DOI:10.13652/j.spjx.1003.5788.2023.60054 [文章编号] 1003-5788(2023)07-0020-09

基于生理信号和多元统计的白芽奇兰茶口感评价

Taste evaluation of Chinese oolong tea "Baiyaqilan" based on physiological signals and multivariate statistics

杨伯垲[1] 申丽娟[2] 杨敬民[2,3]

YANG Bo-kai[1] *SHEN Li-juan*[2] *YANG Jing-min*[2,3]

(1. 闽南师范大学艺术学院,福建 漳州 363000;2. 闽南师范大学计算机学院,福建 漳州 363000;3. 福建师范大学福建省网络安全与密码技术重点实验室,福建 福州 350007)

(1. *School of Arts, Minnan Normal University, Zhangzhou, Fujian* 363000, *China*; 2. *School of Computer Science, Minnan Normal University, Zhangzhou, Fujian* 363000, *China*; 3. *Fujian Provincial Key Laboratory of Network Security and Cryptology, Fujian Normal University, Fuzhou, Fujian* 350007, *China*)

摘要:目的:调查年轻人对白芽奇兰茶的口感偏好,针对性地对茶饮料进行设计。**方法:**设计以脑电波(Electroencephalogram,EEG)、皮电活动(Electrodermal activity,EDA)、心率变异性(Heart rate variability,HRV)多元统计分析和感官评价相结合的方法,让 24 名受试者(其中男女各 12 人)对 7 个批次的不同克数和冲泡时长的白芽奇兰茶进行口感偏好评价。**结果:**EEG 的功率谱密度、HRV 和 EDA 的均值能够对受试者的口感偏好进行较准确的预测,均值和喜欢程度呈负相关关系。双因素方差分析表明,HRV 和 EDA 不受被试者男女性别差异和被试茶样本的影响。**结论:**大部分受试者最喜欢 10 g 白芽奇兰冲泡 10 s 的口感。

关键词:白芽奇兰茶;口感;皮电活动;脑电波;心率变异性

Abstract: Objective: Investigate young people's taste preference for white bud kiran tea and design tea drinks accordingly. **Methods:** Design a combination of electroencephalogram (EEG), electrodermal activity (EDA), heart rate variability (HRV) multivariate statistical analysis and sensory evaluation to allow 24 subjects (12 of each gender) to evaluate the taste preference of seven batches of white bud kiran tea of different grams and brewing lengths. **Results:** the mean values of power spectral density, HRV and EDA of EEG can predict the taste preference of the subjects more accurately, and the mean values are negatively correlated with the liking level. A two-way analysis of variance shows that HRV and EDA are not affected by gender differences between subjects and the subject tea sample. **Conclusion:** Most of the subjects preferred the taste of 10 grams of white bud kiran tea brewed for 10 seconds.

Keywords: white budkiran tea; taste; electrodermal activity; electroencephalogram; heart rate variability

白芽奇兰属于乌龙茶类,产于福建省漳州市平和县。该茶外形紧结,匀整美观,内质香气清高爽悦,似兰香幽长,汤色橙黄明亮滋味醇爽。探索年轻人对白芽奇兰茶的口感偏好评价,对白芽奇兰茶饮料的设计有重要的意义。中国茶叶感官评价的历史悠久[1]。一般而言,主要通过视觉、味觉、嗅觉和触觉 4 个手段对茶叶的色香味形进行综合评鉴。与之对应,国家也颁布了一系列文字标准和实物标准样,比如《地理标志产品龙井茶》(GB/T 18650—2008),《茶叶感官审评室基本条件》(GB/T 18797—2012)和《茶叶感官审评方法》(GB/T 23776—2018)。但是,正如文献[2]指出的,目前中国的茶事活动中,人的感官体验起着非常重要的作用,但是跨感官的相互交叉影响是感官世界中较为普遍的现象,这容易导致对一种感官的过分关注而忽略其他感官的客观表达。传统的基于访谈、问卷调查的偏好研究方法,虽然简单直观,但是往往容易受社会期望效应的影响而改变受试者的主观反应[3]。因此,如何客观地评价年轻人对白芽奇兰茶的口感偏好,是一项有挑战的研究课题。

目前茶叶感官量化评价的主要方法是采用味觉分析系统并结合多元统计分析方法进行。所谓的味觉分析系统是采用了同人舌头味觉细胞工作原理相类似的人工脂

基金项目:福建省网络安全与密码技术重点实验室(福建师范大学)开放课题(编号:NSCL-KF2021-07);福建省教育科学"十四五"规划课题(编号:FJJKBK22-173);福建省本科高校教育教学改革研究项目(编号:FBJG20210070)

作者简介:杨伯垲(1981—),男,闽南师范大学副教授,硕士。E-mail:topku@vip.qq.com

收稿日期:2023-02-21 **改回日期:**2023-06-07

膜传感器技术,采用数字化技术评价食品或药品等样品的苦味、涩味、酸味、咸味、鲜味、甜味等基本味觉感官指标,同时还可以分析苦的回味、涩的回味和鲜的回味(丰富度)[4]。比如,耿利华等[5]将 TS-5000Z 味觉分析系统应用于茶饮料的味觉评价。尹洪旭等[6]用气相色谱—质谱联用技术结合多元统计分析方法对 18 个不同栗香特征的绿茶开展研究。柳镇章等[7]采用气相色谱—质谱联用法和多元统计分析技术,对 6 款 3 个批次不同风格的安溪铁观音进行感官审评分析。味觉分析系统主要依赖于传感器对茶叶各成分的分析精度。

