基于电子舌苦味值的草乌炮制品麻舌感等级评价及双酯型生物碱含量预测

德格吉日呼[1]，乌尼日[1]，阿日棍[1]，布　仁[2, 4]，吴斯琴毕力格[3, 4]，海　英[1]，包勒朝鲁[1, 3, 4*]

1. 内蒙古医科大学蒙医药学院，内蒙古 呼和浩特　010110
2. 内蒙古医科大学药学院，内蒙古 呼和浩特　010110
3. 内蒙古医科大学民族医药创新中心，内蒙古 呼和浩特　010110
4. 内蒙古自治区高校蒙药重点实验室，内蒙古 呼和浩特　010110

摘　要：目的　针对传统“口尝微有麻舌感”评价草乌 *Aconiti Kusnezoffii Radix* 炮制终点的主观性和安全性问题，探究利用电子舌技术量化草乌炮制品麻舌感等级的可行性，建立基于味觉特征值的双酯型生物碱含量预测方法。**方法**　选取生草乌，按不同时间段炮制，制作不同麻舌感草乌样品，通过人工感官评价、电子舌味觉检测及 HPLC 法测定 6 种生物碱（双酯型生物碱及其单酯型衍生物）含量，结合多元统计分析方法，分析感官强度评分、生物碱含量与电子舌特征响应值的动态关联规律，建立基于电子舌特征响应值的草乌麻舌感等级评价和双酯型生物碱总量预测曲线方程。**结果**　随着炮制时间延长，麻舌感评分显著降低（r=−0.85，P<0.01），电子舌苦味值显著升高（r=0.96，P<0.01），新乌头碱、次乌头碱和乌头碱等双酯型生物碱含量逐步减少，苯甲酰新乌头原碱、苯甲酰乌头原碱和苯甲酰次乌头原碱等单酯型生物碱含量逐步增加；偏最小二乘法-判别分析（partial least squares-discriminant analysis，PLS-DA）结合单因素方差分析表明，苦味值（VIP 值>1，P<0.01）是电子舌区分不同麻舌感草乌的重要味觉指标。电子舌苦味值与麻舌感评分（r=−0.93，P<0.01）、双酯型生物碱总量（r=−0.78、P<0.01）均呈现显著相关性。电子舌苦味值（X）与麻舌感评分（Y）进行曲线拟合，得到了方程式为 Y=−3.123 0 ln$X$+5.915 4，R^2=0.937 3 的对数回归方程；电子舌苦味值（X）与双酯型生物碱总量（Y）进行曲线拟合，得到了方程式为 $Y=3.814\ 5\ e^{-0.760}X$，R^2=0.875 5 的指数回归方程，该方程预测结果良好。**结论**　电子舌苦味值可作为客观量化草乌炮制品麻舌感等级和预测双酯型生物碱含量的指标，为草乌炮制终点的判断提供了客观量化依据。

关键词：蒙药材；草乌；电子舌；麻舌感；生物碱；相关性分析；人工感官评价；多元统计分析；新乌头碱；次乌头碱；乌头碱；苯甲酰新乌头原碱；苯甲酰乌头原碱；苯甲酰次乌头原碱；偏最小二乘法-判别分析

中图分类号：R283.6　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**0253 - 2670(2025)17 - 6173 - 11

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2025.17.008

Evaluation of hemp tongue sensation grade and prediction of diester alkaloid content of processed products of *Aconiti Kusnezoffii Radix* based on electronic tongue bitterness value

Degejirihu[1], Wuniri[1], Arigun[1], Buren[2, 4], Wusiqinbilige[3, 4], Haiying[1], Baolechaolu[1, 3, 4]

1. Mongolian Medical College of Inner Mongolia Medical University, Hohhot 010110, China
2. Pharmaceutics College of Inner Mongolia Medical University, Hohhot 010110, China
3. National Medicine Innovation Center of Inner Mongolia Medical University, Hohhot 010110, China
4. Inner Mongolia Autonomous Region University Mongolian Medicine Key Laboratory, Hohhot 010110, China

Abstract: Objective　In view of the subjectivity and safety of the traditional “tasting slightly hemp tongue” to evaluate the end point of processing of Caowu (*Aconiti Kusnezoffii Radix*, AKR), the feasibility of using electronic tongue technology to quantify the grade of hemp tongue of processed products of AKR was explored, and a prediction method of diester alkaloid content based on taste characteristic value was established. **Methods**　AKR was selected and processed according to different time periods to make different

收稿日期：2025-04-14

基金项目：国家自然科学基金项目（82160790）；内蒙古医科大学中药学（蒙药学）“一流学科”研究生科研能力提升计划项目（MYX2023-R07）；蒙药药味理论现代研究科研创新团队（2024MYYLXK005）

作者简介：德格吉日呼（1999—），男，硕士研究生，研究方向为蒙药标准化研究。Tel: (0471)6653887　E-mail: 2215469166@qq.com

***通信作者：**包勒朝鲁（1976—），教授，硕士生导师，从事蒙药标准化研究工作。Tel: (0471)6653887　E-mail: 956613769@qq.com

samples of AKR. The contents of six alkaloids (diester alkaloids and their monoester derivatives) were determined by artificial sensory evaluation, electronic tongue taste detection and HPLC. Combined with multivariate statistical analysis method, the dynamic correlation between sensory intensity score, alkaloid content and electronic tongue characteristic response value was analyzed, and the evaluation of AKR's tongue feeling grade and the prediction curve equation of total diester alkaloids based on electronic tongue characteristic response value were established. **Results** With the prolongation of processing time, the score of Ma-tongue sensation decreased significantly ($r = -0.85$, $P < 0.01$), the bitterness value of electronic tongue increased significantly ($r = 0.96$, $P < 0.01$), the content of diester alkaloids such as mesaconitine, hypaconitine and aconitine decreased gradually, and the content of monoester alkaloids such as benzoylmesaconine, benzoylaconitine and benzoylhypaconine increased gradually. Partial least squares-discriminant analysis (PLS-DA) combined with one-way analysis of variance showed that the bitterness value (VIP value > 1, $P < 0.01$) was an important taste index for the electronic tongue to distinguish different numb-tongue sensation of AKR. The bitterness value of electronic tongue was significantly correlated with the score of numbness ($r = -0.93$, $P < 0.01$) and the total amount of diester alkaloids ($r = -0.78$, $P < 0.01$). The logarithmic regression equation of $Y = -3.123\ 0 \ln X + 5.915\ 4$, $R^2 = 0.937\ 3$ was obtained by fitting the bitterness value (X) of the electronic tongue with the numbness score (Y) curve. The exponential regression equation of $Y = 3.814\ 5\ e^{-0.760}\ X$, $R^2 = 0.875\ 5$ was obtained by fitting the electronic tongue bitterness value (X) with the total amount of diester alkaloids (Y), and the prediction result of the equation was good. **Conclusion** The bitterness value of electronic tongue can be used as an index to objectively quantify the level of numb-tongue sensation and predict the content of diester-type alkaloids in processed products of AKR, which provides an objective quantitative basis for judging the end point of processing of AKR.

