

任 凯,陈 通,陆道礼,等. 基于微型可见光谱仪的茶汤色差的研究[J]. 江苏农业科学,2020,48(2):201-206.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2020.02.037

基于微型可见光谱仪的茶汤色差的研究

任 凯,陈 通,陆道礼,陈 斌

(江苏大学食品与生物工程学院,江苏镇江 212013)

摘要:旨在基于可见光谱技术建立 1 种茶汤色差的快速分析检测方法。以大闽食品(漳州)有限公司提供的速溶绿茶样品为研究对象,采用微型可见光谱仪采集样品原始光谱数据,分别使用 CIE(Commission Internationale de l'Eclairage,国际照明委员会)1976Lab、CMC($l:c$)、CIE DE2000 共 3 种色差计算方法,对被测样品的色差进行测定和分析。结果表明:(1)不同浓度茶汤之间的原始光谱在波长 400 nm 处有较为明显的吸收差异,该点对应黄绿色溶液的特征吸收波长点,表明可应用于茶汤浓度的区分;(2)对茶汤原始透射率使用上述 3 种色差方法进行色差分析,经过对比发现,CIE 1976Lab 色差标准较适用于分析评判绿茶汤的色差值。利用可见光谱分析技术结合 CIE 1976Lab 色差标准方法可实现快速、准确评判速溶绿茶汤的颜色差异。

关键词:速溶绿茶;可见光谱分析;色差分析;茶叶

中图分类号:TS272.7 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2020)02-0201-06

我国是茶叶的故乡,茶道亦是我国悠久文化的代表项目之一,从古至今在人们的日常生活中都扮演着重要角色,茶叶也是我国对外贸易的大宗饮料原料之一^[1]。随着现代医学与科学的发展,越来越多的研究表明,茶叶中含有的多酚类物质(如茶多酚、儿茶素、类黄酮等)对人体具有抗氧化、抗癌、抑

制心血管疾病等功效^[2-3]。因此,日常饮茶受到越来越多人的重视。在继承传统茶业的同时,随着人们口感要求的提升和保健功效要求的提出,促进了茶饮料产业的快速发展。

与传统的茶业不同,茶饮料更多是以经过茶叶浸泡的提取液浓缩液或速溶茶粉为原料,经加工、调配等工序制成茶汤饮料或调味茶饮料^[4-5]。随着现代工业的进步和市场需求的提高,如何保证不同批次产品品质相近或相同,特别是茶汤色泽一致性的控制,是目前企业生产中普遍存在的一个难题。而实际生产过程中使用的检测方法仍然停留在感官评定上,即将待测产品与企业标准品相对比,进

收稿日期:2018-11-12

基金项目:国家重大科学仪器开发专项(编号:2014YQ491015)。

作者简介:任 凯(1994—),男,山西忻州人,硕士研究生,主要从事食品、农产品快速无损检测研究。E-mail:rkkg233@163.com。

通信作者:陈 斌,博士,教授,主要从事食品与农产品快速无损检测方法和应用机制的研究。E-mail:nep@ujs.edu.cn。

本研究对蝉花液体发酵条件进行了考察,优化了蝉花液体发酵工艺条件。后续还将会对蝉拟青霉菌种进行选育考察,同时将继续研究和改良发酵培养基的配方,在打破传统配方的基础上,寻找更适合蝉花发酵的碳源、氮源等材料,从而进一步优化蝉花发酵工艺。

参考文献:

- [1]陈显群,羊 悦,杨胜利. 中药蝉花菌株筛选及发酵条件优化研究[J]. 浙江化工,2015,46(2):18-21.
- [2]黄小忠,谢正林,许俊齐,等. 蝉花真菌的分离及液体发酵培养基优化[J]. 江苏农业科学,2017,45(22):153-155.
- [3]程爱芳,邓政东,陈 文,等. 多粘类芽孢杆菌 HD-1 产纤维素酶的条件优化[J]. 食品工业科技,2015,36(10):173-177.

