

电子鼻/舌融合技术的信阳毛尖茶品质检测

邹光宇, 王万章, 王淼森, 肖焱中, 张红梅*

(河南农业大学机电工程学院, 河南 郑州 450002)

摘 要: 为实现茶叶品质和化学成分快速鉴别和预测, 采用电子鼻与电子舌联用技术对信阳毛尖茶茶叶挥发性气味和茶汤滋味成分进行检测分析。对电子鼻与电子舌联用的响应值进行主成分分析, 结果显示电子鼻与电子舌数据融合可提高对茶叶样品区分度。通过电子鼻与电子舌响应的融合数据, 对茶叶样品中茶多酚、咖啡碱含量建立预测模型。结果表明, 多元线性回归、多元线性逐步回归、二次多项式逐步回归模型中回归系数效果显著 ($P < 0.01$), 其中二次多项式逐步回归模型效果最佳, 茶多酚建模集和验证集的决定系数分别为0.999、0.975, 均方根误差分别为0.083、0.174; 咖啡碱建模集和验证集的决定系数分别为0.985、0.978, 均方根误差分别为0.015、0.048。电子鼻/舌联用可对茶叶品质和理化成分进行很好地分析和预测。

关键词: 电子鼻; 电子舌; 主成分分析 (PCA); 理化成分

Quality Detection of Xinyang Maojian Tea Using Electronic Nose and Electronic Tongue

ZOU Guangyu, WANG Wanzhang, WANG Miaosen, XIAO Yanzhong, ZHANG Hongmei*

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: In order to rapidly identify and predict tea quality, the volatile odor components of Xinyang Maojian tea and the taste components of its infusion were analyzed with an electronic nose and an electronic tongue. Principal component analysis (PCA) indicated that the fusion of the electronic nose and tongue data allowed a better discrimination among tea samples. The fused data were used to develop mathematical models to predict the contents of tea polyphenol and caffeine. Results showed that the regression coefficients of the multiple linear regression (MLR), multivariate linear stepwise regression (MLSR) and quadratic polynomial stepwise regression (QPSR) models were all statistically significant ($P < 0.01$). The QPSR model presented the best prediction performance among these models. The determination coefficients of calibration and validation of this model were 0.999 and 0.975 for tea polyphenol, and 0.985 and 0.978 for caffeine, respectively; the root mean square error of calibration (RMSEC) were 0.083 and 0.174 for tea polyphenol, and 0.015 and 0.048 for caffeine, respectively. The combination of electronic nose and tongue is feasible to predict the quality and chemical composition of tea.

Keywords: electronic nose; electronic tongue; principal component analysis (PCA); chemical composition

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20180504-039

中图分类号: TP212.9

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2019) 10-0279-06

引文格式:

邹光宇, 王万章, 王淼森, 等. 电子鼻/舌融合技术的信阳毛尖茶品质检测[J]. 食品科学, 2019, 40(10): 279-284.

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20180504-039. <http://www.spkx.net.cn>

ZOU Guangyu, WANG Wanzhang, WANG Miaosen, et al. Quality detection of Xinyang Maojian tea using electronic nose and electronic tongue[J]. Food Science, 2019, 40(10): 279-284. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20180504-039. <http://www.spkx.net.cn>

收稿日期: 2018-05-04

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目 (31501213); 河南省现代农业产业技术体系建设专项 (S2017-02-G07); 河南省高等学校青年骨干教师资助计划项目 (2015GGJS-077)

