	均方	F	p	自由度	平方和	均方	F	p
f	1	0.000 178	0.000 178	6.96	0.046	1	0.000 203	0.000 203	4.57	0.086
s	1	0.014 766	0.014 766	578.72	0.000	1	0.000 482	0.000 482	10.85	0.022
l	1	0.002 218	0.002 218	86.92	0.000	1	0.000 722	0.000 722	16.25	0.010
f^2	1	0.000 015	0.000 015	0.59	0.476	1	0.000 001	0.000 001	0.02	0.906
s^2	1	0.003 230	0.003 230	126.57	0.000	1	0.002 097	0.002 097	47.19	0.001
l^2	1	0.000 024	0.000 024	0.94	0.377	1	0.000 219	0.000 219	4.93	0.077
fs	1	0.000 110	0.000 110	4.32	0.092	1	0.000 066	0.000 066	1.49	0.276
fl	1	0.000 030	0.000 030	1.16	0.330	1	0.000 006	0.000 006	0.14	0.723
sl	1	0.000 230	0.000 230	9.00	0.030	1	0.000 751	0.000 751	16.90	0.009
线性	3	0.017 162	0.005 721	224.20	0.000	3	0.001 407	0.000 469	10.56	0.013
平方	3	0.003 300	0.001 100	43.10	0.001	3	0.002 237	0.000 746	16.78	0.005
交互	3	0.000 369	0.000 123	4.83	0.061	3	0.000 823	0.000 274	6.18	0.039
模型	9	0.020 831	0.002 315	90.71	0.000	9	0.004 468	0.000 496	11.17	0.008

注: $p < 0.10$ 为显著相关, $p < 0.05$ 为极显著相关
Note: Significant correlation($p < 0.10$); Extremely significant correlation($p < 0.05$)

由表 3 可知:选净率和误选率模型的 F 值分别为 90.71 和 11.17, p 值分别为 0.000 和 0.008,表明模型的可信度很高,所建立的回归方程模拟精确^[13];选净率和误选率回归方程的决定系数(R^2)分别为 0.993 9 和 0.952 6,表明模型的拟合程度良好,模型的校正决定系数(R^2_{Adj})分别为 0.983 0 和 0.867 4,说明该模型能解释选净率 98.30% 和误选率 86.74% 的响应值变化,表明模型实际值和预测值有较好的一致性,回归性较好。综合适合性检验和显著性检验结果,表明本文所建立的选净率和误选率的回归方程是有意义的。一次项 f 、 s 和 l 对选净率的影响极显著,二次项 s^2 和交互项 sl 对选净率影响极显著,交互项 fs 影响显著。模型中的线性项和平方项对选净率影响极显著,交互项影响显著。各因素对选净率的影响程度大小依次为灵敏度、病斑值和振动频率。因此,在茶叶籽仁霉变色选作业中,从选净率角度考虑,在选择和优化色选工艺参数时,应优先考虑灵敏度和病斑值。一次项 s 、 l 对误选率影响极显著, f 影响显著;此外,二次项 s^2 和交互项 sl 对误选率的影响极显著,二次项 l^2 影响显著。模型中的线性项、平方项和交互项对误选率影响极显著。各因素对误选率的影响程度大小依次为病斑值、灵敏度和振动频率。因此,在茶叶籽仁霉变色选作业中,从误选率角度考虑,在选择和优化色选工艺参数时,也应优先考虑病斑值和灵敏度。

2.1.3 预测精度

根据模型给出合适的工艺参数,进行验证性试验,来评价模型的预测精度。选择与表 2 不同的工

艺参数:振动频率 50 Hz,灵敏度 40,病斑值 70。将上述工艺参数代入 2.1.1 回归方程中,计算出选净率为 97.84%,误选率为 5.98%。按选择的工艺参数进行茶叶籽仁霉变色选试验,测得选净率为 97.48%,误选率为 5.94%,与模型预测值的偏差率分别为 0.37% 和 6.69%。上述结果表明,本文所建立的回归方程具有较好的预测精度,能较准确地预测不同工艺参数下的选净率和误选率,能较好地描述色选效果与工艺参数之间的关系。

2.1.4 色选工艺参数对选净率和误选率的影响分析

2.1.4.1 对选净率的影响

图 3 为 3 个工艺参数对选净率的响应曲面图,其中图 3a 中振动频率为 65 Hz,图 3b 中病斑值为 40。

由图 3a 可知,增大灵敏度和减小病斑值均能提高选净率。这是因为灵敏度越高越能精准地将异色粒筛选出,避免将霉变茶叶籽仁误判为合格品,从而提高茶叶籽仁选净率。此外,大部分茶叶籽仁表面的异色点数相对较小,病斑值设定偏高后,霉变程度小的茶叶籽仁就会被漏选,选净率降低,影响茶叶籽仁霉变色选效果。由图 3b 可知,当灵敏度为 20 时,选净率随着振动频率的增大而减小(如箭头 A1 所示)。但当灵敏度为 40 时,选净率随着振动频率的增大则变化不大(如箭头 A2 所示)。这是因为茶叶籽仁霉变色选过程中,振动频率越高,下料速度越快,进而增大茶叶籽仁流量。当灵敏度为低水平时,随着振动频率增加,色选通道内的茶叶籽仁物料层