- [4]程东庆,丁志山,林美爱,等. 蝉花真菌的分离及液体发酵培养[J]. 中药材,2006,29(2):99-101.
- [5]曾凡清,刘德云,宋小亚,等. 蝉花的分离和培养研究[J]. 浙江食用菌,2008(4):28-29.
- [6]官宗华,宋玉良,滕 晔,等. 金蝉花菌种的分离和培养[J]. 内蒙古中医药,2012,31(18):34.
- [7]夏 敏,温 鲁. 微波法提取虫草素研究[J]. 食品科学,2006,27(10):248-251.
- [8]来永斌,王 琦,孙 月. 蛹虫草多糖含量的测定与分析[J]. 中成药,2001,23(7):517-518.
- [9]邵 颖,李 文,王 陶. 蛹拟青霉发酵菌丝体中虫草酸的提取与测定[J]. 食品工业科技,2012,33(1):262-264,267.
- [10]文 欣,刘素纯,黄晓晗. 蝉花菌株的筛选及菌丝体成分分析[J]. 食品与机械,2013,29(3):61-65.
- [11]董钰明,刘 晖,张 军,等. 比色法测定复方虫草颗粒中甘露醇的含量[J]. 中草药,2001,32(8):697-699.

行简易判定,该方法易受检测人员的经验、心理和生理稳定性等因素以及观测环境条件等差异的影响,测量的准确度较低且重复性较差,不能适应现代工业化生产的要求^[6-7]。因此,有必要开发一种客观、可靠、量化的茶饮料品质色泽的检测方法,从而实现快速、准确判别茶汤色泽,保证各生产批次产品质量的一致性和稳定性。目前,关于茶的色差研究大多数停留在对各种茶叶的品质评定方面,鲜有关于速溶茶茶色的相关研究^[8-12]。

本研究通过使用微型可见光谱仪,对不同浓度的速溶绿茶茶汤进行光谱采集,分别使用由国际照明委员会(Commission Internationale de l'Eclairage,简称 CIE)推荐使用的 CIE 1976Lab、CIE DE2000 和行业推荐使用的 CMC($l:c$)等 3 种色差计算方法^[13]对试验样品进行色差分析,以选取适合速溶绿茶茶汤色差分析的最优色差公式,达到快速评判茶汤色差的目的。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本试验所用速溶绿茶粉样品均由大闽食品(漳州)有限公司提供,共 41 个样品(在生产线上随机选取),每个样品各取 10 g,配制成试验所需的待测样浓度。

1.2 仪器与设备

N100T 型微型光谱仪(济南海能仪器有限公司);HunterLab ColorQuest XE 测色仪(HunterLab 公司);50 mm×14 mm×50 mm 玻璃比色皿(宜兴市谱析光学元件有限公司);DK-8D 型水浴锅(巩义市予华仪器有限责任公司);FA1004B 型电子天平(上海越平科学仪器有限公司,精度:±0.000 1 g)。

1.3 试验方法

1.3.1 仪器参数的设置 N100T 微型光谱仪由江苏大学食品与生物工程学院与济南海能仪器有限公司共同开发,核心部件采用滨松公司(Hamamatsu)生产的 C10988MA 微型可见光探测器,该探测器基于光栅式色散原理进行分光,同时整合了 MEMS(micro-electro-mechanical system,微机电系统)技术和带光接受狭缝的 CMOS(complementary metal-oxide-semiconductor,互补金属氧化物半导体)图像传感器技术,实现了光谱仪的微型化设计,探测器外形及色差检测仪器外形分

别如图 1、图 2 所示。该可见光谱仪的波长响应范围为 340~780 nm,光谱分辨率为 10 nm。

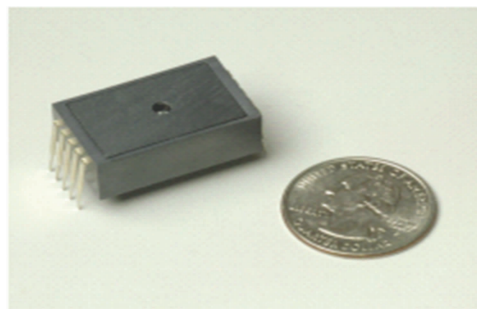


图1 C10988MA-01 探测器



图2 色差检测仪器示意

1.3.2 速溶绿茶汤样品的制备 在设置水浴锅恒定温度为 25℃的条件下,溶解绿茶粉,以待测样品的速溶绿茶汤色差检测标准为依据,将采集的 41 个样品分别按照 10 mg/L 浓度梯度配制成浓度为 800~1 200 mg/L 的待测样。

