

基于电子鼻和电子舌辨识侧柏叶炒炭程度

姜涵¹, 尚超凡¹, 卢琪^{2,3}, 吕畅^{2,3}, 戴衍朋^{2,3}, 石典花^{2,3*}

(1. 山东中医药大学, 山东 济南 250014; 2. 山东省中医药研究院, 山东 济南 250014; 3. 国家中医药管理局中药蜜制和制炭炮制技术与原理重点实验室, 山东 济南 250014)

摘要: 目的 辨识侧柏叶炒炭程度。方法 采用电子鼻和电子舌考察炒炭过程中气味、滋味变化, 并进行客观量化表征, 利用主成分分析、正交偏最小二乘法判别分析对数据进行处理。结果 炒炭后, 氮氧类、烷烃芳香类、无机硫化物类、醇醚醛酮类、芳香类成分发生明显变化, 并且随着炮制程度加重而减少, 同时苦味值和涩味值明显增加。结论 该方法稳定可靠, 可为侧柏叶炒炭工艺的质量控制提供参考依据, 从而保障其临床用药。

关键词: 侧柏叶; 炒炭工艺; 电子鼻; 电子舌; 主成分分析; 正交偏最小二乘法判别分析

中图分类号: R283 文献标志码: A 文章编号: 1001-1528(2025)07-2178-07

doi: 10.3969/j.issn.1001-1528.2025.07.007

Identification of carbonization by stir-frying degree of *Platycladi Cacumen* based on electronic nose and electronic tongue

JIANG Han¹, SHANG Chao-fan¹, LU Qi^{2,3}, LÜ Chang^{2,3}, DAI Yan-peng^{2,3}, SHI Dian-hua^{2,3*}

(1. Shandong University of Traditional Chinese Medicine, Jinan 250014, China; 2. Shandong Provincial Academy of Chinese Medicine, Jinan 250014, China; 3. State Administration of Traditional Chinese Medicine Key Laboratory for Processing Technology and Principle of Honey-processing and Carbonization of Traditional Chinese Medicines, Jinan 250014, China)

KEY WORDS: *Platycladi Cacumen*; carbonization by stir-frying process; electronic nose; electronic tongue; principal component analysis; orthogonal partial least squares discriminant analysis

中药质量评价一般通过眼观、鼻闻、口尝等感官经验进行判断, 其中气味是重要指标之一^[1], 如当归“有浓郁香气, 味甘、辛、微苦”、黄芪“气微, 味微甜, 嚼之微有豆腥味”、薄荷“揉搓后有特殊的清凉香气, 味辛凉”等^[2], 但由于个体差异大、主观性强等原因导致评价结果参差不齐。随着科技发展, 电子鼻、电子舌等现代仿生技术兴起, 使中药气味、滋味评价由主观模糊走向客观精准^[3-4], 它们可将相关信号转化为电信号, 在一定程度上代替人的感官, 从而为中药外观、炮制质量评价提供新方法^[5]。

侧柏叶为柏科植物侧柏 *Platycladus orientalis*

(L.) Franco 的干燥枝梢与叶片, 最早收载于《神农本草经》^[6], 列为上品, 其味苦, 入肺、肝、脾经, 主治吐血、衄血、痢血、崩漏等, 系补阴之良药^[7], 生品偏苦寒, 而炒炭后寒凉之性趋于平和, 偏于收敛止血, 主治热邪不盛的出血证^[8]。现代研究表明, 侧柏叶炒炭后所含的黄酮^[9-12]、挥发油^[13]、鞣质^[14]、氨基酸^[15]、无机元素^[16]等成分发生了明显变化, 其中黄酮类的槲皮素是新产物。

课题组前期调研发现, 市售侧柏炭炒制过度的情况严重, 故探寻如何有效辨识炒炭程度是控制该饮片质量的关键。侧柏叶炒炭后, 气味发生了明显变化, 最突出的特点是原有清香气消失, 同时产生

收稿日期: 2024-10-15

基金项目: 国家中医药管理局中药炮制技术传承基地建设项目(国中医药办规财函[2022]185号); 国家中医药管理局高水平中医药重点学科建设项目(ZYYZDXK-2023121); 第七批全国老中医药专家学术经验传承项目(国中医药人教函[2022]76号); 山东省自然科学基金(ZR2023MH114); 山东省中医药科技发展计划(Q-2023158, Z-2022086T); 齐鲁医派中医学学术流派传承项目-中药蜜制与制炭特色技术(鲁卫函[2021]45号)

