DOI:10.12441/spyswjs.20260627001 [文章编号] 1673-1689(2026)07-0048-09

等离子体处理时间对海蒿子提取物成分及其抗氧化和降血糖活性的影响

解泉源[1] 刘燕玲[1] 黄丹思[1] 谢 星[2*]

(1. 江西科技学院医学院,江西 南昌 330098; 2. 江西师范大学生命科学学院,江西 南昌 330022)

摘要:【目的】建立海蒿子(*Sargassum pallidum*, *S. pallidum*)活性成分的等离子体高效提取技术,推动海蒿子资源的高值化利用。**【方法】**探究等离子体处理时间对海蒿子总酚提取率及其提取物抗氧化、降血糖作用的影响,并采用质谱技术对其主要化学成分进行分析。**【结果】**等离子体处理可使海蒿子细胞表面产生明显裂隙。其中,处理9 min的海蒿子提取物中总酚质量分数(4.86 mg/g)最高,DPPH自由基清除能力(IC_{50}值=2.10 mg/mL)和$ABTS^+$自由基清除能力(IC_{50}值=1.51 mg/mL)最强。等离子体处理6 min的样品对α-葡萄糖苷酶(IC_{50}值=2.07 mg/mL)和DPP-4的抑制效果最优,均显著优于未处理样品。从海蒿子中共鉴定得到14种化合物,包括6种有机酸、4种脂肪酸、3种多酚和1种其他类化合物。等离子体处理可促进海蒿子中槲皮素-3-*O*-葡萄糖醛酸、5-羟基阿魏酸等化合物的溶出,这可能是其抗氧化和降血糖活性提升的重要物质基础。相关性分析结果表明,多酚质量分数与自由基清除能力呈强相关性(r>0.86),与α-葡萄糖苷酶抑制活性呈中高度相关性。**【结论】**该研究可为海蒿子功能活性成分的高效制备及其在糖尿病调控领域的应用提供理论依据与技术支撑。

关键词:海蒿子;等离子体;多酚;抗氧化;降血糖

Effects of Plasma Treatment Duration on Composition and Antioxidant and Blood Glucose-lowering Activities of *Sargassum pallidum* Extract

XIE Quanyuan[1] *LIU Yanling*[1] *HUANG Dansi*[1] *XIE Xing*[2*]

(1. School of Medicine, Jiangxi Institute of Technology, Nanchang 330098, China; 2. College of Life Sciences, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China)

Abstract: [**Objective**] This study developed a plasma-based high-effeciency technology for the active compounds of *Sargassum pallidum* (*S. pallidum*), aiming to promote the value-added utilization of *S. pallidum*. [**Method**] The effects of plasma treatment duration on the extraction rate, antioxidant capacity, and blood glucose-lowering activity of *S. pallidum* polyphenols were investigated. Furthermore, mass spectrometry was employed to analyze the primary chemical constituents. [**Result**] Plasma treatment induced significant cracking on the surface of *S. pallidum* cells. *S. pallidum* extract obtained by plasma treatment for 9 min exhibited the highest mass fraction of total phenols (4.86 mg/g), DPPH radical scavenging ability (IC_{50} value = 2.10 mg/mL), and $ABTS^+$ radical scavenging ability (IC_{50} value = 1.51 mg/mL). *S. pallidum* extract obtained by plasma treatment for 6 min showed the strongest inhibitory effects on α-glucosidase (IC_{50} value = 2.07 mg/mL) and DPP-4, outperforming the untreated sample. A total of 14 compounds were identified from *S. pallidum* extract, including 6 organic acids, 4 fatty acids, 3 polyphenols, and 1 other compound. Plasma treatment promoted the dissolution of quercetin-3-*O*-glucuronic acid and

基金项目:江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ2502510);江西省自然科学基金项目(20242BAB25409)。

通信作者:谢星(1993—),男,讲师,博士,主要从事功能食品资源开发与利用研究。E-mail:13609092537@163.com

收稿日期:2026-06-27 **修回日期:**2026-07-15

phlorofucofuroeckol in *S. pallidum*, which likely accounted for the enhanced antioxidant and blood glucose-lowering activities. Correlation analysis confirmed that the total phenol mass fraction had a strong positive correlation with free radical scavenging activities (r>0.86) and a moderately strong correlation with α-glucosidase inhibitory activity. [**Conclusion**] These findings provide a theoretical foundation and technique support for the efficient preparation of functional active constituents from *S. pallidum* and the value-added utilization of *S. pallidum* in regulating diabetes.

Keywords: *Sargassum pallidum*; plasma; polyphenol; antioxidant activity; blood glucose-lowering

糖尿病是一类以高血糖为主要特征的代谢紊乱性疾病。近年来，全球糖尿病发病率持续攀升，2024年全球糖尿病患病人数高达5.89亿，已成为21世纪威胁人类生命健康、加重医疗负担的重大慢性疾病。长期血糖代谢紊乱会诱发糖尿病视网膜病变、糖尿病肾病、糖尿病足等并发症，显著增加糖尿病患者的死亡风险[1]。目前临床常用的降血糖药物包括阿卡波糖、胰岛素等，长期使用易导致腹泻、过敏、头晕、胀气等多种不良反应[2]。同时，糖尿病患者体内会积累大量活性氧自由基，引起机体氧化应激，从而加剧胰岛素抵抗和糖尿病并发症的发生与发展[3]。因此，寻找天然无毒、副作用低、高效且兼具抗氧化活性的降血糖药物具有重要的研究价值与应用前景。植物多酚主要包括酚酸、类黄酮和单宁等，是开发天然降血糖药物的优质原料。已有研究证实，多种天然植物多酚具有优异的降血糖与抗氧化活性。野生樱桃李多酚可有效清除自由基、抑制α-葡萄糖苷酶活性，改善胰岛素抵抗状态下HepG2细胞的葡萄糖摄取能力[4]，并通过肠道微生物-短链脂肪酸-PI3K/Akt/TBC1D4信号通路缓解2型糖尿病小鼠的高血糖症状[5]。羊栖菜多酚可通过清除自由基、抑制α-淀粉酶与α-葡萄糖苷酶活性等发挥抗糖尿病活性[6]。综上，从植物多酚中挖掘具有抗氧化与降血糖活性的功能成分具有重要的研究价值。

