

阿魏酸苯环取代衍生物改良支链氨基酸苦味味觉的研究

The bitterness inhibition effect of ferulic acid and its phenyl ring substituted derivatives on branched chain amino acids

王 浩¹ 李加兴² 郑建仙¹

WANG Hao¹ LI Jiaying² ZHENG Jianxian¹

(1. 华南理工大学食品科学与工程学院, 广东 广州 510640; 2. 湖南井矿盐工程技术中心, 湖南 长沙 410004)

(1. College of Food Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510640, China; 2. Hunan Provincial Research Centre of Well and Rock Salt Engineering Technology, Changsha, Hunan 410004, China)

摘要:目的:探索阿魏酸苯环 3 位上的基团变化对支链氨基酸苦味的抑制效果及呈味特性。方法:通过化学合成阿魏酸及其苯环取代衍生物,经傅里叶红外光谱、核磁共振氢谱和质谱结构鉴定,使用电子舌测试阿魏酸及其衍生物对支链氨基酸的苦味改良效果,包括:苦味抑制率、自身风味以及对其他味道的影响。结果:阿魏酸及其苯环取代衍生物分子对支链氨基酸均表现出一定的苦味抑制效果,除 A₁(—F)衍生物分子对缬氨酸的苦味抑制效果与阿魏酸(—OCH₃)接近,在不同的添加量下阿魏酸的苦味抑制效果均优于其他衍生物。结论:分子基团的大小和电负性强弱可能是影响苦味抑制效果的关键因素,阿魏酸苯环上 3 号位的—OCH₃对苦味抑制效果最优。

关键词:苦味抑制;阿魏酸;电子舌;支链氨基酸;衍生物

Abstract: Objective: This study aimed to explore the effect of group changes at the third position of the benzene ring of ferulic acid (FA) on the bitterness inhibition effect of branched chain amino acids and their flavor characteristics. **Methods:** FA and its phenyl ring substituted derivatives were synthesized and their structures were identified by Fourier transform infrared spectroscopy, nuclear magnetic resonance spectroscopy, and mass spectrometry. The electronic tongue test was used to evaluate the improvement in the bitter taste of branched-chain amino acids by FA and its derivatives, including bitterness

inhibition rate, self-flavor, and the effect on other tastes.

Results: The results showed that FA and its phenyl ring substituted derivatives exhibited certain bitterness inhibition effects on branched-chain amino acids, and the bitterness inhibition effect of FA was superior to that of other derivatives at different addition amounts except for the A₁(—F) derivative, which had a similar bitterness inhibition effect on valine as FA (—OCH₃) did. **Conclusion:** The size of molecular groups and strong electronegativity might be the key factors affecting the bitter inhibition effect, —OCH₃ at position 3 on the benzene ring showed the best bitter inhibition effect.

Keywords: bitterness inhibition; ferulic acid; electronic tongue; branched chain amino acid; derivative

苦味生物活性物质在补充营养物质、调节生理功能等方面的显著优势而备受青睐^[1-2]。然而,明显的苦涩味会给人带来生理和心理上的双重抗拒,苦味问题极大限制了苦味食品资源的开发与有益的加工特性,逐渐成为影响食品工业可持续发展关键因素。目前,改善食品苦味的方法有味觉掩盖、物理包埋和分离去除等,但这些手段的苦味抑制效果和应用范围有限,如添加过多的糖掩盖苦味不利于健康、对苦味物质进行包封不利于食品风味、分离去除苦味物质会破坏有益活性成分等^[3]。

苦味抑制分子是一种成本低廉、方便高效的新型苦味改良手段,添加微量苦味抑制效果优良^[4]。阿魏酸(Ferulic acid, FA),即 3-(4-羟基-3-甲氧苯基)-2-丙烯酸,是最早发现具有苦味抑制效果的苯丙烯酸衍生物分子^[5],添加量在 0.01~0.1%就具有一定的苦味抑制效

基金项目:国家自然科学基金面上项目(编号: NSFC31972010)

