

## 电子眼技术结合多元统计分析评价滇红工夫茶汤色泽

陈佳瑜<sup>1,2</sup>, 杨艳芹<sup>2</sup>, 袁海波<sup>2</sup>, 邓余良<sup>2</sup>, 沈帅<sup>2</sup>, 刘政权<sup>1\*</sup>, 江用文<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>安徽农业大学 茶树生物学与资源利用国家重点实验室 合肥 230036

<sup>2</sup>中国农业科学院茶叶研究所 农业部茶树生物学与资源利用重点实验室 杭州 310008)

**摘要** 采用电子眼技术检测 50 个滇红工夫茶汤色泽,结合多元统计分析对茶汤色泽品质进行量化评价。结果表明:基于偏最小二乘判别分析(PLS-DA)可有效实现茶汤色泽品质优质组( $\geq 90$ 分)和非优组( $< 90$ 分)的准确判别,并具有较好的解释和预测能力( $R^2Y=0.988, Q^2=0.981$ )。预测集验证了该模型的可靠性,准确率达 100%。在此基础上,基于偏最小二乘回归法(PLSR)实现了茶汤色泽品质得分的准确预测(校正集:  $R_c=0.97, RMSEC=0.79, RPD_c=4.15$ ; 预测集:  $R_p=0.90, RMSEP=1.36, RPD_p=2.15$ ),预测值与真实值的绝对误差在 2.3 分内,相对误差在 2.7% 内。电子眼技术作为新型的智能感官评价方法,可替代人工感官审评,有效应用于滇红工夫茶汤色泽品质的快速、准确评价。

**关键词** 电子眼; 多元统计分析; 茶汤; 色泽; 品质评价

**文章编号** 1009-7848(2022)09-0248-11 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2022.09.026

工夫红茶是我国特有的红茶品种,品类多且产地广。其中,滇红工夫是我国第一个以大叶种为原料制成的红茶,主产于云南省的临沧、保山、西双版纳、思茅(普洱)、德宏等地。作为中国工夫红茶的后起之秀,滇红工夫因形美、色艳、香高、味醇的品质特点,在国内外市场中广受欢迎<sup>[1]</sup>。茶汤的综合品质体现在“色、香、味”<sup>[2]</sup>3 个方面。目前对滇红工夫茶的研究多集中在滋味<sup>[3]</sup>、香气<sup>[4]</sup>和营养成分<sup>[5]</sup>,较少有针对茶汤色泽属性的基础性研究。色泽不仅是衡量红茶发酵程度的关键指标<sup>[6]</sup>,也是评价茶汤品质的重要因子之一,具有重要的研究意义。

目前,茶汤色泽品质的评价手段主要有感官评价和色差分析。感官评价是由专家审评小组依据一定的评价标准和丰富的经验给予样品描述性评语和打分,具有快速和直观的优点,然而,易受个体主观影响,一致性和重复性较差<sup>[7]</sup>。此外,感官评价的描述术语通常较为模糊,缺乏客观的量化评价标准。近些年越来越多的研究采用现代仪器

手段进行茶汤色泽的表征。色差分析法是当前茶汤色泽评价应用最为广泛的方法之一<sup>[8]</sup>。用于色差分析的颜色排序体系包括 HunterLab 体系、CIELAB 体系和 CIELCH 体系<sup>[9]</sup>。然而,此方法所得色泽参数反映的是透过比色皿的透射光,与人眼实际感受到的茶汤色泽并不一致,在一定程度上不能完全反映茶汤的真实色泽。马婉君等<sup>[10]</sup>的研究表明,基于计算机视觉的方法,相比于台式色差仪,对六堡茶汤色得分的预测准确度更高。

电子眼技术是在仿生学基础上发展起来的一种识别样品视觉信息的检测仪器<sup>[11]</sup>。它通过模拟人眼对样品的感知,提供稳定的图像采集环境,保证样品分析条件的一致性,利用计算机处理软件对样品的颜色、形状等视觉参数进行相关评价<sup>[12]</sup>。近年来,该技术在水果成熟度鉴别<sup>[13-14]</sup>、中药材规格等级判别<sup>[11,15-16]</sup>、乳制品加工<sup>[17-18]</sup>与储存质量评价<sup>[19-20]</sup>等方面得到广泛应用,然而,在茶汤色泽品质评价方面鲜有报道。本研究选用滇红工夫茶汤为研究对象,采用电子眼技术结合多元统计分析对色泽品质进行评价,以实现茶汤色泽品质分类的准确判别和品质得分的精准预测。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

收集产于云南省不同产区(临沧市、保山市、普洱市、红河自治州、西双版纳自治州、德宏自治

收稿日期: 2021-09-19

基金项目: 国家茶叶产业技术体系红茶加工岗位项目(CARS-19);国家自然科学基金项目(31902083, 31972465)