作者简介: 姜涵(1997—), 男, 硕士生, 研究方向为中药炮制。E-mail: 1063811067@qq.com

*通信作者: 石典花(1981—), 女, 博士, 研究员, 研究方向为中药炮制。E-mail: shidianhua81@163.com

焦香气，但目前尚无电子鼻和电子舌在该方面应用的报道。因此，本研究采用电子鼻和电子舌考察侧柏叶炒炭过程中气味、滋味变化，探寻其“炒炭存性”特征，以期为其炮制质量控制提供参考，从而进一步保障其临床用药。

1 材料

1.1 仪器 PEN3 电子鼻系统（德国 Airsense 公司），传感器见表 1；SA402B 电子舌系统（日本 INSENT 公司），传感器及对应的味觉分别为 AAE（鲜味）、CTO（咸味）、CAO（酸味）、COO（苦味）、AE1（涩味）；FW-100 高速万能粉碎机（北京市永光明医疗仪器有限公司）；XMTD-8222 电热恒温水浴锅、DHG-9146A 电热鼓风干燥箱（上海精宏实验设备有限公司）；V-100 真空泵 [中海德（福建）工业设备有限公司]；XS205 电子天平（梅特勒-托利多精密仪器有限公司）；WFH-201B 紫外透射反射仪（上海精科实业有限公司）；硅胶 G 预制板（青岛海洋化工有限公司）；TDL-40B 离心机（上海楚柏实验室设备有限公司）；KQ3200E 超声波清洗仪（昆山市超声仪器有限公司）；LC-EA65 电陶炉（广东顺德忠臣电器有限公司）。

表 1 电子鼻传感器

Tab. 1 Sensors of electronic nose

阵列	传感器	性能
1	W1C	对苯类、芳香成分敏感
2	W5S	灵敏度大,对氮氧化合物敏感
3	W3C	对氨类、芳香成分敏感
4	W6S	对氢化物有选择性
5	W5C	对短链烷烃、芳香成分敏感
6	W1S	对甲烷等短链烷烃敏感
7	W1W	对无机硫化物敏感
8	W2S	对醇醚醛酮类敏感
9	W2W	对芳香成分、有机硫化物灵敏
10	W3S	对长链烷烃类敏感

1.2 饮片与试剂 侧柏叶购自山东、河北、浙江等地，经山东省中医药研究院中药炮制研究所戴衍朋副研究员鉴定为正品，具体见表 2。甲醇、无水乙醇、甲酸、甲酸乙酯、乙酸乙酯、甲苯均为分析纯，购自天津富宇精细化工有限公司；水为纯净水，购自杭州娃哈哈集团有限公司。

2 方法

2.1 炒炭品制备 根据课题组前期确定的工艺参数^[17]，将 5 批生品分别制成表面黑褐色、断面焦黄色的炒适中炭，表面棕褐色、断面浅焦黄色的炒轻炭，以及表面亮黑色、断面黑褐色的炒重炭，平

表 2 侧柏叶饮片信息

Tab. 2 Information of *Platycladi Cacumen*

编号	产地	来源	批号
1	山东	山东百味堂中药饮片有限公司	240201
2	山东	济南禾宝中药材有限公司	24020104
3	山东	济南润正中药材有限公司	23111701
4	河北	山东博康中药饮片有限公司	23090803
5	浙江	浙江中医药大学中药饮片有限公司	231201

行 3 份，见图 1。

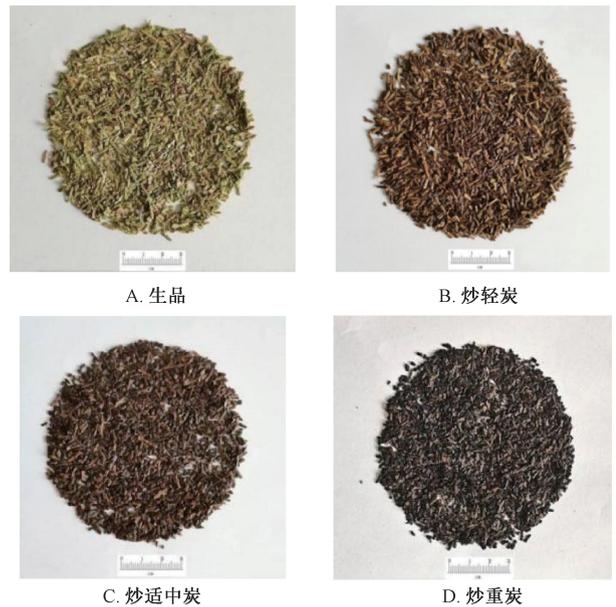


图 1 侧柏叶生品、炒炭品

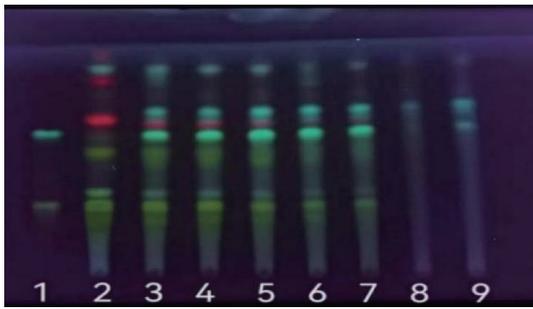
Fig. 1 Raw product and carbonized by stir-frying products of *Platycladi Cacumen*

