DOI:10.13193/j.issn.1673-7717.2026.03.021

基于电子鼻仿生技术建立白鲜不同生长年限的快速判别模型

尹舒悦[1],吴伟[2],王丹[2],于学霖[2],马婧洁[2],姜博千[2]
(1.北京理工大学数学与统计学院,北京 100081;2.辽宁中医药大学药学院,辽宁 大连 116000)

摘要:目的 应用电子鼻技术建立不同年限白鲜基于气味差异的快速、有效鉴别方法。方法 利用电子鼻技术获取白鲜气味数据,通过主成分分析(PCA)、线性判别法(LDA)、负荷加载分析(Loadings)等分析方法及最邻近算法(KNN)、支持向量机(SVM)、判别分析、集成分类器和神经网络分类器五种分类模型对不同年限白鲜样品进行精确的分类识别。结果 雷达图和Loadings分析结果一致,W5S、W1S、W1W、W2S、W2W等5个传感器对白鲜气味有明显响应。PCA不能完全有效地将不同年限白鲜进行区分。LDA能较好区分不同年限的白鲜样品,但个别样品可见重叠情况。在5个分类模型中,SVM、判别分析、集成分类器的分类准确率均达到90%以上,集成分类器为最佳分类模型,准确率为98.9%。结论 研究基于电子鼻技术建立白鲜年限判别模型,可为其他中药材年限鉴定提供方法参考。

关键词:白鲜皮;电子鼻;气味特征;生长年限;快速判别模型
中图分类号:R282.71 **文献标志码**:A **文章编号**:1673-7717(2026)03-0110-09

Establishing Rapid Discrimination Model for Different Growth Years of Baixianpi(*Dictamnus dasycarpus*) Based on Electronic Nose Biomimetic Technology

YIN Shuyue[1], WU Wei[2], WANG Dan[2], YU Xuelin[2], MA Jingjie[2], JIANG Boqian[2]
(1. School of Mathematics and Statistics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
2. College of Pharmacy, Liaoning University of Traditional Chinese Medicine, Dalian 116000, Liaoning, China)

Abstract: *Objective* To establish a rapid and effective identification method for different aged Baixianpi (*Dictamnus dasycarpus*) products based on odor differences using electronic nose technology. *Method* The Baixianpi (*Dictamnus dasycarpus*) odor data was obtained by using the electronic nose technology. The precise classification and recognition of Baixianpi (*Dictamnus dasycarpus*) samples of different ages were carried out through PCA, LDA, Loadings analysis, KNN, SVM, discriminant analysis, ensemble classifier and neural network classifier. *Result* The radar chart and Loadings analysis results were consistent, and five sensors, W5S, W1S, W1W, W2S and W2W, have significant responses to the Baixianpi (*Dictamnus dasycarpus*) odor. PCA cannot effectively distinguish Baixianpi (*Dictamnus dasycarpus*) of different ages. LDA can effectively distinguish Baixianpi (*Dictamnus dasycarpus*) samples of different ages, but some samples showed overlap. Among the five classification models, SVM, discriminant analysis and ensemble classifier all achieved the classification accuracy of over 90%, with ensemble classifier being the best classification model with an accuracy of 98.9%. *Conclusion* This study establishes a Baixianpi (*Dictamnus dasycarpus*) age discrimination model based on electronic nose technology, which can provide methodological references for the age identification of other traditional Chinese medicinal materials.

Keywords: Baixianpi (*Dictamnus dasycarpus*); electronic nose; odor characteristics; growth years; quick discrimination model

白鲜在我国具有悠久的用药历史,始载于《神农本草经》[1]。2020年版《中华人民共和国药典》记载其为芸香科白鲜属植物白鲜 *Dictamnus dasycarpus* Turcz.的干燥根皮。春、秋两季采挖根部,除去泥沙和粗皮,剥取根皮,干燥,具有清热燥湿,祛风解毒之效[2]。研究表明白鲜皮不仅具有抗肿瘤、抗菌、抗炎、抗过敏、抗氧化等药用价值,还有保健、美容的功效。目前,白鲜的野生资源匮乏,已经不能满足市场需求,大田栽培已成主流[3]。

多年生中药材品质与其生长年限密切相关。据实地调研和研究表明3年生以上的白鲜符合用药标准可采收入药[4]。但目前由于过度追求经济利益,不少种植户将未达到规定年限的白鲜投入市场进行售卖,导致药材品质大打折扣。同时随着

基金项目:科技部中央本级重大增减支项目(2060302);辽宁省"兴辽英才计划"教学名师项目(XLYC2211011);辽宁省科技厅农村科技特派行动计划项目-辽宁省喀左县中药材药材科技特派团项目(2024JH5/10400152)
作者简介:尹舒悦(2000-),女,辽宁沈阳人,硕士在读,研究方向:函数型数据与统计的应用。
通讯作者:吴伟(1997-),男,安徽安庆人,讲师,研究方向:中药资源与中药材品质评价。E-mail:577234246@qq.com。
王丹(1988-),女,辽宁沈阳人,副教授,硕士研究生导师,博士,研究方向:中药资源开发、利用与保护。E-mail:875538488@qq.com。

生长年限的增长,白鲜的质量不断提高,因而价格也不断提高。所以常有超过采收年限的白鲜药材流入市场的情况出现,使得白鲜药材质量良莠不齐,严重影响药材的使用,因此寻找合适、有效鉴别白鲜生长年限的方法对于白鲜药材质量的控制意义重大。前人对白鲜年限鉴定有从红外光谱特征峰的位置、强度和形状、化学成分含量差异等方面进行鉴别[5],目前未见有利用白鲜皮气味的差异对不同产地、不同年限白鲜进行鉴定的相关报道。