第一作者简介: 邹光宇 (1994—) (ORCID: 0000-0003-3182-8217), 男, 硕士研究生, 研究方向为信阳毛尖茶叶品质检测。

E-mail: zgy19941001@sina.com

*通信作者简介: 张红梅 (1977—) (ORCID: 0000-0003-3998-0504), 女, 副教授, 博士, 研究方向为农产品智能检测技术。

E-mail: hmzh86022625@sina.com

茶叶香气和滋味是评判茶叶品质的两大因素。电子鼻与电子舌分别是模仿人体嗅觉与味觉机理研制出来的一种智能识别系统^[1-3], 电子鼻与电子舌联用可有效分析茶叶香气和茶汤滋味, 达到对茶叶品质的判别。电子鼻具有检测时间短, 样品预处理简单, 检测结果可靠等优点^[4], 已应用于肉类^[5-7]、水果^[8-9]、食用油^[10]等食品领域, 在茶叶香气的检测上也有独特的优势。Tudu等^[11]用电子鼻技术对印度红茶进行分类, 结果表明径向基神经网络能有效区分4个不同茶园的茶叶; Shi Bolin等^[12]对西湖龙井进行检测研究, 采用遗传算法对电子鼻传感器阵列进行优化, 结果表明电子鼻可对3个不同产地的两类茶叶进行识别; Yu Huichun等^[13]通过电子鼻检测干茶叶、茶汤与茶渣以区分5种不同采摘时间的茶叶, 结果表明经主成分分析(principal component analysis, PCA)特征提取后有效提高线性判别分析与反向传递神经网络对茶叶的区分度; Qin Zihan等^[14]对3个不同品质的中国绿茶、红茶进行识别, 结果显示电子鼻能清晰快速区分不同茶叶品质差异。

电子舌模拟人的舌头对样品进行分析, 可快速反应样品整体的质量信息^[15], 在醋类^[16]、酒类^[17-18]、乳制品^[19]等食品领域都有所运用, 在茶叶的检测方面也有广泛的应用。Yan Simin等^[20]采用电子舌技术通过PCA、偏最小二乘判别分析(partial least squares-discriminant analysis, PLS-DA)区分安吉白茶真假, 结果表明PLSDA分类效果优于PCA; Li Yanjie等^[21]利用电子舌对4种不同产地的铁观音进行区分, 结果显示相比于反向传递神经网络, Levenberg-Marquardt训练算法模型对茶叶有更好区分度; Palit等^[22]通过电子舌对比不同预处理对红茶分类的影响, 结果发现电子舌对红茶具有良好识别能力。

单一的检测系统信息不够全面, 不能从香气、滋味等方面多角度反映样品的信息, 电子鼻能够反映样品整体气味信息, 电子舌能够反映样品的甜、苦、涩、咸等综合滋味信息, 可从不同角度对食品品质进行检测评定。徐宝才等^[23]采用电子鼻和电子舌分析盐水鸭风味的差异性, 陈晓婷等^[24]把电子鼻和电子舌优化技术用于蓝圆鲂调味基料的制备中。Haddi等^[25]将电子鼻和电子舌联用提高果汁样品的识别度。Hong Xuezheng等^[26]同时使用电子鼻与电子舌对樱桃汁掺假进行检测。这些研究结果表明电子鼻、电子舌联用比单一的电子鼻和电子舌技术对样品有更高的分类识别性能。

目前, 多检测技术信息融合研究还比较少, 尤其是在茶叶品质检测中, 对于茶叶品质的研究大多只采用单一的检测技术, 或对多个检测技术分别单独分析。本研究采用电子鼻/舌联用技术, 从气味和滋味综合对茶叶品质进行识别研究。通过PCA降维对比单一的电子鼻/舌检

测信息与电子鼻/舌联用检测信息, 探讨一种对茶叶品质分类识别能力更强的方法。同时, 基于电子鼻/舌融合数据建立茶多酚、咖啡碱预测模型。采用对比多元线性回归、多元线性逐步回归以及二次多项式逐步回归建立回归预测模型, 并对模型预测结果进行对比分析。

1 材料与方法

1.1 材料

茶叶样品为2017年4月河南信阳浉河所摘采的信阳毛尖明前茶, 由专业生产茶叶的厂家按摊放、杀青、揉捻、解块、理条、初烘、摊凉、复烘工艺流程进行加工。品质由高到低分别为特级、一级和二级(T1、T2、T3), 实验前各等级茶叶用锡纸袋密封包装, 置于-4℃贮藏。

1.2 仪器与设备

PEN 3型便携式电子鼻由德国Airsense公司生产, 主要构成部件由传感器阵列、采样及清洗通道、数据采集系统和计算机组成。传感器阵列由10个金属氧化物传感器组成, 各传感器特性及名称如表1所示。

表1 电子鼻传感器阵列性能描述

Table 1 Performance description of the electronic nose sensor array

传感器名称	传感器响应特性
W1C (S1)	对芳香成分灵敏
W5S (S2)	对氨氧化物灵敏
W3C (S3)	对氨水、芳香成分灵敏
W6S (S4)	对氢气有选择性
W5C (S5)	对烷烃、芳香成分灵敏
W1S (S6)	对甲烷灵敏
W1W (S7)	对硫化成分及烃和硫的有机成分较灵敏
W2S (S8)	对乙醇灵敏
W2W (S9)	对芳香成分和有机硫化物灵敏
W3S (S10)	对烷烃灵敏