Key words: Mongolian medicine; *Aconiti Kusnezoffii Radix*; electronic tongue; stingy tongue feeling; alkaloids; correlation analysis; artificial sensory evaluation; multivariate statistical analysis; mesaconitine; hypaconitine; aconitine; benzoylmesaconine; benzoylaconitine; benzoylaconitine; partial least squares-discriminant analysis

草乌（*Aconiti Kusnezoffii Radix*，AKR）为毛茛科乌头属植物北乌头 *Aconitum kusnezoffii* Reichb.的干燥块根。味辛，性温，效轻，有大毒，尝之有强烈的麻舌感[1]，为蒙医最常用的有毒药材。其主要成分为生物碱类，其中含新乌头碱（mesaconitine）、乌头碱（aconitine）、次乌头碱（hypaconitine）等剧毒的双酯类生物碱[2]。因此，蒙医常炮制后用药，并且以“口尝微有麻舌感”作为炮制终点[3]。草乌通过炮制，毒性大的双酯型生物碱水解成毒性较小的单酯型生物碱，麻舌感从强变为“微有”，毒性减弱至安全范围，从而确保临床用药安全。现代研究普遍认为，草乌的麻舌感与其所含的双酯型生物碱直接相关[4]，这类成分既是主要毒性物质，也是关键药效成分。目前，草乌麻舌感的评价仍然使用口尝的方法，这种方法虽然直接快速，但不仅存在较大的安全隐患，也存在主观性和判断误差大、生产操作性不强等缺点。如果能通过现代技术手段，将“口尝微有麻舌感”客观量化，并以之为基础建立相应的评价方法，对于实现炮制品质量的稳定可控具有重大意义。

近年来，电子舌技术凭借其稳定、快速、准确等优势[5-7]，在中药领域得到广泛应用。例如鉴别中药材的种类、产地、真假；评价中药材炮制程度、五味及药效物质基础、掩味效果、质量优劣等[8-12]。电子舌拥有可分辨酸、苦、涩、咸、甜、鲜等味的特异性传感器，并且对味觉的强弱可以直接赋值，从而达到对同一药材味觉差异的量化、可视化[13]。对于草乌麻味的量化表征，现有电子舌研究通过构建多元统计判别模型，在几何空间中引入差异度量化指标（如欧氏距离和方差距离），实现麻味强度等级的精准区分。然而，此方法只针对于草乌药材，未针对实际生产中应用的草乌炮制品开展可行性验证[14]。

有别于现有研究对浓度梯度差异的依赖，本研究基于规范化炮制工艺，按不同时间段炮制，制作不同麻舌感草乌样品，通过电子舌技术结合人工感官评价，分析炮制过程中麻舌感的动态变化规律。同时运用 HPLC 测定其 6 种生物碱含量变化情况，分析感官强度评分、生物碱含量与电子舌特征响应值的动态关联规律，探究利用电子舌技术评价草乌麻舌感等级的可行性并建立基于味觉特征值的双酯型生物碱含量预测方法。

1 仪器与材料

1.1 仪器

SA402B 型味觉分析系统，日本 INSENT 公司；U3000 型高效液相色谱仪，赛默飞世尔科技（中国）有限公司；Thermo Scientific Heraeus Fresco17 型离心机，德国贺利氏集团（香港）有限公司；PS-60AL

型超声波清洗机，深圳市雷德邦电子有限公司；BSA124S-CW 型电子天平，德国赛多利斯集团。

1.2 试药

草乌，购买于市场，经内蒙古医科大学民族医药创新中心包勒朝鲁教授鉴定，为毛茛科乌头属植物北乌头 *Aconitum kusnezoffii* Reichb.的干燥块根，其质量符合《中国药典》2020 年版一部“草乌”项下相关要求。

1.3 化学试剂

对照品苯甲酰新乌头原碱（benzoylmesaconine，BMA，批号 111775-202106）、苯甲酰次乌头原碱（benzoylhypaconitine，BHA，批号 111796-202207）、苯甲酰乌头原碱（benzoylaconine，BAC，批号 111794-202006）、新乌头碱（mesaconitine，MA，批号 110799-201608）、次乌头碱（hypaconitine，HA，批号 110798-202010）、乌头碱（aconitine，AC，批号 22091507），质量分数均≥99.9%，成都普菲德生物技术有限公司。

乙腈，批号 216058，色谱纯，赛默飞世尔科技（中国）有限公司；冰乙酸（批号 20180306）、酒石酸（批号 20240428）、氯化钾（批号 20190805），分析纯，天津永晟精细化工有限公司；四氢呋喃（批号 20240104，色谱纯）、醋酸乙酯（批号 20230718，分析纯）、异丙醇（批号 20200901，分析纯）、盐酸（批号 20230508，分析纯），天津市津东天正精细化学试剂厂；乙酰胺（批号 20201009）、氢氧化钾（批号 20211009），分析纯，天津市鑫铂特化工公司。

2 方法与结果

2.1 样品的制备

2.1.1 生草乌　草乌药材除去杂质，粉碎，过 3 号筛，备用。

2.1.2 制草乌　参照《中国药典》2020 年版一部制“草乌”项下炮制方法炮制。取生草乌，按同等大小平行分成 3 组，用水浸泡约 8 h 至内无干心，取出，加水煮 6 h，期间每 0.5 h 取出 1 次，共取出 12 次，晾至 6 成干后切薄片，干燥。每 0.5 h 取出的炮制品的形状，均达到内无白心的质量要求。以上样品分别粉碎，过 3 号筛，备用。

2.2 不同麻舌感草乌口尝评价

召集 10 名蒙药学专业人员（均通过预筛选确认对草乌麻舌感无强烈嗜好性及排斥感）进行口尝评价。以生草乌麻舌感为基准，根据炮制后麻舌感衰减程度，结合相关文献报道[15]，将草乌麻舌感程度分为强麻舌（分值为 10）、较强麻舌（5≤分值＜10）、中等麻舌（2≤分值＜5）、微麻舌（0.5≤分值＜2）、无麻舌（0≤分值＜0.5）共 5 个等级[4]。评价专家首先对草乌生品粉末进行口尝，确认其麻舌特征，评分为 10 分，随后基于生草乌麻舌感的麻舌特征，依次品尝不同时间炮制品，对其麻舌程度进行打分，最后根据打分情况，确定草乌不同时间炮制样品的麻舌感程度等级。

按固定用量（20±0.12）mg（过 3 号筛）进行口尝评价，评价专家在口尝前 4 h，不得抽烟饮酒，不得食用具有严重气味的食物。口尝前用纯净水漱口 5～6 次，口尝时将样品粉末置于舌前 1/3 处，在口中咀嚼 30 s 后吐出药粉，根据麻舌感属性的感知强度进行评分，最后用纯净水漱口 5～6 次[16]。待口中感觉恢复正常后方可进行下一次的口尝。

不同麻舌感草乌的口尝评分及评定等级结果见表 1。由表 1 可知，所有样品中，生草乌评分值为 10，评定为强麻舌；炮制 0.5 h 麻舌感评分值为 5.41～6.37，评定为较强麻舌；炮制 1.0～2.0 h 麻舌感评分值为 2.12～3.82，评定为中等麻舌；炮制 2.5～4.0 h 麻舌感评分值为 0.56～1.91，评定为微麻舌；炮制 4.5～6.0 h 麻舌感评分值为 0～0.16，评定为无麻舌。随着炮制时间的延长，麻舌感评分值逐渐下降，运用 SPSS 27.0 软件对炮制时间与麻舌感评分进行 Pearson 相关性分析，结果显示，炮制时间与麻舌感呈极显著负相关（r=−0.85，P＜0.01）。

表 1 不同麻舌感草乌口尝评价结果和等级评定范围（$\bar{x} \pm s$, n = 10）

Table 1 Evaluation results and grade evaluation range of different hemp tongue sensation ($\bar{x} \pm s$, n = 10)

炮制品	评分值	等级划分	取值范围
生草乌	10.00	强麻舌	10.00
炮制0.5 h	5.89±0.48	较强麻舌	5.41～6.37
炮制1.0 h	3.41±0.41	中等麻舌	2.12～3.82
炮制1.5 h	2.52±0.34	中等麻舌	
炮制2.0 h	2.40±0.28	中等麻舌	
炮制2.5 h	1.62±0.23	微麻舌	0.56～1.91
炮制3.0 h	1.66±0.25	微麻舌	
炮制3.5 h	0.94±0.20	微麻舌	
炮制4.0 h	0.74±0.18	微麻舌	
炮制4.5 h	0.07±0.09	无麻舌	0.00～0.16
炮制5.0 h	0.04±0.05	无麻舌	
炮制5.5 h	0.05±0.10	无麻舌	
炮制6.0 h	0.03±0.07	无麻舌	