电子鼻是模拟人类嗅觉系统而研制的一种气味检测仪器,主要由样品处理器、气味传感器阵列以及信号处理系统3部分构成,主要利用电子鼻系统中各传感器对气味的不同响应,快速识别多种气味,以气味特征为指标可以快速鉴别和评价具有特殊气味的中药材,因此在中药材质量评价领域得到了大量应用[6-9]。有相关文献记载,辽宁省为白鲜的传统道地产区,质量最佳。本研究采用电子鼻技术对来自辽宁省各主产区1~7年生白鲜药材进行分析,以期该方法可以达到对白鲜不同年限进行有效区分的目的,从而建立一种快速鉴别中药材品质的新方法,为后续相关药材的年限鉴别提供实验依据。

1 材料

1.1 仪器与设备 PEN3电子鼻系统(德国AIRSENSE公司,该电子鼻系统由10个不同的金属氧化物传感器组成传感器阵列,10根传感器敏感成分见表1)、YP2002电子天平(常州市衡正电子仪器有限公司)、FW200型高速万能粉碎机(北京科伟永兴仪器有限公司)。

1.2 白鲜样品 本研究所用白鲜样品均由课题组于2022年8月(适宜采收期)在辽宁省白鲜主产地实地收集籽播1年生~7年生栽培白鲜,7个年限,每个年限3批,生长年限的确定由药材种植基地负责人或药农提供,经辽宁中医药大学尹海波教授鉴定为芸香科白鲜属植物白鲜 *Dictamnus dasycarpus* Turcz.。样品抽芯后自然阴干,每批次白鲜药材均随机取样,粉碎过5号筛(80目),混匀后用于后续测试分析。

表1 传感器性能描述

阵列序号	传感器名称	性能描述
1	W1C	芳香成分,苯类
2	W5S	灵敏度大,对氮氧化合物很灵敏
3	W3C	氨水,对芳香成分灵敏
4	W6S	主要对氢气有选择性
5	W5C	烷烃芳香成分
6	W1S	对甲烷等短链烷烃灵敏
7	W1W	对无机硫化物灵敏
8	W2S	对醇醚醛酮类灵敏
9	W2W	芳香成分,对有机硫化物灵敏
10	W3S	对烷烃灵敏,长链烷烃类

2 方法

2.1 样品前处理 分别称取1.5 g样品放入100 mL烧杯中,双层保鲜膜封口,室温下密封1 h后上机测试。将21批样品按照1~7年为一组共分成3组,分组信息见表3。

2.2 实验方法

顶空吸气法:直接将进样针头插入含样品的密封烧杯中,电子鼻进行测定。

表2 白鲜样品信息

样品编号	采样地址	生长年限	经度	纬度
bxx-1yr	辽宁省本溪市本溪县	1	124°4′38.7291″	41°23′32.39516″
czgc-1yr	辽宁省清原县橡子沟村	1	124°59′49.94326″	42°8′1.52574″
xfc-1yr	辽宁省清原县幸福村	1	125°5′56.11783″	42°9′18.99299″
bxx-2yr	辽宁省本溪市本溪县	2	124°4′38.7291″	41°23′32.39516″
czgc-2yr	辽宁省清原县橡子沟村	2	124°59′49.94326″	42°8′1.52574″
xfc-2yr	辽宁省清原县幸福村	2	125°5′56.11783″	42°9′18.99299″
czgc-3yr	辽宁省清原县橡子沟村	3	124°59′49.94326″	42°8′1.52574″
lybt-3yr	辽宁省辽阳市白塔区	3	123°09′46.09″	41°15′56.84″
bxhr-3yr	辽宁省本溪市桓仁县	3	125°2′11.19″	41°23′29.31″
bxx-4yr	辽宁省本溪市本溪县	4	124°4′38.7291″	41°23′32.39516″
lybt-4yr	辽宁省辽阳市白塔区	4	123°09′46.09″	41°15′56.84″
ddkd-4yr	辽宁省丹东市宽甸县	4	123°31′12.0432″	40°30′51.444″
bxx-5yr	辽宁省本溪市本溪县	5	124°4′38.7291″	41°23′32.39516″
czgc-5yr	辽宁省清原县橡子沟村	5	124°59′49.94326″	42°8′1.52574″
xfc-5yr	辽宁省清原县幸福村	5	125°5′56.11783″	42°9′18.99299″
bxx-6yr	辽宁省本溪市本溪县	6	124°4′38.7291″	41°23′32.39516″
czgc-6yr	辽宁省清原县橡子沟村	6	124°59′49.94326″	42°8′1.52574″
xfc-6yr	辽宁省清原县幸福村	6	125°5′56.11783″	42°9′18.99299″
bxx-7yr	辽宁省本溪市本溪县	7	124°4′38.7291″	41°23′32.39516″
czgc-7yr	辽宁省清原县橡子沟村	7	124°59′49.94326″	42°8′1.52574″
xfc-7yr	辽宁省清原县幸福村	7	125°5′56.11783″	42°9′18.99299″

表3 白鲜分组信息

年限/(年)	a组	b组	c组
1	bxx-1yr	xfc-1yr	czgc-1yr
2	bxx-2yr	xfc-2yr	czgc-2yr
3	bxhr-3yr	lybt-3yr	czgc-3yr
4	bxx-4yr	lybt-4yr	ddkd-4yr
5	bxx-5yr	xfc-5yr	czgc-5yr
6	bxx-6yr	xfc-6yr	czgc-6yr
7	bxx-7yr	xfc-7yr	czgc-7yr

测定条件:采样时间为1 s/组;传感器自清洗时间为80 s;传感器归零时间为5 s;样品准备时间为5 s;进样流量为400 mL/min;分析采样时间为80 s。选取每个样品特征图上68、69、70 s 3个数据点,每个样品进行3次平行实验。