作者简介:王浩,男,华南理工大学在读硕士研究生。

通信作者:郑建仙(1966—),男,华南理工大学教授,博士生导师,博士。E-mail: fejxzh@scut.edu.cn

收稿日期:2023-04-04 **改回日期:**2023-07-06

果^[6]。崔明明等^[7-8]研究发现阿魏酸能够有效抑制多种苦味物质的苦味感知,如高效甜味剂(甜菊糖苷、糖精钠、安赛蜜等)的后苦味、硫酸奎宁和咖啡因的苦味等,且对糖精钠的抑制效果优于咖啡因。支链氨基酸(Branched chain amino acids, BBAC)是3种呈现苦味特征的必需氨基酸,即亮氨酸、异亮氨酸、缬氨酸,在促进胰岛素、生长激素释放、合成代谢等方面具有重要的生理作用^[9],是运动员和健身爱好者最有效的营养补充剂^[10]。Akitomi等^[11]对支链氨基酸苦味进行了感官评价和电子舌测试,表现出良好的相关性,Tokuyama等^[12]建立了支链氨基酸苦味抑制效果的电子舌分析模型,探究L-Arg对支链氨基酸的苦味改良效果。

电子舌是一种能够对味觉信号进行量化处理的精密仪器,具有高灵敏度、高效率和高重现性等特点^[13],广泛应用于食品滋味分析,如茶叶风味^[14]、食盐咸鲜协同^[15]等。SA402B电子舌是日本 Insent 公司开发的一款基于人工脂质膜的新型味觉分析仪器^[16],可用于测试苦味抑制效果^[17],如抑制奎宁苦味^[18]、高效甜味剂后苦味的改良^[19-20]、药物苦味抑制^[21]等。研究拟通过电子舌测试阿魏酸及其苯环取代衍生物对支链氨基酸的苦味抑制效果、自身风味以及对其他味道的影响,探究阿魏酸苯环结构改变与苦味改良作用的影响规律,为开发新型苦味抑制剂提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验试剂

3-甲氧基 4-羟基苯甲醛、3,4-二羟基苯甲醛、3-乙氧基-4-羟基苯甲醛、3-甲基-4-羟基苯甲醛、3-氟-4-羟基苯甲醛、丙二酸、乙酸铵、碳酸氢钠、N,N-二甲基甲酰胺(DMF)、苯:分析纯,上海毕得医药科技股份有限公司;

甲醇:色谱纯,上海阿拉丁生化科技股份有限公司;

盐酸:分析纯,广东广试试剂科技有限公司;

缬氨酸、亮氨酸、异亮氨酸:食品级,河南万邦化工科技有限公司。

1.2 试验仪器

电子舌:SA-402B型,Ag/AgCl电极,日本 Insent 公司;集热式磁力搅拌器:DF-101S型,上海力辰邦西仪器科技有限公司;

DT电子天平:FA124C型,上海力辰邦西仪器科技有限公司;

超纯水仪:KL-UP-III-20型,成都唐氏康宁科技发展有限公司;

傅里叶变换红外光谱仪:VERTEX 33型,德国 Bruker 公司;

600 M 超导核磁共振波谱仪:AVANCE III HD型,德国 Bruker 公司;

超高压液相色谱—高分辨质谱联用仪:Agilent1290型,德国 Bruker 公司。

1.3 试验方法

1.3.1 FA 及其苯环取代衍生物的合成 参照朱婉清^[22]的方法并稍作修改,在 50 mL 圆底烧瓶中,逐步加入 33 mmol 3-甲氧基 4-羟基苯甲醛、50 mmol 丙二酸、30 mL 苯、15 mL DMF 和 0.3 g 乙酸铵,并放入磁转子。将圆底烧瓶置于恒温水浴搅拌器中,装上回流装置,在水浴温度为 90 ℃,反应 4 h。反应完毕后,冷却至室温。在溶液中缓慢加入饱和的 NaHCO₃溶液,同时进行搅拌,添加至不再产生气泡。静置分出下层;在分层后的溶液中缓慢滴加 6 mol/L 盐酸,至不再出现明显白色为止,溶液 pH 约为 2~3。放置于 4 ℃ 冰箱中冷却结晶。对样品进行二次重结晶,40~50 ℃ 下烘干,得到合成样品并称量。FA 及其苯环衍生物的合成路线见图 1。

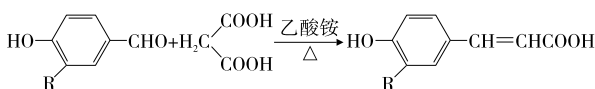


图 1 FA 及其苯环衍生物的合成路线

Figure 1 Synthetic routes of FA and its phenyl ring derivatives

1.3.2 FA 及其苯环取代衍生物的结构表征

(1) 红外光谱:称取 5 mg 合成样品,采用溴化钾压片处理,进行傅里叶变换红外光谱测试,扫描范围 4 000~500 cm⁻¹。

(2) 核磁共振氢谱:称取 20 mg 合成样品,充分溶解于 0.6 mL 氘代 DMSO,设置仪器扫描速度、扫描时间、脉冲宽度等参数后进行测试,¹H NMR 共振频率为 600 MHz。