作者简介: 陈佳瑜(1997—),女,硕士生

通信作者: 刘政权 E-mail: liuzq0312@163.com

江用文 E-mail: jiangyw@tricaas.com

州等)、不同等级(特级、一级、二级、三级等)、不同干茶形状(条形、卷曲型、螺形、针形)的工夫红茶,共 50 个代表性茶样。

表 1 样本信息

Table 1 Information of tea samples in this study

茶样编号	产地	等级	外形	茶样编号	产地	等级	外形
T1	临沧	特级	条索状	T26	临沧	二级	条索状
T2	昆明	二级	勾曲形	T27	临沧	特级	条索状
T3	普洱	特级	针形	T28	临沧	一级	螺状
T4	保山	特级	针形	T29	西双版纳	一级	条索状
T5	保山	特级	条索状	T30	临沧	一级	勾曲形
T6	保山	特级	条索状	T31	临沧	特级	条索状
T7	保山	三级	勾曲形	T32	保山	二级	勾曲形
T8	昆明	二级	针形	T33	临沧	特级	眉形
T9	临沧	特级	条索状	T34	临沧	一级	勾曲形
T10	临沧	特级	条索状	P1	保山	二级	针形
T11	临沧	二级	螺状	P2	保山	三级	条索状
T12	临沧	特级	针形	P3	德宏	三级	条索状
T13	临沧	特级	雀舌状	P4	临沧	二级	勾曲形
T14	临沧	特级	雀舌状	P5	临沧	三级	条索状
T15	西双版纳	二级	针形	P6	临沧	特级	雀舌状
T16	临沧	三级	螺状	P7	临沧	特级	眉形
T17	西双版纳	特级	条索状	P8	临沧	特级	针形
T18	临沧	特级	条索状	P9	临沧	特级	条索状
T19	临沧	一级	条索状	P10	临沧	特级	针形
T20	临沧	一级	条索状	P11	临沧	特级	条索状
T21	普洱	特级	针形	P12	临沧	特级	条索状
T22	普洱	特级	针形	P13	临沧	特级	勾曲形
T23	临沧	一级	条索状	P14	临沧	一级	勾曲形
T24	德宏	特级	条索状	P15	临沧	特级	针形
T25	德宏	特级	眉形	P16	保山	一级	针形

## 1.2 仪器与设备

IRIS VA400 型电子眼, 法国 AlphaM.O.S 公司; CM-5 台式分光测色计, 日本 KonicaMinolta 控股公司; 国家标准成品茶审评杯碗, 中国农业科学院茶叶研究所。

## 1.3 方法

1.3.1 茶汤制备 参考《茶叶感官审评方法》GB/T 23776-2018, 取 3.0 g 代表性茶样, 按照茶水比(质量比)1:50 注入沸水于审评杯中至满, 加盖冲泡 5 min 后, 等速将茶汤滤出置于相应审评碗中。

1.3.2 感官审评 参考《茶叶感官审评方法》GB/T 23776-2018, 以百分制对滇红工夫茶汤色泽品质进行评分。其中, 茶汤色泽品质特征表现: ①为

橙红明亮或红明亮的样品级别为甲类, 得分在 90~99 之间; 表现为尚红亮的样品级别为乙类, 得分在 80~89 之间; 变现为尚红欠亮的样品级别为丙类, 得分在 70~79 之间。感官审评专家小组由 5 人构成, 均具有国家高级评茶员及以上等级职业资格。去除一个最高分和一个最低分, 取其余分数的平均值作为最终得分。

1.3.3 色差仪数据采集 色差仪采用 D65 标准光源(即色温 6 500 K 的人工日光光源)和 10°平面测量的观察方式。数据采集前对色差仪进行校准, 以黑板为基准进行 0% 校准, 以纯水为基准进行 100% 校准。采集不同色空间(CIELAB 体系和 HunterLab 体系)下的 13 个色差分析指标的数据:

$L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$ 、 $C^*$ 、 $H^*$ 、 $L99$ 、 $a99$ 、 $b99$ 、 $C99$ 、 $H99$ 、 $L$ (Hunter)、 $a$ (Hunter)、 $b$ (Hunter)。其中, $L$ 表示明度, $a$ 表示红绿度, $b$ 表示黄蓝度, $C$ 表示彩度, $H$ 表示色调角<sup>[21]</sup>。把待测茶汤注入比色皿内进行检测,每个茶汤样品重复测定3次。

1.3.4 电子眼数据采集 采集数据前,开机15 min以上使光室内的光线稳定,调整镜头的曝光度和焦距,并将比色卡置于光室内进行自动校准。根据预试验结果选择顶部及底部标准光源(2\*2荧光灯灯管,相当于D65光源)作为照明条件,采用5 mm光圈的CMOS摄像头采集茶汤样品的图像(图1)。每个茶汤样品固定于白色背景板下同一个位置进行拍摄,重复采集图像3次。对采集图像进行统一预处理,提取图像中心圈的特征信息,记录其全部色号及相应面积比例作为分析数据。

1.3.5 数据分析 以2:1比例把全部样本随机分为校正集(34)和预测集(16),以预测集样本数据验证校正集样本所建立的模型。根据1.3.2节感官审评结果,以茶汤色泽品质评分90分作为界限将样品分为两类:≥90分的茶汤色泽品质划分为优质组,反之为非优质组。采用SIMCA软件对电子眼采集的数据进行PLS-DA进行分类判别,进一步对其进行PLS回归分析,以实现对其滇红工夫茶汤色泽的品质得分的准确预测。模型精度评价参数的计算公式如下:

$$R_c = \sqrt{1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_{cal} - y_{act})^2}{\sum_{i=1}^n (y_{cal} - y_{mean})^2}} \quad (1)$$

$$R_p = \sqrt{1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_{pre} - y_{act})^2}{\sum_{i=1}^n (y_{pre} - y_{mean})^2}} \quad (2)$$

$$RMSEC = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_{cal} - y_{act})^2}{n}} \quad (3)$$

$$RMSEP = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_{pre} - y_{act})^2}{n}} \quad (4)$$

$$RPD_c = \frac{SD_c}{RMSEC} \quad (5)$$

$$RPD_p = \frac{SD_p}{RMSEP} \quad (6)$$

式中: $R_c$ ——校正集相关系数; $R_p$ ——预测集相关系数; $RMSEC$ ——校正集均方根误差; $RMSEP$ ——预测集均方根误差; $RPD_c$ ——校正集相

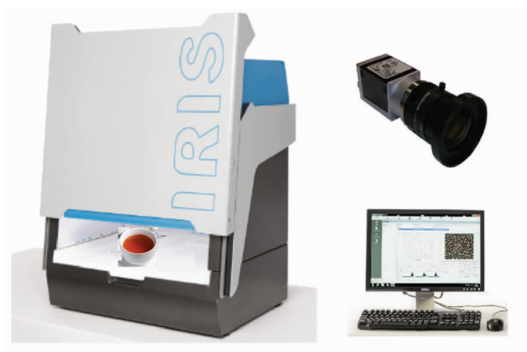


图1 IRIS VA400型电子眼仪器实物图  
Fig.1 Physical drawing of the IRIS VA400 electronic eye

对分析误差; $RPD_p$ ——预测集相对分析误差; $n$ ——数据集中样本个数; $y_{cal}$ ——校正集样本预测值; $y_{pre}$ ——预测集样本预测值; $y_{act}$ ——样本真实值; $SD_c$ ——校正集样本标准偏差; $SD_p$ ——预测集样本标准偏差。其中, $R_c$ 、 $R_p$ 、 $RPD_c$ 和 $RPD_p$ 的值越大, $RMSEC$ 和 $RMSEP$ 的值越小,模型精度和预测能力越高<sup>[22]</sup>。通常认为,相关系数 $R > 0.8$ ,相对分析误差 $RPD > 2$ <sup>[23]</sup>,模型具备较高的可靠性。