2.3 白鲜样品电子鼻数据分析 传感器最大响应值是区分气体种类最常用的也是最重要的特征之一[10]。为了综合分析不同年限白鲜的组间差异性,采用PEN3自带的Win Muster对所测得的电子鼻数据分别进行PCA、LDA、Loadings等分析。对有效区分不同年限白鲜和传感器的筛选进行初步探索。随即利用MATLAB 2022b进行KNN、SVM、判别分析、集成分类器和神经网络分类器等5种分类模型对不同年限白鲜样品进行精确的分类识别,通过模型的参数优化和模型的指标评价找到判别不同年限白鲜的最佳模型。

2.4 模型评价 选用查准率(Precision,P)和受试者操作特征曲线下的面积(ROC Area)这两个指标对各分类模型进行评价。查准率是指真正正确的个数占整个结果的比例,用来衡量分类器的正确率;ROC Area是在0到1范围内的数,ROC Area的值越接近1,说明模型的分类效果越好[11]。

3 结果与分析

3.1 电子鼻不同传感器对白鲜气味的响应值 由于样品个数较多,故不一一列举,以 bxx－1yr 样品为例,分析电子鼻 10 个传感器对于白鲜样品的检测响应值曲线图(图 1)。该响应值为样品气味经过电子鼻传感器引起电阻变化 G 与空气经过传感器引起的电阻变化 G0 的比值。通过查看每个传感器响应值的变化曲线、每个时间点的响应值,可以清晰观察到各个传感器在实验分析过程中的响应情况为各传感器响应值随着挥发性气体在传感器上富集,传感器响应值迅速增大,各个传感器响应值在不同时间点达到最大后,又逐渐下降趋于平稳。

3.2 不同年限白鲜样品电子鼻特征气味差异分析 选取数据采集 80 s 内传感器最大响应值,绘制白鲜样品的电子鼻特征气味的雷达指纹图(插页XXXW图 2)。从 21 个白鲜样品传感器响应值中观察可以得出以下结论:A. 电子鼻对白鲜样品有明显的响应,多个传感器具有明显的应答;B. 对白鲜样品在整个测试中响应比较敏感的传感器主要有 W1W、W2W、W5S、W1S、W2S 这 5 个,此外另外几个传感器在整个测试过程中无明显变化,响应值均处于 1 左右;C. W1W 传感器在整个测试过程中响应值最大,且不同生长年限的白鲜在 W1W 传感器上的差异也较为明显。

3.3 PCA 分析 PCA 分析可以在没有任何样品信息的条件下,迅速浏览所有数据,找出它们之间的相关性,建立一个合理的模型,呈现二维图或三维图[12]。由插页XXXV图 3a 可知,主成分 1 与主成分 2 贡献率之和达到 99.72%,由插页XXXV图 3b 可知,主成分 1 与主成分 2 贡献率之和达到 99.82%,由插页XXXV图 3c 可知,主成分 1 与主成分 2 贡献率之和达到 99.59%,因此三组主成分 1 与主成分 2 均可以基本包含全部的指标信息。但除 c 组区分情况良好外,从插页XXXV图 3a 中可见 bxx－5yr 与 bxhr－3yr 二者重叠,bxx－1yr 和 bxx－4yr 有一定的重叠,其他几个均可良好区分且与其他年份的差异很大。从插页XXXV图 3b 中可见,1～7 年的白鲜样品在气味上表现出一定的规律性,xfc－7yr 与另外几个在气味上差异最大,lybt－3yr、lybt－4yr 落在 xfc－1yr、xfc－2yr 之间,整体来看 b 组气味在第一主成分上由左向右排列。但 xfc－5yr 与 xfc－6yr 重叠严重。因此,利用电子鼻数据的 PCA 不能完全有效将不同产地、不同年限白鲜进行区分。

3.4 LDA 分析 本研究中,LDA 分析可对电子鼻传感器感应到的挥发性物质的响应信号做进一步处理,通过缩小组内方差,扩大组间方差,更直观反映不同组之间的差异[13]。由插页XXXW图4a～插页XXXW图 4c 可知,判别式 LD1 和 LD2 的方差区分度分别是 70.65% 和 22.28%、90.43% 和 4.18%、82.57% 和 10.83%,总方差区分度分别达 92.93%、94.61%、93.40%,均可以较好地反映不同样品的气味信息。a 组中同样可见 bxx－5yr 和bxhr－3yr 与其他的差异最大,相较于 PCA 的结果,区分效果明显。b 组在 LDA 图中缩小组内的差异后样本之间的差异更大,其中 xfc－7yr 与另外几个年限的差异更加明显。在 LDA 图中 1 到 7 年的规律性更加明显,在 Y 轴上 1～6 年除 lybt－4yr 外,由下向上排列。c 组在 LDA 图中缩小组内的差异后样本之间的差异更加明显,整体的趋势和 PCA 中的分布是类似的,czgc－3yr 和 czgc－6yr 仍有一定的重叠。因此可以得出,电子鼻数据 LDA 相较于 PCA,区分效果更好,可对 3 组 1～7 年生不同产地白鲜进行有效区分。

3.5 Loadings 分析 Loadings 分析与 PCA 分析都是基于同一种算法,但在本实验中,Loadings 主要是对传感器进行研究,利用该分析方法可以确认各传感器对白鲜样品区分的贡献率大小,从而可以确定是哪一类气体在白鲜不同年限的区分过程中起到了关键作用。见插页XXXW图 5。

结果显示,三组白鲜电子鼻检测数据的 Loadings 分析均为传感器 W1W 对第一主成分贡献最大,其次是 W1S、W2S、W2W 也对第一主成分有较大的贡献;另外 W5S、W1S、W2S 三个传感器对第二主成分的贡献最大。此外,其他传感器在 XY 轴均为 0 的位置,对第一和第二主成分的贡献均很小。此分析结果也与 3.2 项下所得出的结论一致。