1.3.3 样品的光谱扫描和色差分析 在环境温度为 25℃的条件下,以水作为参比,在扣除暗背景信号和参比信号后,使用 N100T 智能微型光谱仪逐一扫描配制好的 41 个待测样,获取对应样品的透射率光谱,每个样品重复扫描 3 次,取其平均光谱作为样品的最终测量值,分别使用 CIE 1976Lab、CMC($l:c$)、CIE DE2000 标准色差计算方法对相邻 2 个梯度的待测样品进行色差计算。

在对上述试样进行光谱采集的同时,采用 HunterLab ColorQuest XE 黄变仪对同批次的样品进行色度测量,用以对 N100T 微型光谱仪的分析结果进行对比验证。

1.4 色差计算方法

在实际生产中,对于颜色的测量最主要的应用是检测标准色样和待测色样之间的颜色差异(即色差)。实际生产中需要检测两者之间的色差来控制产品品质,如果色差超过规定的标准,则会影响最终的产品质量^[14]。近年来,随着工业生产对颜色控

制要求的不断提高,国际照明委员会提出并推荐使用相应的色差计算公式,统一了检测和计算标准,满足了生产的要求。

CIE 推荐使用的色差计算方法有 CIE 1976Lab、CMC ($l:c$) 及 CIE DE2000 等 3 种,所有色差的计算方法中都需要先将波长透射率依据标准光源的光谱功率因数和 CIE1964 标准色度观察者的三刺激值进行计算,得到相应的颜色三刺激值,然后根据均匀色空间公式,计算出 CIELab 均匀色空间的心理明度 L^* 值、心理彩度坐标(红/绿色品指数) a^* 值、心理彩度坐标(黄/蓝色品指数) b^* 值、彩度 C_{ab}^* 值和色调角 h_{ab} 值,进而通过不同的色差计算标准进行色差分析^[15]。

1.4.1 CIE 1976Lab CIE 1976Lab 均匀颜色空间是从 CIE 1931 标准色度学系统发展而来,通过非线性变换得到的,目前已经成为世界各国正式采纳、国际通用的测色标准。CIE 1976Lab 均匀颜色空间适用于一切光源色或物体色的表示和计算,总色差可以用 2 个样品颜色坐标点的距离来表示,即:

$$\Delta E_{ab}^* = \sqrt{(L_1^* - L_2^*)^2 + (a_1^* - a_2^*)^2 + (b_1^* - b_2^*)^2} \quad (1)$$

式中: L_1^* 、 a_1^* 、 b_1^* 与 L_2^* 、 a_2^* 、 b_2^* 分别是 2 个样品的颜色坐标值^[16-17]。

1.4.2 CMC ($l:c$) 英国颜色测量委员会(color measurement committee,简称 CMC)推广使用的色差计算方法是目前工业上广泛采用的计算色差的方法。其计算公式如下:

$$\Delta E_{cmc}^* = \sqrt{(\Delta L^*/lS_L)^2 + (\Delta C_{ab}^*/cS_C)^2 + (\Delta H_{ab}^*/S_H)^2} \quad (2)$$

式中: ΔL^* 、 ΔC_{ab}^* 、 ΔH_{ab}^* 分别是式(2)中计算出的明度差、彩度差、色调差; S_L 、 S_C 、 S_H 分别为明度差、彩度差、色调差的权重函数,主要用来校正颜色空间的均匀性; l 、 c 分别为明度权重因子、彩度权重因子,用来调整明度、彩度对总色差的影响程度,对于大多数应用而言, $c=1$,对于纺织行业而言, $l=2$,而对于涂料、塑料和油墨等行业应用, $l=1.4$,本试验中的原料为茶汤,同为液体应用,因此 $l=1.4$ ^[18]。