脑电波(Electroencephalogram,EEG)是指按时间序列,在大脑头皮表层记录下的由大脑神经元节律性运动而产生的电压[8]。EEG 具有操作简单、成本低、数据可量化等优势[9],近年来被广泛应用于情绪识别[10],认知负荷评估[11]和疲劳驾驶检测[12]。皮电活动(Electrodermal activity,EDA)是指由于刺激引起的皮肤汗腺激活而带来的电传导能力的变化,最敏感的情绪反馈之一[13]。其与情绪反应、生理唤醒、舒适度和疲劳度等密切相关,能反映人的心理负荷水平[14],因其具有稳定性高、测量简便、灵敏度高等优势,成为反映个体交感神经兴奋性变化的最有效、最敏感的生理参数,被广泛应用于用户偏好情感体验[15]、情感反应[16]和认知负荷[17]等研究。心率变异性(Heart rate variability,HRV)是指个体连续心搏间瞬时心率的微小涨落,迷走神经激活和健康的可靠有效指标[18],目前 HRV 主要应用于心理负荷特征[19],自主神经功能评估[20]和情感反应[21]。目前中国几乎还未有学者综合利用上述生理信号(脑电,心电和肌电)研究茶叶感官量化评价问题。

在以往的研究中,智能感官分析技术[22]被广泛应用于模拟人类感官过程对产品品质进行检测。在茶叶智能感官分析领域,传感器信号参数主要以时域参数为基础。时域参数[23]是通过时间轴来提取信号特征的参数,具有形象直观的特点,可以反映原始信号的特征。最常用的时域参数包括最大值、均值、稳定值、方差、标准偏差等。然而,在信号分析领域中,最大值和方差等问题仍存在一定限制。因此,研究拟采用脑电集帽、皮电设备和心电设备等多种设备来获取传感器信号,并使用相关性分析和方差分析评估茶叶的品质,以提高茶叶品质评价活动的准确性和可靠性。

1　理论基础

双因素方差分析是数理统计中重要的统计方法,主要用于讨论两个不同的试验因素对试验结果的影响。一般而言,双因素方差分析包括提出假设、构造检验的统计量和决策分析 3 个过程。

(1) 提出假设:对行因素提出的假设为:

$H_0: u_1 = u_2 = \cdots = u_k$,行因素对因变量没有显著影响;

$H_1: u_i (i = 1, 2, \cdots, k)$,不完全相等,行因素对因变量有显著影响。

同理,可对列因素作出类似假设。

(2) 构造检验的统计量:记 S_{ST} 为总误差平方和,是全部样本观察值 x_{ij} $(i = 1, 2, \cdots, k; j = 1, 2, \cdots, r)$ 与总样本均值 $\bar{x}$ 的误差平方和,即

$$S_{ST} = \sum_{i=1}^{k}\sum_{j=1}^{r}(x_{ij} - \bar{x})^2 = \sum_{i=1}^{k}\sum_{j=1}^{r}(\bar{x}_{i\cdot} - \bar{x})^2 + \sum_{i=1}^{k}\sum_{j=1}^{r}(\bar{x}_{\cdot j} - \bar{x})^2 + \sum_{i=1}^{k}\sum_{j=1}^{r}(x_{ij} - \bar{x}_{i\cdot}, -\bar{x}_{\cdot j} + \bar{x})^2, \tag{1}$$

$$S_{SR} = \sum_{i=1}^{k}\sum_{j=1}^{r}(\bar{x}_{i\cdot} - \bar{x})^2, \tag{2}$$

$$S_{SC} = \sum_{i=1}^{k}\sum_{j=1}^{r}(\bar{x}_{\cdot j} - \bar{x})^2, \tag{3}$$

$$S_{SE} = \sum_{i=1}^{k}\sum_{j=1}^{r}(x_{ij} - \bar{x}_{i\cdot}, -\bar{x}_{\cdot j} + \bar{x})^2, \tag{4}$$

$$S_{ST} = S_{SR} + S_{SC} + S_{SE}, \tag{5}$$

式中:

S_{SR}、S_{SC}、S_{SE}——行变量平方和,列变量平方和和随机误差平方和;

x_{ij}——第 i 个水平的第 j 个样本的观测;

$\bar{x}$——样本均值;

$\bar{x}_{i\cdot}$ 表示第 i 水平的样本均值;

$\bar{x}_{\cdot j}$——第 j 列的样本均值。

与各误差平方和相对应的自由度分别是:总误差平方和 S_{ST} 的自由度为 $k \times r - 1$;行因素的误差平方和 S_{SR} 的自由度为 $k - 1$;列因素的误差平方和 S_{SC} 的自由度为 $r - 1$;随机误差平方和 S_{SE} 的自由度为 $(k - 1) \times (r - 1)$。

记 M_{SR} 为行因素的均方,即

$$M_{SR} = \frac{S_{SR}}{k - 1}。 \tag{6}$$

M_{SC} 为列因素的均方,即

$$M_{SC} = \frac{S_{SC}}{r - 1}。 \tag{7}$$

M_{SE} 为随机误差项的均方,即

$$M_{SE} = \frac{S_{SE}}{(k - 1)(r - 1)}。 \tag{8}$$

EEG 是用来测量和分析由脑神经元内的离子电流引起的电压波动信号,其主要类型与含义见表 1。大脑的基本组成单位是神经元,神经冲动在神经元上传递时表现为电位变化,脑电信号是人脑内所有神经元电活动的综合。生物电现象是生命活动的基本特征,神经信号在单个神经元上以电位变化的方式传递。在大脑皮层内,神经元的排布不是杂乱无章的,而是在与表面垂直的方向呈链状排列,形成细胞柱。细胞柱内的神经元具有大致