传统植物多酚提取技术普遍存在耗时长、效率低、得率低等缺陷，而新型非热加工技术凭借效率高、能耗低等优势，已成为天然活性成分提取领域的研究热点。等离子体作为一种非热加工技术，可有效破碎植物细胞壁，具有处理时间短、绿色无污染等优势，在植物多酚提取中展现出巨大的应用潜力[7]。Bao等[8]研究发现，等离子体处理能显著提高番茄渣中的多酚提取率。海蒿子属于褐藻门马尾藻科药食两用海藻资源，富含多酚、脂肪酸、多糖等多种活性成分，具有抗炎、抗氧化和抗癌等功效[9]。已有研究表明，海蒿子多酚可缓解糖尿病小鼠的氧化应激损伤、降低空腹血糖水平，具有良好的体内抗氧化与降血糖功效[10]。但目前海蒿子多酚的提取率较低，严重限制了其高值化利用，急需开发高效的提取技术。

基于此，作者采用等离子体辅助技术提取海蒿子中的多酚，测定不同处理时间下样品的总酚质量分数，通过DPPH自由基清除率、$ABTS^+$自由基清除率、α-葡萄糖苷酶抑制率和二肽基肽酶4（dipeptidyl peptidase 4，DPP-4）抑制率评价其体外抗氧化和降血糖活性，系统探究等离子体处理时间对海蒿子多酚提取率与生物活性的影响，并结合质谱技术鉴定其活性成分，旨在为等离子体技术应用于海蒿子活性成分的高效提取及高值化利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

海蒿子：青岛海草生物科技有限公司；阿卡波糖、ABTS、DPPH、α-葡萄糖苷酶、对硝基苯基-*D*-吡喃葡萄糖苷、DPP-4：美国Sigma公司；Gly-Pro-PNA：大连美仑生物技术有限公司；福林酚、没食子酸、槲皮素、碳酸钠、碳酸氢钠：北京索莱宝科技有限公司；乙醇、乙腈：均为色谱纯，上海麦克林生化科技有限公司。

1.2 主要仪器与设备

旋转蒸发仪：RV10型，上海爱朗仪器有限公司；质谱仪：TripleTOF 5600+型，美国Agilent公司；多功能酶标仪：Synergy H1型，美国Biotek仪器有限公司；冷冻干燥机：EYELA型，上海爱朗仪器有限公司；等离子体设备：CPCS-I-300型，苏州屹润食品科技有限公司；扫描电子显微镜（SEM）：S-3400N型，日本Hitachi公司。

1.3 方法

1.3.1 海蒿子提取物的制备

用摇摆式中药粉碎机粉碎海蒿子，过80目筛，得到海蒿子粉末。将海蒿子粉末倒入石英皿中，通过微孔滤膜固定样品以避免位移，置于聚丙烯绝缘基座上。将等离子体设备充满氮气后，在300 W功率下分别处理3、6、9 min。处理参数为：电极间距25 mm，间歇时间1 500 ms，处理频率100 Hz，处理电压90 kV。收集处理后的海蒿子粉末，于干燥皿中保存。分别称取等离子体处理和未处理的海蒿子粉末5.0 g，按1 g∶20 mL的比例加入体积分数70%的乙醇溶液，混匀后于25 ℃搅拌浸提1 h。离心后取上清液，浓缩，用体积分数70%的乙醇溶液定容至50 mL，于−20 ℃冰箱保存。

1.3.2 表面微观结构观察

采用SEM观察等离子体处理前后海蒿子粉末的表面微观结构。海蒿子粉末经冷冻干燥后，用双面碳带将其固定在SEM样品台上，溅射镀铂60 s，在5 kV电压下进行扫描。

1.3.3 总酚质量分数测定

采用福林酚法测定提取液中的总酚质量分数[5]。以没食子酸（20~100 μg/mL）为标准品绘制标准曲线，结果用每克海蒿子提取物干物质中含有的没食子酸当量表示，单位为mg/g。

1.3.4 抗氧化活性测定

1）DPPH自由基清除率测定：参照Peng等[11]的方法测定提取物的DPPH自由基清除率。将50 μL样品溶液与150 μL DPPH溶液混匀，室温避光反应30 min，测定其在517 nm的吸光度。将体积分数70%的乙醇溶液和抗坏血酸（VC）溶液分别作为空白对照组和阳性对照组。

2）$ABTS^+$自由基清除率测定：参照Peng等[11]的方法测定提取物的$ABTS^+$自由基清除率。将50 μL样品溶液与150 μL ABTS溶液混匀，室温避光反应6 min，测定其在734 nm的吸光度。将体积分数70%的乙醇溶液和槲皮素（Que）溶液分别作为空白对照组和阳性对照组。

1.3.5 体外降血糖活性测定

1）α-葡萄糖苷酶抑制率测定：参照谢星等[9]的方法对提取物的α-葡萄糖苷酶抑制率进行测定。在96孔酶标板上分别加入40 μL样品溶液和40 μL α-葡萄糖苷酶溶液，25 ℃反应8 min，加入40 μL对硝基苯基-*D*-吡喃葡萄糖苷溶液（4 mmol/L），孵育8 min后加入800 μL碳酸钠溶液（0.1 mol/L），测定反应体系在405 nm的吸光度。分别以阿卡波糖和体积分数70%的乙醇溶液为阳性对照组和空白对照组。

