DOI:10.12441/spyswjs.20250620001 [文章编号] 1673-1689(2026)05-0094-10

沙棘果渣主要活性组分表征与标志物筛选

王文文[1] 梁新颖[1] 王晓雪[1] 王 雪[1] 邢国良[2] 吕兆林[1,3*]

(1. 北京林业大学生物科学与技术学院,北京 100083; 2. 内蒙古宇航人生物工程技术有限公司,内蒙古 呼和浩特 010010; 3. 林业食品加工与安全北京市重点实验室,北京 100083)

摘要:【目的】分析大果、小果沙棘(*Hippophae rhamnoides* L.)果渣的活性组分,明确其营养利用价值。【方法】以不同果型的沙棘果渣为研究对象,采用气相色谱、液相色谱、电感耦合等离子体质谱等检测技术,对果渣中黄酮、多酚、维生素C、维生素E、氨基酸、矿质元素等主要活性组分进行检测。运用聚类热图、正交偏最小二乘判别分析(OPLS-DA)和PCA对44项营养组分及活性成分进行系统分析。【结果】大果、小果沙棘果渣中均富含黄酮、多酚物质。相较于小果沙棘果渣,大果沙棘果渣中的维生素E和β-胡萝卜素质量分数更高。2种果渣样品中均检测出17种氨基酸(包含7种必需氨基酸和10种非必需氨基酸),同时检测出7种人体必需微量元素和4种常量元素。大果沙棘果渣中检测出11种脂肪酸,小果沙棘果渣中检测出10种脂肪酸。此外,部分氨基酸(如天冬氨酸、亮氨酸等)、部分脂肪酸(如亚油酸、芥酸等)、黄酮、多酚及K、Fe等矿质元素可作为区分大果、小果沙棘果渣的特征标志物。【结论】沙棘果渣富含多种活性组分,能够以食品添加剂等形式应用于食品或保健品等领域。该研究结果可为沙棘果渣深加工与资源化利用提供理论参考。

关键词:沙棘果渣;活性组分;标志物

Characterization of the Main Active Components and Screening of Marker Components in Sea Buckthorn Pomace

WANG Wenwen[1] *LIANG Xinying*[1] *WANG Xiaoxue*[1] *WANG Xue*[1] *XING Guoliang*[2] *LYU Zhaolin*[1,3*]

(1. School of Biological Sciences and Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Inner Mongolia Yuhangren Bioengineering Technology Co., Ltd., Hohhot 010010, China; 3. Beijing Key Laboratory of Forestry Food Processing and Safety, Beijing 100083, China)

Abstract: [**Objective**] This study comprehensively analyzed the bioactive components in the pomace of large-fruited and small-fruited sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.), aiming to determine their nutritional utilization value. [**Method**] The pomace samples of different fruit types of sea buckthorn were selected as the research objects. Detection methods such as gas chromatography, liquid chromatography, and inductively coupled plasma-mass spectrometry were employed to identify the main bioactive components including total flavonoids, total polyphenols, vitamin C, vitamin E, amino acids, and mineral elements in the pomace. Cluster heatmap analysis, orthogonal partial least squares-discriminant analysis (OPLS-DA), and principal component analysis (PCA) were performed to comprehensively analysis 44 nutritional and bioactive components. [**Result**] The pomace samples of both large-fruited and small-fruited sea buckthorn were rich in flavonoids and polyphenols. The mass fractions of vitamin E and β-carotene in the pomace of large-fruited sea buckthorn were higher than those in the pomace of small-fruited sea buckthorn. Seventeen amino acids, including 7 essential amino acids and

基金项目:横向科研合作项目(2016hxfwswxy011)。

通信作者:吕兆林(1971—),女,博士,教授,博士研究生导师,主要从事林源活性物质提取与功能性食品开发研究。E-mail: zhaolinlv@bjfu.edu.cn

收稿日期:2025-06-20 **修回日期:**2025-08-01

10 non-essential amino acids, were detected in both pomace samples. Seven trace elements and four major elements essential for the human body were detected, and 11 and 10 fatty acids were detected in the pomace of large-fruited and small-fruited sea buckthorn, respectively. In addition, some amino acids (such as aspartic acid and leucine), fatty acids (such as linoleic acid and erucic acid), flavonoids, polyphenols, and mineral elements (such as K and Fe) can be used as marker components for the pomace of large-fruited and small-fruited sea buckthorn. [**Conclusion**] The sea buckthorn pomace is rich in bioactive components and can be applied in the food or health product industries in the form of food additives. The results of this study provide a theoretical basis for the comprehensive utilization of sea buckthorn pomace resources.

Keywords: sea buckthorn pomace; bioactive component; marker component

沙棘为胡颓子科沙棘属落叶灌木或小乔木，是一种兼具生态价值与经济价值的可食用浆果植物。沙棘属包含6个种、12个亚种，主要分布于欧洲和亚洲的温带地区及寒温带地区。我国境内有5个沙棘亚种，分别为中国沙棘*H. rhamnoides* subsp. *sinenesis*、蒙古沙棘*H. rhamnoides* subsp. *mongolica*、江孜沙棘*H. gyantsensis*、云南沙棘*H. rhamnoides* subsp. *yunnanensis*和中亚沙棘*H. rhamnoides* subsp. *turkestanica*，主要分布于内蒙古、西藏、云南、河北、山西等地[1]。不同品种沙棘的化学成分与药理活性存在一定差异，给沙棘果实加工过程的质量控制带来一定难度。因此，工业生产中通常依据果型特征，将沙棘划分为大果沙棘和小果沙棘进行加工利用。我国自然分布的沙棘和人工种植用于生态建设的沙棘，多为小果沙棘。大果沙棘则是我国引进俄罗斯优良品种后杂交选育得到的优质品系，相较于小果沙棘，具有单株产量高、果实大、汁水多、口感柔和等特点[2]。

沙棘果实富含多种营养组分，具备良好的抗氧化能力，引起国内外学者的广泛关注[3]。但沙棘果口感酸涩，且在贮藏、运输过程中易腐烂变质，因此多被加工为果汁、果粉、沙棘油、膳食补充剂等深加工产品[4]。目前，我国沙棘相关经营企业超3 200家，沙棘产业年总产值约260亿元，沙棘经榨汁加工后会产生占原料质量约20%的果渣，这类副产物大多被直接废弃，仅少量用作动物饲料。沙棘果渣中大量活性成分未能得到充分利用，不仅降低了沙棘加工副产物的附加值，还造成了严重的资源浪费与环境污染[5]。