表 1　脑电波类型及其主要含义

Table 1　Types of EEG waves and their main meanings

类型	频率/Hz	波形特征	主要出现位置	含义
Delta 波	1～4		额叶和枕叶	大脑皮层在抑制状态下的主要电活动，比如深度麻醉、深度睡眠、缺氧、极度疲劳或者大脑器质性病变
Theta 波	4～8		顶区与颞区	在困倦状态下才可以记录到，尤其是在受到挫折感到抑郁时更为明显，比如工作负荷
Alpha 波	8～14		任意头部位置	大脑皮层在清醒、安静状态下的主要电活动
Beta 波	14～30		额区和中央区	大脑皮层处于兴奋状态的主要电活动

相同的特性，它们组成了大脑皮层最基本的机能单位。通过在大脑皮层特定神经中枢对应的头皮位置上布置电极，记录一段时间内各区域神经元放电现象，绘制成随时间变化的动态曲线即脑电图，它可以反映一段时间内大脑皮层活跃情况。

EEG 的功率谱图主要用于研究脑电信号能量随信号频率的分布。一般而言，功率谱密度（Power spectral density，PSD）是一张二维图，其中横轴为频率，单位 Hz，纵轴为 power 值，单位为 dB，一般取对数。不同频带下的脑电信号能量值为不同频带下的面积计算。通过 PSD 功率谱分析，可以直观地分析不同频带的能量值的分布，哪个频段的激活程度更强。对于一个离散时间信号 $x[n]$，$n=1,2,\cdots,N$，其离散时间傅里叶变换（Discrete-time fourier transform，DTFT）为[14]：

$$F(f)=\sum_{n=1}^{N}x[n]e^{-j2\pi fn}。\tag{9}$$

假设信号采样率为 F_s，采样点的数量为 N，则频域被离散为

$$f=\frac{kF_s}{N},k=0,1,\cdots,N-1。\tag{10}$$

则离散频域点上信号的离散傅里叶变换（discrete Fourier transform，DFT）为

$$F[k]=\sum_{n=0}^{N-1}x[n]e^{-j2\pi kn/N}。\tag{11}$$

Welch 法利用平均法改进方差特性，将 $x_N(n)$ 数据长度 N 分成 L 段，分别计算每一段的频谱，然后求平均，如式(12)所示。其中 M 为每段数据，即窗口长度，$U=\frac{\sum_{n=0}^{M-1}w^2(n)}{M}$ 是归一化因子，用于渐进式无偏估计。

$$\hat{P}_{PER}(w)=\frac{\sum_{i=1}^{L}\left|\sum_{n=0}^{M-1}x_N^i(i)w(n)e^{-iwn}\right|^2}{MUL}。\tag{12}$$

EDA 反应是最敏感的情绪反馈之一，其与情绪反应、生理唤醒、舒适度和疲劳度等密切相关，能反映人的心理负荷水平。研究发现：人在情绪紧张、焦虑或者恐惧情况下汗腺分泌增加，皮肤表面汗液增多，引起导电性增加而致皮电升高，EDA 数据升高；人在情绪较为兴奋、放松的情况下汗腺分泌减少，皮肤表面汗液较少，导电性减少，皮电降低，EDA 的数据下降。HRV 是指个体连续心搏间瞬时心率的微小涨落。在时间紧迫和情绪紧张的情况下，HRV 整体下降。

2　材料与方法

2.1　被试人员

招募年龄 19～20 岁的大学生，其中男女比例各 50%，总共 24 人。试验前均已告知试验目的及内容，并签署知情同意书，确保符合赫尔辛基宣言及相关法规要求。

2.2　试验材料

白芽奇兰茶：一级，福建晨晖茶叶有限公司。

2.3　试验仪器

水电极脑电仪：Bitbrain 型，北京津发科技股份有限公司；

智能穿戴生理仪：ErgoLAB Biosensing 型，北京津发科技股份有限公司。

2.4　试验步骤

试验涉及人体生理信号采集和数据分析处理。生理信号采集采用的是北京津发科技股份有限公司研发的 ErgoLAB 人机环境同步云平台系统，硬件包括 32 通道的 EEG 信号采集 Bitbrain 水电极脑电仪，采样率 256 Hz/s，分辨率 24 bit。ErgoLAB Biosensing 智能穿戴生理仪（用于收集 EDA 和 HRV 信号）。数据分析处理采用的是津发 ErgoLAB_v3.16.0_x64 软件（用于记录和分析数据），Windows 10 操作系统，Intel® Core™ i7-6700 CPU @ 3.40 GHz，32 G 内存，NVIDIA GeForce RTX 2070 SUPER 图形加速卡，python 3.8.5。

所有试验均在艺术学院人机工程实验室中进行,保证受试者不受外界干扰,试验时间为上午 9:00 开始。每名被试者按阅读提示、品茶开始、填写问卷和漱口休息的顺序依次进行测试,共进行 7 轮次测试。

(1) 阅读提示:受试者先按要求戴好脑电及生理信号设备,坐在试验桌前,眼睛保持与屏幕水平,观看提示,按提示进行对应操作。试验开始,屏幕会出现提示,提示被试者做好准备。取 100 mL 沸水按照表 2 中的参数设置冲泡。

表 2　白芽奇兰茶冲泡参数设置表

Table 2　Brewing parameter setting of white bud kiran tea

编号	数量/g	冲泡时长/s	编号	数量/g	冲泡时长/s
1	7	20	5	11	10
2	8	20	6	11	20
3	9	20	7	11	30
4	10	20			