再根据课题组前期确定的“炒炭存性”标准（以槲皮苷、槲皮素为对照，其中前者为生品原有成分，代表“存性”；后者为炒炭品新产物，代表“炒炭”），进行 TLC 定性鉴别^[18]，结果见图 2。由此可知，炒轻炭中存在与生品相应的红色斑点，表明其炮制程度不充分。

2.2 电子鼻测定气味

2.2.1 条件筛选 取生品和不同炮制程度炒炭品适量，粉碎，过 3 号筛，分别对称样量 0.3、0.5、1.0 g，孵化时间 5、10、15 min 进行考察，采用直接顶空吸气法，直接将进样针头插进密闭样品瓶中采集气味信号，平行 3 次。结果，称样量为 0.3 g，孵化时间为 5 min 时色谱峰峰形良好，数值适宜，可用于分析。

2.2.2 测定方法 取生品和不同炮制程度炒炭品粉末（过 3 号筛）各 0.3 g，置于进样瓶中，密闭静置 5 min，生成稳定的顶空气体后进行测定，平



注：1为槲皮素、槲皮苷对照品（上方为前者，下方为后者），2为侧柏叶，3~5为炒轻侧柏炭，6~7为炒适中侧柏炭，8~9为炒重侧柏炭。

图2 各样品 TLC 色谱图 (365 nm)

Fig. 2 TLC chromatogram of various samples (365 nm)

行3次。

2.3 电子舌测定滋味

2.3.1 条件筛选 取生品和不同炮制程度炒炭品适量，粉碎，过4号筛，分别对称样量0.3、0.5、1.0 g进行考察，传感器经清洗、平衡归零后进行30 s测试，在2组参比溶液中短暂清洗，并于新参比溶液中测试，共循环4次，取后3次结果进行

数据分析。结果，称样量为0.5 g时数据适宜。

2.3.2 测定方法 取生品和不同炮制程度炒炭品粉末（过4号筛）各0.5 g，置于250 mL锥形瓶中，加入150 mL蒸馏水后摇匀以保证粉末全部浸润，在100 W功率下超声提取30 min，提取液转移至50 mL离心管中，3 500 r/min离心15 min，抽滤，滤液置于电子舌专用烧杯中，上机测试。

3 结果

3.1 气味差异分析

3.1.1 直观分析 气味传感器响应信号值见表3，再采用OriginPro 2021软件进行分析，结果见图3。由此可知，2、4、6~9号气味传感器响应信号值均随着炮制程度加重而降低，其中2、6~9号较大，并且差异显著，提示侧柏叶炒炭后氮氧类、烷烃芳香类、无机硫化物类、醇醚醛酮类、芳香类成分发生了明显变化。前期报道，对侧柏叶香气起决定性作用的主要成分大多为8号气味传感器所敏感的醇醚醛酮类，与传统炮制经验中炒炭后清气消失相符^[19]。

表3 电子鼻气味传感器响应信号值 (n=3)

Tab. 3 Response signal values for odor sensors of electronic nose (n=3)

样品	传感器阵列序号									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
生品 1	0.444	25.869	0.509	1.388	0.360	23.481	37.122	8.222	13.283	1.082
生品 2	0.445	24.118	0.532	1.324	0.395	18.233	30.469	6.869	10.210	1.079
生品 3	0.439	25.503	0.519	1.373	0.376	21.422	33.640	7.900	11.805	1.082
生品 4	0.414	25.085	0.479	1.513	0.329	28.388	38.049	9.866	12.834	1.094
生品 5	0.411	25.699	0.480	1.488	0.334	28.976	41.987	10.138	13.610	1.114
炒轻炭 1	0.546	19.871	0.626	1.117	0.494	13.330	31.386	4.933	13.952	1.019
炒轻炭 2	0.534	21.854	0.606	1.134	0.464	12.261	28.063	4.902	14.334	1.011
炒轻炭 3	0.541	21.439	0.613	1.109	0.478	12.192	29.069	4.950	13.967	1.025
炒轻炭 4	0.526	20.597	0.596	1.139	0.457	13.117	29.944	5.162	13.214	1.016
炒轻炭 5	0.524	20.725	0.597	1.185	0.456	15.548	32.435	5.480	13.839	1.022
炒适中炭 1	0.610	15.822	0.683	1.064	0.565	10.596	25.211	3.621	12.274	1.006
炒适中炭 2	0.637	16.492	0.713	1.040	0.600	9.425	25.931	3.316	12.303	0.995
炒适中炭 3	0.580	16.232	0.660	1.080	0.530	11.061	25.544	3.911	12.719	0.999
炒适中炭 4	0.602	16.800	0.675	1.069	0.551	10.930	26.159	3.758	12.631	0.997
炒适中炭 5	0.663	16.323	0.698	1.051	0.582	9.537	25.201	3.413	12.641	1.009
炒重炭 1	0.796	13.105	0.881	0.963	0.833	5.553	13.636	2.232	9.311	0.989
炒重炭 2	0.781	13.838	0.868	0.970	0.816	5.779	14.079	2.295	9.493	0.992
炒重炭 3	0.694	12.853	0.773	1.012	0.683	8.225	15.688	3.062	8.656	1.001
炒重炭 4	0.742	14.290	0.826	0.982	0.749	6.046	13.190	2.536	9.466	0.988
炒重炭 5	0.658	13.552	0.732	1.036	0.633	9.552	17.050	3.365	9.644	1.000