3.6 基于电子鼻信号模式判别分类模型的建立 近年来,深度学习方法相比于传统方法有着更快的分析速度和更高的准确率[14],从而得到快速发展,深度学习的相关技术也被应用在了一些电子鼻模式的识别算法中。故本文尝试将所测得的白鲜电子鼻数据导入 MATLAB 软件中 Classfication Learner 模块,采用十折交叉验证的方法优化参数,确定误分类代价,构建白鲜年限的分类预测模型。由表 4 可知,以模型查准率(Precision,P)和受试者操作特征(ROC)曲线下面积(Area Under Curve,AUC)作为评价模型性能好坏的标准[15],结果发现采用集成分类器所建模型的查准率和 AUC 较高。由插页XXXW图 6 可知,所建模型中一年生、二年生、三年生、四年生、五年生和七年生这 6 个年限的所有样本均能全部准确判定,六年生的 27 个样本中,有 2 个判定出现误差,1 个被误判为一年生、1 个被误判成五年生。该模型预测的总正确率 98.9 %,表明所建模型的预测性能结果较好,不同年限白鲜样品的 AUC 值均大于 0.99,说明采用基于集成建立的模型能较好地区别白鲜不同年限。

4 讨论与结论

电子鼻仿生技术是一种敏感性高、选择性强的高效、绿色检测技术[16]。近年来电子鼻技术除了在肉类[17]、乳制品[18]和白酒[19]等方面应用较多外,在中药品种[20]、产地[21]、生长

表4 各分类模型的评价指标

分类模型	精确/(%)	不同年限 Roc Area/(年)						
		1	2	3	4	5	6	7
集成分类器	98.9	1	1	1	1	0.999 4	0.999 3	1
KNN	87.8	0.854 9	0.972 2	0.925 9	0.996 9	0.916 7	0.895 1	0.941 4
SVM	94.7	0.992 5	0.999 5	0.997 0	0.997 3	0.987 4	0.997 3	1
判别分析	98.4	1	0.997 0	1	1	1	0.999 1	0.999 3
神经网络	88.9	0.985 1	0.952 3	0.917 0	0.993 1	0.971 3	0.977 9	0.995 4

年限[22]、采收时间[23]及炮制方式[24]等方面也得到了应用，而白鲜素有“羊膻味”。基于此，本研究利用电子鼻系统对来自辽宁省各栽培基地的 1～7 年生的白鲜样品气味进行测定，并通过 PEN3 型电子鼻自带的 Win Muster 软件进行 PCA、LDA、Loadings 等分析。

Loadings 分析结果与白鲜样品的电子鼻特征气味的雷达指纹图一致，显示为电子鼻对白鲜样品的气味有非常明显的应答，主要响应的传感器有 W5S、W1S、W1W、W2S、W2W 这五个。还发现 PCA 并不能很好地区分不同年限的白鲜样品。在 PCA 的基础上，对白鲜样品的电子鼻数据进行 LDA，发现利用 LDA 可以将采自不同年限的白鲜样品进行区分，但仍有重叠现象发生。故本文将白鲜电子鼻数据导入 MATLAB 软件中 Classfication Learner 模块利用 KNN、SVM、判别分析、集成分类器和神经网络分类器 5 种分类模型对不同年限样品进行精确的分类识别，通过模型的参数优化和模型的指标评价找到判别不同年限白鲜的最佳模型。以查准率、ROC Area 为评价指标，确定在十折交叉验证法下采用集成分类器建立的模型作为判别不同年限白鲜样品的最佳分类模型。

中药材生长年限对于药材质量至关重要，目前已有大量有效鉴别中药材生长年限的相关研究。但对于白鲜生长年限鉴定的研究少之又少[25-27]。本研究利用电子鼻技术结合多种数据处理方法，在有效得到对于白鲜药材有明显响应的电子鼻传感器的同时，还对不同区分方法进行对比评价，建立了能快速判别不同年限白鲜的检测分类模型，丰富了白鲜年限鉴定的相关内容，为其他中药材的生长年限鉴别研究提供方法参考。