(2) 品茶测试:被试者开始品茶测试,在此期间,脑电及生理信号设备持续采集数据,主要包括 PSD、EDA 和 HRV。

(3) 填写问卷:被试者品完茶,填写调查问卷,对每杯茶作出量化评价,分值从 0～9,0 分表示最不喜欢,9 分表示最喜欢。

(4) 漱口休息:每测试完一杯茶,屏幕给出提示,提示被试者用温水漱口,并休息 2 min,再进行下一轮次测试。

3　结果与分析

采用 PSD、EDA 和 HRV 的均值和方差等数字化特征来分析被试者在品茶时的生理状态。首先,采集并分析被试者品茶阶段的 PSD、EDA 和 HRV 数据的均值和方差;其次,根据被试者的问卷记录,整理偏好标记(喜欢/不喜欢)数据;最后,基于多元统计,分析 PSD、EDA 和 HRV 的数字化特征与偏好标记之间的对应关系。

将被试者在品茶结束后填的调查问卷作表 4。结合表 3 和表 4 可以看出,受试者喜欢的茶对应的 EDA 值小,受试者不喜欢的茶对应的EDA值大。当冲泡时间

表 3　受试者 EDA 值

Table 3　EAD values of subjects

受试者	样品 1	样品 2	样品 3	样品 4	样品 5	样品 6	样品 7
记录 001	4.12	3.91	4.43	4.65	5.08	5.19	4.73
记录 002	5.59	5.91	5.67	6.04	5.67	5.50	5.91
记录 003	5.75	5.51	4.90	5.26	5.66	5.67	5.26
记录 004	5.03	5.04	4.61	4.50	4.95	5.34	4.79
记录 005	5.91	5.05	6.07	6.72	7.25	5.91	6.69
记录 006	1.23	0.94	1.38	1.51	1.29	1.45	1.20
记录 007	8.95	8.58	8.49	8.50	8.58	8.62	8.57
记录 008	7.11	7.31	7.83	7.86	7.40	7.81	7.40
记录 009	6.06	6.01	5.94	5.74	5.75	5.93	5.82
记录 010	4.03	3.94	3.71	4.06	4.06	4.04	4.12
记录 011	4.47	4.41	4.16	2.15	5.43	5.13	4.65
记录 012	3.63	3.36	3.34	2.72	2.69	4.19	3.63
记录 013	7.74	7.57	7.51	7.66	8.10	7.85	8.01
记录 014	4.61	4.52	4.49	4.45	4.29	4.42	4.29
记录 015	1.87	1.69	1.28	1.59	1.76	1.54	1.58
记录 016	2.27	2.03	2.36	2.19	2.52	2.12	3.11
记录 017	1.58	1.24	0.71	0.49	0.44	0.46	0.67
记录 018	3.67	3.75	3.82	4.11	3.78	3.87	4.02
记录 019	0.69	0.64	0.53	0.50	0.47	0.48	0.47
记录 020	18.70	15.40	17.78	16.48	16.65	16.11	18.12
记录 021	1.14	1.23	1.29	1.35	1.39	1.40	1.45
记录 022	12.52	12.02	11.28	11.58	9.21	9.87	10.11
记录 023	12.93	13.72	11.51	11.38	12.61	12.30	13.48
记录 024	15.58	12.93	12.97	12.93	10.40	13.36	13.43
平均值	6.05	5.70	5.67	5.60	5.64	5.77	5.90

表 4 被试者的偏好标记

Table 4 Subjects' preference markers

受试者	样品 1～4 和 6 中最不喜欢的样品	样品 5～7 中最不喜欢的样品	样品 1～4 和 6 中最喜欢的样品	样品 5～7 中最喜欢的样品
记录 001	6	5	2	7
记录 002	4	7	1	5
记录 003	1	5	3	7
记录 004	2	5	4	7
记录 005	6	6	2	5
记录 006	4	5	2	7
记录 007	1	5	3	7
记录 008	4	5	1	6
记录 009	1	5	4	6
记录 010	4	7	3	5
记录 011	6	6	4	7
记录 012	1	5	6	6
记录 013	6	6	3	5
记录 014	1	5	6	7
记录 015	1	6	3	5
记录 016	1	7	2	5
记录 017	6	5	6	6
记录 018	4	7	1	6
记录 019	1	5	6	7
记录 020	1	7	2	5
记录 021	6	7	1	6
记录 022	1	7	6	6
记录 023	2	7	4	5
记录 024	1	7	6	6
平均值	1	6	4	6

相同时，被试者最喜欢第 4 杯茶，即冲泡 10 g 的白芽奇兰20 s最受欢迎。当冲泡量相同时，被试者最喜欢第 5 杯茶，即被试者最喜欢冲泡 10 s 数量为 11 g 的白芽奇兰。

对比表 5 和表 6 发现，被试者对于冲泡时间相同的不同浓度的茶叶，HRV 均值有差异。被试者对于冲泡时间不同的相同浓度的茶叶，HRV 均值也有差异。根据以往的研究[5]，HRV 值越小，被试者越喜欢；HRV 值越大，被试者越不喜欢。对于冲泡时间相同的不同浓度的茶叶，第 2 杯时 HRV 值最高，第 4 杯时最低，也就是被试者最喜欢第 4 杯而最不喜欢第 2 杯。推测是由于冲泡 20 min 的 8 g 的白芽奇兰的茶多酚含量较少，过于清淡，而冲泡 20 min 的 10 g 的白芽奇兰最适被试者的口味。对于浓度相同的冲泡时间不同的茶叶，被试者在第 6 杯时 HRV 值最高，第 5 杯时最低，说明被试者最喜欢冲泡 10 min 的 11 g 的白芽奇兰，最不喜欢冲泡 20 min 的 11 g 的白芽奇兰。

