

基于气味信息和活性成分的三七产地溯源研究

闫莎莎^{1,2}, 李 雪^{1,2}, 洪 晶^{1,2}, 张娅俐^{1,2}, 靳冬武³, 张福梅², 宋 礼⁴, 罗 丽⁴,
田晓静^{1,2*}, 张 希^{5*}, 乔丽萍⁶

(1. 西北民族大学生命科学与工程学院, 甘肃 兰州 730124; 2. 西北民族大学生物医学研究中心, 中国-马来西亚国家联合实验室, 甘肃 兰州 730030; 3. 兰州民海生物工程有限公司, 甘肃 兰州 730030; 4. 甘南牦牛乳研究院, 甘肃 甘南 747000; 5. 云南中医药大学中药学院, 云南 昆明 650500; 6. 天津科技大学食品科学与工程学院, 天津 300457)

摘要: **目的** 基于气味信息和活性成分对三七 *Panax notoginseng* (Burk.) F. H. Chen 进行产地溯源研究。**方法** 采集 4 个产地的三七样品, 测定其活性成分(人参皂苷 R1、Rg1、Rb1、Rd)和气味信息并进行多元统计分析和神经网络分析。**结果** 方差分析结果表明, 三七产地对其皂苷含量、电子鼻传感器特征响应信号影响显著; 典则判别分析和聚类分析可实现三七产地的判别, 多层感知器神经网络分析对三七产地的判别准确率均在 87% 以上; 结合偏最小二乘回归分析、多元线性回归分析、多层感知器神经网络分析构建皂苷含量的预测模型, 气味信息与皂苷含量间存在相关关系($0.42 < r < 0.95$)。**结论** 基于电子鼻和高效液相色谱法对三七产地判别具有可行性, 可为三七开发利用、产地追溯、真伪鉴定提供科学依据。

关键词: 三七; 电子鼻; 高效液相色谱; 多元统计; 多层感知器神经网络分析

中图分类号: R282.5

文献标志码: B

文章编号: 1001-1528(2024)05-1740-06

doi: 10.3969/j.issn.1001-1528.2024.05.055

三七为五加科植物三七 *Panax notoginseng* (Burk.) F. H. Chen 的干燥根和根茎^[1], 享有“南国神草”的美誉。我国云南、广西、四川等地均有种植, 尤以道地产区云南省文山州的三七质量最好^[2]。研究表明, 三七含有多种皂苷单体 Rb1、Rg1、Rd 及三七皂苷 R1 等^[3]活性成分, 具有抗炎、降血脂、抗氧化、抗肿瘤、保护肠道等作用^[4-5], 为活血化瘀类传统中药。目前, 三七品质评价主要依靠感官评定、功能性成分分析。通过感官形状进行判别时, 对完整三七, 可以利用外观大小、色泽、直径、体重等感官性状^[6-7]判别其品质, 但在三七粉品质判别时具有较大难度; 依据密度、酸不溶性灰分、总灰分^[8]、皂苷含量^[9]、微量元素^[10]、有机成分^[11]等理化指标已实现对不同季节、产地、品种的三七以及三七不同药用部位的判别和品质鉴定; 此外, 建立基于细胞电子分析技术(RTCA)的三七生物效价检测方法^[12]也可初步用于三七质量的评价。

电子鼻由特异性的气敏传感器阵列、识别系统和信号处理系统组成, 能识别简单和复杂的气味^[13], 可将气味转化为可量化的指标, 在中药产地判别、炮制品区分、品种

鉴定等方面有着广泛的应用, 如判别当归^[14]、人参^[15]、紫菀^[16]的产地, 区分九香虫生品和其炮制品^[17], 黄连、酒黄连、姜黄连及萸黄连^[18], 槟榔和炒槟榔^[19]等制品, 鉴定人参和西洋参^[20]、南五味子和北五味子^[21]、苍术^[22]的品种。因此, 利用电子鼻技术可对三七进行无损检测, Lin 等^[23]基于电子鼻对不同部位三七粉进行鉴别, Yang 等^[24]运用电子鼻对三七掺假与品质鉴别进行研究。