SA402B电子舌分析系统由日本Insent公司生产, 主要由主机、传感器阵列、操作电脑3部分组成。传感器阵列是由味觉传感器和参比电极组成, 其中味觉传感器薄膜电势是根据参比电极的变化检测得出。电子舌自带软件可将所测得的各味觉传感器电势自动转化为味觉值。味觉传感器阵列信息如表2所示。

表2 电子舌味觉传感器阵列性能描述

Table 2 Performance description of the electronic tongue sensor array

传感器名称	传感器响应特性
CA0 (S11)	对酸味灵敏
C00 (S12)	对苦味灵敏
AE1 (S13)	对涩味灵敏
AAE (S14)	对鲜味灵敏
CT0 (S15)	对咸味灵敏

1.3 方法

1.3.1 茶叶气味的电子鼻检测

3个等级茶叶每个等级有5个平行样本,每个平行样本取3份共15个子样本,每个子样本为5g(精确到0.01g),共45个子样本。每个子样本分别放入250 mL烧杯中双层薄膜密封静置45 min。顶空取样,电子鼻每隔1 s采样1次,连续采样60 s,清洗时间50 s,可以基本使传感器响应恢复初始状态,在室温25℃完成。

1.3.2 茶叶滋味的电子舌检测

3个等级茶叶每个等级有5个平行样本,每个平行样本取3份共15个子样本,每个子样本为5g(精确到0.01g),共45个子样本。每个子样本分别加入250 mL的100℃热水冲泡5 min后过滤成为实验所用茶汤,茶水比1:50(g/mL),冷却至室温((25±2)℃)后进行电子舌数据采集,清洗时间5.5 min,传感器自检时间30 s,样品测试时间30 s,测量回味30 s。

1.3.3 理化成分测定

茶多酚含量:参照GB/T 8313—2008《茶叶中茶多酚和儿茶素类含量的检测方法》采用分光光度法进行测定;咖啡碱含量:参照GB/T 8312—2013《茶 咖啡碱测定》采用高效液相色谱法进行测定。

1.4 数据处理

首先对原始数据信息做归一化处理,归一化公式如式(1)所示;进而采用PCA对比单一仪器与两者联用的检测效果;然后对电子鼻与电子舌响应值做PCA特征提取实现数据融合;最后使用融合数据对茶多酚与咖啡碱建立多元线性回归、多元线性逐步回归、二次多项式逐步回归模型,对比3个模型拟合效果,得出较佳预测模型。PCA由SPSS 21.0软件完成,多元线性回归、多元线性逐步回归及二次多项式逐步回归由Matlab 2014a软件完成。

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (1)$$

式中: z 为标准分数; x 为原始数据; μ 为平均数; σ 为标准差。

2 结果与分析

2.1 基于传感器响应的茶叶香气和滋味分析

分别提取电子鼻传感器阵列响应的稳态平均值,与电子舌味觉传感器阵列所测得的味觉值作为特征值。如图1所示,电子鼻传感器阵列显示传感器S6、S7、S9的响应值较大,茶叶等级与响应值呈负相关。这3个传感器分别对甲烷、硫化成分及芳香成分反应灵敏。传感器S9响应信息可反映出二级茶叶的气味较为浓郁,特级茶叶气味较为清淡。同时,虽然传感器S1、S2、S8响应值较为

接近,但茶叶等级与响应值仍呈良好线性关系。这3个传感器分别对芳香成分、氨氧化合物及乙醇灵敏。其中传感器S1对芳香气味的响应结果与传感器S9结果一致。

电子舌味觉传感器阵列显示3类茶叶口感较为接近,其中二级茶叶苦、涩味值最高,一级茶叶苦、涩味值最低。茶叶中苦味的主要呈味成分是咖啡碱,咖啡碱是茶叶中主要的生物碱,占茶叶干质量的2%~5%^[27-28]。涩味的主要呈味成分是茶多酚,其中儿茶素占茶多酚总量的70%~80%,呈苦涩味^[29-30],此外茶多酚中的黄酮类化合物也能增强茶叶的苦涩口感^[31]。因而电子舌味觉传感器给出的苦味值和涩味值,可在一定程度上对茶叶咖啡碱与茶多酚进行预测。在电子舌味觉传感器酸、鲜味响应上茶叶等级呈线性分布,茶叶中酸味来源主要是加工过程中茶叶发酵导致,鲜味主要是茶叶中部分氨基酸所呈现^[32-33]。