另外，4号气味传感器响应信号值小，参考价值不大；1、3、5号气味传感器响应信号值随着炮制程度加重而增加。课题组前期发现，生品炒炭后，含量随着炮制程度加重呈现升高趋势的成

分有苯甲醛、5-甲基糠醛、糠醛等芳香类成分^[13]，与1、3、5号气味传感器对应的灵敏物质一致，而且糠醛类成分被认为是焦香味标志物之一^[20]，表明上述成分与炒炭后产生的焦香气存

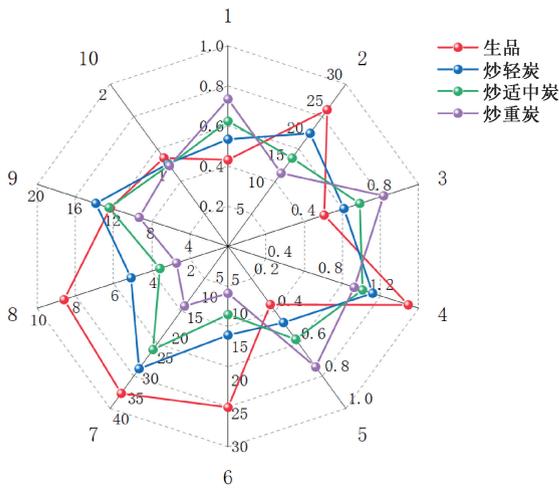


图3 气味分析雷达图
Fig. 3 Radar plot for odor analysis

在相关性；生品和不同炮制程度炒炭品在 10 号气味传感器上的响应信号值无规律性差异，故无参考价值。

3.1.2 化学计量学分析

3.1.2.1 主成分分析 (PCA) 采用 SIMCA-P 14.0 软件进行分析^[21-22]，其中第一主成分贡献率为 85.20%，第二主成分贡献率为 9.34%，累积贡献率为 94.54%，能较好地反映原始数据特征，见图 4。由此可知，基于电子鼻的气味信号值可将生品和不同炮制程度炒炭品明显区分开，但炒轻炭与炒适中炭之间的差异较小。

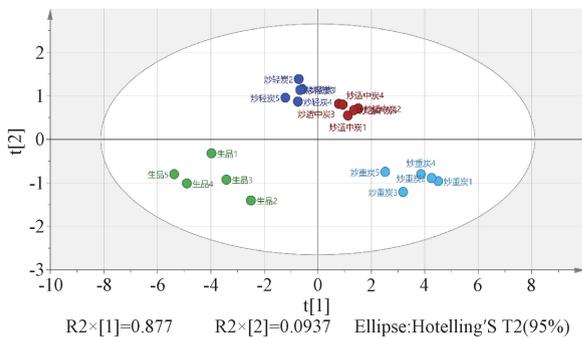


图4 气味值 PCA 图
Fig. 4 PCA plot for odor values

3.1.2.2 正交偏最小二乘判别分析 (OPLS-DA) 在 PCA 分析基础上，采用 SIMCA-P14.0 软件进行分析，结果见图 5A，可知基于电子鼻的气味信号值可将生品和不同炮制程度炒炭品进一步区分开，并且 $R^2Y = 0.779$ ， $Q^2 = 0.736$ ，均大于 0.5，表明模型可解释度和预测能力良好。再进行 200 次置换检验，结果见图 5B，可知左边 R^2 、 Q^2 点均低于右边的，并且两者截距分别低于 0.3、0.05，表明模