2）DPP-4抑制率测定：参照喻奕虎等[12]的方法测定提取物的DPP-4抑制率。在96孔酶标板上分别加入40 μL样品溶液（10 mg/mL）和40 μL的DPP-4溶液，25 ℃反应10 min，加入20 μL Gly-Pro-PNA溶液（5.0 mmol/L），孵育25 min后加入80 μL碳酸氢钠溶液（0.1 mol/L），测定反应体系在405 nm的吸光度。以体积分数70%的乙醇溶液代替样品作为空白对照组，以缓冲液代替Gly-Pro-PNA溶液作为控制组。DPP-4抑制率按式（1）计算。

$$D=\frac{A_c-(A_s-A_b)}{A_c}\times 100\% \quad (1)$$

式中：

D——DPP-4抑制率，%；

A_c——控制组的吸光度；

A_s——试验组的吸光度；

A_b——空白对照组的吸光度。

1.3.6 化学成分测定

采用UPLC-QTOF-MS/MS测定提取液中的化学成分。色谱条件为：采用ACQUITY UPLC HSS T3色谱柱（150 mm×2.1 mm×1.7 μm），柱温25 ℃；进样量5.0 μL；流动相A为体积分数0.1%的甲酸−水溶液；流动相B为乙腈，流量0.3 mL/min。洗脱程序为：0~5 min，流动相A体积分数由95%降至90%；5~8 min，流动相A体积分数由90%降至70%；8~20 min，流动相A体积分数由70%降至50%；20~25 min，流动相A体积分数由50%降至0；25~30 min，流动相A体积分数为0；30~31 min，流动相A体积分数由0升至95%；31~36 min，流动相A体积分数为95%。质谱条件为：采用负离子模式，电喷雾离子源，相对分子质量扫描范围50~1 500，碰撞能量为10、30、50 eV，载气压力45 psi，离子源温度500 ℃。通过Scifinder等数据库和相关文献确定样品的化学成分。

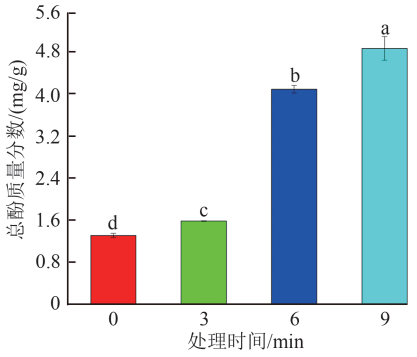
1.4 数据处理

所有试验重复3次，结果以平均值±标准差表示。采用方差分析和LSD检验数据的差异性，$P<0.05$表示差异显著。

2　结果与讨论

2.1　等离子体处理时间对总酚质量分数的影响

随着等离子体处理时间的延长，海蒿子提取物中的总酚质量分数持续升高，见图1。其中，等离子体处理6 min和9 min的海蒿子提取物中的总酚质量分数分别为4.09、4.86 mg/g，显著高于其他处理组，且分别是未处理样品的3.1倍和3.7倍。3 min处理组的总酚质量分数与未处理组相比虽差异显著，但增幅仅为21%。Mehta等[13]研究发现，等离子体处理可提高脱油大米和玉米糠的多酚提取率，但提升效果低于本研究结果。综上，6~9 min的等离子体处理能显著提高海蒿子的多酚提取率。这可能是由于：一方面，等离子体处理能破碎细胞壁，促进多酚的溶出；另一方面，可将海蒿子中部分大分子多酚降解为小分子多酚，从而提高了多酚提取率[14]。



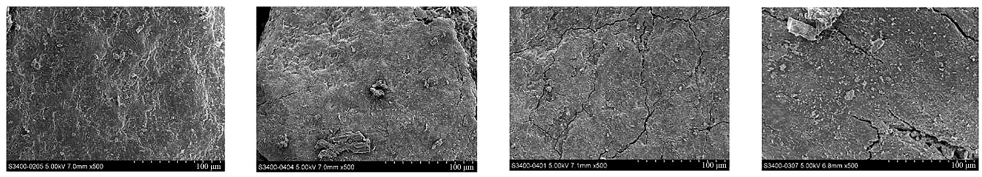
不同字母表示差异显著（P<0.05）。

图1　等离子体处理时间对海蒿子提取物中总酚质量分数的影响

Fig. 1　Effect of plasma treatment duration on the mass fraction of total phenols in *S. pallidum* extract

2.2　等离子体处理时间对海蒿子粉末微观结构的影响

为明确等离子体处理提升海蒿子多酚提取率的原因，作者采用SEM观察不同处理时间下海蒿子粉末的微观形貌特征，见图2。未经等离子体处理的海蒿子细胞壁结构完整、表面致密光滑、无明显裂隙。随着等离子体处理时间的延长，海蒿子细胞壁破损程度加剧，表面裂隙愈发明显，细胞壁完整性被持续破坏，且处理9 min时破损最为显著。结果表明，等离子体处理可破坏细胞壁结构，有效促进海蒿子多酚的释放。这可能是由于等离子体的高能粒子持续轰击海蒿子粉末表面，对细胞壁产生裂解作用，最终造成细胞壁结构破损[7]。