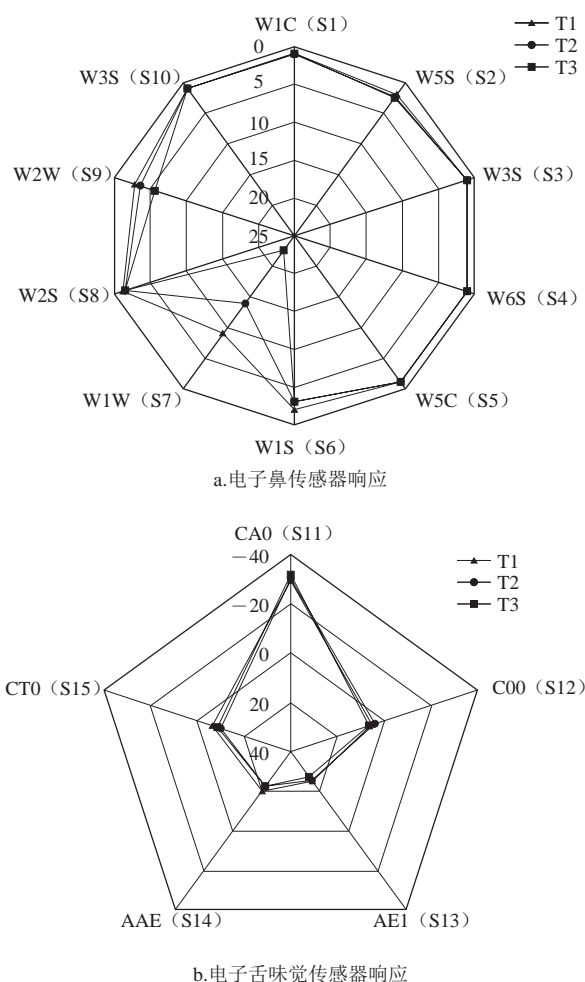


图1 不同品质茶叶电子鼻/舌传感器响应雷达图
Fig. 1 Radar diagram of electronic nose and tongue sensor responses to tea of different qualities

2.2 理化成分分析

茶多酚与咖啡碱是影响茶叶香气和茶汤滋味的两大重要因素。如表3所示,各等级茶叶茶多酚含量有明显变

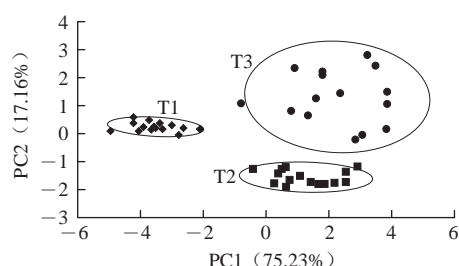
化,茶多酚质量分数与茶叶等级呈正相关。特级毛尖咖啡碱含量最多,一级与二级毛尖咖啡碱含量较少且较为接近。茶多酚、咖啡碱及氨基酸相互作用对茶叶香气和滋味的影响,是造成茶叶气味与口感多样化的重要原因。

表3 信阳毛尖茶理化成分分析

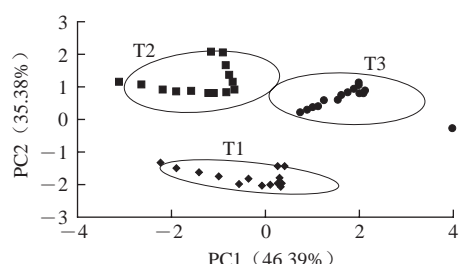
Table 3 Chemical composition analysis of Xinyang Maojian tea