沙棘果渣富含黄酮、维生素、氨基酸等多种活性组分，具有抗氧化、抗菌、抗疲劳等多种药理活性[6]。王薇等[7]对沙棘果渣中的多酚、多糖、黄酮进行提取分析，证实这3种活性成分均具有抑菌活性，为沙棘果渣在果蔬保鲜领域的应用提供了依据。白晓州等[8]测定了6种沙棘果渣中的基本营养成分，发现蛋白质、脂肪、水分、灰分、粗纤维质量分数分别为13.68%~19.47%、15.74%~19.53%、9.69%~15.96%、5.15%~9.98%、37.80%~47.09%；同时检测出沙棘果渣中含有5种矿质元素（Ca、Fe、P、Mn、Zn）和17种氨基酸。目前，国内关于沙棘果渣的研究多集中于单一品种的基础营养成分分析，针对不同品种沙棘果渣活性成分的研究仍较为匮乏。基于此，作者结合企业实际生产现状与沙棘果渣资源化利用不足的现状，以大果、小果沙棘果渣为研究对象，系统评价其活性组分，旨在为不同果型沙棘果渣的资源化利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

大果沙棘果渣、小果沙棘果渣：内蒙古宇航人高技术产业有限责任公司；无水乙醇、正己烷、盐酸、氢氧化钠、氢氧化钾、无水甲醇：现代东方（北京）科技发展有限公司；福林酚、吡啶、硝酸、苯酚、乙腈、甲酸铵、亚硝酸钠、硝酸铝、维生素C、没食子酸、*β*-胡萝卜素、维生素E、芦丁：上海麦克林生化科技有限公司；氨基酸混合标准品、37种脂肪酸甲酯混合标准品：上海安谱璀世标准技术服务有限公司。

1.2 仪器与设备

高效液相色谱仪：K2025型，海能未来技术集团股份有限公司；微波消解仪：MARS6型，美国CEM公司；气相色谱-质谱联用仪：GC2010型，日本岛津公司；数控超声仪：KQ-100DE型，昆山市超声仪器有限公司；气相色谱仪：7890A型，美国安

捷伦科技有限公司；电感耦合等离子体质谱仪：Agilent 7700型，美国安捷伦科技有限公司；自动进样器：ASX-500型，美国安捷伦科技有限公司。

1.3 方法

1.3.1 沙棘果渣预处理及样品制备

1）沙棘果渣预处理：去除沙棘果渣中的杂质，经粉碎机粉碎后过50目筛，采用石油醚进行脱脂处理，随后吹干样品，用于矿质元素和氨基酸的测定。

2）沙棘果渣提取液的制备：准确称取预处理后的沙棘果渣样品1 g，加入40 mL体积分数60%的乙醇，浸泡过夜。55 ℃超声提取40 min，8 000 r/min离心10 min，取上清液。再加入30 mL体积分数60%的乙醇，55 ℃超声提取40 min，8 000 r/min离心10 min，取上清液，重复此操作2次。用布氏漏斗抽滤，合并3次提取液，用于总黄酮、总多酚、维生素C的测定。

3）沙棘果渣油的制备：精确称取预处理后的沙棘果渣样品10 g，用滤纸包好，放入提取管中。安装好索氏提取器，加入正己烷至2/3处，加热水浴锅，将温度控制在70 ℃，回流提取3~4 h，当提取液颜色接近无色时，停止加热。提取液在无水硫酸钠中过滤，旋转蒸发去除正己烷，得到沙棘果渣油，用于β-胡萝卜素、维生素E和脂肪酸的测定。

1.3.2 沙棘果渣主要活性组分测定

1）总黄酮的测定：参照Choi等[9]的方法并稍加修改。配制1.0 mg/mL的芦丁标准溶液，准确移取0、0.05、0.10、0.20、0.30、0.35 mL标准溶液于离心管中，分别加入3 mL 5 g/dL的$NaNO_2$溶液反应5 min，再加入0.3 mL 10 g/dL的$Al(NO_3)_3$溶液反应6 min，随后加入2 mL 4 g/dL的NaOH溶液，摇匀静置15 min。定容至5 mL，于510 nm测定吸光度，绘制标准曲线。准确吸取0.3 mL沙棘果渣提取液，按芦丁标准曲线的测定方法加入反应试剂，定容至4 mL，于510 nm测定吸光度。总黄酮质量分数按式（1）计算。

$$F=\frac{C\times V\times N}{m} \quad (1)$$

式中：

F——沙棘果渣中总黄酮质量分数，mg/g；

C——提取液质量浓度，mg/mL；

N——稀释倍数；

V——提取液体积，mL；

m——沙棘果渣质量，g。

2）总多酚的测定：参照Khomsi等[10]的方法并稍加修改。配制1 mg/mL的没食子酸标准溶液，准确吸取10、20、30、40、50、60、70 μL标准溶液于试管中，分别加入2.5 mL 10 g/dL的福林酚试剂反应5 min，再加入7.5 mL 7.5 g/dL的Na_2CO_3试剂，加蒸馏水至7.5 mL，室温下反应1 h。于765 nm测定吸光度，绘制标准曲线。吸取0.05 mL沙棘果渣提取液，按没食子酸标准曲线的测定方法加入反应试剂，蒸馏水定容至8 mL，室温下反应1 h，于765 nm测定吸光度。

3）维生素C的测定：参照Ao等[11]的方法并稍加修改。分别吸取1 mL不同质量浓度的维生素C标准溶液和样品提取液，旋转浓缩至无水分，加入1 mL吡啶，超声处理至完全溶解。置于冰水浴中，加入衍生化试剂，室温静置30 min，离心取上清液，用于气相色谱分析。采用HP-5型毛细管色谱柱（30 m×0.25 mm×0.25 μm），载气为高纯氦气，流量1 mL/min，分流体积比20∶1，进样口温度280 ℃，FID检测器温度300 ℃。

4）β-胡萝卜素的测定：参照韩浩等[12]的方法并稍加修改。称取1.025 mg β-胡萝卜素标准品，用无水乙醇配制成1.025 mg/mL的β-胡萝卜素标准溶液，分别稀释2倍、4倍、5倍、10倍，于450 nm测定吸光度，绘制标准曲线。取20 μL沙棘果渣油，用4 mL无水乙醇溶解，于450 nm测定吸光度。