随着电子测量技术的发展，脑波频率可以被人们用电子仪器测定出来。国际脑波学会对不同频率的脑波，分别命名为 α 波、β 波、θ 波和 δ 波。人脑产生 β 波时，学习能力差。相反地，δ 波则是太放松的熟睡状态，也不利学习。当人们快睡着时，脑波则处于 θ 波，以上 3 种情况都不利于学习、创意与思考。但当人们身体放松、心情平静时，大脑就处于 α 波的最佳状态，而这种波就对应于最佳的创造力与学习能力。

PSD 比值可以用来评估脑电图信号中脑波节律的平衡情况。α/β 比值表示 α 波和 β 波的平衡情况，通常认为 α 波越高，代表放松、休息的状态，而 β 波越高，则代表兴

表 5　被试者 HRV 值

Table 5　HRV values of subjects

受试者	样品 1	样品 2	样品 3	样品 4	样品 5	样品 6	样品 7
记录 001	879.28	863.09	866.53	863.96	855.47	1 005.76	671.88
记录 002	760.13	712.27	786.18	731.10	736.94	814.73	704.41
记录 003	880.94	911.06	879.48	838.71	908.56	848.33	817.71
记录 004	739.26	853.43	823.74	802.11	862.96	800.88	850.24
记录 005	965.29	811.08	748.41	760.16	783.23	708.33	804.32
记录 006	1 830.58	1 689.50	1 451.72	1 942.06	870.74	1 678.21	1 810.27
记录 007	831.16	841.62	846.45	814.01	803.01	774.87	825.52
记录 008	1 402.98	1 620.82	1 840.21	1 657.99	986.88	2 003.13	1 609.38
记录 009	925.11	899.62	831.07	924.44	788.31	967.42	817.41
记录 010	1 086.63	1 376.12	980.42	1 161.56	1106.43	909.56	730.56
记录 011	863.53	919.87	921.34	773.84	839.23	813.92	945.69
记录 012	770.70	832.48	885.54	801.12	833.04	814.12	987.41
记录 013	851.13	797.62	1 044.56	921.88	940.24	861.52	843.20
记录 014	835.18	1044.79	835.25	777.68	866.12	994.90	782.24
记录 015	715.76	1546.39	797.47	840.23	773.20	1137.15	945.69
记录 016	687.30	639.10	667.97	666.67	986.88	598.09	945.69
记录 017	699.60	735.84	804.99	916.27	791.25	852.54	945.69
记录 018	1 156.25	1 005.51	1 051.41	906.68	915.18	768.40	966.15
记录 019	1 509.31	1 233.99	1 457.93	1 141.86	3 187.50	1 290.08	1 239.06
记录 020	1 273.44	1 858.55	1 762.07	2 066.69	1 890.34	1 326.36	1 992.67
记录 021	688.88	600.33	613.38	605.59	625.36	652.50	655.15
记录 022	1 304.95	1 064.58	805.97	677.08	843.75	855.88	970.34
记录 023	697.53	703.13	669.55	664.69	673.47	644.35	676.72
记录 024	812.14	1 514.16	1 080.63	757.42	817.00	841.68	822.92
平均值	965.29	1 044.79	977.18	958.91	986.88	956.78	973.35

奋、紧张等状态。因此,α/β 比值越高,代表一个人越放松,反之则表示更紧张或兴奋。θ/β 比值表示 θ 波和 β 波的平衡情况,通常认为 θ 波高,则代表大脑处于发呆、放松或者注意力不集中的状态,而 β 波高,则代表大脑处于专注、思考或者兴奋的状态。因此,θ/β 比值越高,则代表一个人处于更放松或者注意力更不集中的状态,反之则表示更专注或者兴奋。$(\alpha+\theta)/\beta$ 比值结合了两者的信息,同时考虑了放松、休息和注意力不集中这两个方面。因此,$(\alpha+\theta)/\beta$ 比值越高,则代表一个人处于更放松或者注意力不集中的状态,反之则表示更专注或者兴奋的状态。$\theta/(\alpha+\beta)$ 比值表示 θ 波对比于 α 波和 β 波的综合作用,这个比值可以用来反映一个人的注意力集中程度。当 $\theta/(\alpha+\beta)$ 比值越高时,则表示一个人注意力不集中的可能性更大,反之则表示更容易集中注意力。从表 7 可以看出,除了 α/β 比值较小,其他 4 个的比值均大于 2,表明被试者在品茶过程中大脑处于比较活跃的状态。

采用可重复双因素方差分析方法,分析性别差异和茶的差异的交互作用对 HRV 和 EDA 的影响。首先对行因素(性别差异)和列因素(茶样本)两个因素分别提出如下假设。

行因素(性别差异):

$H_0: u_1 = u_2 = \cdots = u_{24}$,性别差异对 HRV 没有显著影响;

$H_0: u_1, u_2, \cdots, u_{24}$,不完全相等,性别差异对 HRV 有显著影响。

列因素(茶样本):

$H_0: u_1 = u_2 = \cdots = u_{24}$,茶样本差异对 HRV 没有显著影响;

$H_0: u_1, u_2, \cdots, u_{24}$,不完全相等,茶样本差异对 HRV 有显著影响。

经计算,可得 HRV 可重复双因素方差分析表,如表 8 所示。

由表 8 可知,用于检验“男女”性别差异的 $P =$

表 6　被试者的偏好标记对应结果

Table 6　Corresponding results of preference markers of subjects

受试者	样品 1～4 和 6 中得分最高的样品	样品 5～7 中得分最高的样品	样品 1～4 和 6 中得分最低的样品	样品 5～7 中得分最低的样品
记录 001	1	5	2	7
记录 002	3	5	2	7
记录 003	2	6	4	7
记录 004	6	6	4	5
记录 005	1	7	3	5
记录 006	4	7	3	6
记录 007	4	7	4	5
记录 008	3	5	2	6
记录 009	1	5	3	6
记录 010	2	6	3	7
记录 011	3	7	4	5
记录 012	3	6	4	5
记录 013	3	6	2	7
记录 014	2	5	4	7
记录 015	2	5	3	6
记录 016	6	6	2	5
记录 017	4	7	2	6
记录 018	1	7	4	5
记录 019	6	6	4	7
记录 020	4	7	3	5
记录 021	1	7	2	5
记录 022	1	7	4	6
记录 023	2	7	4	5
记录 024	2	5	4	6
平均值	2	6	4	5