2.3 不同麻舌感草乌电子舌检测

2.3.1 样品制备 取样品粉末 1 g，精密称定，置 250 mL 锥形瓶中，加入 100 mL 蒸馏水，充分浸润后超声提取 30 min，4 000 r/min（r＝8.6 cm）离心 10 min，纱布滤过，将滤液分装至电子舌专用烧杯（约每份 35 mL），26 ℃下进行测定。

2.3.2 参比溶液的制备 取酒石酸 45 mg 置于 900 mL 蒸馏水中溶解后，加入氯化钾 2.24 g 溶解，定容至 1 L 量瓶中，即得。

2.3.3 正极清洗液的制备 250 mL 蒸馏水中加入 3.73 g 氯化钾，溶解后加 150 mL 乙醇搅拌，再加入 0.28 g 氢氧化钾，充分溶解后，定容至 500 mL 量瓶中，即得。

2.3.4 负极清洗液的制备 250 mL 蒸馏水中加入 150 mL 乙醇搅拌，再加入 4.15 mL 盐酸，定容至 500 mL 量瓶中，即得。

2.3.5 测试方法 测试方法为 2 步清洗法。测试流程为①测定参比溶液的电势为基准电势，②测定样品电势，③用参比溶液清洗，④再次测定参比溶液电势测回味，⑤用正负极清洗溶液彻底清洗传感器，⑥自检（传感器 2 次输出结果小于 0.5 mV 时自检通过）。每份样品测试 4 次，取后 3 次数据，取平均值。

2.3.6 方法学考察

（**1**）精密度试验：取生草乌样品，按照“2.3.1”项下方法制备样品溶液，按照“2.3.5”项下测试方法上机测试 7 次，取后 6 次数据，计算各个传感器酸味、苦味、涩味、苦味-回味、涩味-回味、鲜味、丰富性、咸味输出值的 RSD 值，结果 RSD 分别为 1.24%、3.54%、5.40%、64.76%、7.96%、1.23%、4.60%、0.75%。

（**2**）稳定性试验：取生草乌样品，按照“2.3.1”项下方法制备样品溶液，按照“2.3.5”项下测试方法分别于制备后的 0、2、4、6、8、10 h 上机测试，计算各个传感器酸味、苦味、涩味、苦味-回味、涩味-回味、鲜味、丰富性、咸味输出值的 RSD 值，结果 RSD 分别为 1.25%、1.58%、7.44%、83.07%、15.90%、1.32%、4.42%、1.07%。

（**3**）重复性试验：取生草乌样品，按照“2.3.1”项下方法平行制备 6 份样品溶液，按照“2.3.5”项下测试方法上机测试，计算各个传感器酸味、苦味、涩味、苦味-回味、涩味-回味、鲜味、丰富性、咸味输出值的 RSD 值，结果 RSD 分别为 0.49%、3.57%、1.91%、53.98%、8.36%、0.24%、4.79%、0.53%。

综合分析以上试验结果，对于电子舌精密度和本实验方法的稳定性、重复性，除了苦味-回味、涩味-回味 2 个味觉值的 RSD≥10%外，其他各个味觉值的 RSD 均小于 10%。在定量感官评价中一般要求评价结果的 RSD 在 10%以内[17]，但由于苦味-回味、涩味-回味均属于难以准确测量的复杂味道，且所测得的数值极低。因此，认为在本实验设计范围之内，电子舌酸味、苦味、涩味、鲜味、咸味等常规味觉检测草乌药材，设备的精密度和方法的重复性、稳定性均较为良好。

2.3.7 不同麻舌感草乌味觉变化特征分析

（**1**）传感器响应值分析：取 3 批不同麻舌感草乌样品，按照“2.3.1”项下方法制备样品溶液，按照“2.3.5”项下测试方法进行检测，3 批样品传感器响应平均值如表 2 所示。本实验所有数据均是以人工唾液（参比溶液）为标准的绝对输出值[18]，电子舌测试的人工唾液是模拟人口腔中仅有唾液时的环境，人工唾液由氯化钾和酒石酸配制而成，基于此确定酸味的无味点为−13，咸味的无味点为−6，其余各指标无味点均为 0。以此作为评判基准，若样品的味觉值低于无味点，表明样品不具有该味道；若高于 tasteless，则表明样品含该味道。

此外，丰富性用以描述鲜味的回味情况。为了

表 2 不同麻舌感草乌电子舌响应值

Table 2 Response value of electronic tongue of AKR with different hemp tongue sensations

样品组别	电子舌响应值							
	酸味	苦味	涩味	苦味-回味	涩味-回味	鲜味	丰富性	咸味
无味点	−13.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	−6.00
生草乌	−20.25	2.31	−2.24	0.04	0.42	10.49	0.87	−6.65
炮制0.5 h	−23.28	1.28	−2.33	−0.01	0.28	10.70	0.69	−12.08
炮制1.0 h	−24.88	1.93	−1.92	0.11	0.31	10.73	0.62	−13.39
炮制1.5 h	−22.93	2.91	−1.57	0.25	0.32	10.19	0.65	−13.44
炮制2.0 h	−23.24	3.79	−2.06	0.30	0.34	10.39	0.60	−12.79
炮制2.5 h	−26.42	3.31	−1.86	0.08	0.33	10.74	0.53	−14.80
炮制3.0 h	−26.20	3.81	−1.87	0.08	0.30	10.55	0.47	−15.25
炮制3.5 h	−26.43	5.36	−1.51	0.24	0.18	10.66	0.40	−15.88
炮制4.0 h	−27.54	5.36	−1.70	0.17	0.18	10.76	0.37	−16.28
炮制4.5 h	−26.70	5.95	−1.45	0.25	0.16	10.72	0.39	−16.25
炮制5.0 h	−26.98	5.79	−1.62	0.19	0.13	10.74	0.38	−16.32
炮制5.5 h	−26.88	5.71	−1.71	0.07	0.13	10.78	0.37	−16.32
炮制6.0 h	−25.70	6.90	−1.81	0.46	0.33	10.92	0.48	−16.49

能直观反映草乌炮制过程中味觉指标的动态变化规律，通过折线图与相关性矩阵表展示不同麻舌感草乌各味觉值的变化趋势，结果见图 1 和表 3。可知，苦味值随着草乌炮制时间的延长而增加，呈极显著正相关（r=0.96，P<0.01）；咸味值随着草乌炮制时间的延长而减少，呈极显著负相关（r=−0.92，P<0.01）；丰富性随着草乌炮制时间的延长而减少，呈极显著负相关（r=−0.85，P<0.01）；酸味值随着草乌炮制时间的延长而减少，呈极显著负相关（r=−0.73，P<0.01）。

鲜味值和涩味值没有明显变化，苦味-回味、涩味-回味由于所测到的数值极低，变化不明显，且在折线图中高度重叠。综上可见，随着草乌炮制时间的延长，苦味、咸味、丰富性以及酸味指标变化显著，数据结果具有统计学意义。

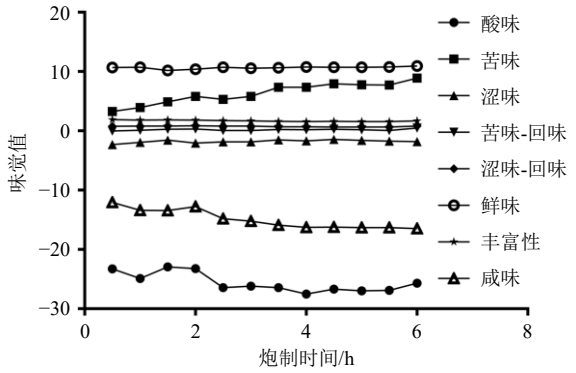


图 1　不同麻舌感草乌电子舌响应值折线图

Fig. 1　Line chart of response value of electronic tongue of AKR with different hemp tongue sensations

表 3　草乌炮制时间与各味觉指标的相关性矩阵

Table 3　Correlation matrix between processing time and taste indexes of AKR

指标	r	P值
炮制时间*vs*苦味	0.96	<0.001
炮制时间*vs*咸味	−0.92	<0.001
炮制时间*vs*丰富性	−0.85	<0.001
炮制时间*vs*酸味	−0.73	0.007
炮制时间*vs*涩味	0.57	0.055
炮制时间*vs*苦味-回味	0.45	0.141
炮制时间*vs*涩味-回味	−0.57	0.051
炮制时间*vs*鲜味	0.55	0.064