参考文献

[1] 吴普. 神农本草经[M]. 孙星衍，孙冯翼辑. 北京：人民卫生出版社，1982：21.
[2] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典：一部[S]. 北京：中国医药科技出版社，2020：114.
[3] 文永国，郑彩玲. 白鲜皮的市场前景及栽培技术[J]. 农业开发与装备，2020，227(11)：173－174.
[4] 李欣然，康靖杰，夏林波，等. AHP－CRITIC 混合加权评分法对辽宁产白鲜皮质量评价[J]. 广州化工，2022，50(21)：127－129，154.
[5] LIU Y Y，CAO D X，LIANG Y，et al. Infrared spectral analysis and antioxidant activity of Dictamnus dasycarpus Turcz with different growth years[J]. J Mol Struct，2021，1229：129780.
[6] 尚超凡，周巧，朱娟娟，等. 电子感官技术在中药质量辨识及炮制的应用概况[J]. 中草药，2024，55(24)：8654－8663.
[7] 刘自强，胡培，韩童童，等. 顶空固相微萃取－气相色谱－质谱结合 Heracles NEO 超快速气相电子鼻分析太子参不同加工品的挥发性成分[J]. 中草药，2024，55(20)：6874－6888.
[8] 余亦婷，赵乙萌，袁曦，等. Heracles Neo 超快速气相电子鼻对不同产地、生长年限及采收期黄芪药材品质评价研究[J]. 中草药，2022，53(5)：1328－1337.
[9] 温英丽，罗茵，许淑清，等. 不同类型电子鼻在中药质量评价研究中的应用[J]. 中国现代中药，2021，23(12)：2201－2208.
[10] LIN Y，ZHANG F，LI L，et al. Identification of Panax notoginseng powder in different parts based on the electronic nose and time－domain feature extraction [J]. J Electrochem Soc，2022，169(4)：47510.
[11] 于淑琳，拱健婷，李莉，等. 基于气味变化规律采用电子鼻构建黄精霉变的快速判别模型[J]. 中国中药杂志，2023，48(7)：1833－1839.
[12] 武文奇，毛怡宁，李虹，等. Heracles Ⅱ超快速气相电子鼻对金银花粉末质量的鉴别研究[J]. 中国中药杂志，2019，44(23)：5129－5133.
[13] MORENO－GARCÍA J，RAPOSO R M，MORENO J. Biological aging status characterization of Sherry type wines using statistical and oenological criteria[J]. Food Res Int，2013，54(1)：285－292.
[14] 陈远涛，熊忆舟，薛莹莹，等. 基于深度学习的电子鼻食品新鲜度检测与识别技术研究[J]. 传感技术学报，2021，34(8)：1131－1138.
[15] 李化，黄国英，张明晓，等. 无机元素特征谱结合化学计量学鉴别黄芩的生长年限[J]. 中国实验方剂学杂志，2022，28(21)：121－128.
[16] 轩菲洋，姜丹，申小营，等. 基于电子鼻和顶空气质联用技术的不同产地北柴胡气味差异分析[J]. 中国现代中药，2022，24(11)：2141－2149.
[17] 曹伟峰，张悦妍，向情儒，等. 基于 HS－SPME－GC－MS 和GC－IMS 结合电子鼻分析真空冷却对酱牛肉风味的影响[J]. 食品工业科技，2022，43(9)：341－348.
[18] 胡海敏，田佳乐，孙思霖，等. 固相微萃取－气相色谱－质谱结合电子鼻技术分析发酵乳中挥发性风味物质[J]. 微生物学通报，2023，50(1)：273－288.
[19] 刘芳，杨康卓，张建敏，等. 基于电子鼻和气质联用技术的浓香型白酒分类[J]. 食品与发酵工业，2020，46(2)：73－78.
[20] 王世丽，朱娟娟，吕畅，等. 基于电子鼻和气相离子迁移谱技术分析南北柴胡气味物质差异[J]. 中华中医药学刊，2025，43(1)：134－141，277－281.
[21] 李建军，常筱沛，马静潇，等. 电子眼、电子鼻和电子舌鉴别不同品种、不同产地生地黄[J]. 中成药，2022，44(11)：3549－3554.
[22] CUI S Q，WANG J，YANG L C，et al. Qualitative and quantitative analysis on aroma characteristics of ginseng at different ages using E－nose and GC－MS combined with chemometrics[J]. J Pharmaceut Biomed，2015，102：64－77.
[23] 崔治家，夏鹏飞，张启立，等. 电子鼻技术区分不同产地不同采收时间不同处理方法的枸杞子研究[J]. 时珍国医国药，2019，30(9)：2163－2166.
[24] 殷珍珍，梁玉芝，王梦，等. 基于超快速气相电子鼻对不同硫熏程度天麻的快速鉴别[J]. 中国实验方剂学杂志，2022，28(13)：167－172.
[25] 王献瑞，郭晓晗，张宇，等. 基于 Support Vector Machine 和 UPLC－QTOF－MS 的人参生长年限数字化鉴定分析[J]. 中国现代中药，2024，26(12)：2049－2055.
[26] DEA S，SAIFRAH A Z，DEWI S A，et al. UHPLC－Q－orbitrap HR－MS－Based metabolomics for profiling the sida rhombifolia metabolites with different plant organs and cultivation ages[J]. Chemistry & biodiversity，2023，20(6)：e202201042.
[27] HU C Y，LI W J，SUN Y X，et al. Nano－effect multivariate fusion spectroscopy combined with chemometrics for accurate identification the cultivation methods and growth years of Dendrobium huoshanense[J]. Microchemical Journal，2022(1)：179.

基于电子鼻仿生技术建立白鲜不同生长年限的快速判别模型

(正文见 110－113 页)