5）维生素E的测定：参照孟德豪[13]的方法并稍加修改。配制1.02 mg/mL的维生素E标准溶液，分别稀释100倍、50倍、25倍、10倍，于297 nm测定吸光度，绘制标准曲线。取20 μL沙棘果渣油，用4 mL正己烷溶解，于297 nm测定吸光度。

6）矿质元素的测定：参照颜子曦等[14]的方法，采用电感耦合等离子体-质谱仪测定沙棘果渣中11种矿质元素（Mn、Zn、Cu、K、Ca、Cr、Na、Fe、Mg、Co、Se）。称取预处理后烘干的沙棘果渣样品0.2 g，置于消解管中，经硝酸处理后，放入微波消解仪中消解1.5 h，冷却后用蒸馏水定容至50 mL，过0.22 μm的微孔滤膜。矿质元素质量分数按式（2）计算。

$$W=\frac{c\times V_1}{m_1} \quad (2)$$

式中：

W——样品中某矿质元素质量分数，μg/g；

c——样品中某矿质元素质量浓度，mg/L；

V_1——样品体积，mL；

m_1——样品质量，g。

7）氨基酸的测定：参照黄莹等[15]的方法并稍加修改。准确称取0.2 g预处理后的沙棘果渣，加入4 mL盐酸、2滴苯酚，置于110 ℃真空干燥箱中干燥24 h。过滤后加入蒸馏水至终体积为10 mL，取0.4 mL氮吹至完全干燥，加蒸馏水定容至0.5 mL，加入衍生化试剂，置于110 ℃真空干燥箱中处理1 h。加入正己烷，摇匀后吸取下层溶液过滤膜，进行HPLC分析。采用Kromasil 100-5-C18色谱柱（250 mm×4.6 mm×5 μm），流动相A为0.01 mol/L的甲酸铵-乙腈溶液，流动相B为乙腈-水溶液（体积比8∶2），流量0.5 mL/min，进样量10 μL，柱温40 ℃，检测波长254 nm。

8）脂肪酸的测定：参照Wu等[16]的方法并稍加修改。取20 μL沙棘果渣油溶于2 mL正己烷，加入0.5 mL的KOH-CH_3OH溶液（5 g/dL），涡旋混匀，取上层溶液进行气相色谱-质谱联用分析。采用Rtx-5色谱柱（30 m×0.25 mm×0.25 μm），分流体积比30∶1，载气为氦气，流量1 mL/min，进样口温度280 ℃。电子轰击（EI）离子源电子能量为70 eV，m/z扫描范围30~550，离子源温度250 ℃，接口温度250 ℃。

1.4　数据统计与分析

所有试验均重复3次，结果用平均值±标准偏差表示。使用SPSS 26.0进行显著性分析，$P<0.05$表示差异显著。采用Origin 2021进行可视化分析与主成分分析（principal component analysis，PCA），使用SIMCA 14.1软件进行正交偏最小二乘判别分析（orthogonal partial least squares-discriminant analysis，OPLS-DA）。

2　结果与讨论

2.1　沙棘果渣主要活性组分分析

沙棘果渣主要活性组分质量分数见图1。小果沙棘果渣的黄酮类和多酚类物质更为丰富，其总黄酮质量分数为79.02 mg/g，约为大果沙棘果渣的3倍；总多酚质量分数为43.33 mg/g，约为大果沙棘果渣的2倍。黄酮类物质具有抗炎、抗衰老、调控心血管疾病、调节血糖及血脂水平、改善机体代谢等多种生理功能。多酚类物质具有抗氧化、抗癌、保护肝脏、促进消化吸收、调节肠道菌群、增强机体免疫力等作用。多酚分子中的多元酚羟基使其具备极强的自由基清除能力。因此，富含黄酮、多酚类物质的小果沙棘果渣可作为天然产物的提取原料，在食品、医药、化妆品等领域具有广阔的应用前景。

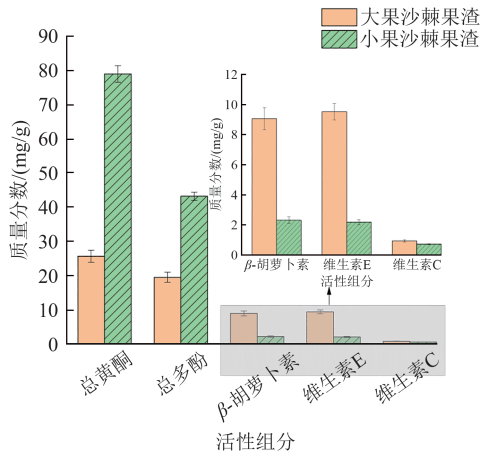


图1　沙棘果渣主要活性组分对比

Fig. 1　Comparison of main bioactive components in sea buckthorn pomace

大果沙棘果渣中含有较多的β-胡萝卜素、维生素E及维生素C。其中，β-胡萝卜素质量分数为9.07 mg/g，约为小果沙棘果渣的4倍。β-胡萝卜素是天然脂溶性色素与抗氧化剂，能有效清除体内自由基，延缓细胞衰老。维生素E为脂溶性维生素，大果沙棘果渣中其质量分数为9.53 mg/g，显著高于小果沙棘果渣（2.19 mg/g），且远高于芝麻、玉米、小麦、花生等粮食作物[17]，表明沙棘果渣是优质的天然维生素E来源。大果、小果沙棘果渣中维生素C质量分数分别为0.937、0.724 mg/g。维生素C具有抗氧化活性，可促进机体组织修复与胶原蛋白合成，在缓解氧化应激、预防慢性疾病方面发挥了重要作用[18-19]。

综上，沙棘果渣富含黄酮、多酚、维生素E、β-胡萝卜素、维生素C等活性组分。其中小果沙棘果渣适用于黄酮等活性组分的提取，大果沙棘果渣适用于油脂及其脂溶性活性组分的提取。