（2）味觉指标聚类分析：采用 Origin 2021 软件对不同麻舌感草乌电子舌味觉信息进行系统聚类分析，结果见图 2。由图 2 可知，炮制时间较短的 0.5～2.0 h 样品与炮制时间较长的 2.5～6.0 h 样品分别聚为一类，但第 3 批次的 1.0、1.5、2.0 h 样品

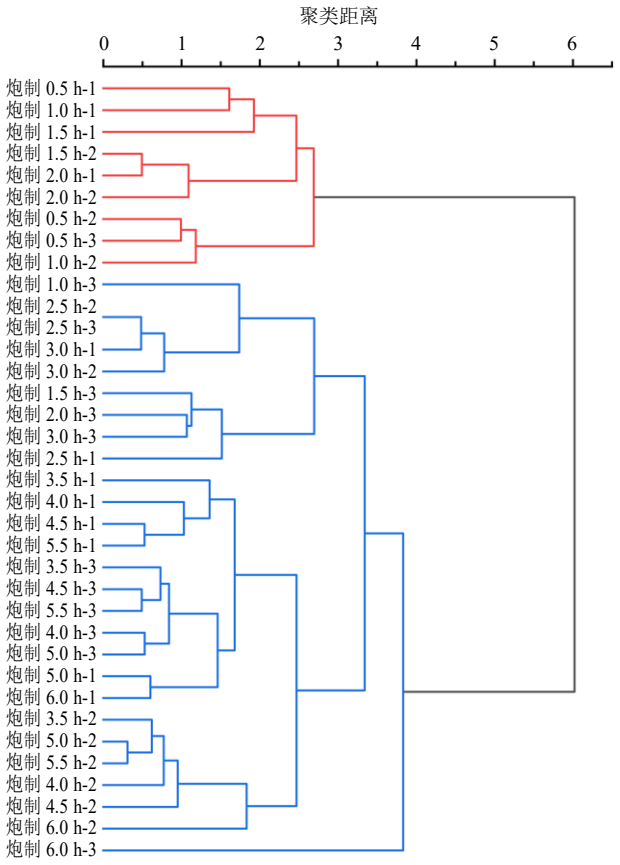


图 2　不同麻舌感草乌味觉信息系统聚类图

Fig. 2　Clustering diagram of taste information system of AKR with different hemp tongue sensations

异常归属于炮制时间较长组。此偏移可能由炮制过程中的工艺误差所致。总体而言，随着炮制时间的延长，滋味特征产生了较明显的变化，但越到后期滋味差异会逐渐减少。

（3）主成分分析（principal component analysis，PCA）：将生草乌及不同麻舌感草乌的电子舌味觉信息导入电子舌系统配备的 PCA 软件进行分析，得到 PCA 坐标数据后采用 Origin 2021 软件得到 PCA 得分图，观察各样本之间的总体分布情况，结果见图 3。PCA 得分图以分散点的形式表示样本之间的距离，如果距离越近，说明样本之间差异性越小，味道越相近；如果距离越远，说明样本之间差异性越大，味道越不相同。由图 3 可知，PC1 和 PC2 2 个主成分累积贡献率达到 94.49%，包含了全部测量指标所具有的主要信息。以强麻舌的生草乌为参比样，可以看出随着炮制时间的延长，各样品离参比样的距离越来越远。其中炮制 0.5 h 离参比样最近，其麻舌感也最强；其次是炮制 1.0～2.0 h，麻舌感稍弱；再次是炮制 2.5～3.0 h，麻舌感弱；最后是

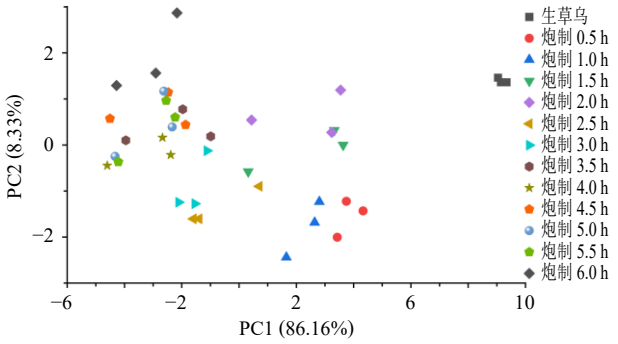


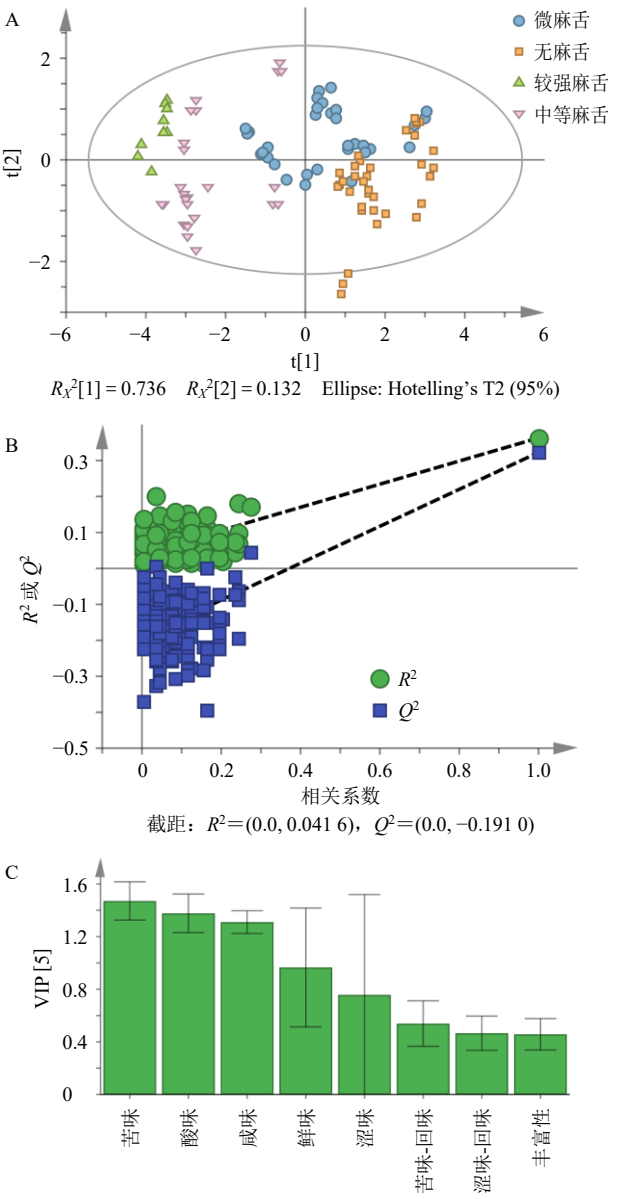
图 3　不同麻舌感草乌味觉信息 PCA 得分图

Fig. 3　PCA score plot of taste information of AKR with different hemp tongue sensations

炮制 3.5～6.0 h，麻舌感最弱或无。说明越靠近参比样其麻舌感越强，越远则麻舌感越弱，也表明了生草乌通过不同时间的炮制，麻舌感从强到无的过程中味觉发生了明显的变化，这种变化可能与其主要成分的变化有关。

（4）偏最小二乘法-判别分析（partial least squares-discriminant analysis，PLS-DA）：将不同麻舌感草乌的电子舌味觉信息以口尝评价等级分组输入 SIMCA 14.1 软件中进行 PLS-DA，得到味觉 PLS-DA 得分图、经过 200 次置换检验图和变量重要性投影（variable importance in projection，VIP）值，结果见图 4。由图 4-A 可知，较强麻舌草乌与中等麻舌、微麻舌、无麻舌草乌均已明显区分开，中等麻舌与微麻舌、微麻舌与无麻舌草乌之间有部分重叠，这可能是草乌炮制时间间隔短、各批次之间炮制工艺误差大，口尝评价具有主观性等原因导致；由图 4-B 可知，经过 200 次置换检验，Q^2 回归线在 y 轴的截距为负值，说明模型可靠，未出现过拟合现象；由图 4-C 可知，苦味、酸味、咸味 3 种味觉值 VIP 值大于 1，因此可认为苦味、酸味、咸味是区分不同麻舌感草乌的差异性味觉。