0.988 963>0.05，接受原假设，表明男女性别之间 HRV 并无显著差异。用于检验“列”（茶样本）的 $P=0.998\ 718>0.05$，接受原假设，表明不同的茶之间 HRV 并无显著差异。“交互”反映的是性别因素和茶因素联合参数对 HRV 的附加效应，用于检验的 $P=0.947\ 136>0.05$，表明性别差异和茶差异的交互作用对 HRV 无显著影响。说明 HRV 数据是客观的。

同理，可得 EDA 可重复双因素方差分析表，如表 9 所示。

由表 9 可知，用于检验“男女”性别差异的 $P=0.058\ 420>0.05$，接受原假设，表明男女性别之间 EDA 并无显著差异。用于检验“列”（茶样本）的 $P=0.999\ 975>0.05$，接受原假设，表明不同的茶样本之间 EDA 并无显著差异。“交互”反映的是性别因素和茶样本因素联合参数对 EDA 的附加效应，用于检验的 $P=0.999\ 906>0.05$，表明性别差异和茶差异的交互作用对 EDA 无显著影响。说明 EDA 数据是客观的。

4　结论

采用多元统计分析和感官评价相结合的方法，通过分析脑电波、皮电活动和心率变异性的均值和方差等数据，让 24 个对 7 个批次的不同克数和冲泡时长的白芽奇兰茶进行口感偏好评价。研究发现，脑电波的功率谱密度均值，心率变异性均值和皮电活动均值都能客观反映受试者的偏好，均值和喜欢程度呈负相关关系。此外，通过双因素方差分析，表明此次试验中，性别差异和茶差异

表 7　被试者各波形 PSD 比值与偏好标记对应表

Table 7　PSD and preference markers of subjects

受试者	最喜欢编号	α/β	θ/β	$(\alpha+\theta)/\beta$	$(\alpha+\theta)/(\alpha+\beta)$	$\theta/(\alpha+\beta)$
1	4	2.03	7.26	8.40	4.25	3.12
2	2	−0.41	6.42	7.24	4.43	3.61
3	4	0.10	4.57	5.90	2.84	1.51
4	2	0.38	4.89	6.21	3.00	1.69
5	4	6.55	11.85	12.97	5.55	4.43
6	3	1.42	8.84	9.56	5.78	5.06
7	4	3.90	10.06	11.00	5.62	4.68
8	5	2.83	12.80	13.21	8.56	8.14
9	4	−2.25	1.04	2.71	0.68	−0.99
10	4	1.52	7.39	8.39	4.55	3.55
11	4	0.39	6.22	7.23	4.02	3.01
12	2	−2.61	3.32	4.31	2.41	1.42
13	2	−1.78	1.68	3.30	1.08	−0.53
14	6	0.35	6.02	7.07	3.88	2.84
15	1	1.71	7.94	8.87	4.92	3.99
16	1	2.50	8.70	9.64	5.20	4.27
17	6	2.81	7.84	9.03	4.39	3.20
18	6	2.72	10.06	10.80	6.22	5.48
19	4	−0.35	4.87	6.01	3.17	2.03
20	2	−0.55	6.05	6.91	4.17	3.31
21	3	1.69	6.57	7.80	3.86	2.64
22	4	2.73	10.39	11.08	6.49	5.80
23	4	1.15	8.06	8.87	5.25	4.44
24	2	3.82	11.57	12.25	6.92	6.25
平均值		0.80	6.81	7.83	4.26	3.24

表 8　HRV 可重复双因素方差分析表

Table 8　The results of repeatable bivariate analysis of variance of HRV

差异源	离差平方和	自由度	均方	F 检验的统计量值	P 值	显著水平下的 F 临界值
样本	29	1	29	0.000 192	0.988 963	3.908 741
列	62 614	6	10 436	0.068 414	0.998 718	2.163 932
交互	253 212	6	42 202	0.276 666	0.947 136	2.163 932
内部	21 355 319	140	152 538			
总计	21 671 174	153				

表 9　EDA 可重复双因素方差分析

Table 9　The results of repeatable bivariate analysis of variance of EDA

差异源	离差平方和	自由度	均方	F 检验的统计量值	P 值	显著水平下的 F 临界值
样本	53.83	1	53.828 8	3.637 448	0.058 542	3.908 741
列	1.57	6	0.261 2	0.017 648	0.999 975	2.163 932
交互	2.46	6	0.410 6	0.027 748	0.999 906	2.163 932
内部	2 071.79	140	14.798 5			
总计	2 129.65	153				

的交互作用对皮电活动和心率变异性无显著影响。在今后的研究中，需要进一步研究多模态生理信号的分析方法，试验设计和试验时长也需要做进一步优化。

参考文献

[1] 张颖彬, 王国庆, 于良子, 等. 我国茶叶感官审评技术的形成与发展[J]. 中国茶叶, 2019, 41(1): 19-21.
ZHANG Y B, WANG G Q, YU L Z, et al. Formation and development of sensory review techniques of tea in China[J]. China Tea, 2019, 41(1): 19-21.