2.2 沙棘果渣矿质元素质量分数分析

在大果沙棘果渣和小果沙棘果渣中均检测到7种人体必需微量元素，分别为铬（Cr）、锰（Mn）、铁（Fe）、钴（Co）、铜（Cu）、硒（Se）、锌（Zn），见图2。大果沙棘果渣中锰元素质量分数最高，为25.40 μg/g。锰可参与人体多种酶系统的转运[20]，促进蛋白质代谢、改善皮肤炎症，同时具有良好的抗氧化活性。小果沙棘果渣中锌元素质量分数最高，为17.38 μg/g。锌可参与蛋白质合成，具有调节免疫和脂质代谢的功能，是促进生长发育、维持正常味觉和嗅觉的关键因子[21]。大果、小果沙棘果渣中分别含有10.16、9.02 μg/g的铜元素。铜对维持心血管系统稳态至关重要，与机体组织结构稳定、免疫功能调节密切相关，还可促进机体内铁元素的吸收与转运[22]。沙棘果渣中铬元素的质量分数为3.8~4.3 μg/g，成年人每日对铬元素的需求量为20~35 μg，该元素对维持人体血糖和胆固醇水平具有重要意义，因此沙棘果渣可作为膳食中铬的来源。此外，沙棘果渣中还检测出少量硒元素，硒是构成人体硒蛋白的重要组成部分，具有抗衰老、抗氧化、免疫调节等作用[23]。

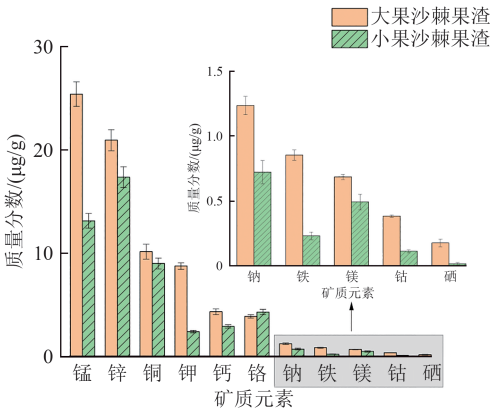


图2 沙棘果渣矿质元素对比

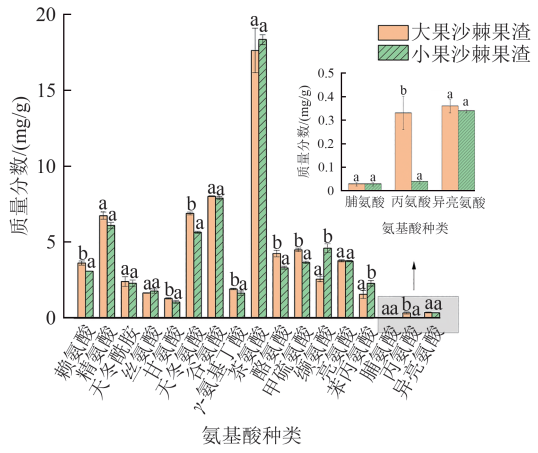
Fig. 2 Comparison of mineral elements in sea buckthorn pomace

除微量元素外，沙棘果渣中还含有钙（Ca）、钾（K）、钠（Na）、镁（Mg）等人体必需的宏量元素。其中，钙是维持骨骼健康的核心元素，同时参与机体神经传导等重要生理过程[14]。钾是一种电解质，与细胞中蛋白质和碳水化合物的代谢有关，具有调节体液平衡的作用[24]。钠也属于重要的电解质，可与钾协同维持机体细胞的正常生理功能和体液平衡，在维持血压平衡和帮助神经信号传递方面也发挥着重要作用。镁不仅能够保护心血管健康，在稳定血糖、维持骨骼健康方面也发挥着重要作用[25]。

综上，矿质元素对维持机体的正常功能和促进新陈代谢起着至关重要的作用，但人体不能合成矿质元素，需要从食物中摄取，沙棘果渣中矿质元素丰富，可以将其添加到面包、面条等食品中以补充人体所需的矿质元素。

2.3 沙棘果渣氨基酸质量分数分析

2种沙棘果渣样品中均检测出17种氨基酸，包括7种必需氨基酸和10种非必需氨基酸，见图3。其中，小果沙棘果渣中必需氨基酸质量分数（23.81 mg/g）较高，大果沙棘果渣中非必需氨基酸质量分数（44.40 mg/g）较高。茶氨酸质量分数在2种沙棘果渣中均最高，分别为17.63、18.35 mg/g。茶氨酸能够改善睡眠质量、提高注意力，具有镇静安神功能[26]。除茶氨酸外，谷氨酸、精氨酸和天冬氨酸质量分数在2种沙棘果渣样品中也处于较高水平。其中，谷氨酸参与氨基酸代谢与免疫调节过程，是中枢神经系统信号传递的重要功能性氨基酸[27]。精氨酸属于条件必需氨基酸，在特殊生理阶段需要从食物中获得，在蛋白质合成、免疫调节等方面发挥着重要作用[28]。天冬氨酸是神经递质合成的重要前体物质，可参与脑功能调节与机体能量代谢等，同时是食物鲜味的主要贡献物质。此外，小果沙棘果渣中苯丙氨酸质量分数



同一氨基酸不同字母表示组间差异显著（$P<0.05$）。

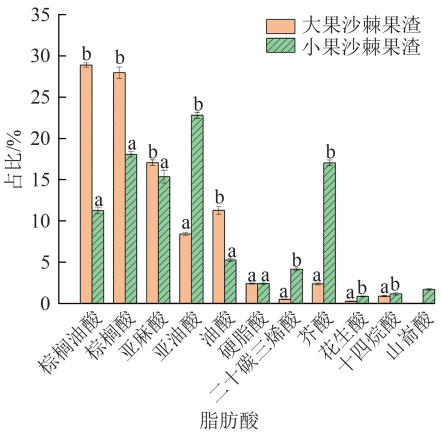
图3 沙棘果渣氨基酸检测结果

Fig. 3 Detection results of amino acids in sea buckthorn fruit pomace

（2.28 mg/g）显著高于大果沙棘果渣（1.56 mg/g）。苯丙氨酸是类黄酮的前体物质[29]，该结果与小果沙棘果渣中总黄酮质量分数相对较高的结果一致。综上，沙棘果渣中氨基酸质量分数较高，且种类丰富、配比均衡。