（5）单因素方差分析：为进一步验证苦味、酸味、咸味是区分不同麻舌感草乌的重要味觉指标，采用 SPSS 27.0 软件分别对 4 种不同麻舌感组别苦味、酸味、咸味进行单因素方差分析，结果见表 4。由表 4 可知，在苦味中较强麻舌组、中等麻舌组、微麻舌组和无麻舌组 4 组样本之间均有极显著差异（$P<0.01$）；在酸味中较强麻舌组与中等麻舌组、微麻舌组与无麻舌组之间并无显著差异，其余各组之间均有极显著差异（$P<0.01$）；在咸味中较强麻舌组、中等麻舌组、微麻舌组和无麻舌组 4 组样本之间均有极显著差异（$P<0.01$）。



A-得分图；B-置换检验图；C-VIP 得分图。

A-score chart; B-permutation test chart; B-VIP score chart.

图 4　不同麻舌感草乌味觉信息 PLS-DA 图

Fig. 4　PLS-DA diagram of taste information of AKR with different hemp tongue sensations

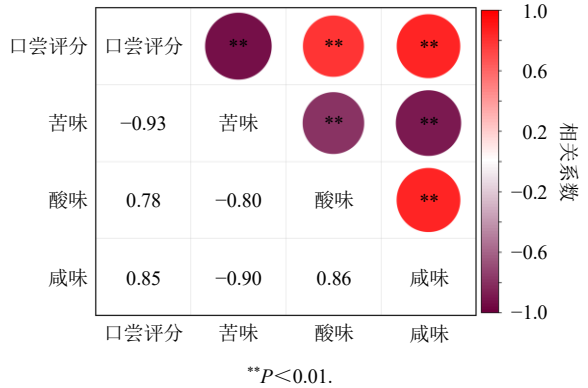
表 4　单因素方差分析结果

Table 4　Results of one-way analysis of variance

样品配对	苦味		酸味		咸味	
	*P*值	显著性	*P*值	显著性	*P*值	显著性
较强麻舌*vs*中等麻舌	<0.001	极显著	0.400		0.002	极显著
较强麻舌*vs*微麻舌	<0.001	极显著	<0.001	极显著	<0.001	极显著
较强麻舌*vs*无麻舌	<0.001	极显著	<0.001	极显著	<0.001	极显著
中等麻舌*vs*微麻舌	<0.001	极显著	<0.001	极显著	<0.001	极显著
中等麻舌*vs*无麻舌	<0.001	极显著	<0.001	极显著	<0.001	极显著
微麻舌*vs*无麻舌	<0.001	极显著	0.778		<0.001	极显著

2.4 口尝评分与味觉指标相关性分析

口尝评分和电子舌响应值能作为区分不同麻舌感草乌的重要指标，那么两者之间必有共性。为了验证口尝评分与电子舌响应值之间的关系，采用 Origin 2021 软件将口尝评分与（VIP＞1）筛选出来的苦、酸、咸味觉值进行皮尔逊相关性分析（Pearson correlation analysis），结果见图 5。由图 5 可知，口尝评分与苦味值呈极显著负相关（r＝−0.93，P＜0.01），口尝评分与咸味值有极显著正相关（r＝0.85，P＜0.01），口尝评分与酸味值有极显著正相关（r＝0.78，P＜0.01）。



$^{**}P$＜0.01.

图 5 不同麻舌感草乌口尝评分与味觉值相关性热图

Fig. 5 Heat map of correlation between taste score and taste value of AKR with different hemp tongue sensations

口尝评价是区分不同麻舌感草乌的有效手段，但其有经验性较强、结果随机性大，重复性差等缺陷。同样，电子舌味觉信息 PLS-DA 多元统计判别方法也是区分不同麻舌感草乌的手段，弥补了口尝评价的缺陷，但需要以口尝评价结果为前提。基于差异性味觉指标与口尝评分的相关性分析，筛选出与口尝评分相关系数最大的苦味值。以苦味值作为横轴，口尝评分作为纵轴，进行曲线拟合。拟合得到方程式为 Y＝−3.123 0 ln$X$＋5.915 4，判别系数为 R^2＝0.937 3 的相关性对数曲线，结果如图 6 所示。根据口尝评定结果计算得到苦味值在 0.86～1.18 时对应的草乌麻舌感评定等级为较强麻舌；苦味值在 1.96～3.37 时对应的草乌麻舌感评定等级为中等麻舌；苦味值在 3.61～5.56 时对应的草乌麻舌感评定等级为微麻舌；苦味值在≥6.31 时对应的草乌麻舌感为无麻舌。

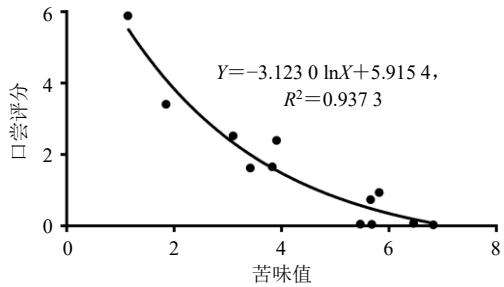


图 6 苦味值与口尝评分的规律曲线

Fig. 6 Regular curve of bitterness value and taste score

2.5 不同麻舌感草乌主要成分分析

2.5.1 色谱条件 色谱柱为 Waters Extend-C_{18} 柱（250 mm×4.6 mm，5 μm）；以乙腈-四氢呋喃（25∶15）为流动相 A，以 0.1 mol/L 醋酸铵水溶液为流动相 B；梯度洗脱：0～45 min，13%～18% A；45～85 min，18%～24% A；检测波长为 235 nm；柱温为 30 ℃；体积流量为 1.0 mL/min；进样量 10 μL。

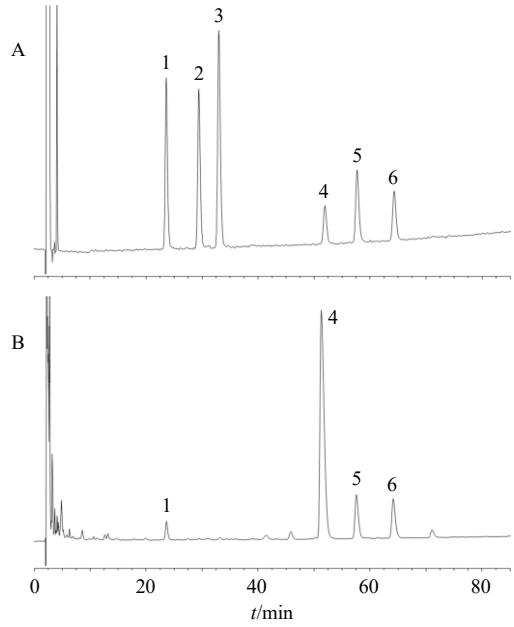
2.5.2 对照品溶液的制备 取苯甲酰新乌头原碱、苯甲酰乌头原碱、苯甲酰次乌头原碱、新乌头碱、次乌头碱、乌头碱对照品适量，加入 10%盐酸水溶液，定容至 2 mL，摇匀，分别制备成质量浓度为 1.145、1.475、0.850、2.320、1.090、0.560 mg/mL 对照品溶液。

2.5.3 供试品溶液的制备 取样品约 0.5 g，精密称定，置具塞锥形瓶中，加氨试液 0.75 mL，精密加入异丙醇-醋酸乙酯混合溶液（1∶1）12.5 mL，称定质量，超声处理（功率 300 W、频率 40 kHz，水温在 25 ℃以下）30 min，放冷，再称定质量，用异丙醇-醋酸乙酯（1∶1）补足减失的质量，摇匀，滤过。精密量取续滤液 6.25 mL，40 ℃以下减压回收溶剂至干，残渣精密加入 10%盐酸水 1.5 mL 溶解，滤过，取续滤液，即得供试品溶液。