信阳毛尖样品	茶多酚质量分数/%	咖啡碱质量分数/%
特级	21.02	3.78
一级	19.58	3.72
二级	18.81	3.52

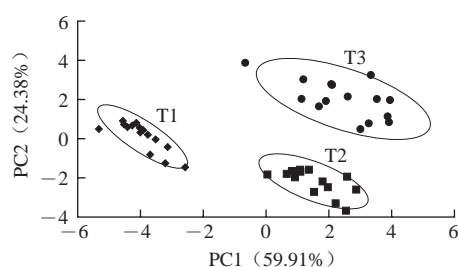
2.3 PCA



a. 电子鼻



b. 电子舌



c. 电子鼻/舌数据融合

图2 3个等级茶叶PCA

Fig. 2 Comparison of principal component analysis of different grades of tea

电子鼻与电子舌采集得到的多维数据,无法直观分析茶叶所属类别,因而采用PCA降低数据维度,达到识别目的。首先分别对电子鼻、电子舌所测数据以及电子鼻电子舌所测融合后数据做z-score归一化处理,然后进行PCA降维识别。如图2a所示,电子鼻传感器阵列响应降维后T1、T2、T3茶叶得到初步区分。PC1与PC2贡献率分别为75.23%、17.16%,累计解释方差的92.39%。

如图2b所示,电子舌味觉传感器阵列响应降维后T2、T3茶叶有部分重叠,不能得到较好区分效果。PC1与PC2的贡献率分别为46.39%、35.38%,累计解释方差的81.77%。如图2c所示,电子鼻与电子舌味觉传感器阵列数据融合降维后T1、T2、T3茶叶区分度有明显提升,3类茶叶的类内聚集效果提高。PC1与PC2贡献率分别为59.91%、24.38%,累计解释方差的84.29%。通过对比可知,电子鼻检测可使各类茶叶得到区分,但各类茶叶的组内聚集效果较差;电子舌检测使茶叶组内聚集效果提升,但茶叶的识别能力下降。而电子鼻与电子舌传感器的数据融合综合了两者的优点,识别效果优于单一仪器的检测效果。这反映出电子鼻与电子舌联用可从嗅觉与味觉2个角度对茶叶品质进行评判,丰富了茶叶的特征信息,能有效提高对茶叶样品的分离度。

2.4 电子鼻/舌融合的茶多酚和咖啡碱预测模型结果

2.4.1 融合数据优化结果

对电子鼻/舌所测得的原始数据进行数据融合含有丰富的茶叶信息特征,但融合后数据维度高且含有大量冗余信息,不利于后期数据处理,因此需对融合数据进行优化处理。本实验采用PCA方法分别对电子鼻和电子舌进行特征提取。为保证提取的主成分信息保留大量原始变量信息,对累计解释98%以上的原始变量信息主成分进行提取。电子鼻传感器阵列提取前5个主成分(X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 、 X_5),可累计解释原始变量信息的99.36%;电子舌传感器阵列提取前3个主成分(X_6 、 X_7 、 X_8),可累计解释原始变量信息的98.48%。将提取后的特征重新组合成一个8维矩阵。经优化处理后,新特征矩阵保留原始数据大量信息特征,剔除部分冗余信息,降低数据维度,可有效减小计算量。

2.4.2 基于融合优化后数据的茶多酚预测模型结果

茶多酚是形成茶叶香气的主要成分之一,也是茶叶涩味的主要呈味物质。对茶多酚建立多元回归模型以预测含量。将优化后的8个特征值作为自变量、茶多酚含量作为因变量,采用多元线性回归、多元线性逐步回归、二次多项式逐步回归分别建立茶多酚预测模型,回归模型分别如式(2)~(4),3种模型的决定系数和均方根误差如表4所示。

$$TP_{MLR} = 46.683 - 0.333x_1 - 0.937x_2 - 4.212x_3 - 3.002x_4 + 1.226x_5 - 0.334x_6 - 0.371x_7 - 0.12x_8 \quad (2)$$

$$TP_{MLR} = 42.131 - 1.094x_1 + 0.805x_2 - 0.368x_6 - 0.342x_7 \quad (3)$$

$$TP_{QPSR} = 14.182 - 32.819x_1 + 25.634x_2 + 1.993x_7 + 1.328x_8 - 0.006x_6^2 - 0.082x_8^2 + 0.759x_1x_6 + 0.296x_1x_7 - 0.603x_2x_6 - 0.219x_2x_7 - 0.081x_6x_7 - 0.138x_6x_8 \quad (4)$$

式中: TP_{MLR} 、 TP_{MSLR} 、 TP_{QPSR} 分别代表多元线性回归、多元线性逐步回归、二次多项式逐步回归模型中茶多酚的预测含量; $x_1 \sim x_8$ 分别对应 $X_1 \sim X_8$ 主成分值。