变厚,影响 CCD 传感器对霉变茶叶籽仁颗粒信号的正常捕捉,从而降低选净率。此外,从表 3 可知,灵敏度对选净率的影响程度远高于振动频率,因此在

灵敏度处于高水平时,且在合适的振动频率范围内,选净率随着振动频率增加变化并不大。

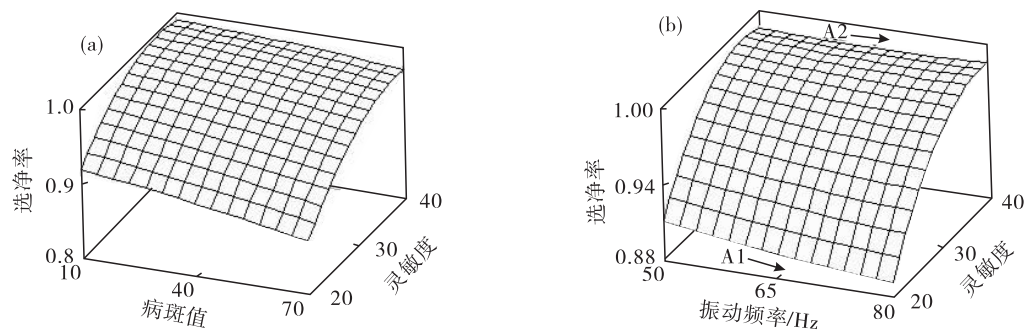


图 3 3 个工艺参数对选净率影响的响应曲面图

Fig. 3 Response surface for sorting net rate with process parameters

2.1.4.2 对误选率的影响

振动频率为 65 Hz 时,灵敏度和病斑值对误选率的响应曲面图如图 4 所示。

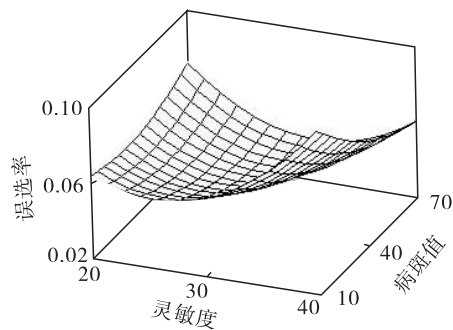


图 4 误选率与灵敏度和病斑值之间的响应曲面图

Fig. 4 Response surface for error – sorting rate with sensitivity and disease spot value

由图 4 可知,随着灵敏度的增加,误选率呈先减小后增大的趋势。这是因为在茶叶籽仁霉变色选过程中,一些细碎和翻滚跳动的未霉变茶叶籽仁因无法通过输送带的摩擦作用获得足够的抛物线速度而不能落入成品腔,只能落入废料腔,从而提高了误选

率。当灵敏度较小时,被筛选的霉变茶叶籽仁较少,误选率较高;随着灵敏度的增大,茶叶籽仁霉变色选精度提高,被筛选的霉变茶叶籽仁增多,误选率有所降低;但当灵敏度继续增大时,剔除的异色粒增多,误选率增加。

2.2 色选工艺参数的选择与优化

利用 Minitab 软件,得到茶叶籽仁霉变色选最佳工艺条件为振动频率 50 Hz、灵敏度 32、病斑值 47,在此条件下选净率预测值为 98.25%,误选率预测值为 4.13%。在最佳工艺条件下,对目前市售茶叶籽油主要原料品种普洱茶茶叶籽仁和鸠坑茶叶籽仁进行霉变色选试验,选净率分别为 98.6% 和 99.1%,误选率分别为 3.89% 和 4.34%,茶叶籽仁霉变率由色选前 7.79% 和 3.58% 分别降低到 0.67% 和 0.54%,分别降低了 91.4% 和 84.9%,符合茶叶籽油原料要求。