(a) 0 min　(b) 3 min　(c) 6 min　(d) 9 min

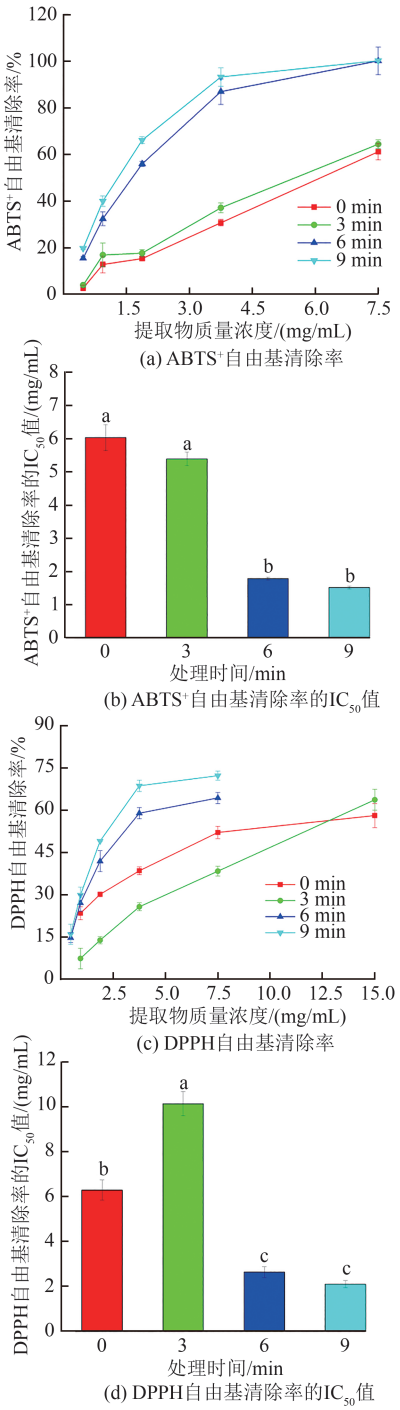
图2　等离子体处理时间对海蒿子粉末微观结构的影响（500×）

Fig. 2　Effect of plasma treatment duration on the microstructure of *S. pallidum* powder（500×）

2.3　等离子体处理时间对海蒿子提取物抗氧化活性的影响

海蒿子提取物的$ABTS^+$自由基清除能力与提取物质量浓度呈现明显的剂量依赖性，见图3（a）。不同等离子体处理时间制备样品的$ABTS^+$自由基清除能力顺序为：9 min>6 min>3 min>0 min，且等离子体处理6 min和9 min所得海蒿子提取物的$ABTS^+$自由基清除率的IC_{50}值无显著差异（P>0.05），见图3（b）。结果表明，等离子体处理6~9 min可显著提高海蒿子提取物的$ABTS^+$自由基清除能力。短时间（≤3 min）等离子体处理后，样品$ABTS^+$自由基清除率与未处理组无显著变化（P>0.05），这可能是由于短时间等离子体处理无法有效促进细胞壁中的多酚物质释放[15]。

等离子体处理前后的海蒿子提取物均具有较好的DPPH自由基清除能力，且整体表现出显著的剂量效应。由于处理6 min和9 min样品具有较好的DPPH自由基清除能力，因此在质量浓度7.5 mg/mL时评价结束。如图3（c）~（d）所示，与未处理样品相比，等离子体处理6~9 min的海蒿子提取物的DPPH自由基清除率提高了2.3~3.0倍，其中9 min处理组样品的DPPH自由基清除能力最强，IC_{50}值为2.10 mg/mL；而3 min处理组的DPPH自由基清除能力较低。结果表明，等离子体处理6~9 min可有效增强海蒿子提取物的DPPH自由基清除能力。Keshavarzi等[16]研究发现，等离子体处理能显著提升绿茶多酚提取物的抗氧化活性，与本研究结果一致。



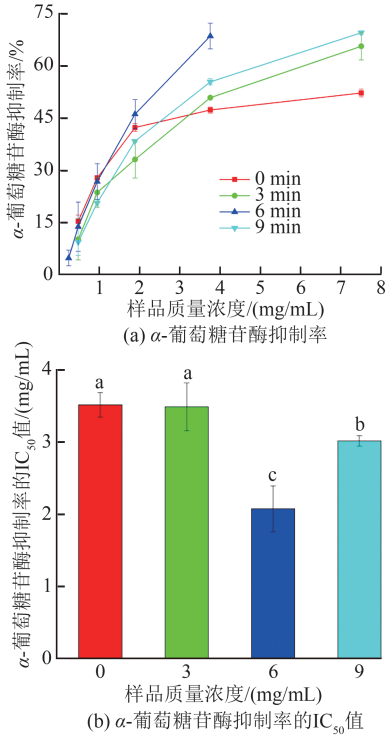
不同字母表示差异显著（P<0.05）。

图 3　等离子体处理时间对海蒿子提取物抗氧化活性的影响

Fig. 3　Effect of plasma treatment duration on the antioxidant activity of *S. pallidum* extract

2.4　等离子体处理时间对海蒿子提取物 α-葡萄糖苷酶抑制能力的影响

所有海蒿子提取物的 α-葡萄糖苷酶抑制能力均表现出显著的剂量效应，见图 4。不同等离子体处理时间下样品的 α-葡萄糖苷酶抑制能力顺序为：6 min>9 min>3 min>0 min。其中，等离子体处理 6 min 的样品 α-葡萄糖苷酶抑制能力是未处理样品的 1.7 倍。等离子体处理 9 min 和未处理组的 α-葡萄糖苷酶抑制能力差异较小，IC_{50} 值分别为 3.5、3.0 mg/mL，说明等离子体处理 6 min 能提升海蒿子多酚提取物抑制 α-葡萄糖苷酶的能力，而处理时间过长或过短的效果均不佳。程鑫鹏等[17]研究发现，中等时长的等离子体处理可提高覆盆子多酚的 α-葡萄糖苷酶抑制能力，但其提升效果低于本研究结果。



不同字母表示差异显著（P<0.05）。

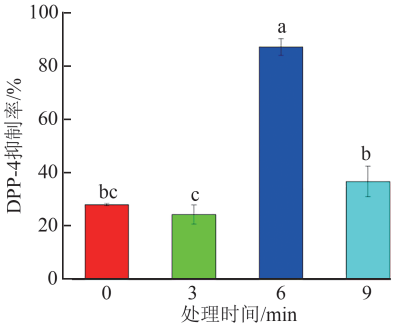
图 4　等离子体处理时间对海蒿子提取物 α-葡萄糖苷酶抑制能力的影响

Fig. 4　Effect of plasma treatment duration on the α-glucosidase inhibition activity of *S. pallidum* extract

2.5　等离子体处理时间对海蒿子提取物 DPP-4 抑制能力的影响

DPP-4 可通过调节胰高血糖素样肽-1 和促胰岛素多肽的分泌来发挥降血糖作用[18]。如图 5 所示，当样品质量浓度为 10 mg/mL 时，等离子体处理 6 min 的样品 DPP-4 抑制率最强，达 87.15%，是未处理样品的 3.1 倍；等离子体处理 9 min 的海蒿子提取物次之，DPP-4 抑制率为 36.74%。结果表明，适宜时长的等离子体处理可有效提高海蒿子提取物