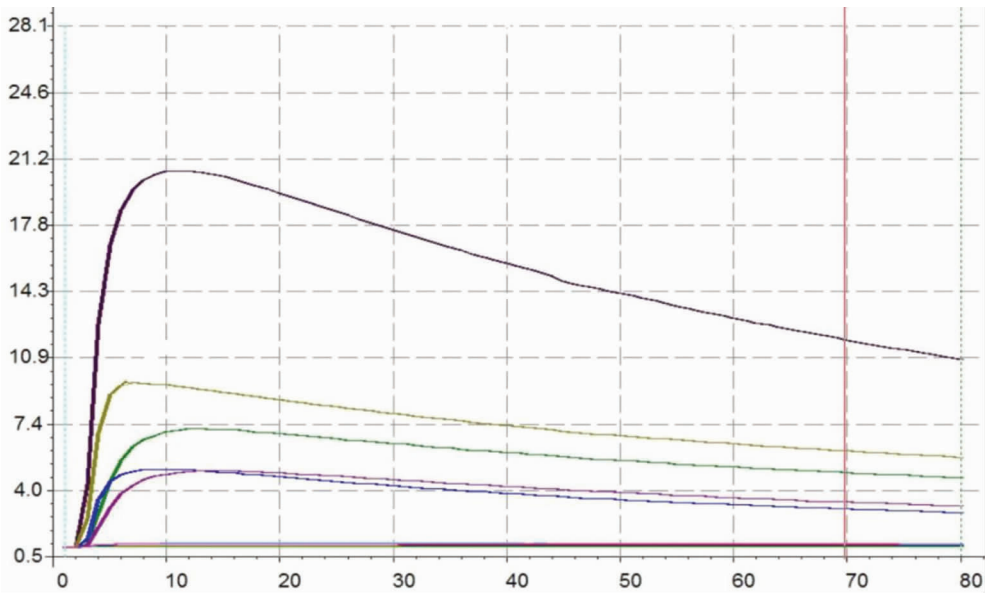


图 1　电子鼻 10 个传感器对白鲜样品(bxx－1yr)的响应值曲线图

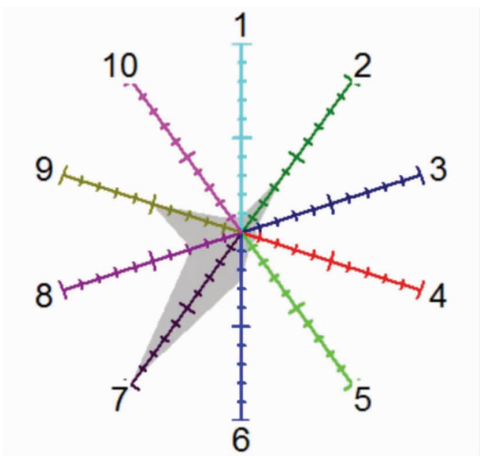


图 2　白鲜样品各电子鼻传感器响应值的雷达图

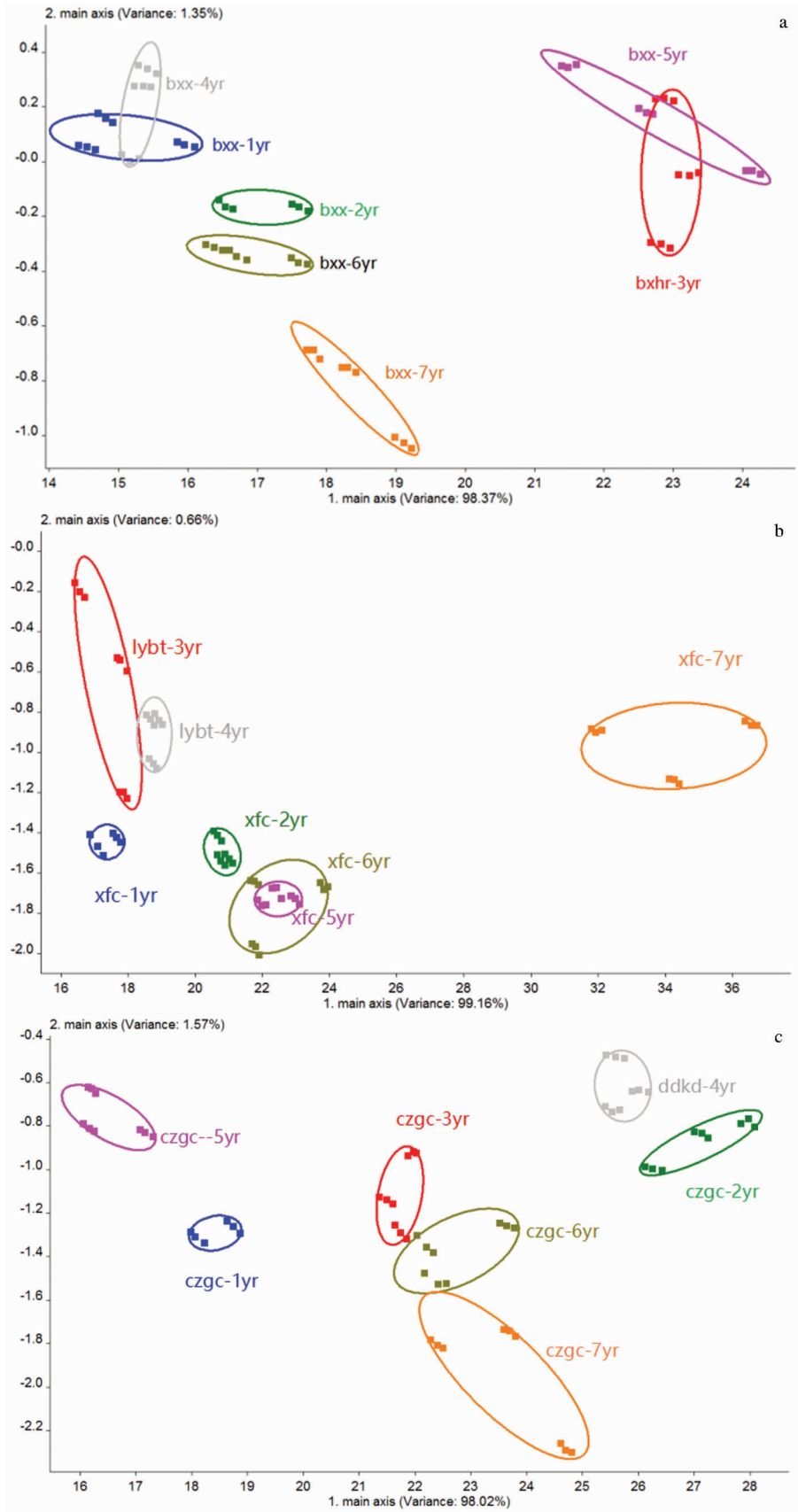