## 2 结果与分析

### 2.1 电子眼采集茶汤色泽参数的重复性考察

为验证图像采集环境的稳定性,以保证试验结果的可靠性和重复性,分别任意选取3个优质组和非优质组的茶汤样品,筛选占比大于1%的色号,计算各色号比例在对应样本中的相对标准偏差(RSD)。结果显示,电子眼提取到的以上样本的特征色号RSD值均小于5%,表明电子眼采集的茶汤色泽参数具有良好的重复性,可用于下一步茶汤色泽品质的分类判别和品质得分的预测。

### 2.2 基于PLS-DA分析的滇红工夫茶汤色泽品质的分类判别

本研究中50个样本共提取到27个特征色号,每个色号在不同样品中所占比例各不相同。27个特征色号对应的特定的 $R$ 、 $G$ 、 $B$ 和 $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$ 值见表3,视觉色彩如图2所示。相邻色号的 $R$ 、 $G$ 、 $B$ 和 $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$ 值较接近,人眼的视觉色彩感受相似。为了考察样本之间的异同点以及关键色号对茶汤色泽品质的影响,引入了偏最小二乘-判别分析(PLS-DA)。PLS-DA是一种常见的有监督的判别

表 2 电子眼采集汤色数据的重复性考察(%)

Table 2 The repeatability analysis of tea infusions collected by electronic eye (%)

样本		1840	1841	1842	2096	2097	2098	2112	2113	2114	2368	2384	2640
优质组	T22	-	-	-	0.42	1.86	2.25	1.76	3.78	4.39	-	-	-
	P7	-	-	-	2.73	0.53	0.00	1.50	4.56	4.80	-	-	-
	T24	-	-	-	3.41	4.60	-	0.36	1.81	2.69	-	-	-
非优组	T7	2.62	1.88	5.12	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	P6	2.30	0.83	2.32	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	T3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4.02	0.47	0.53

注：“-”表示此样本未提取到对应色号。

表 3 特征色号的参数信息

Table 3 The parameters of the characteristic color codes

色号	R	G	B	L*	a*	b*
1840	120	56	8	31.872	26.578	39.556
1841	120	56	24	31.964	26.943	32.586
1842	120	56	40	32.130	27.591	23.589
1843	120	56	56	32.378	28.555	13.862
1856	120	72	8	35.673	17.697	42.188
1857	120	72	24	35.752	18.071	36.141
1858	120	72	40	35.894	18.738	27.913
2096	136	56	8	34.656	33.309	42.978
2097	136	56	24	34.739	33.607	36.344
2098	136	56	40	34.886	34.139	27.606
2112	136	72	8	38.090	24.978	45.189
2113	136	72	24	38.162	25.288	39.379
2114	136	72	40	38.292	25.841	31.361
2128	136	88	8	41.982	16.140	47.807
2352	152	56	8	37.547	39.591	46.462
2368	152	72	8	40.649	31.849	48.316
2369	152	72	24	40.715	32.108	42.754
2384	152	88	8	44.229	23.402	50.581
2385	152	88	24	44.287	23.667	45.706
2624	168	72	8	43.320	38.327	51.526
2640	168	88	8	46.609	30.328	53.482
2656	168	104	8	50.277	21.880	55.788
2896	184	88	8	49.100	36.920	56.476
2912	184	104	8	52.513	28.813	58.511
2928	184	120	8	56.232	20.424	60.847
3168	200	104	8	54.855	35.461	61.330
3184	200	120	8	58.350	27.331	63.426

分析方法,该方法通过预先对样本指定分类,通过发掘组间的异同点进而对研究对象进行判别<sup>[24]</sup>。本研究中,以特征色号的面积占比作为自变量( $X$ ),以茶汤色泽品质优质组( $\geq 90$ 分)和非优组( $< 90$ 分)作为因变量( $Y$ )进行 PLS-DA 分析。结果显示,

以校正集(34个样本)建立的判别模型稳定,且预测能力优秀(拟合参数  $R^2Y=0.988$ ,  $Q^2=0.981$ )。把预测集(16个样本)代入该模型中进一步验证,实现了样本 100%的正确分类。

本研究 PLS-DA 模型得分图如图 3a 所示,优

质组和非优组分别落在 Y 轴两侧, 存在明显的分离趋势。对模型进行 200 次置换检验,  $R^2$  回归直线与 Y 轴的截距小于 0.4,  $Q^2$  回归直线与 Y 轴的截距小于 0, 表明不存在过拟合的现象<sup>[25]</sup>, 该模型结果可靠(图 3b)。载荷值代表主成分对各自变量反应程度的大小, 各自变量(特征色号)距离中心点的离散程度越高, 表明其对两组分类的贡献越大, 且离因变量越近的自变量对该分类的贡献越大<sup>[26]</sup>。由 PLS-DA 载荷图可见(图 3c), 色号 2113, 2114, 2096 和 2097 对区分优质组的贡献较大。变量投影重要性(VIP)可以量化模型中每一个变量

因子对分类的贡献度, VIP 值越大表明变量在不同组间的差异越显著, 通常认为 VIP 值>1 为关键变量<sup>[27]</sup>。本研究所建立的 PLS-DA 模型中(图 3d), VIP 值大于 1 的变量共有 8 个色号, 按其 VIP 值大小排序依次为 2114, 2113, 2096, 2097, 2112, 2098, 1857, 1856。上述重要色号的 RGB 三维散点图和  $L^*a^*b^*$  三维散点图(图 4), 呈现一定的空间聚集分布, 其中 R 值介于 120~136, G 值介于 56~72, B 值介于 8~40,  $L^*$  值介于 34.7~38.3,  $a^*$  值介于 17.7~34.1,  $b^*$  值介于 27.6~45.2。