的DPP-4抑制能力，而过长时间的等离子体处理可能导致活性成分降解，造成样品活性下降。整体来说，海蒿子提取物对α-葡萄糖苷酶的抑制能力优于DPP-4，说明相较于DPP-4，α-葡萄糖苷酶是海蒿子多酚调控血糖的主要作用靶点。



不同字母表示差异显著（P<0.05）。

图5　等离子体处理时间对海蒿子提取物DPP-4抑制能力的影响

Fig. 5　Effect of plasma treatment duration on the DPP-4 inhibition activity of *S. pallidum* extract

2.6　海蒿子提取物成分分析

采用UPLC-QTOF-MS/MS对未处理、等离子体处理6 min和等离子体处理9 min的海蒿子提取物进行主要化学成分分析，见图6和表1。通过解析化学成分的分子式和特征离子碎片等质谱信息，共鉴定出14种化合物，包括6种有机酸、4种脂肪酸、3种多酚类化合物和1种其他类化合物。其中，未处理组、等离子体处理6 min、等离子体处理9 min的海蒿子提取物中分别鉴定出10、10、12种化合物。等离子体处理6 min样品的总离子流图的响应值最高，9 min处理组次之，证实等离子体处理可有效促进海蒿子中植物化合物的溶出，且处理6 min样品的化合物溶出效率最高。

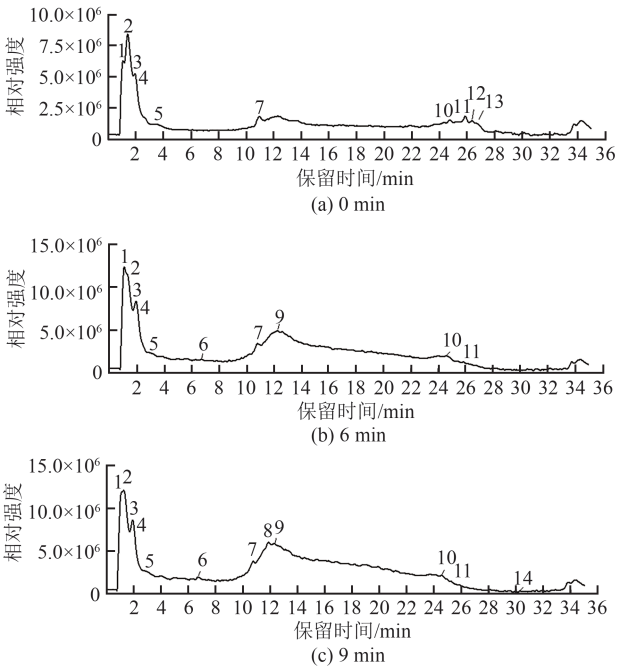


图6　不同等离子体处理时间下海蒿子提取物的总离子流图

Fig. 6　Total ion chromatograms of *S. pallidum* extracts obtained under different plasma treatment duration

表1　不同等离子体处理时间下海蒿子提取物的二级质谱信息

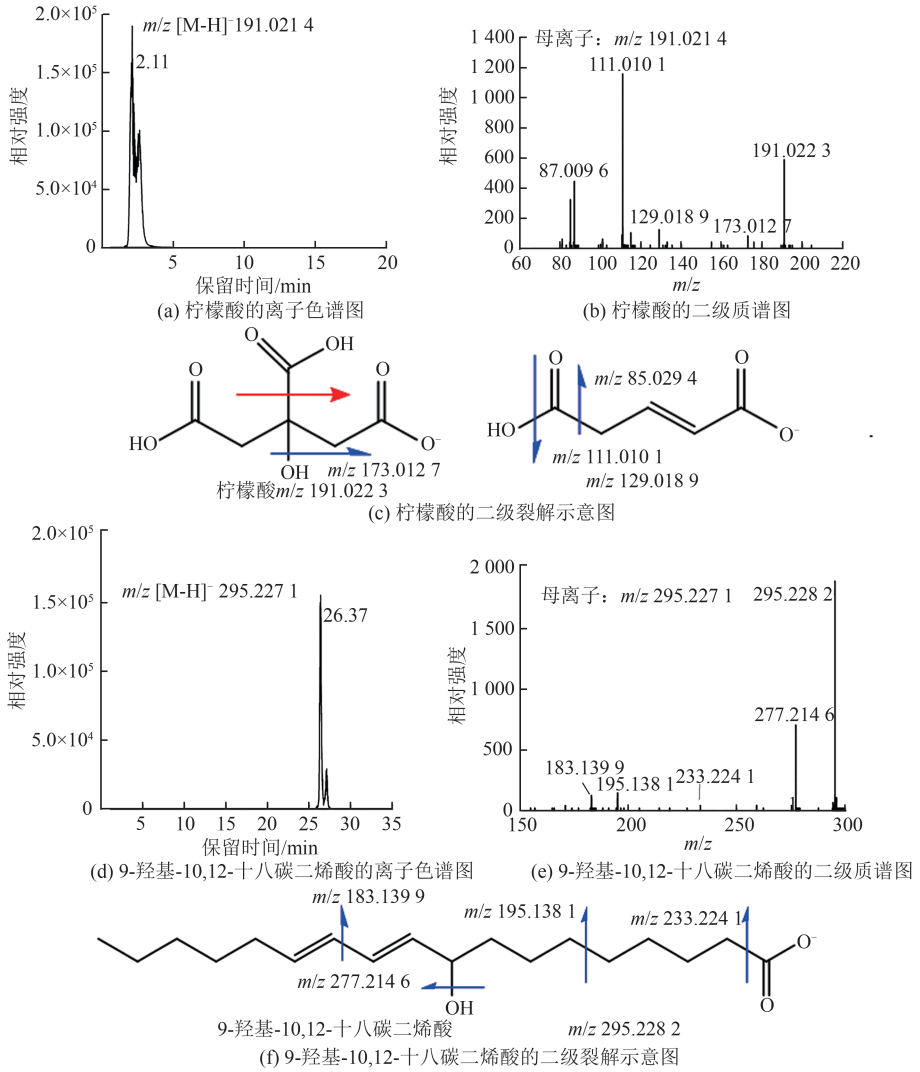
Table 1　MS/MS information of *S. pallidum* extracts obtained under different plasma treatment duration