型未产生过拟合，稳定可靠。

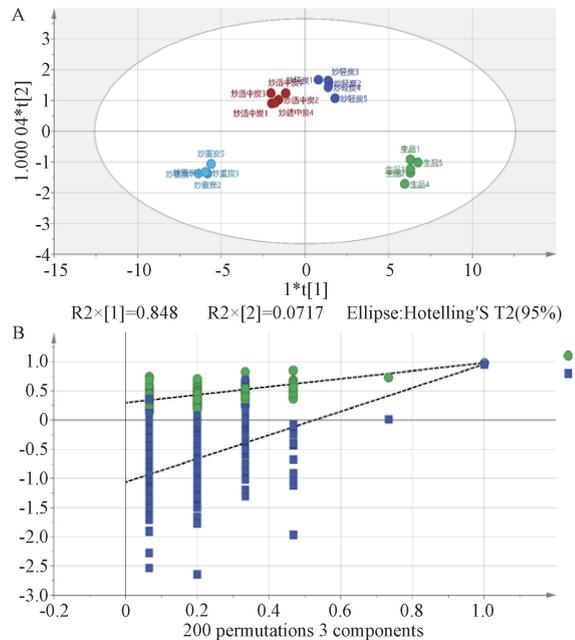


图5 气味值 OPLS-DA 图
Fig. 5 OPLS-DA plot for odor values

3.2 滋味差异分析

3.2.1 直观分析 味觉传感器响应信号值见表 4，再采用 originPro 2021 软件进行分析，结果见图 6。由此可知，苦味、涩味、苦味回味、涩味回味、丰富度、鲜味传感器响应信号值较大，表明生品和不同炮制程度炒炭品滋味以苦味、涩味和鲜味为主；酸味、咸味传感器响应信号值较小，并且分别低于其味觉零点-13、零点-6，故无参考价值；炒炭后苦味、涩味传感器响应信号值增加，与传统炮制经验中炒炭后苦涩味增加相符，可能是由于产生了苦涩味物质所致；生品苦味回味、涩味回味传感器响应信号值明显大于炒炭品的，与其他味觉传感器的恰好相反。前期报道，炒炭后提供苦味、涩味来源之一的挥发油大量消失^[9,19,23]，推测可能与炒炭对其含量的影响有关，即挥发油为脂溶性，而参比溶液为水溶性，故对挥发油较多的生品进行测试时味觉传感器难以清洗，而炒炭后该类成分明显减少，使得清洗更容易。

3.2.2 化学计量学分析

3.2.2.1 PCA 采用 SIMCA-P 14.0 软件进行分析，第一主成分贡献率为 53.70%，第二主成分贡献率为 30.90%，累积贡献率为 84.60%，能较好地反映原始数据特征，结果见图 7。由此可知，生品和不同炮制程度炒炭品可基本区分开，但炒轻炭与炒适中炭之间的差异较小。

表 4 电子舌味觉传感器响应信号值 (n=3)

Tab. 4 Response signal values for taste sensors of electronic tongue (n=3)

样品	传感器信号							
	酸味	苦味	涩味	苦味回味	涩味回味	鲜味	丰富度	咸味
生品 1	-36.580	15.370	4.330	9.470	1.970	9.590	22.190	-16.570
生品 2	-37.103	15.113	4.453	9.130	1.997	9.620	22.270	-16.473
生品 3	-35.540	14.123	4.427	8.520	2.010	9.387	22.307	-17.170
生品 4	-34.807	14.050	4.410	8.443	1.963	9.477	22.400	-17.163
生品 5	-34.573	14.503	4.583	8.613	2.013	9.353	22.493	-17.110
炒轻炭 1	-36.147	15.089	5.685	-0.041	-0.219	10.151	0.377	-17.009
炒轻炭 2	-36.211	14.821	5.646	0.000	-0.097	9.838	0.411	-16.871
炒轻炭 3	-37.040	14.723	5.892	-0.026	0.206	10.271	0.413	-16.651
炒轻炭 4	-36.668	14.771	5.693	-0.086	0.190	10.309	0.435	-15.393
炒轻炭 5	-36.834	15.024	6.008	0.083	0.250	10.149	0.432	-17.299
炒适中炭 1	-38.687	15.389	5.762	0.016	0.177	10.643	0.291	-16.476
炒适中炭 2	-38.981	15.072	5.736	-0.081	0.217	10.827	0.339	-15.988
炒适中炭 3	-41.714	15.587	5.893	-0.082	0.194	11.463	0.306	-14.409
炒适中炭 4	-39.114	14.899	5.493	-0.197	0.172	10.849	0.279	-15.527
炒适中炭 5	-38.287	14.870	5.558	-0.252	0.163	10.546	0.274	-16.181
炒重炭 1	-31.135	15.734	5.445	-0.277	0.331	8.286	-12.224	-12.235
炒重炭 2	-30.895	15.343	5.515	-0.269	0.062	7.509	-12.347	-12.340
炒重炭 3	-32.502	15.043	5.126	-0.334	0.066	8.243	-12.558	-11.246
炒重炭 4	-31.916	15.319	5.304	-0.196	0.074	7.922	-12.542	-12.762
炒重炭 5	-31.059	15.500	5.491	-0.217	0.083	7.537	-12.556	-14.113