2.5.4 方法学考察

（1）专属性试验：取“2.5.2”项下各个对照品溶液适量，定容至 2 mL，摇匀，制备成混合对照品溶液。取生草乌样品，按照“2.5.3”项下方法制备供试品溶液。按照“2.5.1”项下色谱条件，分别测定供试品溶液和对照品溶液，记录色谱图，结果如图 7 所示。供试品溶液中的苯甲酰新乌头原碱、新乌头碱、次乌头碱和乌头碱均能达到基线分离，其他杂质峰不干扰待测成分的测定，且与对照品溶液在相同保留时间上均出了良好的色谱峰，表明专属性良好。

（2）线性关系考察：取“2.5.2”项下各个对照品溶液适量，依次稀释后注入高效液相色谱仪，按照“2.5.1”项下色谱条件进行检测，记录色谱峰面积。以对照品稀释质量浓度为横坐标（X），色谱峰面积为纵坐标（Y），绘制标准曲线，进行线性回归，



1-苯甲酰新乌头原碱；2-苯甲酰乌头原碱；3-苯甲酰次乌头原碱；4-新乌头碱；5-次乌头碱；6-乌头碱。

1-benzoylmesaconine; 2-benzoylaconine; 3-benzoylhypaconine; 4-mesaconitine; 5-hypaconitine; 6-aconitine.

图 7　混合对照品 (A) 和生草乌样品 (B) 的 HPLC 图

Fig.7　HPLC of mixed reference substances (A) and AKR sample (B)

得回归方程分别为苯甲酰新乌头原碱 Y＝138.05 X＋0.349 2，R^2＝0.999 9，线性范围 11.4～1 145.0 μg/mL；苯甲酰乌头原碱 Y＝138.47 X＋0.080 7，R^2＝0.999 7，线性范围 2.9～147.5 μg/mL；苯甲酰次乌头原碱 Y＝125.10 X＋0.238 9，R^2＝0.999 6，线性范围 4.2～85.0 μg/mL；新乌头碱 Y＝129.63 X＋0.444 0，R^2＝0.999 9，线性范围 5.8～2 320.0 μg/mL；次乌头碱 Y＝116.38 X＋0.041 2，R^2＝0.999 9，线性范围 5.4～545.0 μg/mL；乌头碱 Y＝123.37 X－0.226 0，R^2＝0.999 5，线性范围 5.6～560.0 μg/mL。可知，苯甲酰新乌头原碱、苯甲酰乌头原碱、苯甲酰次乌头原碱、新乌头碱、次乌头碱、乌头碱线性关系良好，在相应的范围之内呈现良好的线性关系。

（3）精密度试验：取“2.5.2”项下各个对照品溶液适量，定容至 2 mL，摇匀，制备成混合对照品溶液。按照“2.5.1”项下色谱条件进样检测，连续进样 6 次，记录 6 种生物碱苯甲酰新乌头原碱、苯甲酰乌头原碱、苯甲酰次乌头原碱、新乌头碱、次乌头碱、乌头碱的色谱峰面积，计算其 RSD 分别为 0.64%、0.93%、1.02%、0.38%、1.05%、0.64%，结果表明该仪器精密度良好。

（4）稳定性试验：取生草乌样品，按照“2.5.3”项下方法制备供试品溶液，按照“2.5.1”项下色谱条件分别于制备后的 0、3、6、9、12、16 h 进样检测，记录 6 种生物碱苯甲酰新乌头原碱、苯甲酰乌头原碱、苯甲酰次乌头原碱、新乌头碱、次乌头碱、乌头碱的色谱峰面积，计算其 RSD 分别为 2.87%、3.19%、3.28%、0.64%、0.90%、0.57%，结果表明供试品溶液在 16 h 内稳定性良好。

（5）重复性试验：取生草乌样品，按照“2.5.3”项下方法平行制备 6 份供试品溶液，按照“2.5.1”项下色谱条件进样检测，记录 6 种生物碱苯甲酰新乌头原碱、苯甲酰乌头原碱、苯甲酰次乌头原碱、新乌头碱、次乌头碱、乌头碱的色谱峰面积，计算其质量分数的 RSD 分别为 2.23%、5.24%、4.97%、1.09%、1.67%、1.72%，结果表明此方法重复性良好。

（6）加样回收率试验：精密称取已测知 6 种生物碱含量的生草乌样品 0.25 g，按照“2.5.3”项下方法平行制备 12 份供试品溶液，6 份加入“2.5.2”项下的苯甲酰新乌头原碱、苯甲酰乌头原碱、苯甲酰次乌头原碱对照品溶液适量，另外 6 份加入“2.5.2”项下的新乌头碱、次乌头碱、乌头碱对照品溶液适量。按照“2.5.1”项下色谱条件分别进样，记录色谱峰面积，计算平均回收率和 RSD 值，结果苯甲酰新乌头原碱、苯甲酰乌头原碱、苯甲酰次乌头原碱、新乌头碱、次乌头碱、乌头碱的平均加样回收率分别为 102.44%、104.79%、105.22%、98.91%、99.32%、101.47%，RSD 分别为 1.92%、3.93%、4.10%、1.41%、1.29%、1.38%，表明该方法回收率良好。

2.5.5　含量测定　取 3 批不同麻舌感草乌样品，按照“2.5.3”项下方法制备供试品溶液，按照“2.5.1”项下色谱条件进行检测，分别记录各个样品中单酯型生物碱（苯甲酰新乌头原碱、苯甲酰乌头原碱、苯甲酰次乌头原碱）和双酯型生物碱（新乌头碱、次乌头碱、乌头碱）色谱峰面积，并计算其质量分数。3 批不同麻舌感草乌样品 6 种生物碱质量分数平均值如表 5 所示。新乌头碱在炮制至 0～1.0 h 时，质量分数随着炮制时间的延长而下降迅速，至 3.0 h 时质量分数为 0 mg/g；次乌头碱与乌头碱质量分数变化趋势一致，随着炮制时间的延长而下降缓慢，分别至 5.0、2.5 h 时质量分数为 0 mg/g；苯甲酰新乌头原碱在炮制至 0～1.5 h 时，质量分数随炮制时间的延长而上升迅速，而后上升速度变缓，至 3.0 h 达到最高点，之后逐渐下降，呈现出动态平衡；苯

表 5 不同麻舌感草乌 6 种生物碱含量

Table 5 Contents of six alkaloids in different hemp tongue sensations AKR

炮制程度	质量分数/(mg·g^{-1})								炮制程度	质量分数/(mg·g^{-1})							
	BMA	BAC	BHA	单酯型生物碱总量	MA	HA	AC	双酯型生物碱总量		BMA	BAC	BHA	单酯型生物碱总量	MA	HA	AC	双酯型生物碱总量
生草乌	0.429	0.055	0.064	0.548	5.035	1.027	0.734	6.796	炮制3.5 h	2.403	0.272	0.163	2.838	0	0.089	0	0.087
炮制0.5 h	1.072	0.086	0.061	1.219	1.342	0.669	0.256	2.242	炮制4.0 h	2.535	0.309	0.179	3.022	0	0.063	0	0.063
炮制1.0 h	2.012	0.180	0.077	2.269	0.418	0.444	0.122	0.977	炮制4.5 h	2.362	0.258	0.184	2.805	0	0.043	0	0.043
炮制1.5 h	2.684	0.215	0.131	3.030	0.156	0.346	0.048	0.552	炮制5.0 h	2.457	0.285	0.189	2.931	0	0.026	0	0.025
炮制2.0 h	2.579	0.260	0.126	2.964	0.032	0.205	0.025	0.262	炮制5.5 h	2.334	0.261	0.236	2.831	0	0	0	0
炮制2.5 h	2.921	0.309	0.187	3.416	0.003	0.135	0	0.140	炮制6.0 h	2.502	0.294	0.212	3.008	0	0	0	0
炮制3.0 h	3.172	0.315	0.234	3.721	0.001	0.157	0	0.158									