类别	序号	保留时间/min	检测m/z	理论m/z	分子式	MS/MS	化合物名称	处理时间/min		
								0	6	9
有机酸类	2	1.86	133.014 1	133.014 2	$C_4H_6O_5$	115.010 3、89.028 2	莽草酸	+	+	+
	3	2.02	191.021 4	191.019 7	$C_6H_8O_7$	111.012 3	柠檬酸	+	+	+
	4	2.07	147.029 1	147.029 9	$C_5H_8O_5$	129.018 4、101.023 2、85.028 4	2-甲基苹果酸	+	+	+
	5	3.15	117.019 1	117.019 3	$C_4H_6O_4$	99.008 5	琥珀酸	+	+	+
	6	6.80	131.034 4	131.035 0	$C_5H_8O_4$	113.027 1、87.047 0	戊二酸	−	+	+
	8	11.89	187.099 2	187.097 6	$C_9H_{16}O_4$	143.113 8、125.101 0	壬二酸	−	−	+
脂肪酸类	11	25.88	269.211 7	269.212 2	$C_{16}H_{30}O_3$	251.201 3、199.128 8、171.108 8、123.057 6	9-十七碳烯酸	+	+	+
	12	26.37	295.227 1	295.227 9	$C_{18}H_{32}O_3$	277.214 6、233.224 1、195.138 1、183.139 9	9-羟基-10,12-十八碳二烯酸	+	−	−
	13	26.38	297.243 8	297.243 5	$C_{18}H_{34}O_3$	279.236 6、251.238 1、183.012 1	9-羟基十八烷酸	+	−	−
	14	30.36	283.266 7	283.264 3	$C_{18}H_{36}O_2$	265.781 9、227.040 6、179.756 5、149.027 8	棕榈酸	−	−	+
多酚类	7	10.76	209.045 3	209.045 5	$C_{10}H_{10}O_5$	191.036 4、181.053 3、137.070 0	5-羟基阿魏酸	+	+	+
	9	12.52	477.099 6	477.066 3	$C_{21}H_{18}O_{13}$	301.038 0	槲皮素-3-*O*-葡萄糖醛酸	−	+	+
	10	24.89	293.176 5	293.175 8	$C_{17}H_{26}O_4$	177.072 1、193.132 0、275.143 2	6-姜酚	+	+	+
其他类	1	1.53	181.070 9	181.070 7	$C_6H_{14}O_6$	163.062 7、119.034 2、101.024 0	*D*-甘露醇	+	+	+

注：“+”和“−”分别表示海蒿子提取物中存在或不存在该化合物。

化合物2、3、4、5的母离子*m/z*分别为133.014 1（[M-H]⁻，$C_4H_6O_5$）、191.021 4（[M-H]⁻，$C_6H_8O_7$）、147.029 1（[M-H]⁻，$C_5H_8O_5$）、117.019 1（[M-H]⁻，$C_4H_6O_4$）。其二级质谱碎片呈现18（脱去H_2O）、28（脱去CO）、16（脱去CH_4）等有机酸特征相对分子质量丢失规律。结合文献报道的一级、二级质谱数据进行对比分析[18]，化合物2、3、4、5分别被鉴定为莽草酸、柠檬酸、2-甲基苹果酸和琥珀酸。其中代表性化合物柠檬酸的提取离子色谱图、二级质谱图及裂解示意图见图7（a）~（c）。化合物6的母离子*m/z*为131.034 4（[M-H]⁻，$C_5H_8O_4$），碎片离子113.027 1、87.047 0分别由母离子丢失一分子H_2O和一分子CO_2产生。化合物8的母离子*m/z*为187.099 2（[M-H]⁻，$C_9H_{16}O_4$），其二级质谱碎片离子143.113 8和125.101 0由母离子依次丢失一分子CO_2和一分子H_2O产生，表明该化合物分子结构中同时存在羧基和羟基。因此，化合物6和8分别被鉴定为戊二酸和壬二酸[19]。

化合物11、12、13、14均被鉴定为脂肪酸。以化合物12为例，其离子色谱图和二级质谱裂解图见图7（d）~（e）。该化合物母离子*m/z*为295.227 1[M-H]⁻，对应分子式为$C_{18}H_{32}O_3$，MS/MS碎片离子277.214 6、233.224 1分别由母离子脱去H_2O、H_2O-CO_2片段产生；碎片离子195.138 1、183.139 9分别由母离子C5—C6键、C11—C12键的断裂产生，推测羟基取代位点为C7、C8、C9位。结合PuBChem数据库的化合物结构信息及文献报道的同类化合物二级裂解规律[20]，化合物12被鉴定为9-羟基-10，12-十八碳二烯酸，其完整二级裂解模式见图7（f）。采用相同



(a) 柠檬酸的离子色谱图　(b) 柠檬酸的二级质谱图
(c) 柠檬酸的二级裂解示意图
(d) 9-羟基-10,12-十八碳二烯酸的离子色谱图　(e) 9-羟基-10,12-十八碳二烯酸的二级质谱图
(f) 9-羟基-10,12-十八碳二烯酸的二级裂解示意图

图7　柠檬酸和9-羟基-10，12-十八碳二烯酸的离子色谱图、二级质谱图和二级裂解示意图

Fig. 7　Ion chromatograms, MS/MS spectrum, and possible MS/MS fragmentation pattern of citric acid and 9-hydroxy-10, 12-octadecadienoic acid