在我国传统的中医药医疗实践中, 药材的道地性一直是评价药材品质的独特综合性标准^[25], 因此, 对三七药材的道地性、产地的鉴别尤为重要。本实验通过电子鼻采集测定三七的气味信息并利用高效液相色谱联用仪测定三七的皂苷含量, 并结合多元统计与多层感知器神经网络分析探讨三七道地性与气味信息和皂苷含量的关系并对三七产地进行溯源研究, 为三七产地追溯、识别提供参考。

1 材料

1.1 药物与试剂 所用三七样品经云南中医药大学李维蛟研究员鉴定为正品, 于 2017 年 11 月采集于道地云南文山州丘北县(QB)以及周边地区, 如曲靖市师宗县(SZ)、

收稿日期: 2023-04-10

基金项目: 甘肃高等学校青年博士基金项目(2022QB-021); 西北民族大学中央高校基本科研业务费资金资助项目(31920230159); 甘肃省科技专员专项(23CXGA0022); 中央高校基本科研业务专项资金(31920210006)

作者简介: 闫莎莎(1999—), 女, 硕士生, 从事食品、农产品品质检测研究。Tel: 18293314304, E-mail: 2575798432@qq.com

* **通信作者:** 田晓静(1982—), 女, 教授, 从事食品、农产品品质检测研究。Tel: 13893476851, E-mail: smile_tian@yeah.net

张 希(1982—), 女, 教授, 从事药食同源中草药资源开发研究。Tel: 18288666239, E-mail: zhangxi1030@hotmail.com

红河州泸西县（LX）、曲靖市罗平县阿岗镇（AG）4 个不同地区，每个产地采集 40~50 颗主根。样品经干制后，粉碎，过 60 目筛，密封保存于 4℃ 冰箱待用（电子鼻检测前，需待样品恢复至室温）。皂苷提取液为自制（称取 100.0 mg 三七样品，置于 10 mL 离心管，加入 5 mL 甲醇，以封口膜密封，超声提取 1 h，超声结束后补充损失甲醇，静置 30 min，0.45 μm 有机微孔滤膜过滤，即得）。

1.2 仪器 PEN3 型便携式电子鼻（德国 Airsense 公司）；Agilent1260 型高效液相色谱仪（美国 Agilent 公司）。

2 方法

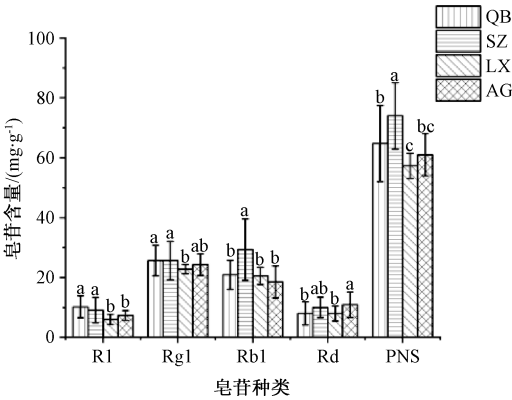
2.1 三七中皂苷含量检测 参考唐卿雁等^[26]的方法，色谱条件为 Agilent ZORBAX Eclipse Plus C₁₈ 色谱柱（4.6 mm × 250 mm，5 μm）；流动相乙腈（A）-水（B），梯度洗脱（0~12 min，19% A；12~40 min，19%~30% A；40~60 min，30%~36% A；60~65 min，36% A；65~66 min，36%~80% A；66~83 min，80% A；83~84 min，80%~19% A；84~90 min，19% A）；体积流量 0.6 mL/min；检测波长 203 nm；柱温 30℃；进样量 5 μL。检测三七皂苷 R1、人参皂苷 Rg1、Rb1、Rd 4 种活性成分的含量，每类样品进行 35 次重复，取平均值进行后续分析。

2.2 三七电子鼻气味信息采集 参考刘元林等^[2]优化的检测条件，将 1.5 g 三七样品置于 250 mL 烧杯中，以双层保鲜膜密封后室温下静置 45 min，使得顶空气体达到平衡。在载气体积流量 400 mL/min、进样时间 90 s、清洗时间 80 s 的条件下采集 4 个区域三七样品的气味信息。每类样品进行 38 次重复，去除电子鼻适应阶段的前 3 个数据点，进行进一步分析。