1.4.3 CIE DE2000 CIE DE2000 色差公式是在 CIELAB、CIE94 等色差公式的基础上,通过大量视觉试验和色差评估试验得到的,其计算公式如下:

$$\Delta E_{00}^* = \left[\left(\frac{\Delta L^*}{k_L S_L} \right)^2 + \left(\frac{\Delta C^*}{k_C S_C} \right)^2 + \left(\frac{\Delta H^*}{k_H S_H} \right)^2 + \right.$$

$$\left. \left(\frac{\Delta C^* \Delta H^*}{k_C S_C k_H S_H} \right)^2 + R_T \left(\frac{\Delta C^*}{k_C S_C} \right) \left(\frac{\Delta H^*}{k_H S_H} \right) \right]^{0.5} \quad (3)$$

在 CIE 给定的标准条件下,式(3)中:参数因子的 $k_L = k_C = k_H = 1$,该参数是影响色差感觉的因素; R_T 为旋转函数,用来校正蓝色区域色分辨椭圆主轴方向的偏转^[19]。

2 结果与分析

2.1 N100T 微型光谱仪色度的可靠性验证

为了验证 N100T 可见光谱仪的可靠性,分别使用 N100T 微型光谱仪和 HunterLab ColorQuest XE 测色仪对待测试样进行光谱采集,根据 CIE 色度学的基本原理,计算得到各浓度茶汤的 L^* 、 a^* 、 b^* 坐标值。由图 3 可以看出, L^* 值(即明亮度坐标)随着茶汤浓度的增大呈逐渐减小的趋势,符合人眼观测结果,且 N100T 光谱仪的测量结果与 HunterLab ColorQuest XE 测色仪的测量结果一致, L^* 值均分布在 60~75 之间; b^* 值(即黄/蓝色品坐标)随着茶汤浓度的增大,出现了增大的趋势,从茶汤试样的实际颜色角度考虑,绿茶茶汤呈黄绿色,而高浓度绿茶茶汤颜色偏黄色,符合观测结果, N100T 光谱仪的测量结果在测量 910 mg/L 浓度茶汤时出现了明显的异常值,产生该现象可能的原因是仪器光源预热时间不足; a^* 值(即红/绿色品坐标)基本为负值,符合茶汤实际颜色(呈偏绿色时, a 值即为负值),个别出现大于 0 的情况,可能的原因是在试验过程中,茶汤发生了氧化。以上结果表明, N100T 可见光谱仪对于待测茶汤试样色度测量具有一定的可靠性,可应用于茶汤色差的检测。

2.2 不同浓度速溶绿茶汤 L^* 、 a^* 、 b^* 值的差异显著性分析

为了进一步分析 CIE Lab 均匀颜色空间中 L^* 、 a^* 、 b^* 值 3 个颜色参数与不同茶汤浓度色差之间的相关性,本研究采用 Duncan's multiple range test 方法在 SPSS v16 数据分析软件中分别对 L^* 、 a^* 、 b^* 值进行分析,部分浓度的茶汤色坐标值见表 1。

将表 1 中的数据按照色差标准浓度范围划分为 A (浓度 < 950 mg/L)、B (950 mg/L ≤ 浓度 ≤ 1 050 mg/L)、C (浓度 > 1 050 mg/L) 共 3 类,对其 L^* 、 a^* 、 b^* 值分别采用 Duncan's 方法作单因素方差分析。