图 3 不同年限白鲜电子鼻数据的 PCA 分析

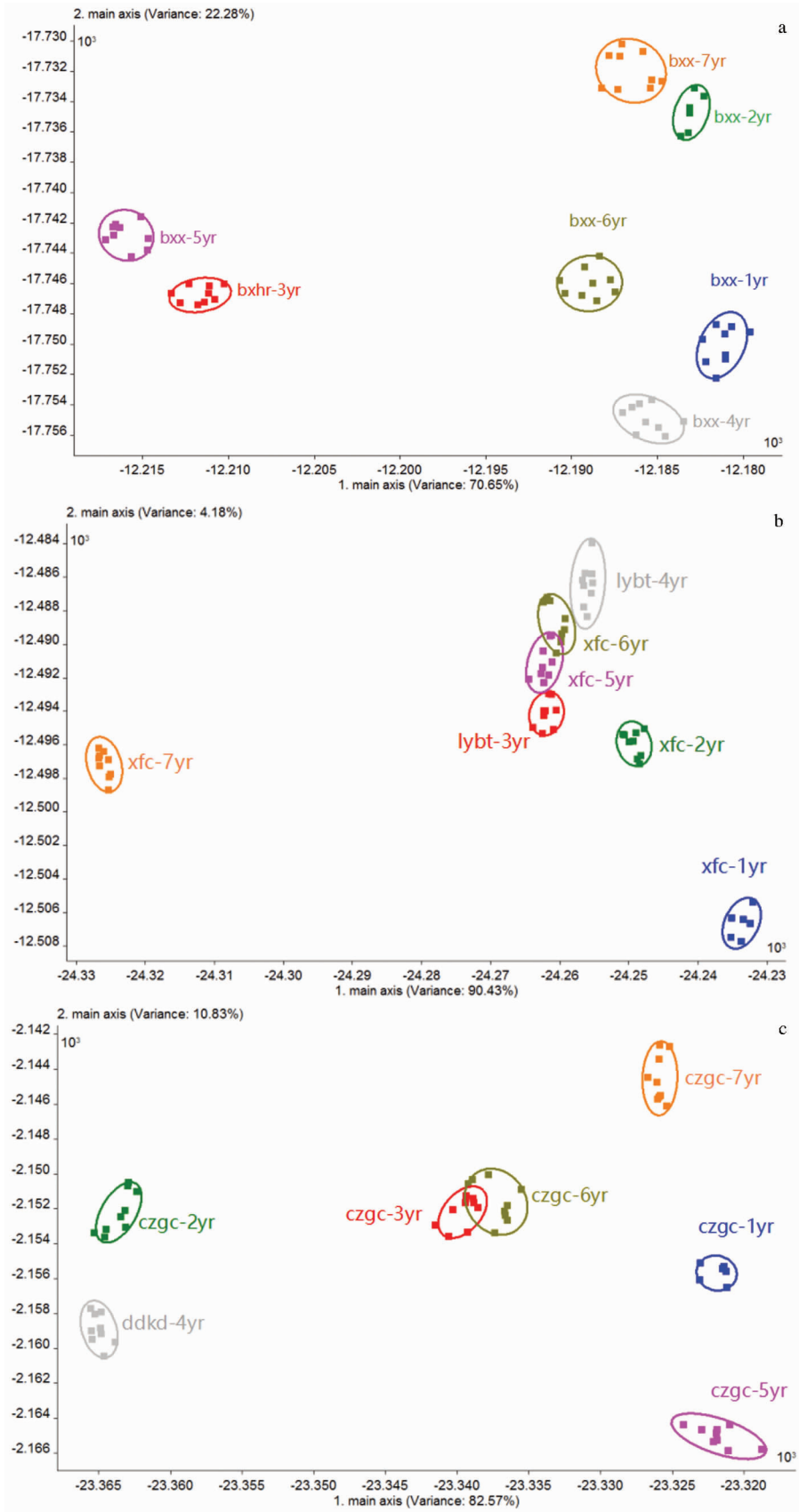


图 4 不同年限白鲜电子鼻数据的 LDA 分析

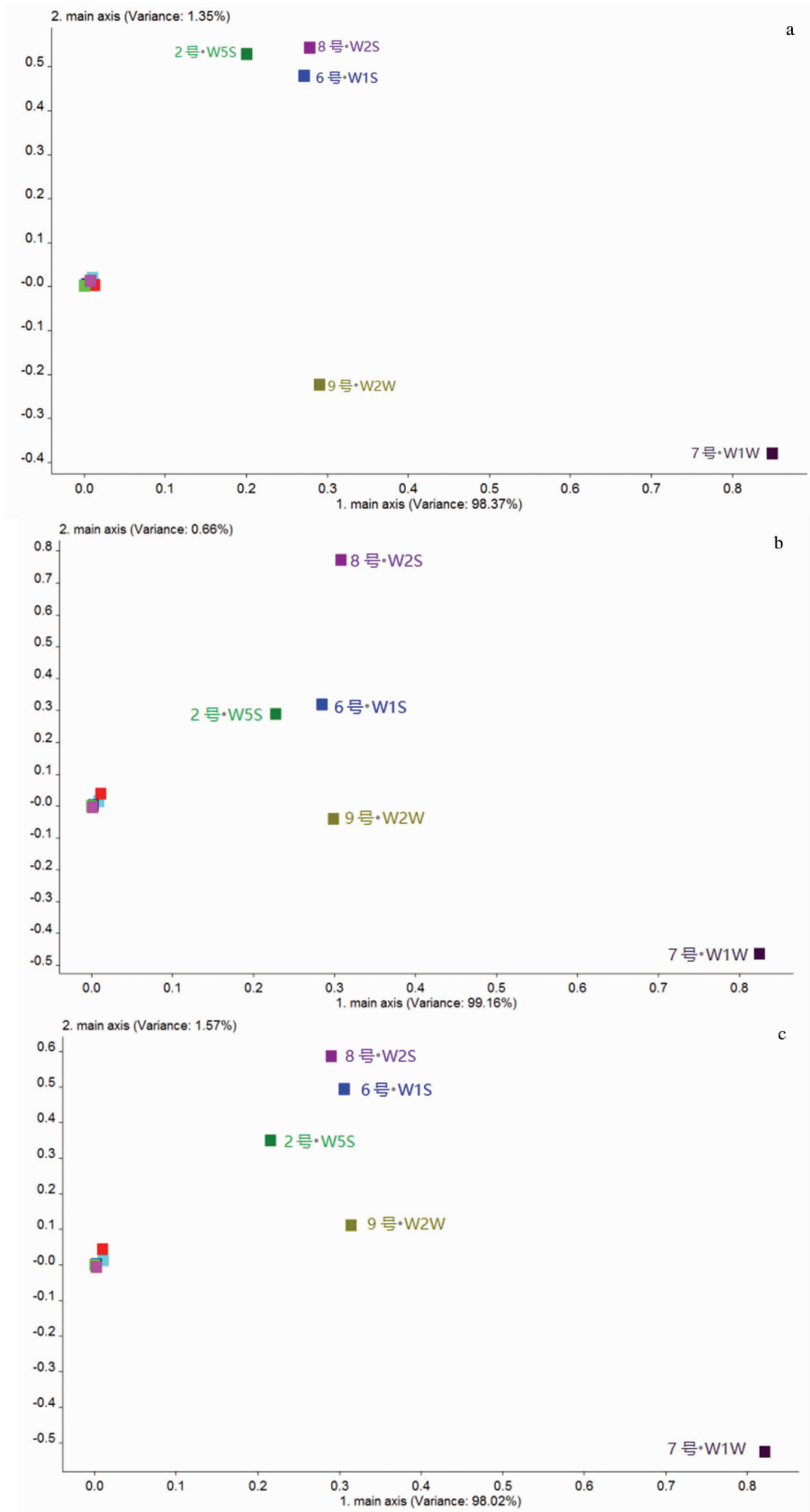
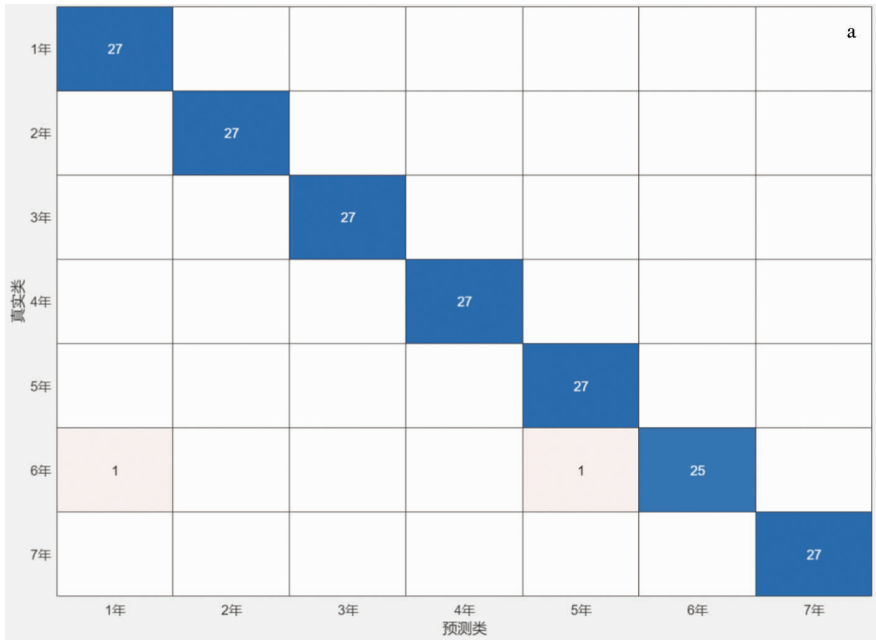