2.3 数据分析方法 采用方差分析（ANOVA）研究三七产地对皂苷含量和电子鼻传感器响应信号的影响规律；采用典则判别分析（CDA）和聚类分析（CA）对三七产地进行定性判别；采用多层感知器神经网络（MLP）对三七产地进行定量判别；采用偏最小二乘回归分析（PLS）、多元线性回归分析（MLR）和 MLP 并基于传感器响应信号构建三七皂苷含量的预测模型，对比其预测效果；CDA 和 CA 分析均由 SASV9 完成，方差分析、MLR 分析和 MLP 分析均由 SPSS（V26）完成，PLS 分析均由 MINITAB19 完成，采用 Origin8.0 软件绘制结果图。

3 结果

3.1 产地对皂苷含量的影响规律 以 ($\bar{x} \pm s$) 表示不同产地三七皂苷含量的差异，结果见图 1。由此可知，产地对三七皂苷 R1、人参皂苷 Rg1、Rb1、Rd 与总皂苷含量（PNS）的影响均显著（ $P < 0.05$ ）。对于三七皂苷 R1、人参皂苷 Rg1，QB 和 SZ 的含量显著高于其它 2 个地区；对于人参皂苷 Rb1，SZ 的皂苷含量显著高于其他地区；对于人参皂苷 Rd，AG 的皂苷含量显著高于 LX、QB；对于 PNS，SZ 的皂苷含量显著高于其他地区，QB 与 AG 高于 LX，QB 和 SZ 的总皂苷含量基本接近，不同产地皂苷含量的差异为区别三七产地奠定了基础。



注：不同字母表示不同产地对皂苷含量影响显著。

图 1 三七产地对皂苷含量的影响规律

3.2 电子鼻传感器特征响应曲线 电子鼻传感器对道地周边 3 个产区三七的特征响应曲线见图 2。由此可知，检测初期，传感器对样品中的挥发性气味物质做出迅速响应，在 18 s 达到峰值，之后趋于平衡。不同产地三七样品的信号强度不同，传感器 S6~S7 对三七的响应最强，QB 和 LX 对传感器 S2、S6~S9 的响应最为强烈，SZ 和 AG 对传感器 S6~S9 的响应最为强烈，其次是 S2，为基于电子鼻信息检测区分不同产地的三七奠定基础。本研究均选取各三七样品传感器第 90 s 响应稳态值进行后续分析。

3.3 产地对电子鼻传感器信息的影响 采用方差分析研究三七产地对电子鼻传感器信息的影响规律，其结果以 ($\bar{x} \pm s$) 表示，结果见表 1。由此可知，除 S4、S5 外，产地对传感器 S1~S3、S6~S9 信号影响极显著（ $P < 0.01$ ），对传感器 S10 的信号影响显著（ $P < 0.05$ ）。对于传感器 S1、S3，AG 响应信号显著高于其他地区；对于传感器 S2，LX 响应信号显著高于其他地区；对于传感器 S6~S9，AG 响应信号显著低于其它地区；对于传感器 S10，LX 的响应信号最高，QB、SZ、AG 的响应信号最低。不同产地三七间响应信号的差异为其产地的判别奠定基础。

3.4 三七产地的定性判别

3.4.1 基于 CDA 的三七产地判别 为判别不同产地三七的差异，分别以三七中皂苷含量、电子鼻气味信息及其联用数据为输入进行 CDA 分析，结果见图 3。由图 3a 可知，第一主成分为 89.75%，第二成分为 8.48%，共解释了原始变量 98.23% 的信息，QB 与 SZ 的数据点之间有不同程度的重叠，LX 与 AG 数据点集聚较为明显；图 3b 共解释了原始变量 97.83% 的信息，QB 和 SZ 之间数据点之间有着部分重叠且间距相近与 LX 和 SZ 之间有明显间隔；图 3c 共解释了原始变量 91.14% 的信息，QB 与 SZ、AG 与 LX 各数据点之间有部分重叠，但除去各异常点外，4 个产地可基本被区分。综上所述，通过结合 CDA 分析，基于电子鼻气味信息和皂苷含量可以实现三七道地与非道地产地的判别。