表4 茶多酚的3种回归模型
Table 4 Three regression models for tea polyphenols

回归模型	建模集		验证集	
	决定系数	均方根误差	决定系数	均方根误差
多元线性回归	0.995	0.069	0.973	0.291
多元线性逐步回归	0.993	0.078	0.98	0.349
二次多项式逐步回归	0.999	0.083	0.975	0.174

3种回归模型的 P 值均小于0.01,表明回归系数检验显著,传感器阵列特征值能有效预测茶叶中茶多酚的变化规律。建模集决定系数显示3种回归模型决定系数均大于0.99,验证集决定系数显示3种回归模型决定系数均大于0.97,茶多酚预测值和实测值呈显著线性相关。建模集和验证集均方根误差显示预测值与实际值偏差较小,3种回归模型均对茶叶中茶多酚含量有良好的预测能力。多元线性回归与多元线性逐步回归模型旨在寻找多元自变量对因变量的线性关系,要求自变量与因变量之间的关系必须是线性的^[34]。二次多项式逐步回归模型预测效果较佳,回归后建模集和验证集的决定系数分别为0.999、0.975。二次多项式回归的优越性主要在于,把正交试验与回归分析相结合,在原始数据的基础上,生成新的二次项,考虑数据交叉作用结果^[35]。

2.4.3 基于融合优化后数据的咖啡碱预测模型

咖啡碱是构成茶叶苦味的重要物质,对茶叶品质有着重要影响。将优化后的8个特征作为自变量、咖啡碱含量作为因变量,其多元线性回归、多元线性逐步回归、二次多项式逐步回归模型分别如式(5)~(7),3种模型的决定系数和均方根误差如表5所示。

$$CAF_{MLR} = 6.432 + 0.079x_1 - 0.137x_2 - 0.126x_3 - 0.041x_4 + 0.014x_5 - 0.053x_6 - 0.038x_7 - 0.017x_8 \quad (5)$$

$$CAF_{MSLR} = 6.641 - 0.068x_2 - 0.082x_3 - 0.056x_6 - 0.033x_7 \quad (6)$$

$$CAF_{QPSR} = 4.508 - 0.0024x_1x_8 + 0.0038x_2x_4 - 0.0024x_2x_6 - 0.0006x_6x_7 \quad (7)$$

式中: CAF_{MLR} 、 CAF_{MSLR} 、 CAF_{QPSR} 分别代表多元线性回归、多元线性逐步回归、二次多项式逐步回归模型中咖啡碱的预测含量; $x_1 \sim x_8$ 对应 $X_1 \sim X_8$ 主成分值。

表5 咖啡碱的3种回归模型
Table 5 Three regression models for caffeine

回归模型	建模集		验证集	
	决定系数	均方根误差	决定系数	均方根误差
多元线性回归	0.982	0.029	0.969	0.045
多元线性逐步回归	0.980	0.018	0.567	0.062
二次多项式逐步回归	0.985	0.015	0.978	0.048

3种回归模型中的回归系数检验显著, P 值均小于0.01,表明传感器阵列特征值能有效预测茶叶中咖啡碱含量。建模集3种模型决定系数均大于0.98,验证集决定系数表明多元线性逐步回归的预测能力较差,决定系数仅

为0.567。建模集和验证集均方根误差偏小表明模型预测值与实际值较为接近。多元线性回归和二次多项式逐步回归模型可对茶叶中咖啡碱进行良好预测,其中二次多项式逐步回归模型效果较佳,回归后建模集和验证集的决定系数分别为0.985、0.978。

3 结论

本实验采用电子鼻和电子舌结合理化成分检测对3个等级的信阳毛尖茶品质进行分析,结果表明:3个等级茶叶的茶多酚、咖啡碱含量随茶叶品质提升而增加,表明茶多酚、咖啡碱含量与茶叶品质呈正相关。对电子鼻和电子舌传感器阵列进行PCA能有效区分3个不同等级的茶叶,电子鼻/舌数据融合可显著提高茶叶品质的识别能力。将电子鼻/舌数据融合数据对茶多酚和咖啡碱建立多元线性回归、多元线性逐步回归、二次多项式逐步回归模型。结果显示传感器阵列对茶多酚和咖啡碱的建模中,二次多项式逐步回归模型效果较佳。茶多酚建模集和验证集的决定系数分别为0.999、0.975,均方根误差分别为0.083、0.174;咖啡碱建模集和验证集的决定系数分别为0.985、0.978,均方根误差分别为0.015、0.048。电子鼻/舌联用技术能准确预测茶叶品质和理化成分含量。