(3) 高分辨质谱:称取 5 mg 合成样品,将其用色谱级甲醇溶解,0.22 μm 滤膜过滤,ESI 负离子模式,扫描范围 *m/z* 50~500。

1.3.3 电子舌测试

(1) 测试 FA 及其苯环衍生物对支链氨基酸的苦味抑制效果:配制 100 mmol 的亮氨酸、异亮氨酸、缬氨酸溶液为底物,添加 0, 200, 300 mg/L 的 FA 及其苯环衍生物 A₁~A₄,其中 0 mg/L 添加量作为空白组,进行电子舌测试。每个样品测试 4 次,取后 3 次测试平均值为最终测试结果。

(2) 测试 FA 及其苯环衍生物自身的呈味特性:配制 200 mg/L 的 FA 及其苯环衍生物 A₁~A₄溶液,进行自身风味测试,包括涩味、酸味、鲜味、咸味、厚味 5 个味觉信号。每个样品测试 4 次,取后 3 次测试平均值为最终测试结果。

(3) 测试 FA 及其苯环衍生物其他味觉的影响:配制

100 mmol 的亮氨酸溶液,添加质量浓度为 200 mg/L 的 FA 及其苯环衍生物 $A_1 \sim A_4$ 进行其他味觉测试,包括涩味、酸味、鲜味、咸味、厚味 5 个味觉信号进行测试。每个样品测试 4 次,取后 3 次测试平均值为最终测试结果。

1.3.4 苦味抑制率的计算

$$I_E = (I_0 - I_1) / I_0 \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

I_E ——电子舌苦味抑制率, %;

I_0 ——未添加苦味抑制剂的电子舌苦味值;

I_1 ——加入苦味抑制剂后的电子舌苦味值。

1.3.5 数据分析 使用 SPSS Statistics、Origin、Chem Draw、MestReNova 软件进行数据处理和绘图。

2 结果与分析

2.1 FA 及其苯环取代衍生物的合成及结构表征

2.1.1 FA 及其苯环取代衍生物的合成 FA 及其衍生物的合成使用经典的 Knoevenagel 法,苯作溶剂,乙酸铵和 DMF 作催化剂,相比于吡啶作溶剂、哌啶和苯胺作催化剂更加环保,试验安全性更高。产物经过二次酸碱重结晶,低温下得到晶型较好的目标产物。表 1 反映了产物的外观特征和产率。

表 1 FA 及其苯环衍生物的合成产率及外观特征

Table 1 Synthetic yield and appearance characteristics of FA and its phenyl ring derivatives

化合物	名称	外观	产率/%
FA	4-羟基-3-甲氧基肉桂酸	淡黄色粉末	80.3
A_1	3,4-二羟基肉桂酸	黄色粉末	78.4
A_2	4-羟基-3-甲基肉桂酸	白色粉末	79.4
A_3	4-羟基-3-乙氧基肉桂酸	白色粉末	82.8
A_4	4-羟基-3-氟肉桂酸	白色粉末	72.2

2.1.2 目标化合物的结构表征

(1) 红外光谱表征:如图 2 所示,在 $3\ 500 \sim 3\ 200\text{ cm}^{-1}$ 附近有宽峰,主要是羟基的 O—H 和苯环上 C—H 伸缩振动叠加所造成的,在 $1\ 680 \sim 1\ 640\text{ cm}^{-1}$ 左右的锐峰是羧酸的 C=O 伸缩振动, $1\ 680 \sim 1\ 600\text{ cm}^{-1}$ 对应苯环骨架和烯烃的振动,FA、 A_1 、 A_3 在 $1\ 250 \sim 1\ 100\text{ cm}^{-1}$ 对应醚键 C—O 特征峰。

(2) 核磁共振氢谱表征:如图 3~图 7 所示,FA 及其苯环衍生物 $A_1 \sim A_4$ 均为苯丙烯酸分子,化学结构差异在于苯环 3 号位上的活性基团。在 $^1\text{H NMR}$ 中,FA 的化学基团—COOH 的吸收峰为单峰, $\delta = 12.13$; 酚羟基上—OH 为单峰, $\delta = 9.55$; 受苯环结构影响,丙烯酸基团 3 号碳原子上的双键氢化学位移趋向于高场, $\delta = 7.50$, 表现为双重峰; $\delta = 7.28$ (d 峰)、 $\delta = 7.09$ (dd 峰)、 $\delta = 6.8$ (d 峰) 是