的结构解析方法，化合物11（269.211 7［M-H］⁻，$C_{16}H_{30}O_3$）、13（297.243 8［M-H］⁻，$C_{18}H_{34}O_3$）、14（283.266 7［M-H］⁻，$C_{18}H_{36}O_2$）分别被鉴定为9-十七碳烯酸、9-羟基十八烷酸[21]和棕榈酸[22]。

化合物1的母离子*m/z*为181.070 9［M-H］⁻，对应分子式为$C_6H_{14}O_6$，其MS/MS碎片离子为163.062 7［M-H_2O-H］⁻、119.034 2［M-4H_2O-H］⁻、101.024 0［M-5H_2O-H］⁻，表明该化合物至少含有5个羟基。通过与PuBChem数据库的化合物结构进行对比，确定该化合物为*D*-甘露醇。化合物7的分子式为$C_{10}H_{10}O_5$，其特征碎片离子191.036 4、181.053 3、137.070 0分别由母离子脱去一分子H_2O、一分子CO和一分子CH_2═CH—COOH产生。结合PuBChem数据库中的化合物结构进行对比，化合物7被鉴定为5-羟基阿魏酸。槲皮素相对分子质量为301，化合物9的母离子*m/z*为477.099 6，且含有特征二级质谱碎片301.038 0［M-1］，据此推测该化合物为槲皮素-3-*O*-葡萄糖醛酸。结合文献[23]与标准品比对结果，化合物10被鉴定为6-姜酚。

6-姜酚、槲皮素-3-*O*-葡萄糖醛酸和5-羟基阿魏酸均具有良好的抗氧化、降血糖活性，是海蒿子提取物发挥生物活性的关键物质基础[24-25]。已有大量研究证实，多酚具有比有机酸和糖类化合物更强的抗氧化和降血糖活性[26]。槲皮素-3-*O*-葡萄糖醛酸和5-羟基阿魏酸仅在等离子体处理的海蒿子提取物中被检出，这可能是其降血糖和抗氧化活性更强的重要原因。此外，已有研究表明，槲皮素-3-*O*-葡萄糖醛酸的降血糖活性优于阿卡波糖，*α*-葡萄糖苷酶抑制率的IC_{50}值为108.11 μmol/L[25]。同时，该成分在等离子体处理6 min的海蒿子提取物中的响应强度高于未处理和等离子体处理9 min的海蒿子提取物，表明其可能是海蒿子中最核心的降血糖活性成分。

3　结论

作者系统分析了等离子体处理时间对海蒿子提取物抗氧化和降血糖活性成分提取率、生物活性及主要化学成分的影响。结果表明，海蒿子提取物的总酚质量分数随等离子体处理时间延长整体呈上升趋势，其中等离子体处理9 min时提取物总酚质量分数最高，为4.86 mg/g。等离子体处理9 min的海蒿子提取物的抗氧化活性最优，其DPPH自由基清除率和$ABTS^+$自由基清除率显著高于未处理样品。在降血糖方面，等离子体处理6 min的海蒿子提取物的*α*-葡萄糖苷酶抑制率和DPP-4抑制率最高，均显著高于未处理样品。作者从海蒿子提取物中共鉴定出14种化合物，包括6种有机酸、4种脂肪酸、3种多酚和1种其他类化合物。质谱结果进一步表明，等离子体处理可有效促进海蒿子中化合物的溶出，尤其是槲皮素-3-*O*-葡萄糖醛酸和5-羟基阿魏酸等多酚类化合物。综上，适宜时长的等离子体处理可显著提高海蒿子提取物的抗氧化与降血糖活性，在海蒿子功能活性成分高效提取领域具有良好的应用前景。

参考文献

[1] Yan L，Vaghari-Tabari M，Malakoti F，et al. Quercetin：an effective polyphenol in alleviating diabetes and diabetic complications[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition，2023，63（28）：9163-9186.

[2] Li K，Wang Y J，Chen C，et al. Targeting pyroptosis：a novel strategy of ginseng for the treatment of diabetes and its chronic complications[J]. Phytomedicine，2025，138：156430.

[3] Saedi S，Tan Y，Watson S E，et al. Oxidative stress and pediatric diabetic cardiovascular complications：emerging research and clinical applications[J]. American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology，2025，328（4）：H945-H962.

[4] 罗世博，刘伟，谢星，等. 紫色野生樱桃李提取物抗氧化和降血糖活性研究及化学成分鉴定[J]. 食品与发酵工业，2024，50（19）：191-200.
Luo S B，Liu W，Xie X，et al. Antioxidant and hypoglycemic activities of purple *Prunus cerasifera* Ehrh extracts and identification of chemical constituents[J]. Food and Fermentation Industries，2024，50（19）：191-200.（in Chinese）

[5] Cheng X P，Xie X，Luo S B，et al. Wild *Prunus cerasifera* Ehrh. polyphenols alleviate hyperglycemia in type 2 diabetes mellitus mice *via* modulating gut microbiota-SCFAs-PI3K/Akt/TBC1D4 pathway[J]. Food Science & Nutrition，2026，14（2）：e71498.

[6] 陈荫，朱欣怡，沈潇，等. 羊栖菜多酚与多糖体外消化过程中抗氧化、降血糖及降尿酸的活性比较[J]. 广东海洋大学学报，2026，46（1）：119-130.
Chen Y，Zhu X Y，Shen X，et al. Comparison of antioxidant，hypoglycemic，and uric acid-lowering activities of polyphenols and polysaccharides from *Sargassum fusiforme* during *in vitro* digestion[J]. Journal of Guangdong Ocean University，2026，46（1）：119-130.（in Chinese）

[7] 史莹莹，杨晴丽，柳雅丽，等. 低温等离子体在食品中应用的研究[J]. 农产品加工，2020(7)：63-66，70.
Shi Y Y，Yang Q L，Liu Y L，et al. Study on the application of low temperature plasma in food[J]. Farm Roducts Rocessing，2020(7)：63-66，70.(in Chinese)

[8] Bao Y W，Reddivari L，Huang J Y. Development of cold plasma pretreatment for improving phenolics extractability from tomato pomace[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies，2020，65：102445.