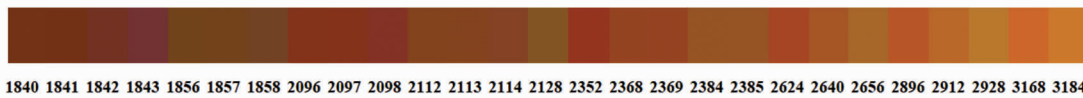


图2 特征色号的视觉色彩效果

Fig.2 The color sensation of the characteristic color codes

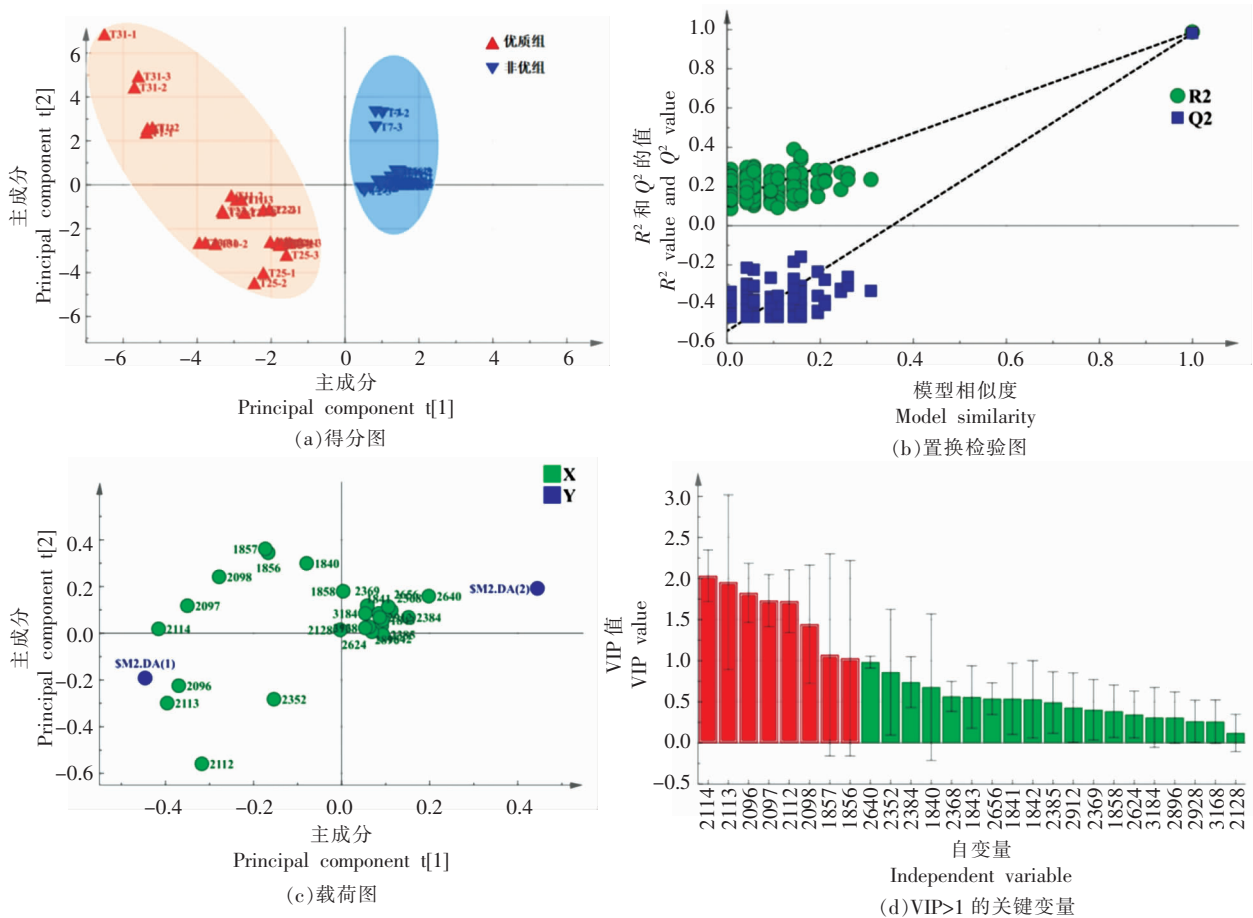


图3 基于电子眼技术的茶汤色泽品质优质组和非优质组的 PLS-DA 分析

Fig.3 PLS-DA analysis of high quality and non-high quality tea infusions based on electronic eye



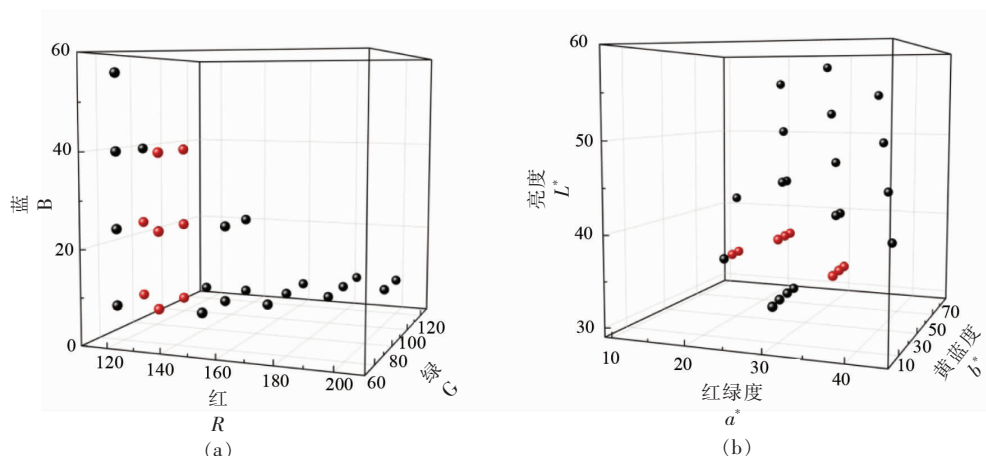


图 4 VIP>1 的关键色号 RGB 三维散点图(a),  $L^* a^* b^*$  三维散点图(b)