由表 2 可知,当显著性水平为 0.05 时,对于明度值 L^* 、A、B、C 3 组之间具有显著差异;对于红/绿

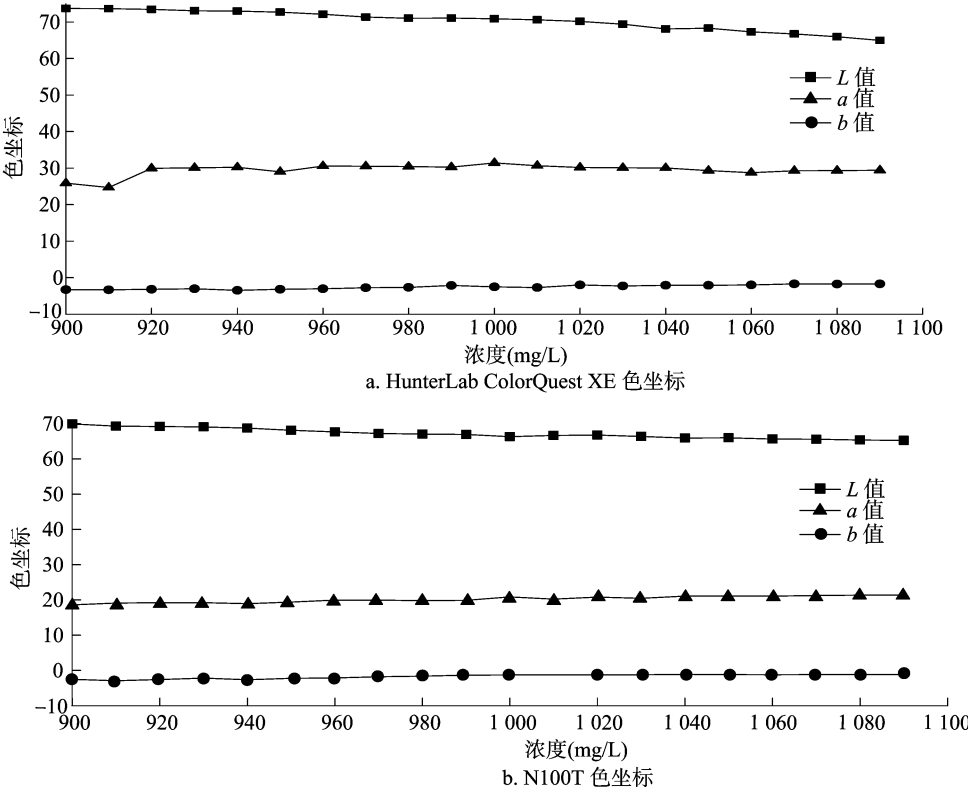


图3 不同浓度茶汤色的坐标变化

表 1 速溶绿茶汤部分浓度的 L^* 值、 a^* 值、 b^* 值

茶汤浓度 (mg/L)	L^* 值	a^* 值	b^* 值
900	73.712	-3.259 0	25.89
910	73.667	-3.314 0	24.72
920	73.466	-3.166 0	29.96
⋮	⋮	⋮	⋮
970	71.364	-2.729 0	30.52
980	71.054	-2.640 5	30.41
990	71.085	-2.111 0	30.29
1 000	70.875	-2.509 0	31.43
1 010	70.630	-2.690 0	30.65
1 020	70.165	-2.003 0	30.19
⋮	⋮	⋮	⋮
1 070	66.739	-1.711 0	29.29
1 080	65.959	-1.734 0	29.31
1 090	64.957	-1.684 0	29.43

表 2 不同茶汤浓度和 L^* 、 a^* 、 b^* 值之间的差异

组别	L^* 值	a^* 值	b^* 值
A	$73.38 \pm 0.33a$	$-3.25 \pm 0.17a$	$28.18 \pm 2.66a$
B	$70.54 \pm 1.45b$	$-2.48 \pm 0.41b$	$30.23 \pm 0.66ab$
C	$66.25 \pm 1.02c$	$-1.77 \pm 0.13c$	$29.19 \pm 0.31b$

注:采用 Duncan's multiple range test 方法进行分析,同列数据后标有不同小写字母表示数组之间差异显著($P < 0.05, n = 3$)。

2.3 不同浓度速溶绿茶汤色差分析

本研究采用的色差分析方法如下:在 200 mL、 $(25 \pm 5)^\circ\text{C}$ 水中加入 (0.2 ± 0.01) g 速溶绿茶粉溶解,即以浓度范围为 950 ~ 1 050 mg/L 的茶汤色泽作为标准色泽,用待测样与之进行色差比较,超过标准色差范围时,则视为不合格产品。