[9] 谢星，王思宇，王佩欣，等. 海蒿子多酚组分的化学成分、抗氧化和降血糖活性分析[J]. 食品科学，2023，44(10)：281-290.
Xie X，Wang S Y，Wang P X，et al. Chemical composition，antioxidant and hypoglycemic activities of phenolic fractions from *Sargassum pallidum*[J]. Food Science，2023，44(10)：281-290.(in Chinese)

[10] Xie X，Chen C，Fu X. Modulation effects of *Sargassum pallidum* extract on hyperglycemia and hyperlipidemia in type 2 diabetic mice[J]. Foods，2023，12(24)：4409.

[11] Peng C Y，Xie Q Y，Xie X，et al. Extraction，phytochemicals characterization，*in vivo* and *in vitro* anti-diabetic ability of non-extractable polyphenols from *Undaria pinnatifida*[J]. Food Research International，2024，196：115021.

[12] 喻奕虎，贾丽，曾慧婷，等. 石榴花可水解单宁及抗糖尿病活性研究[J]. 中国中药杂志，2022，47(12)：3258-3264.
Yu Y H，Jia L，Zeng H T，et al. Hydrolyzable tannins from flowers of *Punica granatum* and their anti-diabetic activities[J]. China Journal of Chinese Materia Medica，2022，47(12)：3258-3264.(in Chinese)

[13] Mehta D，Yadav K，Chaturvedi K，et al. Impact of cold plasma on extraction of polyphenol from de-oiled rice and corn bran：improvement in extraction efficiency，*in vitro* digestibility，antioxidant activity，cytotoxicity and anti-inflammatory responses[J]. Food and Bioprocess Technology，2022，15(5)：1142-1156.

[14] Bao Y W，Reddivari L，Huang J Y. Enhancement of phenolic compounds extraction from grape pomace by high voltage atmospheric cold plasma[J]. LWT-Food Science and Technology，2020，133：109970.

[15] Li X A，Li M L，Ji N N，et al. Cold plasma treatment induces phenolic accumulation and enhances antioxidant activity in fresh-cut pitaya (*Hylocereus undatus*) fruit[J]. LWT-Food Science and Technology，2019，115：108447.

[16] Keshavarzi M，Najafi G，Ahmadi Gavlighi H，et al. Enhancement of polyphenolic content extraction rate with maximal antioxidant activity from green tea leaves by cold plasma[J]. Journal of Food Science，2020，85(10)：3415-3422.

[17] 程鑫鹏，刘佳慧，焦俊兰，等. 等离子体辅助提取对覆盆子提取物化学成分、抗氧化和降血糖活性的影响[J]. 食品与发酵工业，2025，51(16)：126-133.
Cheng X P，Liu J H，Jiao J L，et al. Effect of plasma-assisted extraction on chemical composition，antioxidant，and hypoglycemic activities of *Rubus chingii* Hu extracts[J]. Food and Fermentation Industries，2025，51(16)：126-133.(in Chinese)

[18] Iswaldi I，Gómez-Caravaca A M，Lozano-Sánchez J，et al. Profiling of phenolic and other polar compounds in zucchini (*Cucurbita pepo* L.) by reverse-phase high-performance liquid chromatography coupled to quadrupole time-of-flight mass spectrometry[J]. Food Research International，2013，50(1)：77-84.

[19] Zhang L，Tu Z C，Yuan T，et al. Solvent optimization，antioxidant activity，and chemical characterization of extracts from *Artemisia selengnesis* Turcz[J]. Industrial Crops and Products，2014，56：223-230.

[20] Zhang L，Tu Z C，Xie X，et al. Jackfruit (*Artocarpus heterophyllus* Lam.) peel：a better source of antioxidants and a-glucosidase inhibitors than pulp，flake and seed，and phytochemical profile by HPLC-QTOF-MS/MS[J]. Food Chemistry，2017，234：303-313.

[21] Jiménez-Sánchez C，Lozano-Sánchez J，Rodríguez-Pérez C，et al. Comprehensive，untargeted，and qualitative RP-HPLC-ESI-QTOF/MS2 metabolite profiling of green *Asparagus* (*Asparagus officinalis*)[J]. Journal of Food Composition and Analysis，2016，46：78-87.

[22] Sun Y，Qin Y，Li H Y，et al. Rapid characterization of chemical constituents in *Radix tetrastigma*，a functional herbal mixture，before and after metabolism and their antioxidant/antiproliferative activities[J]. Journal of Functional Foods，2015，18：300-318.

[23] Yudthavorasit S，Wongravee K，Leepipatpiboon N. Characteristic fingerprint based on gingerol derivative analysis for discrimination of ginger (*Zingiber officinale*) according to geographical origin using HPLC-DAD combined with chemometrics[J]. Food Chemistry，2014，158：101-111.

[24] Park S R，Kim J H，Jang H D，et al. Inhibitory activity of minor phlorotannins from *Ecklonia cava* on α-glucosidase[J]. Food Chemistry，2018，257：128-134.

[25] 谢星. 海蒿子中α-葡萄糖苷酶抑制剂的筛选及其抗糖尿病机制研究[D]. 广州：华南理工大学，2021：39-65.

[26] Rybak M，Wojdyło A. Inhibition of α-amylase，α-glucosidase，pancreatic lipase，15-lipooxygenase and acetylcholinesterase modulated by polyphenolic compounds，organic acids，and carbohydrates of *Prunus domestica* fruit[J]. Antioxidants，2023，12(7)：1380.

[27] Xie X，Chen C，Huang Q，et al. Investigation into the mechanisms of quercetin-3-*O*-glucuronide inhibiting α-glucosidase activity and non-enzymatic glycation by spectroscopy and molecular docking[J]. Food & Function，2021，12(17)：7825-7835.