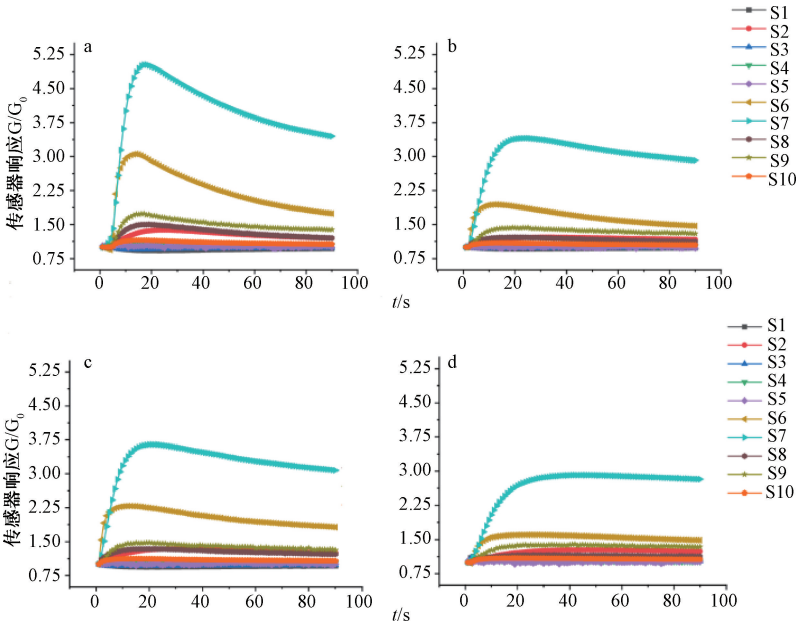
3.4.2 基于 CA 分析的三七产地判别 聚类分析一般使用欧氏距离为评价指标，衡量不同数据间的相似性。本研究以各三七中皂苷含量、电子鼻气味信息及两者联用数据为

表 1 三七产地对传感器响应信号的影响规律 ($\bar{x}\pm s$)

三七产地	电子鼻传感器响应(G/G0)				
	S1	S2	S3	S4	S5
QB	0.956±0.003 ^b	1.218±0.011 ^b	0.979±0.001 ^b	1.046±0.003 ^a	1.001±0.003 ^a
SZ	0.959±0.004 ^b	1.232±0.014 ^b	0.981±0.002 ^b	1.031±0.010 ^a	1.004±0.003 ^a
LX	0.955±0.004 ^b	1.288±0.018 ^a	0.978±0.002 ^b	1.032±0.010 ^a	0.999±0.003 ^a
AG	0.974±0.005 ^a	1.210±0.016 ^b	0.988±0.003 ^a	1.013±0.012 ^a	1.003±0.003 ^a
F	5.314	5.291	4.424	2.204	0.567
P	0.002	0.002	0.005	0.090	0.638

三七产地	电子鼻传感器响应(G/G0)				
	S6	S7	S8	S9	S10
QB	1.845±0.071 ^a	3.463±0.105 ^a	1.237±0.020 ^a	1.376±0.014 ^a	1.073±0.004 ^{ab}
SZ	1.809±0.054 ^a	3.232±0.077 ^a	1.229±0.019 ^a	1.355±0.012 ^a	1.075±0.005 ^{ab}
LX	1.859±0.074 ^a	3.326±0.087 ^a	1.248±0.023 ^a	1.370±0.013 ^a	1.080±0.004 ^a
AG	1.482±0.051 ^b	2.979±0.076 ^b	1.143±0.017 ^b	1.308±0.011 ^b	1.066±0.002 ^b
F	8.637	5.392	6.755	6.059	3.073
P	<0.001	0.001	<0.001	0.001	0.029