参考文献:

- [1] 何余勤,胡荣锁,张海德,等.基于电子鼻技术检测不同焙烤程度咖啡的特征性香气[J].农业工程学报,2015,31(18):247-255. DOI:10.11975/j.issn.1002-6819.2015.18.034.
- [2] 徐维盛,王竹,杨月欣.电子舌技术快速辨识15种茶汤滋味[J].食品工业,2014,35(12):154-158.
- [3] 戴悦雯,支瑞聪,赵镭,等.茶叶品质智能评价中统计分析技术的应用现状与展望[J].食品科学,2015,36(7):223-227. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201507041.
- [4] 裴高璞,史波林,赵镭,等.典型掺假蜂蜜的电子鼻信息变化特征及判别能力[J].农业工程学报,2015,31(增刊1):325-331. DOI:10.3969/j.issn.1002-6819.2015.z1.039.
- [5] 王婧,李璐,王佳奕,等.电子鼻结合气相色谱-质谱法对宁夏小尾寒羊肉中鸭肉掺假的快速检测[J].食品科学,2017,38(20):222-228. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201720032.
- [6] 夏海娜,张月东,常圆境,等.基于电子鼻的牛肉复配保鲜剂效果评价及储存时间预测模型研究[J].中国食品学报,2016,16(8):254-260. DOI:10.16429/j.1009-7848.2016.08.035.
- [7] 张娟,张申,张力,等.电子鼻结合统计学分析对牛肉中猪肉掺假的识别[J].食品科学,2018,39(4):296-300. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201804044.
- [8] 赵梦田,杜佳苏,黄洁,等.基于电子鼻的库尔勒香梨品质区分方法研究[J].中国食品学报,2014,14(3):225-228. DOI:10.16429/j.1009-7848.2014.03.032.
- [9] 朱娜,毛淑波,潘磊庆,等.电子鼻对草莓采后贮藏早期霉菌感染的检测[J].农业工程学报,2013,29(5):266-273. DOI:10.3969/j.issn.1002-6819.2013.05.035.
- [10] 胡国梁,徐立荣,许生陆,等.基于电子鼻的食用油氧化判别分析[J].食品科学,2016,37(20):141-145. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201620023.