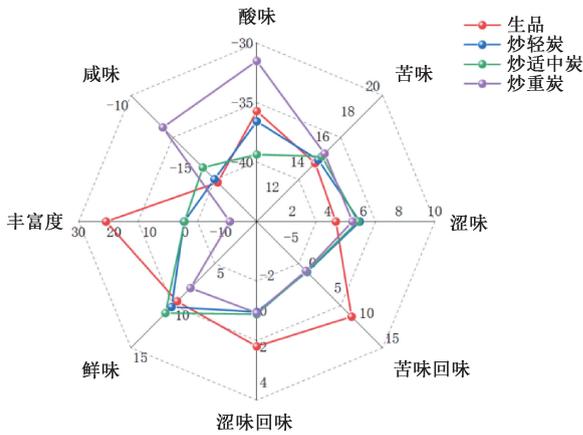


图 6 滋味值雷达图

Fig. 6 Radar plot for flavor values

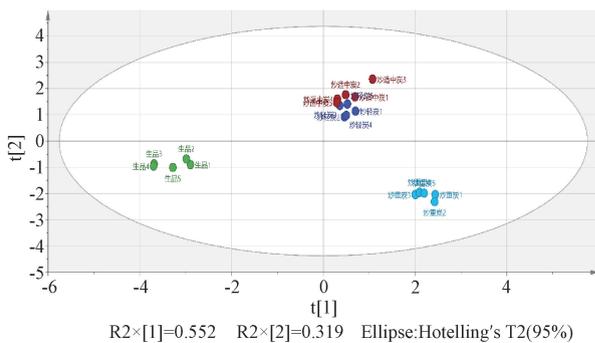


图 7 滋味值 PCA 图

Fig. 7 PCA plot for flavor values

3.2.2.2 OPLS-DA 采用 SIMCA-P 14.0 软件进行分析, 结果见图 8A, 可知基于电子舌的滋味信号值可将生品和不同炮制程度炒炭品进一步区分开, 并且 $R^2Y=0.843$, $Q^2=0.820$, 均大于 0.5, 表明模型可解释度和预测能力良好。再进行 200 次置换检验, 结果见图 8B, 可知左边 R^2 、 Q^2 点均低于右边的, 而且两者截距分别低于 0.3、0.05, 表明模型未产生过拟合, 稳定可靠。

4 讨论与结论

气味、滋味是判断中药质量的重要指标之一^[24-25], 本实验采用电子鼻和电子舌对侧柏叶炒炭过程中两者变化进行研究, 发现炒轻炭、适中炭具有一定相似性, 推测可能是因为其内在成分差异较小, TLC 图谱、HPLC 特征图谱也证实了这一点^[17]; 生品和不同炮制程度炒炭品的气味差异主要集中在氮氧类、烷烃芳香类、无机硫化物类、醇醚醛酮类、芳香类成分。文献 [19] 报道, 对侧柏叶香气起决定性作用的主要成分为相对含量较高的桉烯 (29.59%)、 α -侧柏酮 (16.43%)、 α -乙酸苧酯 (7.55%)、 L -苧酮 (7.55%)、 β -侧柏酮 (3.12%) 等。本实验结合雷达图发现, 相关成分大多为对 W2S 传感器灵敏的醇醚醛酮类, 而且随着炮制程度加重而降低, 与生品炒炭后清香味消失相符, 故电子鼻可对此加以辨识。