[2] 肖坤冰, 帕金. 听见好滋味: 中国当代茶事活动中的多重感官体验[J]. 民族艺术, 2022, 164(1): 85-94.
XIAO K B, PARKIN. Hearing the good taste: Multi-sensory experiences in contemporary Chinese tea events[J]. National Arts, 2022, 164(1): 85-94.

[3] SUNG B, WILSON N J, YUN J H, et al. What can neuroscience offer marketing research? [J]. Asia Pacific Journal of Marketing and Logistics, 2020, 32(5): 1 089-1 111.

[4] 张静, 刘嘉飞, 汪廷彩, 等. 基于味觉分析系统鉴别干邑白兰地真假的应用初探[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(13): 4 086-4 091.
ZHANG J, LIU J F, WANG T C, et al. A preliminary investigation on the application of taste analysis system based on the identification of authentic Cognac brandy[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2019, 10(13): 4 086-4 091.

[5] 耿利华, 崔红, 王华夫, 等. 味觉分析系统在茶饮料味觉评价方面应用[J]. 现代仪器与医疗, 2014, 20(6): 57-61.
GENG L H, CUI H, WANG H F, et al. Application of taste analysis system in taste evaluation of tea beverages[J]. Modern Instruments & Medical Treatment, 2014, 20(6): 57-61.

[6] 尹洪旭, 杨艳芹, 姚月凤, 等. 基于气相色谱—质谱技术与多元统计分析对不同栗香特征绿茶判别分析[J]. 食品科学, 2019, 40(4): 192-198.
YIN H X, YANG Y Q, YAO Y F, et al. Discriminant analysis of green tea with different chestnut aroma characteristics based on gas chromatography-mass spectrometry and multivariate statistical analysis[J]. Food Science, 2019, 40(4): 192-198.

[7] 柳镇章, 陈彬, 蔡银笔, 等. 基于多元统计分析的不同安溪铁观音茶产品的化学品质[J]. 食品科学, 2022, 43(18): 224-235.
LIU Z Z, CHEN B, CAI Y B, et al. Chemical quality of different Anxi Tieguanyin tea products based on multivariate statistical analysis[J]. Food Science, 2022, 43(18): 224-235.

[8] WANG Z, WANG Y X, ZHANG J P, et al. Spatial-Temporal Feature Fusion Neural Network for EEG-Based Emotion Recognition [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 1-12.

[9] KHURANA V, GAHALAWAT M, KUMAR P, et al. A survey on neuromarketing using EEG signals [J]. IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems, 2021, 13(4): 732-749.

[10] 孙中皋, 薛全德, 王新军, 等. 基于脑电信号的情感识别方法综述[J]. 北京生物医学工程, 2020, 39(2): 186-195.
SUN Z G, XUE Q D, WANG X J, et al. A review of EEG signal-based emotion recognition methods [J]. Beijing Biomedical Engineering, 2020, 39(2): 186-195.

[11] 许子明, 牛一帆, 温旭云, 等. 基于脑电信号的认知负荷评估综述[J]. 航天医学与医学工程, 2021, 34(4): 339-348.
XU Z M, NIU Y F, WEN X Y, et al. A review of EEG signal-based cognitive load assessment [J]. Space Medicine and Medical Engineering, 2021, 34(4): 339-348.

[12] 王洪涛, 殷浩钧, 陈创泉, 等. 基于脑电信号的驾驶疲劳检测综述[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2022, 50(11): 54-65, 78.
WANG H T, YIN H J, CHEN C Q, et al. A review of EEG signal-based driving fatigue detection[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2022, 50(11): 54-65, 78.

[13] ANTONIO B, MARCELINO S, HUGO P D S. Electrodermal activity: Fundamental principles, measurement, and application[J]. IEEE Potentials, 2022, 41(5): 35-43.

[14] 徐富明, 史燕伟. 公平偏好的电生理测量: 来自脑电、皮肤电和心电的证据[J]. 心理科学, 2020, 43(1): 180-186.
XU F M, SHI Y W. Electrophysiological measures of equity preferences: evidence from electroencephalography, electrodermal, and electrocardiography[J]. Journal of Psychological Science, 2020, 43(1): 180-186.

[15] 柳沙, 彭鑫玉, 张宝月. 皮肤电信号在产品外观偏好评价中的应用研究[J]. 包装工程, 2016, 37(24): 22-27.
LIU S, PENG X Y, ZHANG B Y. Research on the application of skin electrical signal in product appearance preference evaluation [J]. Packaging Engineering, 2016, 37(24): 22-27.

[16] 吴钰. 旅游广告的情感反应研究[D]. 上海: 上海师范大学, 2020: 15-20.
WU Y. Research on emotional responses to tourism advertisements [D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2020: 15-20.

[17] 张朋云. 基于眼动和皮肤电信号的认知负荷测量研究[D]. 武汉: 华中师范大学, 2022: 32-40.
ZHANG P Y. Research on cognitive load measurement based on eye movements and skin electrical signals[D]. Wuhan: Huazhong Normal University, 2022: 32-40.

[18] CHUANG X L, WILLIAM H O, TANYA S W, et al. Psychological Inflexibility and HF-HRV reactivity to laboratory stressors [J]. Journal of Contextual Behavioral Science, 2022, 26: 134-138.

[19] 刘清, 陈俊华, 杨柳, 等. 基于心率变异性的船员心理负荷特征研究[J]. 中国航海, 2022, 45(2): 19-25.
LIU Q, CHEN J H, YANG L, et al. A study of mental load characteristics of crew members based on heart rate variability[J]. Navigation of China, 2022, 45(2): 19-25.