甲酰乌头原碱与苯甲酰次乌头原碱含量变化趋势一致，随着炮制时间的延长而上升缓慢，至 3.0 h 之后呈现出动态平衡。说明双酯型生物碱在炮制前中期均受热水解成毒性更小的单酯性生物碱：苯甲酰新乌头原碱在高温炮制条件下超过 3.0 h 后可能因过度受热发生二次水解，其酯键进一步断裂生成醇胺型生物碱及苯甲酸[19]，导致含量下降；而随着炮制后期热能分布趋于稳定，水解反应达到动态平衡。其余单酯型生物碱因结构稳定性较高，分解速率较低，故在炮制后期维持相对稳定。

2.5.6 有效成分含量聚类分析 采用 Origin 2021 软件对不同麻舌感草乌 6 种生物碱含量进行系统聚类分析，结果见图 8。由图 8 可知，炮制 0.5 h 草乌单独为一类；炮制 1.0 h 草乌单独为一类；炮制 1.5～6.0 h 草乌聚为一类。说明炮制前期含量变化明显，差异较大，但越到后期含量差异会逐渐减小。这一结果与电子舌味觉特征的变化较为一致，说明滋味与含量之间存在一定的相关性。

2.6 成分含量与味觉值相关性分析

为进一步分析不同麻舌感草乌味觉指标与含量之间的相关性，采用 Origin 2021 软件将双酯型生物碱总量（total diester alkaloids，TDA）和单酯型生物碱总量（total monoester alkaloids，TMA）与（VIP＞1）筛选出来的苦、酸、咸味觉值进行皮尔逊相关性分析，结果如图 9 所示。由图 9 可知，苦味值与双酯型生物碱总量呈极显著负相关（r＝−0.78、P＜0.01），与单酯型生物碱总量呈极显著正相关（r＝0.54，P＜0.01）；酸味值与双酯型生物碱总量呈极显著正相关（r＝0.54、P＜0.01），与单酯型生物碱总量呈显著负相关（r＝−0.36、P＜0.05）；咸味值与双酯型生物碱总量呈极显著正相关（r＝0.70、P＜0.01），与单酯型生物碱总量呈极显著负相关（r＝−0.52、P＜0.01）。

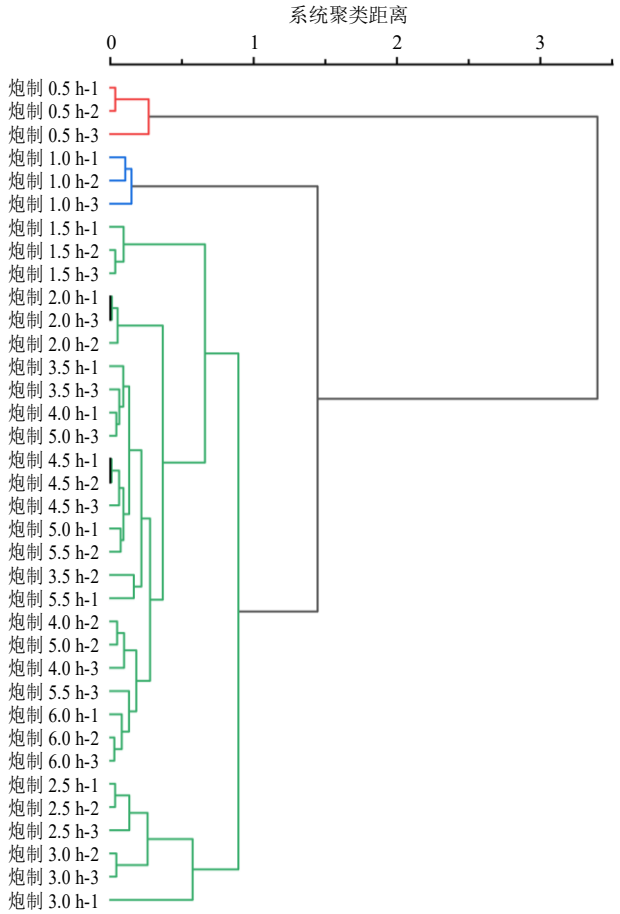
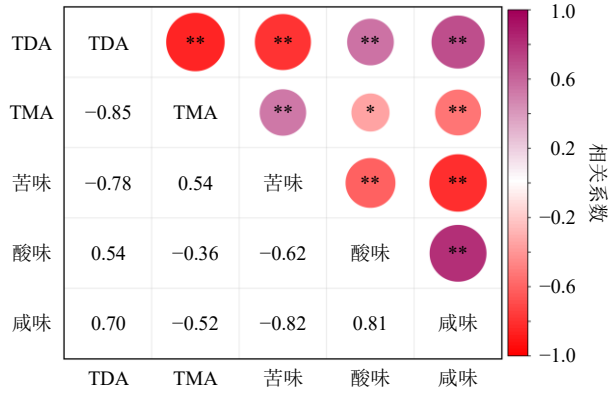


图 8 不同麻舌感草乌成分含量系统聚类图

Fig. 8 System clustering diagram of component content of AKR with different hemp tongue sensations

综上，双酯型生物碱和单酯型生物碱均与苦味、酸味、咸味有关联，表明味觉值与成分含量之间在相互影响。其中，双酯型生物碱总量与苦味值相关系数最高，故以苦味值作为横轴，双酯型生物

碱总量作为纵轴，拟合得到方程式为 $Y=3.814\ 5\ e^{-0.76}X$，判别系数为 $R^2=0.875\ 5$ 的相关性指数曲线，如图 10 所示。



$^{*}P<0.05$ $^{**}P<0.01$.

图 9　不同麻舌感草乌成分含量与味觉值相关性热图

Fig. 9　Heat map of correlation between component contents and taste value of AKR with different hemp tongue sensations

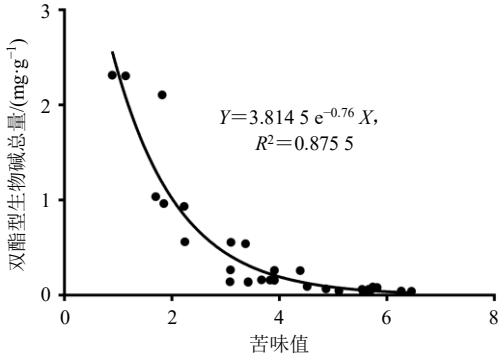


图 10　苦味值与双酯型生物碱总量的规律曲线

Fig. 10　Regular curve of bitterness value and total amount of diester alkaloids

2.7　相关性曲线预测能力验证

取 X1、X2、X3、X4 4 个未知样品，检测其苦味值，根据苦味值与双酯型生物碱总量预测规律曲线 $Y=3.814\ 5\ e^{-0.76}X$，计算得到未知样品的双酯型生物碱总量，定义为预测值。同时检测未知样品的双酯型生物碱总量，重复检测 3 次，定义为真实值，计算预测值与真实值的相对标准偏差，结果见表 6。由表 6 可知，真实值和预测值之间相对标准偏差均小于 10%，符合感官评价要求[17]。表明该曲线能够很好的预测双酯型生物碱总量。

3　讨论

近年来，通过多元统计分析方法对电子舌非基本滋味（辛味、麻味）的量化表征研究逐渐增多，例如杨露萍等[20]通过电子舌技术结合 PCA，引入差

表 6　双酯型生物碱总量的预测结果

Table 6　Prediction results of total amount of diester alkaloids

样品	苦味值	真实值/(mg·g^{-1})			预测值/(mg·g^{-1})	RSD/%
		1	2	3		
X1	1.59	1.037	1.022	1.034	1.139	5.16
X2	3.19	0.279	0.284	0.286	0.338	9.28
X3	3.93	0.168	0.159	0.164	0.192	8.70
X4	5.12	0.069	0.071	0.066	0.078	7.12