根据上述色差分析方法,以 1 000 mg/L 浓度的绿茶茶汤色泽为标准,基于采集的 41 个速溶绿茶汤样品的原始光谱,利用 3 种色差计算标准分别计算不同浓度茶汤色泽与该标准色泽之间的色差。

图 4 是经过 3 种色差计算标准分析得到的 41 个不同浓度茶汤样品色差。可以看出,以 1 000 mg/L 为标准色泽茶汤浓度,在低浓度一侧,随着茶汤浓度的减小,用 3 种色差标准计算得到的色差总体呈增大的趋势;在高浓度一侧,随着茶汤浓度的增加,用 3 种色差计算标准得到的色差总体

色品指数 a^* , A、B、C 这 3 组之间同样也存在显著差异;对于黄/蓝色品指数 b^* , A、B 2 组之间不存在显著差异, B、C 2 组之间不存在显著差异,而 A、C 2 组之间存在显著差异。由此可见,不能单独利用 L^* 、 a^* 、 b^* 等参数对不同浓度茶汤色差进行分析。随着茶汤浓度增大, L^* 、 a^* 等颜色参数之间会出现明显差异,表明基于该颜色参数分析不同浓度茶汤色泽的方法具有可行性和有效性。

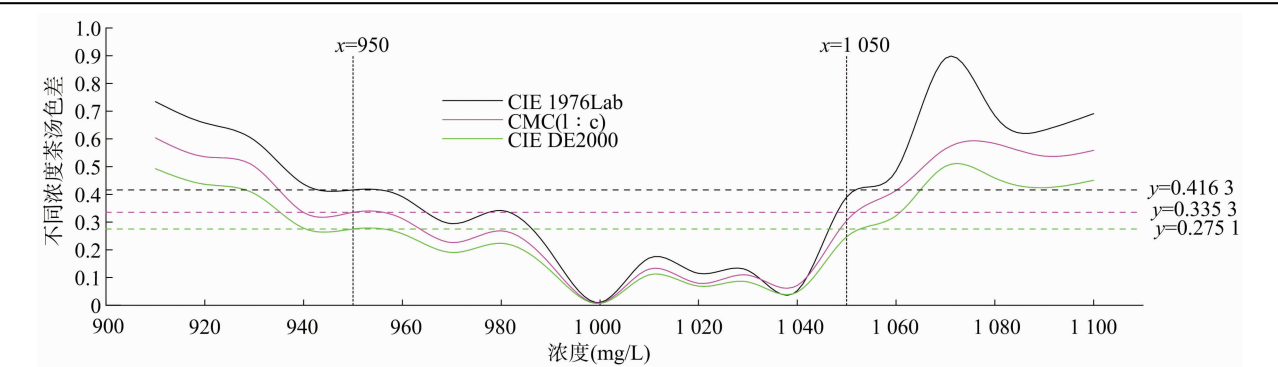


图4 不同浓度茶汤试样色差

呈现增大的趋势。

通过对 3 种色差公式的分析对比可知, CIE 1976Lab 色差分析结果整体较大, 其次分别是 CMC (1 : c)、CIE DE2000。在色差标准允许的范围内, 即浓度为 950 ~ 1 050 mg/L 的区间内(图 4 中 $x=950$ 、 $x=1\ 050$ 这 2 条线所含区域), 用 CIE 1976Lab 色差公式计算的总色差 ΔE^*_{ab} 均小于 0. 416 3 NBS(该色差值是浓度为 950 mg/L 的茶汤色泽与浓度为 1 000 mg/L 的茶汤色泽之间的色差, 即下限), 而在此浓度范围外的各个浓度的茶汤色泽与标准浓度茶汤色泽之间的总色差均大于 0. 416 3 NBS, 表明该色差计算结果满足标准色差的评定要求。由 CMC (1 : c) 色差公式计算的总色差 ΔE^*_{cmc} 在该浓度范围之间和 CIE 1976Lab 色差分析的结果相近, 均小于 0. 335 3 NBS, 即小于色差值的下限。但在该浓度范围以外, 部分浓度样品的茶汤色差同样小于 0. 335 3 NBS(如 940 mg/L 浓度样品), 易造成色差误判, 进而影响产品的一致性。由 CIE DE2000 色差公式计算分析的结果看出, 在标准浓度范围中, ΔE^*_{00} 均小于 0. 275 1 NBS; 而在该标准浓度范围外, 均大于 0. 275 1 NBS, 同样也满足标准色差的评定要求。基