注：同列数据不同字母表示不同产地间的差异显著。



注：a 为 QB，b 为 SZ，c 为 LX，d 为 AG。

图 2 云南三七的电子鼻特征响应信号

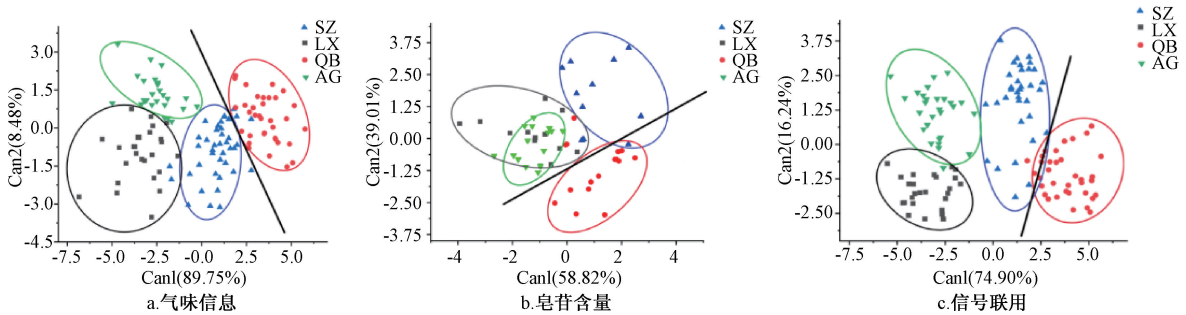


图 3 基于 CDA 对三七产地的判别

输入进行聚类分析，以均方根距离 (D) 为评价指标，衡量各产地之间的相似性，结果见图 4。由图 4a 可知，当 $D=1.007\ 8$ 时，LX 和 AG 各聚为一类，当 $D=2.031\ 0$ 时，QB 聚为一类；由图 4b 可知，当 $D=0.884\ 3$ 时，SZ 与 QB 各聚为一类；由图 4c 可知，当 $D=3.093\ 9$ 时，可全部按照产地进行正确识别。综上所述，基于 CA 分析通过计算其均方根

距离即可实现三七道地与非道地的判别，且 CA 分析判别结果与 CDA 结果基本一致。

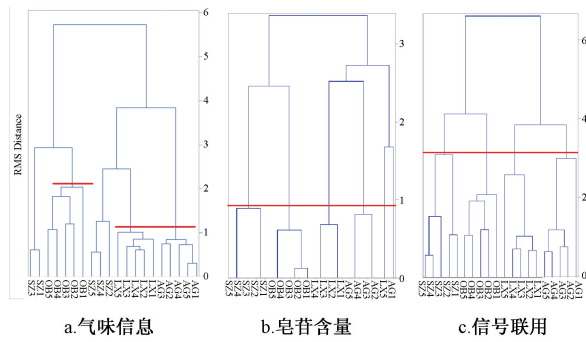


图 4 基于 CA 对三七产地的定性判别

3.5 基于 MLP 对三七产地的定量判别 以三七中皂苷含量、电子鼻气味信息及两者联用数据为输入，随机将各数

据分为建模集为 112 (28×4) 和验证集为 28 (7×4)，以产地为输出，基于 MLP 定量判别三七道地及周边地区，结果见表 2。由此可知，MLP 神经网络分析对三七样品分类的准确率分别为 84.29%、75%、85.72%；所建立的网格混淆矩阵表明对三七产地判别准确率、精确率、灵敏度、特异度以及曲线下方面积 (AUC) 分别高于 87.00%、74.00%、79.00%、91.00%、85.00%，见表 3。对道地地区 QB 的样品分类的准确率分别为 100%、94.29%、85.71%；所建立的网格混淆矩阵表明对三七产地判别准确率、精确率、灵敏度、特异度以及 AUC 分别均高于 86.00%、85.00%、66.00%、95.00%、81.00%，基于气味信息对 QB 的判别效果最优。综上所述，结合 MLP 神经网络，电子鼻传感器响应信号和皂苷含量及两者联用数据可以实现对三七产地、道地与非道地产地的定量判别。

表 2 产地判别混淆矩阵结果

输入数据	样品	QB	SZ	LX	AG	准确率/%	准确率平均值/%
气味信息	QB	35	0	0	0	100.00	84.29
	SZ	2	31	1	1	88.57	
	LX	0	1	25	9	71.43	
	AG	0	1	7	27	77.14	
皂苷含量	QB	33	0	0	2	94.29	75.00
	SZ	13	20	2	0	57.14	
	LX	2	0	29	4	82.85	
	AG	2	0	11	23	65.71	
联用数据	QB	30	4	0	1	85.71	85.72
	SZ	2	33	0	0	94.29	
	LX	0	4	25	6	71.43	
	AG	0	0	3	32	91.43	