2.4　沙棘果渣脂肪酸质量分数分析

小果沙棘果渣中共检测出11种脂肪酸，包括5种饱和脂肪酸、3种单不饱和脂肪酸和3种多不饱和脂肪酸；大果沙棘果渣中共检测出10种脂肪酸，包括4种饱和脂肪酸、3种单不饱和脂肪酸和3种多不饱和脂肪酸，见图4。小果沙棘果渣中亚油酸质量分数最高，其次为棕榈酸（18.06%）、芥酸（17.03%）、亚麻酸（15.35%）。亚油酸为人体必需脂肪酸，是组织细胞的重要组成成分，对维持机体正常功能具有重要作用[30]；棕榈酸具有滋润表皮、软化皮肤的作用；亚麻酸具有调控血压、血糖、血脂水平与增强免疫力等作用。大果沙棘果渣中棕榈油酸质量分数最高，占比为28.87%。棕榈油酸具有抗菌、抗炎、改善血脂、延缓皮肤衰老等生理活性，常见的油料作物中棕榈油酸质量分数普遍较低，因此大果沙棘果渣可作为棕榈油酸的天然膳食来源。此外，棕榈酸（27.95%）、亚麻酸（17.05%）、油酸（11.27%）在大果沙棘果渣中占比也较高。其中油酸能降低胆固醇、调节血脂水平、有效降低高胆固醇血症及心血管疾病的发生风险。整体来看，大果沙棘果渣和小果沙棘果渣在脂肪酸种类组成上相差较小，但脂肪酸占比存在明显差异，见表1。



同一脂肪酸不同字母表示组间差异显著（P<0.05）。

图4　沙棘果渣脂肪酸检测结果

Fig. 4　Detection results of fatty acids in sea buckthorn pomace

表1　沙棘果渣的脂肪酸占比

Table 1　Proportions of fatty acids in sea buckthorn pomace

样品	饱和脂肪酸占比/%	不饱和脂肪酸占比/%
大果沙棘果渣	31.50	68.50（其中单不饱和脂肪酸占比42.53%，多不饱和脂肪酸占比25.97%）
小果沙棘果渣	24.16	75.84（其中单不饱和脂肪酸占比33.56%，多不饱和脂肪酸占比42.28%）

2.5　大果、小果沙棘果渣44种活性组分的综合分析

作者以大果、小果沙棘果渣为自变量，44个共有活性组分为因变量，通过聚类热图和OPLS-DA可以实现大果、小果样品的有效区分。由图5可以看出，大果、小果沙棘果渣基于物质质量分数特征呈现明显的分层聚类趋势，表明2种果渣在总黄酮、总多酚及β-胡萝卜素等物质组成上存在明显差异。从变量分布特征来看，部分氨基酸（如天冬氨酸、丙氨酸）、微量元素（Fe、Zn）及维生素（维生素C）在组间呈现差异化表达特征。红色高表达区域在不同组别中分布集中，表明大果沙棘果渣与小果沙棘果渣的活性组分质量分数存在明显差异。

对大果、小果沙棘果渣的活性组分进行OPLS-DA，模型自变量拟合指数（R^2_x）为0.941，因变量拟合指数（R^2_y）为0.998，模型预测指数（Q^2）为0.994，R^2、Q^2均大于0.5表示模型拟合效果良好[31]。经200次置换检验，Q^2回归线与纵轴的交点小于0，表明模型无过度拟合现象，建模结果稳定有效，可用于大果沙棘果渣与小果沙棘果渣的鉴别，见图6。为进一步分析不同物质对区分大果、小果沙棘果渣的贡献率，以P<0.05且VIP>1的筛选标准进行变量贡献分析，见图7。结果表明，部分氨基酸（如天冬氨酸、亮氨酸等）、脂肪酸（如亚油酸、芥酸等）及矿质元素（K、Fe等）的VIP值较高，可作为潜在的特征标志物[32]。