于区分不同浓度茶汤色泽差异应该越大越好的原则, 最终选择 CIE 1976Lab 色差标准作为本研究中速溶绿茶汤色泽的分析计算标准。

为了验证茶汤色差分析方法的准确性, 由南京融点食品科技有限公司提供 10 个未知浓度样品, 首先由该公司的 5 位专业感官评定人员对该茶汤样品色泽进行合格性评定, 之后使用微型可见光谱仪对同样的样品进行色差分析并判定合格率。由表 3 可知, 5 位感官评定人员对于 10 个未知浓度样品的合格判定正确率分别为 80%、80%、70%、90%、70%, 平均正确率为 78%; 而经微型可见光谱仪检测分析判定, 正确率高达 90%, 有且仅有 1 个茶汤样品出现误判情况, 表明该方法相对于感官评定更为准确可靠。对上述茶汤样品使用色差标准进行分析, 由图 5 可以看出, 这批样品的色差分布与 41 个茶汤试样色差分布结果呈相同的变化趋势, 而发生误判的茶汤样品出现在 1 050 mg/L(检测边缘)浓度附近。综上可知, 利用色差分析方法检测未知浓度样品色差较感官评定结果更加准确、稳定、可靠, 可应用于实际生产中, 同时也实现了茶汤色泽的数据量化和存储, 方便生产过程的管理及反馈指导。

表 3 2 种评定方法的合格率

浓度 (mg/L)	样品号	不同评定人员判断的合格情况					
		1 号	2 号	3 号	4 号	5 号	N100
1 000	1	+	+	+	+	+	+
1 050	2	Δ	+	Δ	+	+	+
980	3	+	+	Δ	+	Δ	+
870	4	-	Δ	-	Δ	-	-
9 050	5	Δ	-	-	-	Δ	-
1 085	6	-	-	-	-	-	-
1 100	7	-	-	-	-	-	-
1 010	8	+	+	+	+	+	+
965	9	+	Δ	+	+	+	Δ
950	10	+	+	Δ	+	Δ	+

注:表中“+”代表合格,“-”代表不合格,“Δ”代表误判。

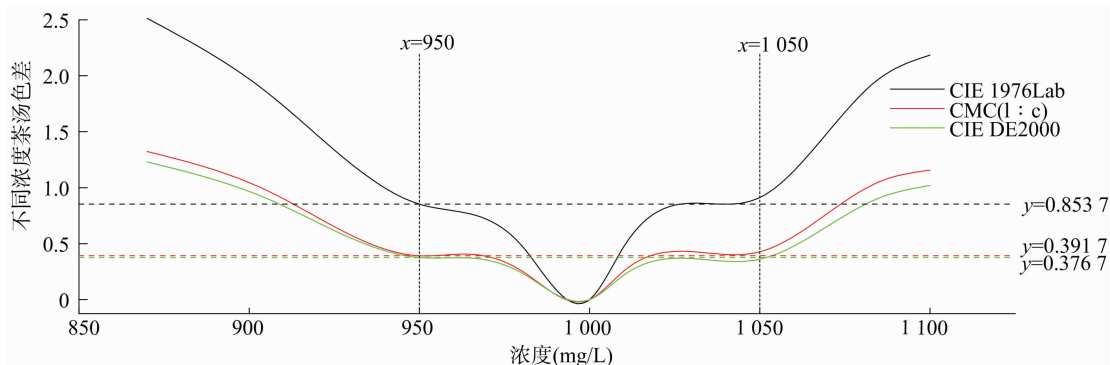


图5 感官试验样品色差

3 结论

基于可见光谱分析技术对不同浓度的速溶绿茶汤进行光谱采集,根据 CIE 色度学基本原理,并根据相关色差计算公式分析发现,N100T 微型光谱仪测量结果与 HunterLab ColorQuest XE 测色仪的测量结果一致,均符合人眼观测结果,表明该方法可以用来检测不同浓度茶汤之间的颜色差异,测量结果具有一定的可靠性,且成本较台式色差仪低,具有体积小、便携等优点。