表 3 MLP 网格性能参数

输入数据	样品	准确率/%	精确率/%	灵敏度/%	特异度/%	AUC/%
气味信息	QB	98.57	100.00	94.59	100.00	97.30
	SZ	95.71	88.57	93.94	96.26	95.10
	LX	87.14	71.43	75.76	90.65	83.21
	AG	88.57	77.14	72.97	92.38	82.68
	平均值	92.50	84.29	84.31	94.82	89.57
皂苷含量	QB	86.43	94.29	66.00	97.78	81.89
	SZ	89.29	57.14	100.00	87.50	93.75
	LX	86.43	82.86	69.05	93.88	81.46
	AG	87.14	63.89	82.14	88.39	85.27
	平均值	87.32	74.55	79.30	91.89	85.59
联用数据	QB	95.00	85.71	93.75	95.37	94.56
	SZ	92.86	94.29	80.49	97.98	89.23
	LX	90.71	71.43	89.29	91.07	90.18
	AG	92.86	91.43	82.05	97.03	89.54
	平均值	92.86	85.72	86.40	95.36	90.88

3.6 皂苷含量的定量预测模型 为基于气味信息无损评价三七内在品质，将三七的电子鼻响应数据随机分为建模集 112 (28×4) 和验证集 28 (7×4)，以皂苷 R1、人参皂苷 Rg1、Rb1 与 Rd 及其总皂苷含量为输出，采用 PLS、MLR 和 MLP 建立三七皂苷含量预测模型，以找出较佳预测模

型，结果见表 4。由此可知，对于三七皂苷 R1 含量，在 3 种建模集中，建模集的决定系数 Rc^2 均高于 0.82，均方根误差 RMSEC 均小于 0.79，采用建立的模型进行预测， Rp^2 均高于 0.8，RMSEP 均小于 0.85，预测效果较好；对于人参皂苷 Rg1 含量，在 3 种建模集中，建模集的决定系数 Rc^2

均高于 0.70, RMSEC 均小于 0.73, 采用建立的模型进行预测, R_p^2 均高于 0.7, RMSEP 均小于 0.71, 预测效果较好; 对于人参皂苷 Rb1, 在 3 种建模集中, 建模集的决定系数 R_c^2 均高于 0.38, RMSEC 均小于 3.7, 采用建立的模型进行预测, R_p^2 均高于 0.3, RMSEP 均小于 0.42, 预测效果一般; 对于人参皂苷 Rd 含量, 在 3 种建模集中, 建模集的决定系数 R_c^2 均高于 0.2, RMSEC 均小于 1.2, 采用建立的模型进行预测, R_p^2 均高于 0.21, RMSEP 均小于 1.2, 预测效果一般; 对于总皂苷含量, 在 3 种建模集中, 建模集

的决定系数 R_c^2 均高于 0.41, RMSEC 均小于 4.9, 采用建立的模型进行预测, R_p^2 均高于 0.31, RMSEP 均小于 5.2, 预测效果一般。

对于人参皂苷 Rb1、Rd 及其总皂苷含量, 其相关系数 r 均在 0.44~0.78 之间, 其气味信息与皂苷含量之间存在相关关系, 但是预测效果不如三七皂苷 R1 和人参皂苷 Rg1。综上所述, 利用电子鼻传感器响应数据采用 PLS、MLR 和 MLP 基本可以实现对三七皂苷含量的预测, 且 MLP 的预测效果明显优于 MLR 和 PLS。

表 4 定量预测三七的皂苷含量

模型类别	预测方法	训练集		测试集	
		R^2	RMSEC/%	R^2	RMSEP/%
三七皂苷 R1 含量预测	PLS	0.825 2	0.786 1	0.800 3	0.832 8
	MLR	0.850 4	0.736 2	0.847 0	0.812 2
	MLP	0.892 3	0.640 4	0.883 5	0.706 8
人参皂苷 Rg1 含量预测	PLS	0.758 0	0.655 9	0.729 4	0.702 1
	MLR	0.737 6	0.676 4	0.778 0	0.658 6
	MLP	0.701 3	0.720 4	0.702 1	0.708 2
人参皂苷 Rb1 含量预测	PLS	0.384 7	3.670 2	0.304 0	3.890 1
	MLR	0.387 5	3.645 7	0.385 6	4.153 4
	MLP	0.547 9	3.234 9	0.443 5	3.526 7
人参皂苷 Rd 含量预测	PLS	0.222 8	1.170 8	0.333 1	1.087 2
	MLR	0.201 5	1.179 6	0.311 3	1.104 4
	MLP	0.308 3	1.175 3	0.217 4	1.093 9
皂苷总含量预测	PLS	0.445 8	4.747 5	0.319 1	5.150 3
	MLR	0.418 3	4.851 6	0.380 5	4.923 9
	MLP	0.602 4	3.990 8	0.589 4	4.039 8