Fig.4 The key variable based on VIP>1 3D scatter of RGB (a); 3D scatter of  $L^* a^* b^*$  (b)

### 2.3 基于 PLSR 的滇红工夫茶汤色泽品质得分的预测

在实现滇红工夫茶茶汤色泽品质分类判别的基础上, 我们期望能够对茶汤色泽品质的具体得分进行量化评价, 为此我们引入了偏最小二乘回归分析(PLSR)。PLSR 通过将预测变量和观测变量投影到一个新的空间, 以此建立线性回归模型<sup>[28]</sup>。PLSR 结合了主成分分析、线性回归分析和典型相关性分析的特点<sup>[29]</sup>, 其目的是从一组独立变量(预测因子)中分析预测一组因变量。本研究中, 我们以电子眼提取的特征色号面积占比作为自变量, 茶汤色泽品质得分作为因变量进行偏最小二乘回归分析。以 34 个校正集样本建立 PLSR 模型, 其

拟合参数  $R^2Y=0.943, x^2=0.747$ , 表明模型稳定且预测能力良好, 预测值与真实值的绝对误差在 2.2 分以内, 相对误差在 2.3% 以内。把 16 个预测集样本代入上述模型进行验证, 结果表明模型有效可靠, 预测值与真实值的绝对误差在 2.3 分以内, 相对误差在 2.7% 以内(表 4)。其中, 校正集的相关系数  $R_c=0.97$ , 均方根误差  $RMSEC=0.79$ , 相对分析误差  $RPDc=4.15$ ; 预测集样本的相关系数  $R_p=0.90$ , 均方根误差  $RMSEP=1.36$ , 相对分析误差  $RPDp=2.15$  (图 5)。综上可知, 电子眼技术结合 PLSR 可实现汤色品质得分的准确预测, 相较于传统的感官评价, 具有客观、准确的优点。

表 4 基于 PLS 方法预测茶汤色泽品质得分的误差分析

Table 4 Error analysis of predicting quality scores of infusion colour based on PLS

样本编号	真实值	预测值	绝对误差	相对误差/%	样本编号	真实值	预测值	绝对误差	相对误差/%
T1	91.7	92.4	0.8	0.9	T26	86.0	86.4	0.4	0.4
T2	88.3	88.5	0.2	0.2	T27	86.7	86.8	0.1	0.1
T3	86.7	86.7	0.0	0.0	T28	82.3	81.1	1.3	1.5
T4	87.3	87.2	0.2	0.2	T29	87.0	86.3	0.7	0.9
T5	86.0	85.5	0.5	0.5	T30	91.7	92.9	1.2	1.3
T6	79.3	80.8	1.5	1.8	T31	93.7	92.6	1.1	1.1
T7	82.3	83.6	1.3	1.6	T32	90.3	90.8	0.4	0.5
T8	88.3	88.3	0.0	0.0	T33	86.7	86.0	0.7	0.8
T9	85.3	84.9	0.4	0.5	T34	88.7	88.5	0.2	0.2
T10	87.7	87.5	0.1	0.2	P1	87.7	86.8	0.9	1.0
T11	91.7	91.7	0.0	0.0	P2	91.7	90.9	0.8	0.9
T12	83.3	82.8	0.6	0.7	P3	82.3	84.2	1.8	2.2

(续表 4)

样本编号	真实值	预测值	绝对误差	相对误差/%	样本编号	真实值	预测值	绝对误差	相对误差/%
T13	84.7	84.7	0.0	0.0	P4	86.7	87.8	1.1	1.3
T14	85.7	86.4	0.7	0.8	P5	90.7	91.2	0.6	0.6
T15	85.0	86.4	1.4	1.6	P6	87.3	86.1	1.2	1.4
T16	86.0	86.6	0.6	0.7	P7	92.7	91.6	1.0	1.1
T17	84.3	85.4	1.0	1.2	P8	84.0	86.2	2.2	2.7
T18	87.3	86.8	0.5	0.6	P9	86.0	87.5	1.5	1.8
T19	86.7	86.8	0.1	0.1	P10	84.7	85.6	0.9	1.1
T20	86.3	86.2	0.1	0.1	P11	87.3	87.8	0.5	0.5
T21	88.3	86.3	2.0	2.3	P12	85.3	86.9	1.5	1.8
T22	92.7	91.5	1.2	1.3	P13	85.7	86.5	0.8	0.9
T23	92.0	92.1	0.1	0.1%	P14	84.3	82.7	1.6	1.9
T24	91.3	90.6	0.8	0.8	P15	93.7	96.0	2.3	2.5
T25	93.0	93.5	0.5	0.5	P16	89.7	87.9	1.8	2.0

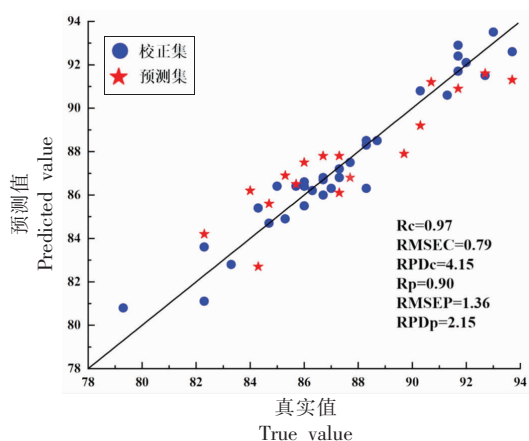


图5 基于PLS方法的品质得分预测精度散点图

Fig.5 Scatter plot of prediction accuracy of quality score by using PLS method

## 2.4 与传统色差仪的对比分析

目前关于茶汤色泽的诸多研究报告中,常使用色差仪进行定性和量化评价<sup>[8,30-32]</sup>。色差仪采集的CIELab颜色系统是目前色泽研究中惯用的色彩系统,该体系由国际照明委员会(CIE)于1931年首次提出,而后在1976年被修正为 $CIEL^*a^*b^*$ ,改进给予了更多的均匀颜色空间,由 $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$  3个参数来确定某个颜色<sup>[33]</sup>。其中, $L^*$ 代表亮度,取值介于0~100之间,100为白色,0为黑色; $a^*$ 代表红绿度,正值(+)表示红色程度,负值(-)表示绿色程度; $b^*$ 代表黄蓝度,正值(+)表示黄色程度,负值(-)表示蓝色程度<sup>[34]</sup>。本研究对比了色差仪和电子