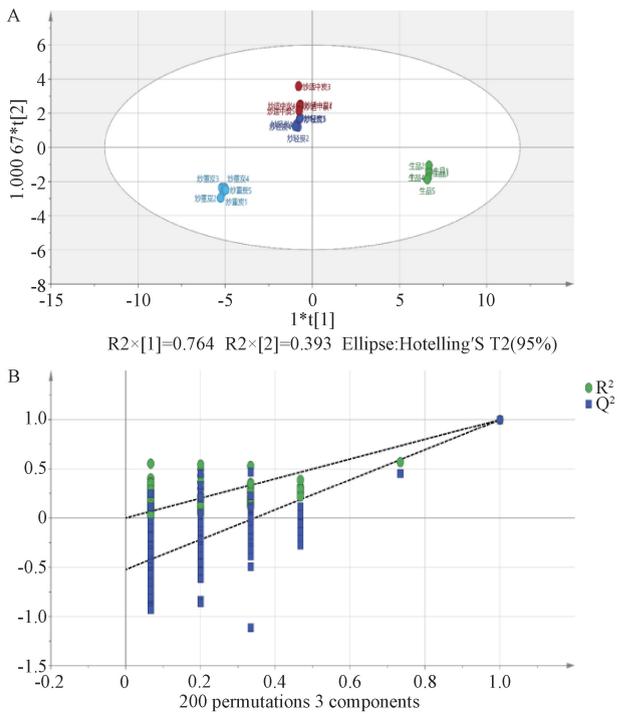


图8 滋味值 OPLS-DA 图

Fig. 8 OPLS-DA plot for flavor values

另外，基于电子舌味觉传感器贡献度发现，生品和不同炮制程度炒炭品的滋味差异主要集中在苦味和涩味。前期报道，侧柏叶炒炭后的新产生成分主要为槲皮素与山柰酚^[9]，其中前者为苦味来源之一^[26-27]，而涩味与鞣质相关^[28-29]；张华等^[30]报道，炮制后鞣质含量升高，以炒适中炭中最明显，但炒制过重反而明显降低，与本实验结果一致，推测炒炭品苦涩味增加可能与槲皮素、鞣质含量升高有关，与传统炮制经验相符。

综上所述，本实验基于电子鼻和电子舌探讨侧柏叶炒炭程度，可为进一步提升该炮制品质量控制标准和制备工艺水平提供参考。今后，将开展侧柏叶及其不同炮制程度炒炭品气味变化与内在质量的相关性研究，以期建立“由表及里”地快速辨识该中药炮制质量的方法。

参考文献:

[1] 卢一. 基于“气味”信息分析的中药饮片快速鉴别研究[D]. 成都: 成都中医药大学, 2017.
[2] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典: 2020年版一部[S]. 北京: 中国医药科技出版社, 2020: 139; 315; 394.
[3] Lu L, Hu Z Q, Hu X Q, et al. Electronic tongue and electronic nose for food quality and safety[J]. *Food Res Int*, 2022, 162(Pt B): 112214.

[4] Cho S, Moazzem M S. Recent applications of potentiometric electronic tongue and electronic nose in sensory evaluation[J]. *Prev Nutr Food Sci*, 2022, 27(4): 354-364.
[5] Deng X P, Tang S Q, Liu Z D. Application and development of electronic sensing technologies represented by electronic nose in modern traditional Chinese medicine preparations[J]. *China J Chin Mater Med*, 2024, 49(4): 924-931.
[6] 吴普. 神农本草经[M]. 北京: 人民卫生出版社, 1963: 40.
[7] 陈嘉谟. 本草蒙筌[M]. 北京: 人民卫生出版社, 1988: 210.
[8] 肖永庆, 李丽. 中华医学百科全书(中药炮制学)[M]. 北京: 中国协和医科大学出版社, 2016: 150-151.
[9] 石典花, 戴衍朋, 王丽凤, 等. 基于UHPLC-QTOF-MS/MS辨识的侧柏叶炒炭前后化学成分分析[J]. *中国实验方剂学杂志*, 2021, 27(8): 107-116.
[10] 孙延君. 侧柏叶炮制品质量及黄酮类成分药效作用研究[D]. 沈阳: 辽宁中医药大学, 2019.
[11] 谭晓亮, 李瑞海, 贾天柱. 侧柏叶炮制前后成分的对比如[J]. *实用药物与临床*, 2015, 18(11): 1359-1362.
[12] 陈叶青. 凉血止血药炒炭时黄酮类成分的变化规律与止血作用的相关性研究[D]. 南京: 南京中医药大学, 2016.
[13] 石典花, 戴衍朋, 卢琪, 等. 基于GC-IMS气味检测辨识侧柏叶炒炭程度研究[J]. *中草药*, 2021, 52(21): 6510-6517.
[14] 张瑞峰, 曾阳, 刘力宽, 等. 侧柏叶的化学成分与药理学作用研究进展[J]. *中国野生植物资源*, 2021, 40(4): 53-56.
[15] 孙延君, 李瑞海. 不同产地侧柏叶药材及炮制前后氨基酸成分比较分析[J]. *亚太传统医药*, 2017, 13(8): 52-55.
[16] 薛露, 单鸣秋, 张丽, 等. 侧柏炭的研究进展[J]. *中成药*, 2016, 38(5): 1127-1131.
[17] 石典花, 戴衍朋, 苏本正, 等. 侧柏叶“炒炭存性”科学内涵初探[J]. *中草药*, 2020, 51(23): 5963-5971.
[18] 石典花, 宗珊珊, 王军, 等. 基于市售侧柏炭饮片质量问题探讨其“炒炭存性”的质控标准[J]. *中国实验方剂学杂志*, 2019, 25(3): 21-26.
[19] 王道平, 潘卫东. 侧柏叶香味成分SPME-GC/MS分析[J]. *中南林业科技大学学报*, 2012, 32(9): 135-137.
[20] 商杰, 彭嘉玉, 郑郁清, 等. 基于电子鼻和HS-GC-MS技术结合相对气味活度值分析甘草不同炮制品气味差异及其物质基础[J]. *中国中药杂志*, 2024, 49(19): 5218-5228.
[21] 陈佩. 主成分分析法研究及其在特征提取中的应用[D]. 西安: 陕西师范大学, 2014.
[22] Giuliani A. The application of principal component analysis to drug discovery and biomedical data[J]. *Drug Discov Today*, 2017, 22(7): 1069-1076.
[23] 邵黎雄, 陆建梅, 姜雪峰. 味觉化学之苦味化学[J]. *化学教育(中英文)*, 2020, 41(17): 7-14.
[24] Wu C J, Zhong C P, Wang D, et al. Discovery of active ingredients in traditional Chinese medicine based on the analysis