采用 Duncan's multiple range test 方法进行单因素方差分析,分别设 1 050、950 mg/L 作为标准色差浓度的上、下限,结果表明,不同浓度速溶绿茶汤色泽之间对于明亮度 L^* 值、红/绿色品指数 a^* 值均表现出显著差异。

对采集到的茶汤原始透光率采用 CIE 1976Lab、CMC(1:c) 和 CIE DE2000 等 3 种色差计算标准进行分析,结果表明,在对该速溶绿茶茶汤色泽的评价分析中,CIE1976Lab 色差计算标准更符合实际生产过程中对于茶汤色泽的评判标准,可实现客观、可靠、量化的产品判别,保证生产过程中产品品质的一致性。通过与感官评定方法相对比表明,采用微型可见光谱仪对于不同浓度茶汤合格判定的正确率优于感官评定人员,因此,该技术稳定可靠,具有一定的价值和应用前景。

参考文献:

- [1] 李连清. 中国近代茶业研究综述[J]. 甘肃农业,2009(6):71-73.
- [2] 王岳飞. 科学饮茶之谈谈茶保健功效:茶叶防辐射[J]. 茶博览,2014(3):80-81.
- [3] 蓝雪铭,刘志彬,倪莉. 乌龙茶保健功效的研究进展[J]. 中国

食品学报,2014,14(2):201-207.

- [4] 岳鹏翔,江春柳. 茶饮料发展对中国茶产业的推动作用[C]//中国茶产业可持续发展战略学术研讨会. 杭州,2010.
- [5] 郭威. 中国茶饮料发展现状及市场结构分析[J]. 经济视野,2012(10):211.
- [6] 徐吉祥,楚炎沛. 色差计在食品品质评价中的应用[J]. 现代面粉工业,2010(3):43-45.
- [7] 袁琨. 颜色测量仪器关键技术及其应用研究[D]. 杭州:浙江大学,2015.
- [8] 余书平,尹军峰,袁海波,等. 小叶种红茶发酵外观色差及其主要品质成分相关性[J]. 食品安全质量检测学报,2015,6(6):2201-2208.
- [9] 刘洪林. 工夫红茶品质客观评价研究[D]. 重庆:西南大学,2015.
- [10] 吴瑞梅,赵杰文,陈全胜,等. 绿茶汤色品质感官评价的色差仪表征方法研究[J]. 河南农业科学,2014,43(1):149-153.
- [11] 朱丽. 茶汤色泽与茶叶感官品质相关性研究[J]. 中外食品工业,2013(7):3-4.
- [12] 董青华,孙威江,张孔碌,等. 基于茶汤色泽和 pH 的乌龙茶产品判别[J]. 福建农林大学学报(自然科学版),2012,41(4):470-475.
- [13] León K, Mery D, Pedreschi F, et al. Color measurement in $L^*a^*b^*$ units from RGB digital images[J]. Food Research International, 2006,39(10):1084-1091.
- [14] 吴琼. 便携式色差计的设计和研究[D]. 金华:浙江师范大学,2007.
- [15] John A C. Publications briefly mentioned: CIE 142—2001, improvement to industrial colour - difference evaluation[J]. Color Research and Application,2002,27(1):61.
- [16] 郑元林,周世生,张林林,等. 基于印刷数据集 CIELAB 系列色差公式的评价研究[J]. 中国印刷与包装研究,2010,2:60-64.
- [17] 刘辉,张云生,张印辉,等. 均匀空间色差度量的矢量形态学图像处理[J]. 中国图象图形学报,2011,16(12):2145-2151.
- [18] 金肖克,张声诚,李启正,等. 色差公式的发展及其在织物颜色评价中的应用[J]. 丝绸,2013,50(5):33-38.
- [19] 孙建明,周世生,周利国. 基于 CIEDE2000 色差公式的印刷品色差检测研究[J]. 机械科学与技术,2011,30(4):582-585.