眼对茶汤色泽品质的滇红工夫茶汤优质组( $\geq 90$ 分)和非优组( $< 90$ 分)的判别效果。以色差仪采集的13个分析指标为 $X$ 变量,优质组和非优组作为 $Y$ 变量建立PLS-DA模型,其参数 $R^2Y=0.318$ , $Q^2=0.286 < 0.5$ ,该模型具有较差的解释能力和预测能力。PLS-DA得分图显示,优质组样品和非优组样品有部分交叉重叠区域,无法很好地区分开(图6)。

综上所述,相较于传统的色差仪分析,电子眼的技术更有利于滇红工夫茶汤色泽品质准确、客观地评价。究其产生上述差异的原因可能是色差仪所测得的分析指标反映的是光穿透盛有茶汤的透明比色皿的透射信息,与茶汤通过反射而反馈给人眼的视觉感受不同;而电子眼通过图像传感器采集图片并将其转化为数据是基于反射信息,因此更接近人眼对茶汤色泽的感知。

## 3 结论

本研究首次采用电子眼技术结合多元统计分析对滇红工夫茶汤色泽品质进行评价,50个样本共提取到27个特征色号。按照国标茶叶感官审评标准,以90分为界限把茶汤色泽品质划分为优质组( $\geq 90$ )和非优组( $< 90$ ),基于PLS-DA分析可实现校正集中两类茶汤色泽品质分类的有效判别,并且具有较好的解释能力和判别能力( $R^2Y=0.988$ , $Q^2=0.981$ ),预测集进一步验证该模型的可

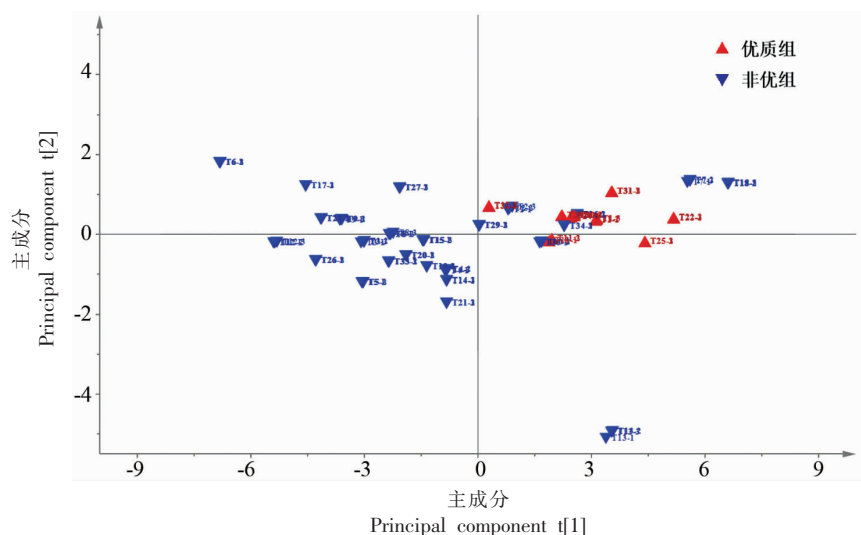


图 6 基于色差分析的优质组和非优质组茶汤 PLS-DA 得分图

Fig.6 PLS-DA score plot of high quality and non-high quality tea infusions based on colorimeter technology

靠性,准确率达到 100%。进一步基于 PLSR 分析实现了滇红工夫茶汤色泽品质得分的准确预测,预测值与真实值的绝对误差在 2.3 分以内,相对误差在 2.7% 以内;校正集相关系数  $R_c=0.97$ ,均方根误差  $RMSEC=0.79$ ,相对分析误差  $RPD_p=4.15$ ,预测集相关系数  $R_p=0.90$ ,均方根误差  $RMSEP=1.36$ ,相对分析误差  $RPD_p=2.15$ ,表明该模型有效且具有较高的可靠性。总体而言,相较于传统的色差仪技术,电子眼技术可以实现茶汤色泽品质快速、准确的评价,且能量化其感官评价的具体得分,为滇红工夫茶汤色泽品质评价提供了一种新的研究方法思路。后续工作我们将围绕茶汤香气、滋味等特点,分别引入气相电子鼻、电子舌等仪器,旨在通过智能感官技术为茶汤“色香味”综合品质评价提供全面的数据支撑。

### 参 考 文 献

- [1] REN G X, NING J M, ZHANG Z Z. Multi-variable selection strategy based on near-infrared spectra for the rapid description of dianhong black tea quality[J]. Spectrosc Acta Pt A-Molec Biomolec Spectr, 2021, 245(9).
- [2] LI H H, LUO L Y, WANG J, et al. Lexicon development and quantitative descriptive analysis of Hunan fuzhuan brick tea infusion[J]. Food Res Int, 2019, 120: 275-284.
- [3] 熊一帆, 安会敏, 欧行畅, 等. 滇红滋味类型判别模型的建立[J]. 食品工业科技, 2019, 40(24): 251-255, 69.
- XIONG Y F, AN H M, OU X C, et al. Establishment of discrimination model of yunnan province black tea flavor type[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(24): 251-255, 69.
- [4] WANG C, ZHANG C X, KONG Y W, et al. A comparative study of volatile components in Dianhong teas from fresh leaves of four tea cultivars by using chromatography-mass spectrometry, multivariate data analysis, and descriptive sensory analysis[J]. Food Res Int, 2017, 100: 267-275.
- [5] LI N, ZHU H T, WANG D, et al. New flavoalkaloids with potent  $\alpha$ -glucosidase and acetylcholinesterase inhibitory activities from Yunnan Black Tea 'Jin-Ya'[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2020, 68(30): 7955-7963.
- [6] 范捷, 王秋霜, 秦丹丹, 等. 红茶品质及其相关生化因子研究进展[J]. 食品科学, 2020, 41(3): 246-253.
- FAN J, WANG Q S, QIN D D, et al. Recent progress in black tea quality and related biochemical factors[J]. Food Science, 2020, 41(3): 246-253.
- [7] DI ROSA A R, LEONE F, CHELI F, et al. Fusion of electronic nose, electronic tongue and computer vision for animal source food authentication and