（下转第 171 页）

[17] CHYLINSKA M, SZYMANSKA-CHARGOT M, ZDUNEK A. FT-IR and FT-Raman characterization of non-cellulosic polysaccharides fractions isolated from plant cell wall [J]. Carbohydrate polymers, 2016, 154: 48-54.

[18] 赵婧. 南瓜酸性多糖的结构解析及其与功能蛋白的相互作用[D]. 北京: 中国农业大学, 2017: 20-21.
ZHAO J. Structural elucidation of pumpkin acidic polysaccharides and their interactions with functional proteins[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017: 20-21.

[19] COBS-ROSAS M, CONCHA-OLMOS J, WEINSTEIN-OPPENHEIMER C, et al. Assessment of antiproliferative activity of pectic substances obtained by different extraction methods from rapeseed cake on cancer cell lines [J]. Carbohydrate Polymers, 2015, 117: 923-932.

[20] 周慧吉, 马海乐, 郭丹钊, 等. 不同体积分数乙醇沉淀桑黄胞内多糖的理化性质及抗氧化活性[J]. 食品科学, 2015, 36(19): 34-38.
ZHOU H J, MA H L, GUO D Z, et al. Physicochemical properties and antioxidant activity of intracellular polysaccharides from *Phellinus igniarius* precipitated by different ethanol concentrations [J]. Food Sciences, 2015, 36(19): 34-38.

[21] 王佳, 李进霞, 张慧芝, 等. 虎杖多糖乙醇分级纯化及其抗氧化性[J]. 食品工业科技, 2019, 40(1): 92-95.
WANG J, LI J X, ZHANG H Z, at al. Ethanol fractional purification and antioxidant activities of polysaccharides from *Polygonum cuspidatum* [J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(1): 92-95.

[22] 张梦洁, 易阳, 闵婷, 等. 不同浓度醇沉级分的莲藕多糖成分分析与对 RAW264.7 细胞免疫活性的影响[J]. 食品科技, 2021, 46(8): 162-170.
ZHANG M J, YI Y, MIN T, at al. Composition analysis and in vitro evaluation of some activities of RAW264.7 of *Lotus Root* polysaccharide extracted by ethanol precipitation with different concentrations[J]. Food Science and Technology, 2021, 46(8): 162-170.

[23] 康文艺, 蒙丽君, 王莉, 等. 花中多糖化学组成与生物活性研究进展[J]. 食品科学, 2022, 43(1): 1-13.
KANG W Y, MENG L J, WANG L, at al. Chemical composition and biological activity of polysaccharides from flowers: A review [J]. Food Science, 2022, 43(1): 1-13.

[24] CHEN L, HUANG G L. Antioxidant activities of sulfated pumpkin polysaccharides [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 126: 743-746.

[25] SONG Y, NI Y Y, HU X S, et al. Effect of phosphorylation on antioxidant activities of pumpkin (*Cucurbita pepo*, Lady godiva) polysaccharide [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2015, 81: 41-48.

[26] ZHANG H X, ZHAO J C, SHANG H M, at al. Extraction, purification, hypoglycemic and antioxidant activities of red clover (*Trifolium pratense* L.) polysaccharides[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 148: 750-760.

[27] 赵婧, 袁驰, 周春丽, 等. 南瓜多糖降血糖作用研究进展[J]. 食品研究与开发, 2014, 35(7): 108-110.
ZHAO J, YUAN C, ZHOU C L, at al. Research advance in hypoglycemic effects of pumpkin polysaccharides [J]. Food Research and Development, 2014, 35(7): 108-110.

(上接第 28 页)

[20] 张健, 颜伟, 王佳晨, 等. 探讨血糖代谢障碍对心率变异性的影响[J]. 解放军医学院学报, 2022, 43(3): 277-283, 353.
ZHANG J, YAN W, WANG J C, et al. Exploring the effect of impaired glucose metabolism on heart rate variability [J]. Academic Journal of Chinese PLA Medical School, 2022, 43(3): 277-283, 353.

[21] 孔令琴, 陈飞, 赵跃进, 等. 融合心率变异性与表情的非接触心理压力检测[J]. 光学学报, 2021, 41(3): 68-77.
KONG L Q, CHEN F, ZHAO Y J, et al. Non-contact psychological stress detection by fusing heart rate variability with expression[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(3): 68-77.

[22] 史波林, 赵镭, 汪厚银, 等. 智能感官分析技术在茶叶品质检测中的 应用[J]. 食品科学, 2009, 30(19): 351-355.
SHI B L, ZHAO L, WANG H Y, et al. Application of intelligent sensory analysis technology in tea quality testing[J]. Food Science, 2009, 30(19): 351-355.

[23] 余顺园. 信号与系统中时域频域的对称性[J]. 科技视界, 2012(25): 192-193.
YU S Y. Symmetry in the time and frequency domains of signals and systems[J]. Science & Technology Vision, 2012(25): 192-193.

(上接第 156 页)

[31] TANG Y, FAN Z, YANGM, et al. Low concentrations of the antidepressant venlafaxine affect courtship behaviour and alter serotonin and dopamine systems in zebrafish (Danio rerio) [J]. Aquatic Toxicology, 2022, 244(10): 60-82.

[32] KOPSCHINA FELTES P, DOORDUIN J, KLEIN HC, et al. Anti-inflammatory treatment for major depressive disorder: Implications for patients with an elevated immune profile and non-responders to standard antidepressant therapy [J]. Journal of Psychopharmacology, 2017, 31(9): 1 149-1 165.

[33] NGUYEN M, STEWART A M, KALUEFF A V. Aquatic blues: Modeling depression and antidepressant action in zebrafish [J]. Progress in Neuro-Psychopharmacology and Biological Psychiatry, 2014, 55(12): 26-39.