- [11] TUDU M, JANA A, METLA A, et al. Electronic nose for black tea quality evaluation by an incremental RBF network[J]. *Sensors & Actuators B: Chemical*, 2009, 138(1): 90-95. DOI:10.1016/j.snb.2009.02.025.
- [12] SHI B L, ZHAO L, ZHI R C, et al. Optimization of electronic nose sensor array by genetic algorithms in Xihu-Longjing tea quality analysis[J]. *Mathematical and Computer Modelling*, 2013, 58(3/4): 752-758. DOI:10.1016/j.mcm.2012.12.029.
- [13] YU H C, WANG J, XIAO H, et al. Quality grade identification of green tea using the eigenvalues of PCA based on the E-nose signals[J]. *Sensors & Actuators B: Chemical*, 2009, 140(2): 378-382. DOI:10.1016/j.snb.2009.05.008.
- [14] QIN Z H, PANG X L, CHEN D, et al. Evaluation of Chinese tea by the electronic nose and gas chromatography-mass spectrometry: correlation with sensory properties and classification according to grade level[J]. *Food Research International*, 2013, 53(2): 864-874. DOI:10.1016/j.foodres.2013.02.005.
- [15] 王霞, 徐幸莲, 王鹏. 基于电子舌技术对鸡肉肉质区分的研究[J]. *食品科学*, 2012, 33(21): 100-103.
- [16] 张璟琳, 黄明泉, 孙宝国, 等. 电子舌技术在食醋口感评价中的应用[J]. *食品与发酵工业*, 2013, 39(11): 220-226. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.2013.11.049.
- [17] 贾洪锋, 梁爱华, 何江红, 等. 电子舌对啤酒的区分识别研究[J]. *食品科学*, 2011, 32(24): 252-255.
- [18] 张高楠, 苏钰亭, 赵思明, 等. 4 种甜米酒主要营养成分与滋味特征对比及分析[J]. *华中农业大学学报*, 2018, 37(2): 89-95.
- [19] 范佳利, 韩剑众, 田师一, 等. 基于电子舌的掺假牛乳的快速检测[J]. *中国食品学报*, 2011, 11(2): 202-208. DOI:10.16429/j.1009-7848.2011.02.031.
- [20] YAN S M, HU Z F, WU C X, et al. Electronic tongue combined with chemometrics to provenance discrimination for a green tea (Anji-White Tea)[J]. *Journal of Food Quality*, 2017(6): 1-6. DOI:10.1155/2017/3573197.
- [21] LI Y J, LEI J C, YANG J N, et al. Classification of Tieguanyin tea with an electronic tongue and pattern recognition[J]. *Analytical Letters*, 2014, 47(14): 2361-2369. DOI:10.1080/00032719.2014.908381.
- [22] PALIT M, TUDU B, BHATTACHARYA N, et al. Comparison of multivariate preprocessing techniques as applied to electronic tongue based pattern classification for black tea[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2010, 675(1): 8-15. DOI:10.1016/j.aca.2010.06.036.
- [23] 徐宝才, 李聪, 马倩, 等. 基于电子鼻和电子舌分析盐水鸭风味的差异性[J]. *中国食品学报*, 2017, 17(12): 279-286. DOI:10.16429/j.1009-7848.2017.12.035.
- [24] 陈晓婷, 吴靖娜, 路海霞, 等. 基于电子鼻和电子舌优化蓝圆鲂调味基料的制备[J]. *食品科学*, 2018, 39(4): 282-289. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201804042.
- [25] HADDI Z, MABROUK S, BOUGRINI M, et al. E-nose and e-tongue combination for improved recognition of fruit juice samples[J]. *Food Chemistry*, 2014, 150(2): 246-253. DOI:10.1016/j.foodchem.2013.10.105.
- [26] HONG X Z, WANG J. Detection of adulteration in cherry tomato juices based on electronic nose and tongue: comparison of different data fusion approaches[J]. *Journal of Food Engineering*, 2014, 126(4): 89-97. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2013.11.008.
- [27] 刘盼盼, 邓余良, 尹军峰, 等. 绿茶滋味量化及其与化学组分的相关性研究[J]. *中国食品学报*, 2014, 14(12): 173-181. DOI:10.16429/j.1009-7848.2014.12.029.
- [28] 程焕, 贺玮, 赵镭, 等. 红茶与绿茶感官品质与其化学组分的相关性[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(增刊1): 375-380. DOI:10.3969/j.issn.1002-6819.2012.z1.063.
- [29] 张英娜, 嵇伟彬, 许勇泉, 等. 儿茶素呈味特性及其感官分析方法研究进展[J]. *茶叶科学*, 2017, 37(1): 1-9. DOI:10.13305/j.cnki.jts.2017.01.001.
- [30] 普冰清, 徐怡, 杜春华, 等. 不同茶叶中茶多酚类成分及咖啡碱含量研究[J]. *食品工业*, 2017, 38(2): 301-303.
- [31] SUSANNE S, NADINE H, THOMAS H. Identification of the astringent taste compounds in black tea infusions by combining instrumental analysis and human bioresponse[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2004, 52(11): 3498-3508. DOI:10.1021/jf049802u.
- [32] HUANG Y Y, LIU C, XIAO X D. Quality characteristics of a pickled tea processed by submerged fermentation[J]. *International Journal of Food Properties*, 2016, 19(6): 1194-1206. DOI:10.1080/10942912.2015.1075217.
- [33] SUSANNE S, THOMAS H. Molecular definition of black tea taste by means of quantitative studies, taste reconstitution, and omission experiments[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2005, 53(13): 5377-5384. DOI:10.1021/jf050294d.
- [34] WANG G L, WU J H, WU J H, et al. A comparison between the linear neural network method and the multiple linear regression method in the modeling of continuous data[J]. *Journal of Computers*, 2011, 6(10): 2143-2148. DOI:10.4304/jcp.6.10.2143-2148.
- [35] 张红梅, 王俊, 余泳昌, 等. 基于电子鼻技术的信阳毛尖茶咖啡碱检测方法[J]. *传感技术学报*, 2011, 24(8): 1223-1227. DOI:10.3969/j.issn.1004-1699.2011.08.028.