在最佳工艺条件下,茶叶籽仁霉变色选效果见图 5。

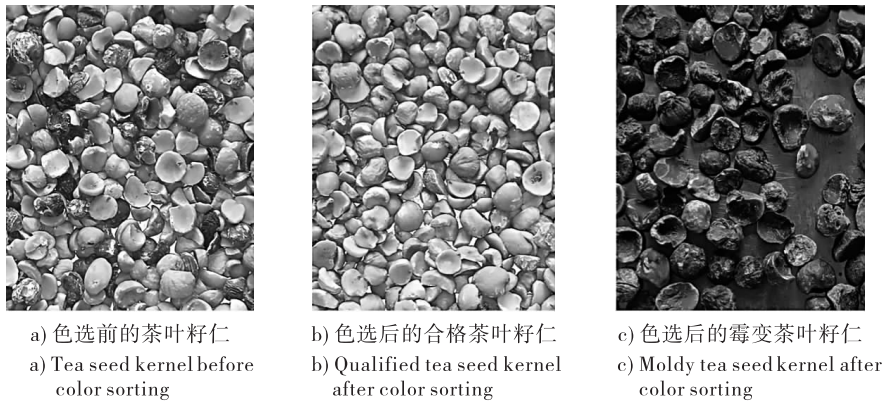


图 5 茶叶籽仁霉变色选效果

Fig. 5 The color sorting effect of moldy tea seed kernel

由图5可见,正常的茶叶籽仁外观以淡黄色为主,霉变的茶叶籽仁呈灰色或有霉斑。色选工序能有效剔除发霉籽、未剥壳籽和茶叶籽壳等异色物料和杂质,显著提高茶叶籽油原料质量。因此,色选工艺可从原料源头保障茶叶籽油质量安全,为茶叶籽油精准适度加工创造条件。

考虑实际情况及其他因素,可选择出合理的色选工艺参数范围,将茶叶籽仁霉变色选效果控制在设定的选净率和误选率之内,如设定选净率不低于98%,误选率不超过5%,根据回归模型可以得到色选工艺参数范围为振动频率50~60 Hz、灵敏度30~33、病斑值40~47。

3 结 论

通过茶叶籽仁霉变色选试验,建立了茶叶籽仁霉变色选效果与工艺参数之间的二阶回归方程,所建立的霉变色选模型具有较好的适合性和显著性,茶叶籽仁霉变色选模型预测精度较高,能较好地描述茶叶籽仁霉变色选效果与工艺参数之间的关系。

通过茶叶籽仁霉变色选模型,得到茶叶籽仁霉变色选最佳工艺条件为振动频率50 Hz、灵敏度32、病斑值47,在此条件下普洱茶叶籽仁和鸠坑茶叶籽仁的选净率分别为98.6%和99.1%,误选率分别为3.89%和4.34%,茶叶籽仁的霉变率分别为0.67%和0.54%。合适的茶叶籽霉变色选工艺参数范围为振动频率50~60 Hz、灵敏度30~33、病斑值40~47,在此条件下选净率不低于98%,误选率不超过5%。此外,将色选与脱壳、脱膜等其他茶叶籽原料处理工序有机结合,可以提高茶叶籽油原料质量和茶叶籽油品质。

参考文献:

[1] ZHOU S, LI Z Y, SONG H Z, et al. Recent advances in tea seeds (*Camellia Sinensis* (L.) O. Kuntze): Active ingredients, health effects, and potential applications [J/

OL]. Trends Food Sci Tech, 2023, 141: 104192 [2024-02-07]. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.104192>.

[2] 常亚丽,黄双杰,刘威,等.茶叶籽油研究进展[J].中国粮油学报,2019,34(12):138-146.

[3] 陈长卿,郑寨生,陈斌,等.茶叶籽脱壳、清选和色选自动化加工技术[J].农业工程,2021,11(7):64-67.

[4] 于立志,刘奇琳,张婷婷,等.乙醇水剂法提取武夷水仙茶叶籽油及其品质分析[J].热带作物学报,2021,42(4):1120-1126.

[5] 谷政伟,姚磊,李丹,等.含水正丁醇同步提取茶叶籽油和茶皂素工艺[J].中国粮油学报,2021,36(3):79-83.

[6] 徐君飞,谢慧,刘兰,等.超声波辅助酶法提取茶叶籽油及其脂肪酸组成分析[J].中国油脂,2018,43(1):20-23.

[7] 陈琳,卢红伶,胡文君,等.茶叶籽油精炼工艺条件对其质量指标的影响[J].中国粮油学报,2018,33(12):74-79.

[8] 常明,朱晋萱,刘睿杰,等.油脂精炼对茶叶籽油品质变化的影响[J].中国油脂,2014,39(6):31-34.

[9] 李明真,薛强,李洋.基于双向渐进结构优化法的油茶籽脱壳机辊筒的拓扑优化设计[J].中国油脂,2019,44(2):147-152,160.

[10] 郑寨生,陈斌,边晓东,等.一种茶叶籽壳仁分离机:CN 202110460658.0[P]. 2022-07-29.

[11] MONTGOMERY D C. 实验设计与分析[M]. 傅珏生,张健,王振羽,等译.北京:人民邮电出版社,2009:60-62,367-370.

[12] BASHIR M J K, AZIZ H A, YUSOFF M S, et al. Application of response surface methodology (RSM) for optimization of ammoniacal nitrogen removal from semi-aerobic and fill leachate using ion exchange resin[J]. Desalination, 2010, 254(1):154-161.

[13] 汪昆立,黄俊圻,张海龙,等.响应面优化组氨酸改性蒙脱土脱除花生油中黄曲霉毒素B₁工艺[J].中国油脂,2023,48(12):71-75,109.