- of odor and flavor of compounds[J]. *Curr Pharm Des*, 2022, 28(34): 2771-2784.
- [25] Zhou H Y, Luo D H, GholamHosseini H, et al. Identification of chinese herbal medicines with electronic nose technology: Applications and challenges[J]. *Sensors (Basel)*, 2017, 17(5): 1073.
- [26] Zhao H X, Wang L J, Jia Y J, et al. Accumulation of the bitter substance quercetin mediated by the overexpression of a novel seed-specific gene F1RDE2 in Tartary buckwheat[J]. *Plant Physiol Biochem*, 2024, 207: 108402.
- [27] Shi Q Q, Li X, Du J T, et al. Association of bitter metabolites and flavonoid synthesis pathway in jujube fruit[J]. *Front Nutr*, 2022, 9: 901756.
- [28] Soares S, Brandão E, Guerreiro C, et al. Tannins in food: Insights into the molecular perception of astringency and bitter taste[J]. *Molecules*, 2020, 25(11): 2590.
- [29] 毕洪娟. 菜用甘薯遗传多样性分析及茎叶苦涩味关键代谢物筛选[D]. 武汉: 华中农业大学, 2023.
- [30] 张 华, 邢书东. 侧柏炭炮制程度的研究[J]. *山东医药工业*, 2002, 21(4): 8-9.

黄姜纤维素氮掺杂碳量子点制备及其在铁离子检测中的应用

郭露月, 杨成宇, 付思莹, 周金伟, 宋小兵, 刘荣生, 夏国华*, 杨欢*
(江苏大学药学院, 江苏 镇江 212013)

摘要: 目的 制备黄姜纤维素氮掺杂碳量子点, 并考察其在铁离子检测中的应用。方法 以纤维素为碳源, 尿素为氮源, 水热法制备碳量子点, 评估其形态、结构、元素组成、光学特性, 并测定不同铁离子浓度下荧光光谱变化。结果 碳量子点呈类球形, 平均粒径为 3.91 nm, 得率为 3.31%, 荧光量子产率为 19.3%, 表面富含羟基、羰基、氨基等活性基团, 具有良好的水溶性和生物相容性。它在紫外光照射下发出明亮的蓝色荧光, 在 360 nm 激发波长处荧光强度最高, 并且与铁离子浓度呈负相关性。结论 黄姜纤维素氮掺杂碳量子点对铁离子具有高灵敏度的检测特性和选择性, 在其他重金属离子检测领域中有着较好的应用前景。

关键词: 黄姜; 纤维素; 氮掺杂碳量子点; 制备; 水热法; 铁离子

中图分类号: R944

文献标志码: A

文章编号: 1001-1528(2025)07-2184-06

doi:10.3969/j.issn.1001-1528.2025.07.008

Preparation of nitrogen-doped carbon quantum dots from *Dioscorea zingiberensis* cellulose and their application on detection of iron ions

GUO Lu-yue, YANG Cheng-yu, FU Si-ying, ZHOU Jin-wei, SONG Xiao-bing, LIU Rong-sheng, XIA Guo-hua*, YANG Huan*

(College of Pharmacy, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

KEY WORDS: *Dioscorea zingiberensis* C. H. Wright; cellulose; nitrogen-doped carbon quantum dots; preparation; hydrothermal method; iron ions

收稿日期: 2024-09-24

基金项目: 国家自然科学基金(81873196); 常州市基础 Research 计划(CJ20220161)

作者简介: 郭露月(2000—), 女, 硕士, 研究方向为中药学。Tel: (0511) 85038451, E-mail: gly20000611@163.com

* 通信作者: 夏国华(1977—), 男, 博士, 高级实验师, 研究方向为中药学。Tel: (0511) 85038451, E-mail: xgh-78131@yeah.net

杨欢(1980—), 男, 博士, 教授, 研究方向为中药学。Tel: (0511) 85038451, E-mail: yanghuan1980@ujs.edu.cn