- quality assessment - A review [J]. *J Food Eng*, 2017, 210: 62-75.
- [8] 王家勤, 姚月凤, 袁海波, 等. 基于色差系统的工夫红茶茶汤亮度的量化评价方法研究[J]. *茶叶科学*, 2020, 40(2): 259-268.  
WANG J Q, YAO Y F, YUAN H B, et al. A quantitative method for brightness evaluation of congou black tea infusions based on color difference analysis[J]. *Journal of Tea Science*, 2020, 40(2): 259-268.
- [9] NIELSEN S S. Food analysis [J]. *Food Analysis*, 2010, 2(14): 64-68.
- [10] 马婉君, 马士成, 施江, 等. 六堡茶茶汤色泽量化分析三种方法的比较[J]. *食品科学*, 2021, 42(16): 155-161.  
MA W J, MA S C, SHI J, et al. Comparative study on three quantitative analysis methods for the color Liupao tea infusion [J]. *Food Science*, 2021, 42(16): 155-161.
- [11] 刘瑞新, 郝小佳, 张慧杰, 等. 基于电子眼技术的中药川贝母真伪及规格的快速辨识研究[J]. *中国中药杂志*, 2020, 45(14): 3441-3451.  
LIU R X, HAO X J, ZHANG H J, et al. A rapid identification of authenticity and specifications of Chinese medicine *Fritillariae Cirrhosae Bulbus* based on E-eye technology [J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2020, 45(14): 3441-3451.
- [12] VALKOVA V, DURANOVA H, STEFANIKOVA J, et al. Wheat bread with grape seeds micropowder: Impact on dough rheology and bread properties [J]. *Appl Rheol*, 2020, 30(1): 138-150.
- [13] ORLANDI G, CALVINI R, FOCA G, et al. Data fusion of electronic eye and electronic tongue signals to monitor grape ripening [J]. *Talanta*, 2019, 195: 181-189.
- [14] ORLANDI G, CALVINI R, PIGANI L, et al. Electronic eye for the prediction of parameters related to grape ripening [J]. *Talanta*, 2018, 186: 381-388.
- [15] CUI Y X, LIU R X, LIN Z Z, et al. Quality evaluation based on color grading: Quality discrimination of the Chinese medicine *Corni Fructus* by an E-eye [J]. *Sci Rep*, 2019, 9: 12.
- [16] 张晓, 吴宏伟, 于现阔, 等. 基于电子眼技术的穿心莲质量评价 [J]. *中国实验方剂学杂志*, 2019, 25(1): 189-195.  
ZHANG X, WU H W, YU X K, et al. Quality evaluation of *andropogonis herba* based on electronic-eye technique [J]. *Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae*, 2019, 25(1): 189-195.
- [17] 贾凌云, 胡志和, 薛璐, 等. 不同温度发酵无乳糖酸奶与普通酸奶差异性比较 [J]. *食品科学*, 2019, 40(23): 79-90.  
JIA L Y, HU Z H, XUE L, et al. Comparison of lactose-free and plain yoghurt fermented at different temperatures [J]. *Food Science*, 2019, 40(23): 79-90.
- [18] 赵旭飞, 胡志和, 薛璐, 等. 超高压处理对脱脂乳感官特性的影响 [J]. *食品科学*, 2019, 40(19): 172-184.  
ZHAO X F, HU Z H, XUE L, et al. Effect of ultra-high pressure treatment on sensory quality of skim milk [J]. *Food Science*, 2019, 40(19): 172-184.
- [19] STEFANIKOVA J, MARTISOVA P, ARVAY J, et al. Comparison of electronic systems with sensory analysis for the quality evaluation of *parenica cheese* [J]. *Czech J Food Sci*, 2020, 38(5): 273-279.
- [20] 贾凌云, 胡志和, 程凯丽, 等. 基于 Arrhenius 模型预测无乳糖超高温乳的货架期 [J]. *食品工业科技*, 2020, 41(19): 232-239.  
JIA L Y, HU Z H, CHENG K L, et al. Predicting shelf life of lactose-free ultra-high temperature milk by a arrhenius model [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41(19): 232-239.
- [21] 吴仕敏, 王家勤, 江用文, 等. 影响工夫红茶茶汤亮度的关键成分分析 [J]. *食品科学*, 2021, 42(24): 221-228.  
WU S M, WANG J Q, JIANG Y W, et al. Key chemical components influencing the brightness of congou black tea infusions [J]. *Food Science*, 2021, 42(24): 221-228.
- [22] WANG Y J, LI T H, LI L Q, et al. Evaluating taste-related attributes of black tea by micro-NIRS [J]. *J Food Eng*, 2021, 290: 8.
- [23] 司海青, 姚艳敏, 王德营, 等. 含水率对土壤有机质含量高光谱估算的影响 [J]. *农业工程学报*, 2015, 31(9): 114-120.  
SI H Q, YAO Y M, WANG D Y, et al. Hyperspectral prediction of soil organic matter contents under different soil moisture contents [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*,