采用主成分分析（PCA）对大果沙棘果渣与小果沙棘果渣进行降维可视化分析，见图8。从变量维度来看，多酚、黄酮等位于横轴正方向，与PC1

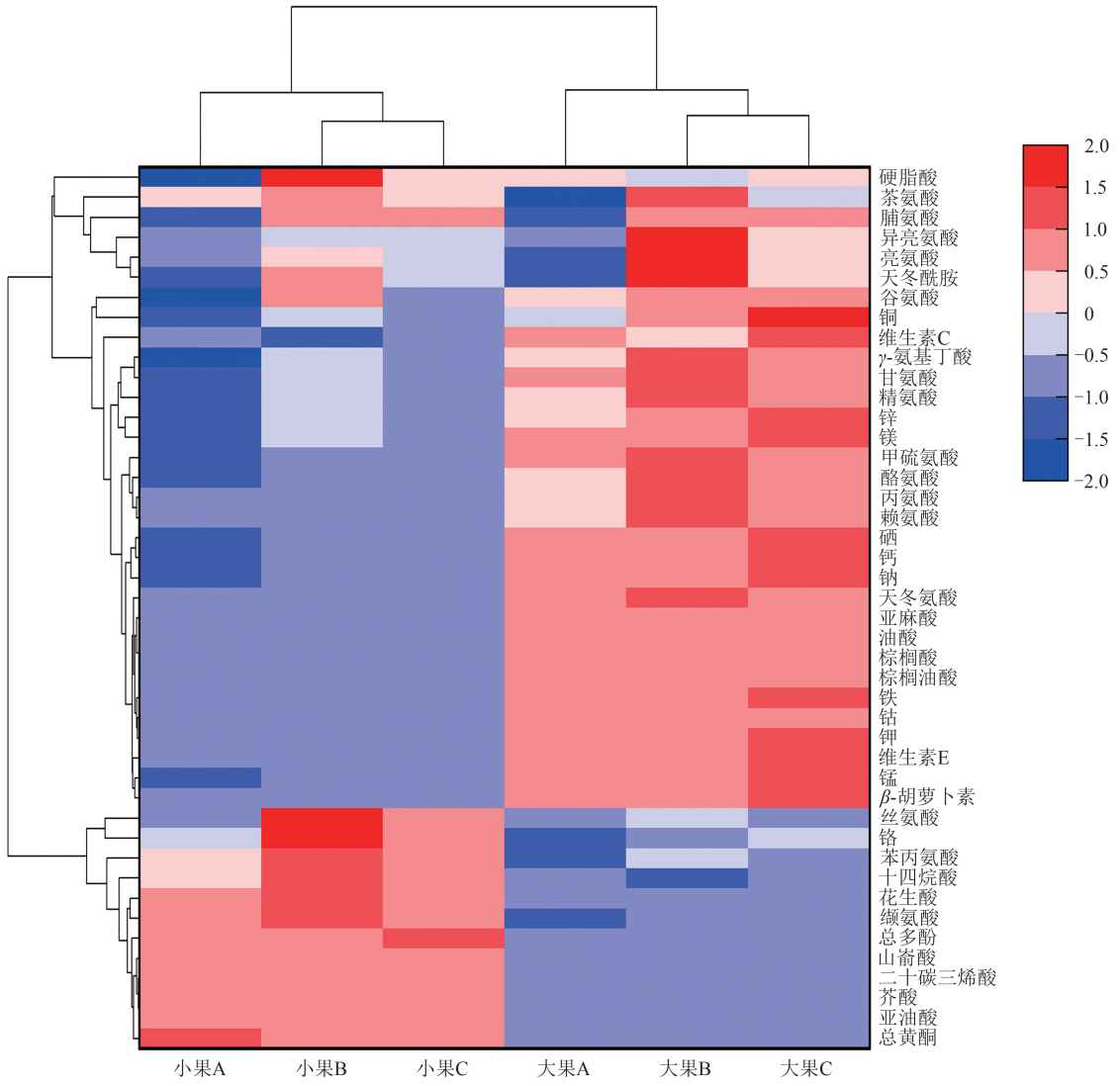


图 5　大果、小果沙棘果渣共有物质聚类热图

Fig. 5　Cluster heatmap of common components in the pomace of large-fruited and small-fruited sea buckthorn

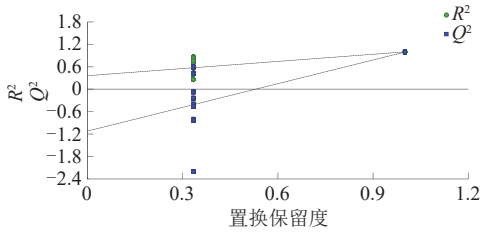


图 6　大果、小果沙棘果渣共有物质置换检验图

Fig. 6　Permutation test plot of common components in the pomace of large-fruited and small-fruited sea buckthorn

呈显著正相关，表明这些活性成分对 PC1 贡献突出，可能是样本差异的关键驱动因素；而 Na、Ca、β-胡萝卜素等变量集中于横轴负方向，与 PC1 呈负相关，其变化趋势与正方向变量形成对比。在纵轴方向上，天冬酰胺、丝氨酸、铬等变量的分布反映了其与 PC2 的关联。基于此，选取前 12 种特征指标进行主成分分析，深入挖掘样本特征关联，见图 9。12 种指标可以明显分成 2 个区域，其中，PC1 对数据变异的解释率为 99.6%，是区分样本的核心维度；PC2 解释率为 0.3%，辅助呈现样本分布特征，表明 2 组样本的特征差异主要由 PC1 主导。围绕各组数据的置信椭圆无重叠，进一步说明了大果沙棘果渣与小果沙棘果渣在特征主成分空间中独立分布，组间差异显著，且组内样本同质性较高。结果表明，部分氨基酸（天冬氨酸、亮氨酸等）、部分脂肪酸（亚油酸、芥酸等）、黄酮、多酚及 K、Fe 等矿质元素可作为大果、小果沙棘果渣的特征标志物。

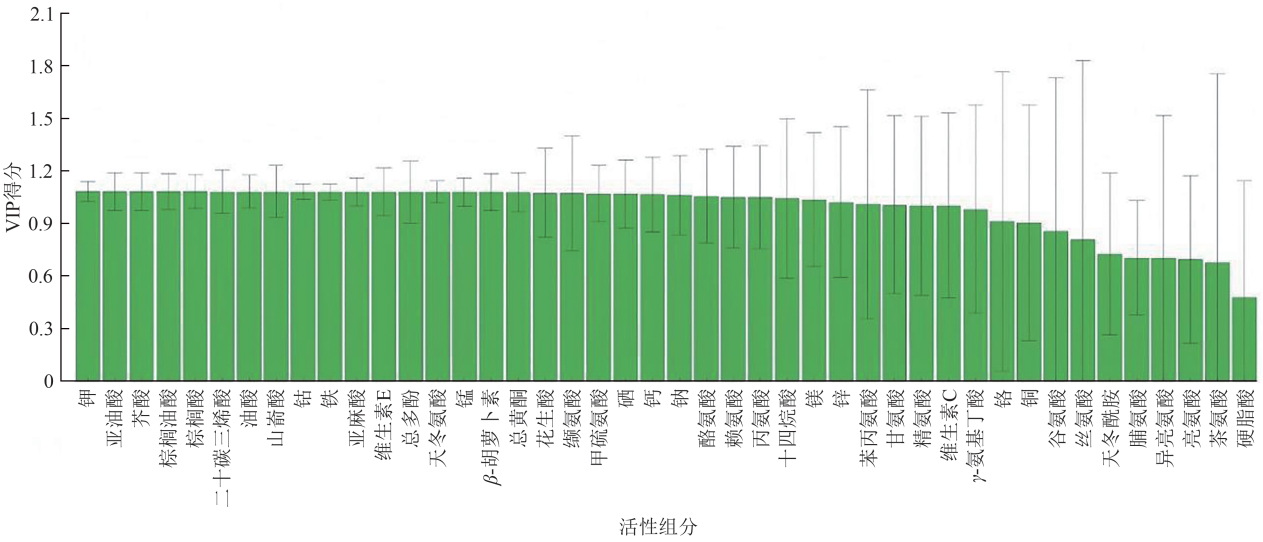


图 7　大果、小果沙棘果渣共有物质 VIP 得分图

Fig. 7　VIP score plot of common components in the pomace of large-fruited and small-fruited sea buckthorn