图 5 不同年限白鲜电子鼻监测数据的 Loadings



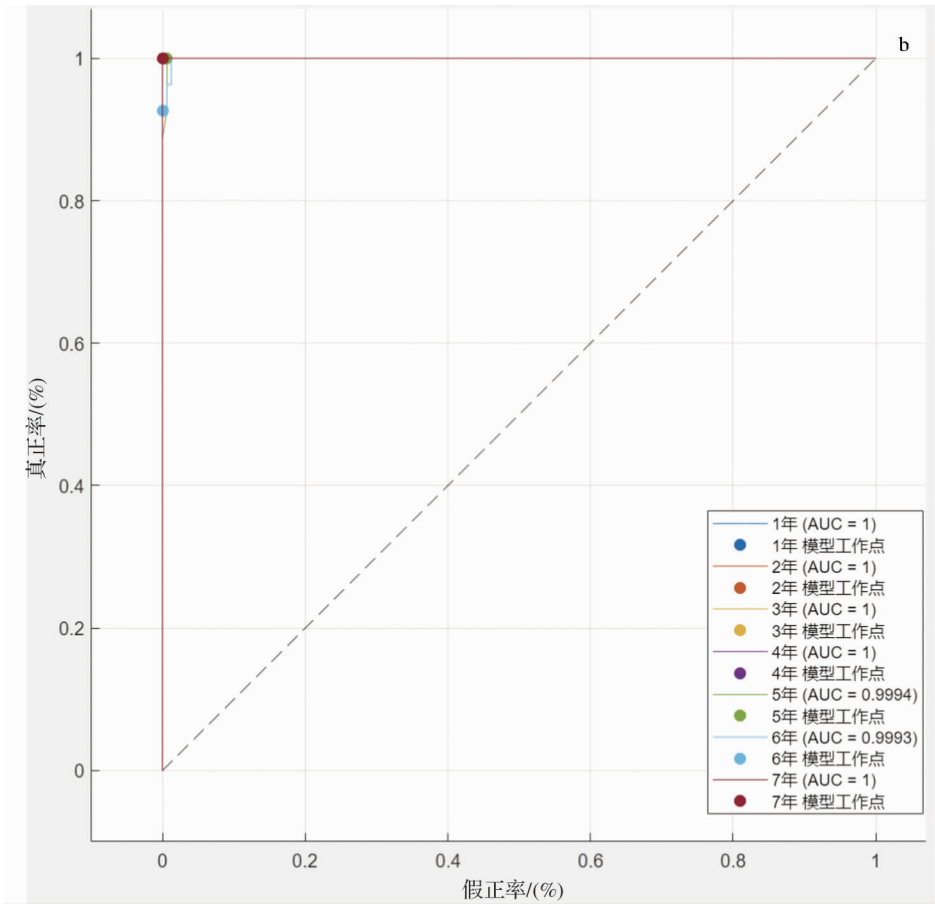


图 6 不同年限白鲜的集成分类器混淆矩阵(a)和 ROC 曲线(b)图