异度指标，揭示了川芎挥发油中丁烯苯酞、藁本内酯和洋川芎内酯 A 为其辛味核心物质基础，明确了传感器响应与化学成分的“谱味”关联规律；毕胜等[21]利用电子舌技术结合线性判别分析和皮尔逊相关性分析，证实制川乌炮制过程中电子舌响应与苯甲酰新乌头原碱、苯甲酰乌头原碱、单酯型生物碱总量显著相关，证明了仿生技术用于中药炮制质量控制的可行性；包丽媛等[14]基于电子舌技术，对生草乌的麻味浓度进行定量表征，通过多元线性回归模型建立生草乌麻舌感与双酯型生物碱含量的定量关系，验证了电子舌替代传统感官评价的可行性。本研究在此基础上，结合多元统计分析方法将草乌麻舌感、有效成分与特定传感器进行关联，通过替代性味觉指标间接反映毒性成分变化，为实现感官评价从主观经验到客观量化的突破提供了参考依据。

药物的味道大多是由其所含化学成分引起的，不同物质的味道与其分子结构形式有关[22]。草乌主含生物碱，双酯型生物碱是其有效成分，也是主要毒性成分，经炮制受热水解成毒性更小的单酯型生物碱。而单酯型生物碱在一定条件下会进一步水解成醇胺型生物碱及苯甲酸。不论生物碱本身，还是其盐类，多具苦味，有的味极苦而辛辣，还有的刺激唇舌的灼烧感[23]。双酯型生物碱由于极性最小，在水中溶解度较低，对应的苦味值也较低；单酯型生物碱极性高于双酯型生物碱，其在水中溶解度及苦味值均高于双酯型生物碱；醇胺型生物碱极性最大，在水中溶解度最高，苦味值也最大。这一规律阐明了草乌随着炮制时间的延长，苦味值逐渐增加的内在机制。

本研究通过整合传统感官评价、电子舌技术及 HPLC 分析，系统揭示了草乌炮制过程中麻舌感、电子舌响应特征、生物碱成分的动态关联规律，证实了电子舌苦味值与口尝麻舌感评分及双酯型生

物碱含量的显著相关性，并建立了基于苦味值的麻舌感等级评价及双酯型生物碱含量预测回归曲线，为草乌炮制终点的客观量化提供了新思路。

电子舌虽然能够量化味觉信息，但与人体实际的味觉感知存在差异，并且“麻舌感”是舌头接触某些特定的物质时所产生的味觉感应，是一种综合味觉[24]。在对麻舌等特殊味觉及复合味的感知和表达上，与人体真实感受仍有差距。本研究中，尽管电子舌苦味值与麻舌感评分及双酯型生物碱含量呈现显著相关性，但其本质是一种间接关联，无法完全复现人体口腔环境中多成分的协同作用。此外，草乌水提液可能含有多种水溶性成分，如小分子量多糖、有机酸等，可能掩盖生物碱的味觉信号，导致苦味值与双酯型生物碱的相关系数低于理论预期。因此，本研究将电子舌苦味传感器作为草乌炮制程度的辅助评价指标，旨在为“口尝微有麻舌感”这一传统经验判断提供客观量化补充，而非完全代替“口尝麻舌感”评价，后期需将电子舌技术与其他先进技术融合，如结合电子鼻从嗅觉层面获取草乌信息，与质谱、核磁共振等技术联用，对数据进行特征级融合，建立更为全面的代替“口尝麻舌感”的评价方法。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

[1] 国家中医药管理局《中华本草》编委会. 中华本草. 蒙药卷 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2004: 276.

[2] 乌尼日, 包勒朝鲁. 草乌化学成分、药理作用、毒性及蒙医学毒性控制方法概述 [J]. 中医药导报, 2024, 30(1): 93-99.

[3] 乌兰图雅, 包勒朝鲁. 口尝麻舌感在蒙药炮制中的应用及问题 [J]. 中医药导报, 2020, 26(13): 77-79.

[4] 乌尼日. 基于麻舌感的蒙药材草乌物质基础、量-效-毒关系研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古医科大学, 2024.

[5] Podrażka M, Bączyńska E, Kundys M, *et al*. Electronic tongue-a tool for all tastes? [J]. *Biosensors*, 2017, 8(1): 3.

[6] Wasilewski T, Migoń D, Gębicki J, *et al*. Critical review of electronic nose and tongue instruments prospects in pharmaceutical analysis [J]. *Anal Chim Acta*, 2019, 1077: 14-29.

[7] Imam M, Nagpal K. The electronic tongue: An advanced taste-sensing multichannel sensory tool with global selectivity for application in the pharmaceutical and food industry [J]. *Pharm Dev Technol*, 2023, 28(3/4): 318-332.

[8] 倪诗婷, 杨天歌, 高旭华, 等. ASTREE II 电子舌在不同头数三七分类识别中的应用 [J]. 北京中医药, 2022, 41(10): 1164-1167.

[9] 陈栋杰, 郭盛, 卢有媛, 等. 基于电子舌技术的不同产地枸杞子鉴别研究 [J]. 南京中医药大学学报, 2020, 36(5): 615-622.

[10] 张慧杰, 张璐, 冯文豪, 等. 电子舌用于川贝母真伪及商品规格快速辨识研究 [J]. 中成药, 2021, 43(6): 1531-1537.

[11] 曲珍妮, 吕畅, 毕钰, 等. 基于电子仿生感官技术的山楂不同炮制品颜色、味道变化研究 [J]. 中草药, 2024, 55(20): 6929-6939.

[12] 阿丽娅·阿卜杜热依木, 李潮, 魏娜, 等. 基于滋味-成分关联分析探究桔梗苦味物质基础 [J]. 时珍国医国药, 2024, 35(7): 1767-1772.

[13] Wu X, Tahara Y, Yatabe R, *et al*. Taste sensor: Electronic tongue with lipid membranes [J]. *Anal Sci*, 2020, 36(2): 147-159.

[14] 包丽媛, 刘芳, 唐雅楠, 等. 利用电子舌对草乌进行麻味评价及其双酯型生物碱定量预测 [J]. 中华中医药杂志, 2023, 38(7): 3049-3053.

[15] 李欣欣, 张凯, 王丽霞, 等. 基于口尝和电子舌技术探讨味道检测在黑顺片质量评价中的实用价值 [J]. 中国现代中药, 2021, 23(3): 506-511.

[16] 松林. 蒙药学概论 [M]. 呼和浩特: 内蒙古教育出版社, 2012: 8.

[17] GB/T 39501-2020 感官分析-定量响应标度使用导则 [S]. 北京: 中华人民共和国国家市场监督管理局, 中国国家标准化管理委员会, 2020.

[18] 侯亚星, 月英, 敖民, 等. 基于电子舌技术的泡囊草炮制前后味觉比较 [J]. 亚太传统医药, 2022, 18(9): 73-79.

[19] 龚又明, 邓广海, 郑显辉, 等. 生附子煎煮过程中生物碱含量变化及水解机理 [J]. 中国药业, 2017, 26(4): 9-15.

[20] 杨露萍, 倪妮, 洪燕龙, 等. 基于电子舌表征和化学成分的“谱味”相关性探究川芎辛味物质基础 [J]. 中成药, 2021, 43(7): 1805-1811.

[21] 毕胜, 谢若男, 金传山, 等. 基于仿生技术的制川乌炮制过程变化研究 [J]. 中草药, 2020, 51(23): 5956-5962.

[22] 徐晓晓, 白红洁, 毕钰, 等. 味觉受体与中药五味理论的现代研究进展 [J]. 中国实验方剂学杂志, 2025, 31(12): 322-330.

[23] 邵黎雄, 陆建梅, 姜雪峰. 味觉化学之酸味化学 [J]. 化学教育: 中英文, 2020, 41(13): 1-5.

[24] 徐丹萍, 蒲彪, 叶萌, 等. 花椒中麻味物质的呈味机理及制备方法研究进展 [J]. 食品科学, 2018, 39(13): 304-309.

[责任编辑 郑礼胜]