4 讨论与结论

三七的挥发成分主要为萜烯类、醇类、醛类、烯烃类和烷烃类化合物^[27], 各三七的响应信号差异主要表现在传感器 S6~S9, 结合电子鼻传感器阵列可知, 三七中挥发性呈香物质主要为芳香类、烷烃类等; 三七中主要的活性成分为皂苷 R1、人参皂苷 Rg1、Rb1 与 Rd 等, 皂苷含量越高, 品质越好^[28], 而皂苷含量会受到生长环境的影响。通过方差分析发现, 产地对三七皂苷含量影响显著, 其中 QB 与 SZ 的各皂苷含量基本相差不大, 这可能与它们产地相邻有关, 与孙玉琴等^[29]的研究结果基本一致, QB 的皂苷含量较高。对三七产地进行 CDA 和 CA 分析发现, LX 和 AG、SZ 与 QB 接近, 说明气味信息、皂苷含量与产地间具有差异性和相似性。以电子鼻气味信息为输入, 结合 PLS、MLP、MLR 构建皂苷含量的预测模型, 结果表明, 气味信息与皂苷含量之间存在相关关系 ($0.42 < r < 0.95$)。汪萌^[30]采用逐步回归法建立春七电子鼻传感器响应信号与皂苷含量之间的回归模型 ($R=0.802$), 也表明气味与皂苷含量存在相关性。

CDA、CA 分析已被广泛用于药材产地判别及溯源的研究中, 本研究通过 CDA 和 CA 分析均可实现三七道地与非道地产区的有效区分, 且联用数据的判别效果最优^[10,31]。基于 MLP 神经网络分析对三七产地的判定准确率均在 87.00% 以上, 且联用数据的判别效果最优, 但基

于电子鼻对于道地产地 QB 的判别效果优于皂苷含量及联用信号。有研究表明, 通过 MLP 神经网络对不同来源的南北五味子识别率达到了 100%^[21], 可见 MLP 神经网络分析在产地判别中的可行性; 结合 PLS、MLR、MLP 分析构建皂苷含量的预测模型, 表明 MLP 的预测效果优于 MLR、PLS。

本研究通过检测道地与非道地三七的气味信息和皂苷含量, 结合多元统计分析实现对三七产地的定性、定量判别以及三七皂苷含量的定量预测。在今后的研究中, 可尝试将电子鼻气味信息应用到三七皂苷含量的检测中, 实现其内在品质的快速、无损评价, 以期对市场道地产区判别及掺伪提供新的检测方法。

参考文献:

[1] 刘耀晨, 张铁军, 郭海彪, 等. 三七的研究进展及其质量标志物预测分析[J]. 中草药, 2021, 52(9): 2733-2745.

[2] 刘元林, 龙 鸣, 张 希, 等. 基于电子鼻与多元统计分析判别三七品质[J]. 中成药, 2021, 43(3): 700-707.

[3] Han S Y, Li H X, Ma X, *et al.* Evaluation of the antimyocardial ischemia effect of individual and combined extracts of *Panax notoginseng* and *Carthamus tinctorius* in rats [J]. *J Ethnopharmacol*, 2013, 145(3): 722-725.

[4] Xie W J, Meng X B, Zhai Y D, *et al.* *Panax notoginseng* Saponins: a review of its mechanisms of antidepressant or

anxiolytic effects and network analysis on phytochemistry and pharmacology[J]. *Molecules*, 2018, 23(4): 940.

[5] 杨 娟,袁一怔,尉广飞,等. 三七植物化学成分及药理作用研究进展[J]. 世界科学技术 (中医药现代化), 2017, 19(10): 1641-1647.

[6] 王润云,刘如良,高天爱. 三七及其易混淆品真伪鉴别分析[J]. 光明中医, 2013, 28(12): 2667-2668.

[7] 张艳美. 天麻、三七及何首乌等名贵中药的真伪鉴别与分析[J]. 光明中医, 2019, 34(11): 1661-1663.

[8] 刘大会,徐 娜,郭兰萍,等. 三七药材质量特征和商品规格等级标准研究[J]. 中国中药杂志, 2016, 41(5): 776-785.