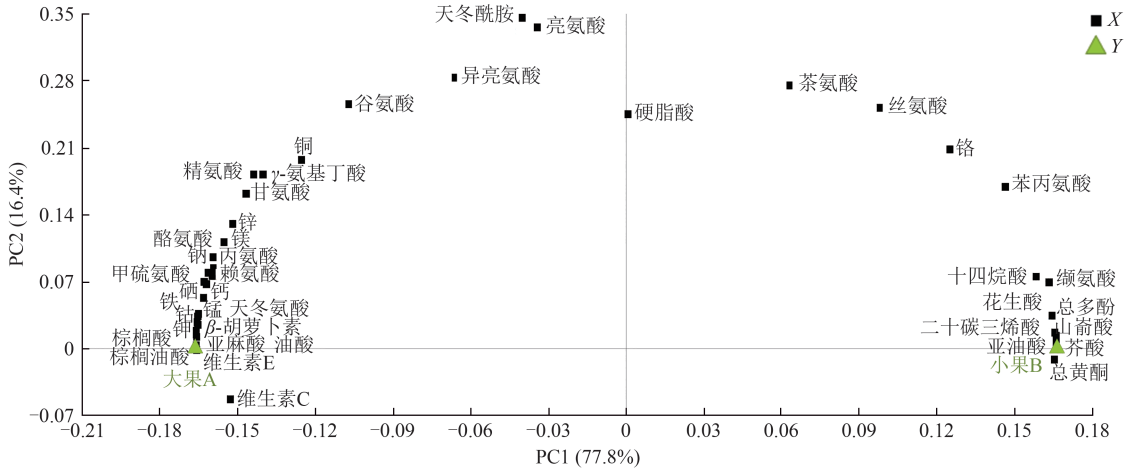


图 8　大果、小果沙棘果渣共有物质散点图

Fig. 8　Scatter plot of common components in the pomace of large-fruited and small-fruited sea buckthorn

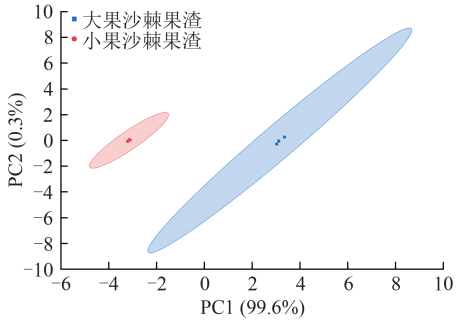


图 9　大果、小果沙棘果渣中 12 种活性物质主成分得分图

Fig. 9　Score plot of PCA for 12 bioactive components in the pomace of large-fruited and small-fruited sea buckthorn

3　结论

采用气相色谱、液相色谱、电感耦合离子质谱等检测技术对大果沙棘果渣、小果沙棘果渣中黄酮、维生素 C、矿质元素、氨基酸等 44 种主要活性组分进行检测和分析。结果表明，小果沙棘果渣富含黄酮、多酚物质，质量分数分别为 79.02、43.33 mg/g；大果沙棘果渣富含 β-胡萝卜素、维生素 E 和维生素 C，质量分数分别为 9.07、9.53、0.937 mg/g。脂肪酸结果表明，大果、小果沙棘果渣中分别检测出 10 种和 11 种脂肪酸。此外，在 2 种果渣样品中均检测出 7 种人体必需微量矿质

元素、17种氨基酸。部分氨基酸、部分脂肪酸、黄酮、多酚及K、Fe等矿质元素可作为大果、小果沙棘果渣的特征标志物。本研究系统阐明了不同果型沙棘果渣的活性组分差异，为2种沙棘果渣在不同领域的高效利用提供数据支撑。

参考文献

[1] 王天翼. 中国沙棘和云南沙棘的遗传分化研究[D]. 北京：中国林业科学研究院，2021：5.

[2] 曾奥，许炳烨，王雪，等. 新疆大果沙棘原浆、籽油和果油气味特征及产品间相关性[J]. 北京林业大学学报，2024(2)：132-142.
Zeng A，Xu B Y，Wang X，et al. Odor characteristics and inter-product correlation of Xinjiang large berry sea buckthorn pulp，seed oil and fruit oil[J]. Journal of Beijing Forestry University，2024(2)：132-142.(in Chinese)

[3] Beveridge T，Li T S C，Oomah B D，et al. Sea buckthorn products：manufacture and composition[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry，1999，47(9)：3480-3488.

[4] Wang C Y，Lei M L，Zhang H，et al. Comparison of metabolites in juice，seed and peel of sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides* L. subsp. *sinensis*)[J]. Journal of Plant Biochemistry and Biotechnology，2020，29(2)：305-313.

[5] Kumar A，Kumar P，Sharma A，et al. Scientific insights to existing know-how，breeding，genetics，and biotechnological interventions pave the way for the adoption of high-value underutilized super fruit Sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.)[J]. South African Journal of Botany，2022，145：348-359.

[6] 陈彦辉，张智锋，庄姣，等. 适于沙棘汁发酵的乳酸菌适应性进化策略研究[J]. 食品与生物技术学报，2025，44(1)：115-124.
Chen Y H，Zhang Z F，Zhuang J，et al. Strategies for adaptive evolution of lactic acid bacteria for seabuckthorn juice fermentation[J]. Journal of Food Science and Biotechnology，2025，44(1)：115-124.(in Chinese)

[7] 王薇，曹雯. 沙棘果渣多酚、多糖及黄酮抑菌性及对葡萄保鲜研究[J]. 中国食品添加剂，2023，34(11)：12-18.
Wang W，Cao W. Study on bacteriostasis of polyphenols，polysaccharides and flavonoids from sea buckthorn pomace and their preservative effects on grapes[J]. China Food Additives，2023，34(11)：12-18.(in Chinese)

[8] 白晓州，韩小存，张镒飞. 不同种类的沙棘果渣营养成分及抗氧化活性研究[J]. 食品研究与开发，2018，39(23)：179-183.
Bai X Z，Han X C，Zhang Y F. Study on nutritional components and antioxidant activities of different kinds of seabuckthorn pomace[J]. Food Research and Development，2018，39(23)：179-183.(in Chinese)

[9] Choi J，Noh E，Lee D，et al. Effect of roasting after sugar-soaking on the level of volatile compounds，total polyphenol，total flavonoid，and isoflavones in black soybean (*Glycine max* (L.) Merr.)[J]. LWT-Food Science and Technology，2023，185：115166.

[10] Khomsi M E，Imtara H，Kara M，et al. Antimicrobial and antioxidant properties of total polyphenols of *Anchusa italica* Retz[J]. Molecules，2022，27(2)：416.

[11] Ao X，Mu Y H，Xie S，et al. Impact of UHT processing on volatile components and chemical composition of sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides*) pulp：a prediction of the biochemical pathway underlying aroma compound formation[J]. Food Chemistry，2022，390：133142.