- 2015, 31(9): 114-120.
- [24] 陈佳瑜, 张铭铭, 江用文, 等. 电磁滚筒变温/热风耦合干燥技术对绿茶栗香形成的影响[J]. 现代食品科技, 2021, 37(2): 191-204, 154.
- CHEN J Y, ZHANG M M, JIANG Y W, et al. Effect of electromagnetic cylinder variable temperature coupling to hot air drying technology on the formation of chestnut-like aroma green tea[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2021, 37(2): 191-204, 154.
- [25] SUYOUNG K, 朱荫, 郑新强, 等. 不同季节绿茶香气成分的判别与聚类分析[J]. 食品科学, 2018, 39(14): 268-275.
- SUYOUNG K, ZHU Y, ZHENG X Q, et al. Multivariate statistical analysis of volatiles compounds in green teas from different harvesting seasons[J]. *Food Science*, 2018, 39(14): 268-275.
- [26] 钟贵, 张霁, 张金渝, 等. 紫外指纹图谱结合 PLS-DA 法鉴定不同产地珠子参[J]. 河南农业科学, 2015, 44(9): 91-94.
- ZHONG G, ZHANG J, ZHANG J Y, et al. Identification of *Panax japonicus* var. *major* from different origins using UV spectra fingerprint combined with partial least squares discriminant analysis[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2015, 44(9): 91-94.
- [27] YANG Y Q, ZHANG M M, YIN H X, et al. Rapid profiling of volatile compounds in green teas using Micro-Chamber/Thermal Extractor combined with thermal desorption coupled to gas chromatography-mass spectrometry followed by multivariate statistical analysis[J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2018, 96: 42-50.
- [28] 何鸿举, 朱亚东, 陈岩, 等. 基于高光谱成像快速检测牛肉糜中大豆分离蛋白掺入量[J]. 食品工业科技, 2020, 41(20): 206-211.
- HE H J, ZHU Y D, CHEN Y, et al. Rapid detection of soy protein isolate concentration in minced beef by hyperspectral imaging technology[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41(20): 206-211.
- [29] 周文杰, 王鹏, 詹萍, 等. 香气活度值法结合 PLSR 用于梨酒特征香气物质筛选与鉴定[J]. 食品科学, 2017, 38(14): 138-143.
- ZHOU W J, WANG P, ZHAN P, et al. Screening and identification of flavor characteristics of three pear wines based on odor activity value using partial least squares regression[J]. *Food Science*, 2017, 38(14): 138-143.
- [30] 徐邢燕, 陈思, 俞晓敏, 等. 不同烘焙程度与等级武夷肉桂茶品质差异分析[J]. 食品科学, 2020, 41(13): 22-28.
- XU X Y, CHEN S, YU X M, et al. Quality differences of different grades of Wuyi Rougui tea with different baking degrees[J]. *Food Science*, 2020, 41(13): 22-28.
- [31] 王华杰, 滑金杰, 江用文, 等. 足火热传递方式对工夫红茶品质成分及色泽、滋味的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(15): 148-157.
- WANG H J, HUA J J, JIANG Y W, et al. Effect of different heat transfer modes during secondary drying on quality components, color and taste of congou black tea[J]. *Food Science*, 2020, 41(15): 148-157.
- [32] 杨娟, 袁林颖, 钟应富, 等. 工夫红茶色泽与品质相关性研究[J]. 西南农业学报, 2014, 27(6): 2605-2610.
- YANG J, YUAN L Y, ZHONG Y F, et al. Study on correlations between color and quality of congou made of different varieties of tea[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2014, 27(6): 2605-2610.
- [33] 雷用东, 邓小蓉, 罗瑞峰, 等. 3种颜色体系在食品应用中的研究进展[J]. 食品科学, 2016, 37(1): 241-246.
- LEI Y D, DENG X Y, LUO R F, et al. Progress in the application of three types of color system in color measurement of foods[J]. *Food Science*, 2016, 37(1): 241-246.
- [34] 张妍, 金心怡, 刘伟, 等. 基于不同力模型下的乌龙茶造型过程中理化与香气品质的变化[J]. 食品工业科技, 2018, 39(24): 1-10, 7.
- ZHANG Y, JIN X Y, LIU W, et al. Physicochemical and aroma quality changes of oolong tea in modeling process under different forces models[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2018, 39(24): 1-10, 7.

## Evaluation of the Color of Dianhong Gongou Tea Infusion by Electronic Eye Technology Combined with Multivariate Statistical Analysis

Chen Jiayu<sup>1,2</sup>, Yang Yanqin<sup>2</sup>, Yuan Haibo<sup>2</sup>, Deng Yuliang<sup>2</sup>, Shen Shuai<sup>2</sup>, Liu Zhengquan<sup>1\*</sup>, Jiang Yongwen<sup>2\*</sup>

*(<sup>1</sup>State Key Laboratory of Tea Plant Biology and Utilization, Anhui Agricultural University, Hefei 230036*

*<sup>2</sup>Key Laboratory of Tea Biology and Resource Utilization, Ministry of Agriculture, Tea Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310008)*

**Abstract** In this study, the color of fifty Dianhong Gongou tea infusions was detected by using electronic eye technology, and the color quality of tea infusions was evaluated by combining with multivariate statistical analysis. The results showed that quality classification of high-quality ( $\geq 90$  score) and non-high-quality ( $< 90$  score) could be accurately judged based on partial least squares discriminant analysis (PLS-DA), which had excellently interpretative and predictive ability ( $R^2Y=0.988$ ,  $Q^2=0.981$ ). The validation of the prediction set showed the reliability of the model, with an accuracy of 100%. Furthermore, the accurate prediction of quality scores of tea infusions' color was achieved based on the partial least square regression (PLSR) (calibration set;  $R_c=0.97$ ,  $RMSEC=0.79$ ,  $RPD_c=4.15$ ; prediction set;  $R_p=0.90$ ,  $RMSEP=1.36$ ,  $RPD_p=2.15$ ). The absolute error between the predicted value and the true value is within 2.3, and the relative error was within 2.7%. In summary, the Electronic eye technology can replace traditional sensory evaluation to achieve the speedy and accurate evaluation of color quality for Dianhong black tea.

**Keywords** electronic eye; multivariate statistical analysis; tea infusion; color; quality evaluation