[9] Wei G F, Yang F, Wei F G, *et al.* Metabolomes and transcriptomes revealed the saponin distribution in root tissues of *Panax quinquefolius* and *Panax notoginseng*[J]. *J Ginseng Res*, 2020, 44(6): 757-769.

[10] 张 棚,张 希,杨雪妍,等. 基于微量元素分析的三七产地及其主侧根鉴别[J]. 浙江农业学报, 2021, 33(7): 1300-1308.

[11] 杨兰芬,郝志云,杨新周. 三七不同药部位的红外光谱分析与鉴定[J]. 云南化工, 2018, 45(6): 81-83.

[12] 孙成祥,雷飞飞,王建春,等. 基于实时细胞电子分析技术的三七质量生物评价研究[J]. 中药材, 2015, 38(4): 766-769.

[13] 冯文豪,田亮玉,施钧瀚,等. 电子鼻技术应用于川贝母真伪及规格辨识的可行性分析[J]. 中国实验方剂学杂志, 2021, 27(13): 108-118.

[14] 刘阿静,王 娟,王 波,等. 基于电子鼻与多元统计分析鉴别当归产地的研究[J]. 质量安全与检验检测, 2022, 32(1): 1-5.

[15] Li S, Li X R, Wang G L, *et al.* Rapid discrimination of Chinese red ginseng and Korean ginseng using an electronic nose coupled with chemometrics [J]. *J Pharm Biomed Anal*, 2012, 70: 605-608.

[16] 王 蓉,郭伟娜,刘倩倩,等. 基于电子鼻和电子舌技术分析紫菀药材的气味特征[J]. 中成药, 2022, 44(5): 1693-1697.

[17] 张思聪,张振秋,李 峰. 基于电子鼻技术分析生、制九香虫药材“气”特征[J] 中华中医药学刊, 2021, 39(6): 145-147; 281-282.

[18] 胥 敏,杨诗龙,张 超,等. 基于气味客观化的黄连及其炮制品鉴别研究[J]. 中国中药杂志, 2015, 40(1): 89-93.

[19] Xu M, Yang S L, Peng W, *et al.* A novel method for the discrimination of *Semen Arecae* and its processed products by using computer vision, electronic nose, and electronic tongue [J]. *Evid Based Complement Alternat Med*, 2015, 2015: 753942.

[20] Cui S Q, Wu J F, Wang J, *et al.* Discrimination of American ginseng and Asian ginseng using electronic nose and gas chromatography-mass spectrometry coupled with chemometrics [J]. *J Ginseng Res*, 2017, 41(1): 85-95.

[21] 牟倩倩,贺敬霞,卢 一,等. 电子鼻结合化学计量学方法在南五味子和北五味子鉴别上的应用研究[J]. 时珍国医国药, 2017, 28(6): 1356-1359.

[22] 韩 玉. 电子鼻在苍术质量评价中的应用研究[D]. 北京: 北京中医药大学, 2011.

[23] Lin Y H, Zhang F J, Li L X, *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): 047510.

[24] Yang X D, Song J, Wu X, *et al.* Identification of unhealthy *Panax notoginseng* from different geographical origins by means of multi-label classification[J]. *Spectrochim Acta A Mol Biomol Spectrosc*, 2019, 222: 117243.

[25] 刘 飞,王元忠,杨春艳,等. 红外光谱结合判别分析对三七道地性及产地的鉴别研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2015, 35(1): 108-112.

[26] 唐卿雁,陈 庚,卢迎春,等. HPLC 同时测定三七不同部位 4 种皂苷含量[J] 热带农业科学, 2018, 38(9): 91-95.

[27] 聂枳宁. 基于风味组学的茶叶香味与成分的映射关联评价研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2020.

[28] 陈 博,毛希琴. 高效液相色谱法快速鉴别三七粉品质[J]. 农业科技与信息, 2021(21): 53-55.

[29] 孙玉琴,向飞军,曾 江,等. 云南省不同产地三七皂苷含量的比较[J]. 文山学院学报, 2013, 26(6): 8-10.

[30] 汪 萌. 基于多重分析手段的三七商品规格等级划分研究[D]. 北京: 北京中医药大学, 2016.

[31] 龙 鸣. 基于指纹图谱技术的甘南牦牛乳品质评价研究[D]. 兰州: 西北民族大学, 2021.