[12] 韩浩，李晓娟，王珣，等. 南瓜中β-胡萝卜素提取工艺优化及稳定性研究[J]. 中国调味品，2023，48(10)：73-77.
Han H，Li X J，Wang X，et al. Optimization of extraction process and stability of β-carotene from pumpkin[J]. China Condiment，2023，48(10)：73-77.(in Chinese)

[13] 孟德豪. 11个沙棘品种的果实主要活性成分及呈香物质的研究[D]. 北京：北京林业大学，2023：20.

[14] 颜子曦，李永慧，孟德豪，等. 苦水玫瑰中49项营养及活性成分指标分析与评价[J]. 北京林业大学学报，2023，45(2)：120-128.
Yan Z X，Li Y H，Meng D H，et al. Analysis and evaluation of 49 nutritional and active component indexes of Kushui rose[J]. Journal of Beijing Forestry University，2023，45(2)：120-128.(in Chinese)

[15] 黄莹，黄晶，杨晓，等. PITC柱前衍生-高效液相色谱法测大米肽中的16种氨基酸含量[J]. 食品工业科技，2023，44(24)：279-285.
Huang Y，Huang J，Yang X，et al. Determination of 16 amino acids in rice peptides by PITC pre-column derivatization high performance liquid chromatography[J]. Science and Technology of Food Industry，2023，44(24)：279-285.(in Chinese)

[16] Wu Y，Yuan W Q，Han X，et al. Integrated analysis of fatty acid，sterol and tocopherol components of seed oils obtained from four varieties of industrial and environmental protection crops[J]. Industrial Crops and Products，2020，154：112655.

[17] 董诗婷，陈云，高群玉. 沙棘果生物活性成分及其功能的研究进展[J]. 中国酿造，2020，39(2)：26-32.
Dong S T，Chen Y，Gao Q Y. Research progress on bioactive compounds and function of sea buckthorn berry

[J]. China Brewing，2020，39(2)：26-32.(in Chinese)

[18] Carr A C，Maggini S. Vitamin C and immune function [J]. Nutrients，2017，9(11)：1211.

[19] 宁志雪，牛广财，朱立斌，等. 沙棘活性成分、生理功能及开发利用研究进展[J]. 食品与机械，2021，37(11)：221-227，240.
Ning Z X，Niu G C，Zhu L B，et al. Research progress on the active compounds of sea buckthorn and their physiological functions and utilization [J]. Food and Machinery，2021，37(11)：221-227，240.(in Chinese)

[20] 刘炎，樊玉，刘江，等. 云南地质高背景区苹果矿质元素富集特征和营养及健康风险评价[J]. 环境科学，2024，45(9)：5538-5547.
Liu Y，Fan Y，Liu J，et al. Enrichment and nutrition/health risks assessment of mineral elements in apples growing in Yunnan's high geological background area[J]. Environmental Science，2024，45(9)：5538-5547.(in Chinese)

[21] 张粲. 沙棘叶、沙棘茶和绿茶营养成分的比较研究[D]. 北京：北京林业大学，2012：26.

[22] 罗晓雨，韩爱芝，丁杰，等. 新疆伊犁野生杏种仁矿质元素及氨基酸含量分析[J]. 果树学报，2024，41(4)：638-650.
Luo X Y，Han A Z，Ding J，et al. Analysis of the contents of mineral elements and amino acids in wild apricot kernels from Ili Region of Xinjiang[J]. Journal of Fruit Science，2024，41(4)：638-650.(in Chinese)

[23] 肖兴中，闫妞，马朝喜，等. 叶面喷施硒肥对南瓜果实硒含量、产量及营养品质的影响[J]. 中国瓜菜，2024，37(9)：81-89.
Xiao X Z，Yan N，Ma C X，et al. Effects of foliar spraying selenium solution on selenium content，yield and nutrition quality of pumpkin fruit[J]. China Cucurbits and Vegetables，2024，37(9)：81-89.(in Chinese)

[24] 吴耀鹏. 重庆核桃矿质营养动态特征研究[D]. 重庆：西南大学，2022：3.

[25] 赵婉伊. 施用粪肥对菜田土壤重金属、微生物群落及其抗性基因的影响[D]. 重庆：西南大学，2023：1.

[26] 方开星，秦丹丹，潘晨东，等. 高茶氨酸茶树新品种'粤茗5号'[J]. 园艺学报，2023，50(S2)：187-188.
Fang K X，Qin D D，Pan C D，et al. A new tea cultivar 'yueming 5' with high theanine content [J]. Acta Horticulturae Sinica，2023，50(S2)：187-188.(in Chinese)

[27] 张智勇，王宇婷，熊思瑞，等. 酱油品质指标的比较与抗氧化能力的研究[J]. 食品工业，2024，45(1)：284-291.
Zhang Z Y，Wang Y T，Xiong S R，et al. Comparison of quality indexes of soy sauce and study on antioxidant capacity of soy sauce [J]. The Food Industry，2024，45(1)：284-291.(in Chinese)

[28] 陈荣珠，王小平，高伟城，等. 4种裂叶类型五指毛桃果实中氨基酸组成比较及营养价值评价[J]. 中国食品添加剂，2024，35(1)：238-246.
Chen R Z，Wang X P，Gao W C，et al. Comparative analysis of amino acids composition in fruits of four types *Ficus hirta* with lobed leaf and evaluation of their nutritional value [J]. China Food Additives，2024，35(1)：238-246.(in Chinese)

[29] 郭亚飞. 茶树鲜叶中儿茶素和氨基酸性状的遗传基础解析[D]. 武汉：华中农业大学，2022：4.

[30] 王思寒. 沙棘籽油分离富集不饱和脂肪酸的工艺研究[D]. 杭州：浙江大学，2010：12.

[31] Yun J，Cui C J，Zhang S H，et al. Use of headspace GC/MS combined with chemometric analysis to identify the geographic origins of black tea[J]. Food Chemistry，2021，360：130033.

[32] 邵淑贤，徐梦婷，林燕萍，等. 基于电子鼻与HS-SPME-GC-MS技术对不同产地黄观音乌龙茶香气差异分析[J]. 食品科学，2023，44(4)：232-239.
Shao S X，Xu M T，Lin Y P，et al. Differential analysis of aroma components of Huangguanyin oolong tea from different geographical origins using electronic nose and headspace solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry[J]. Food Science，2023，44(4)：232-239.(in Chinese)