苯环上的 H; 丙烯酸基 2 号碳原子上的双键氢与—C=O 键相连,化学位移趋向于低场, $\delta = 6.37$ (d 峰), $J = 15.9\text{ Hz}$, 表明合成物质的立体异构为反式; $\delta = 3.82$ (s 峰) 是苯环 3 号位上甲氧基取代的—CH₃ 的 H。相比于 FA 的核磁共振氢谱,衍生物 A_1 含有两个酚羟基,在 $\delta = 9.13, 9.22$ 表现为两个单峰;衍生物 A_1 的氢原子数与 FA 相同;衍生物 A_3 为乙氧基取代,在 $\delta = 4.06 \sim 4.09$ 表现为—CH₂ 基团

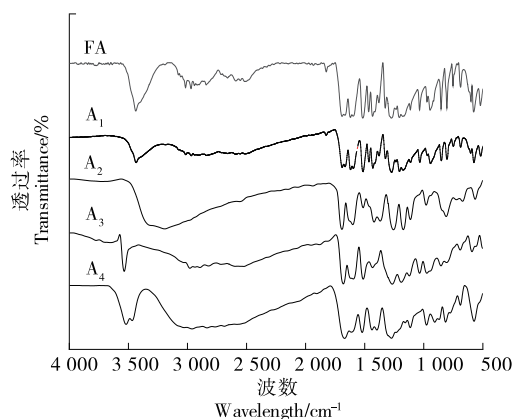


图 2 FA 及其苯环衍生物的红外光谱图

Figure 2 Infrared spectra of FA and its phenyl ring derivatives

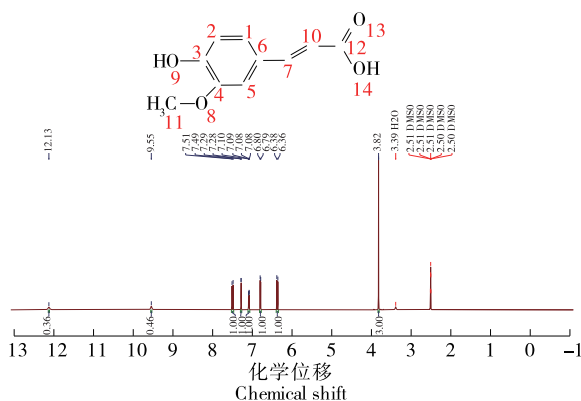


图 3 FA 核磁共振氢谱图

Figure 3 $^1\text{H NMR}$ spectra of FA

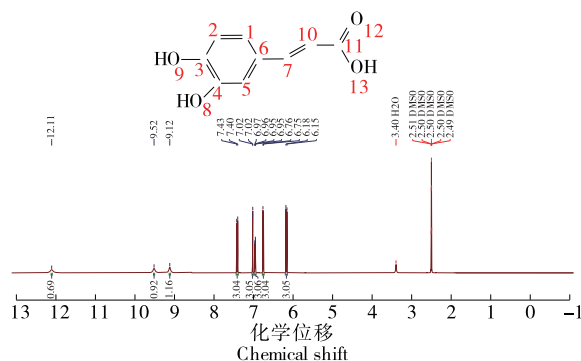


图 4 衍生物 A_1 核磁共振氢谱图

Figure 4 $^1\text{H NMR}$ spectra of A_1

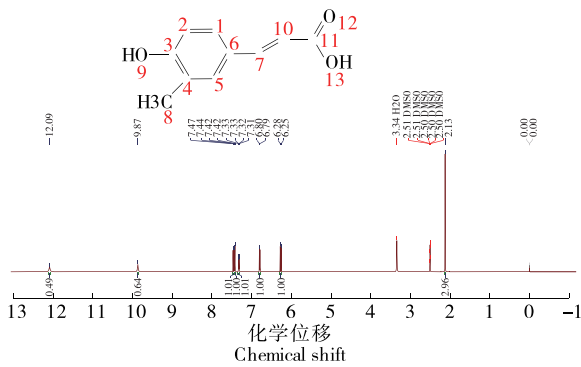


图 5 衍生物 A₂核磁共振氢谱图
Figure 5 ¹H NMR spectra of A₂

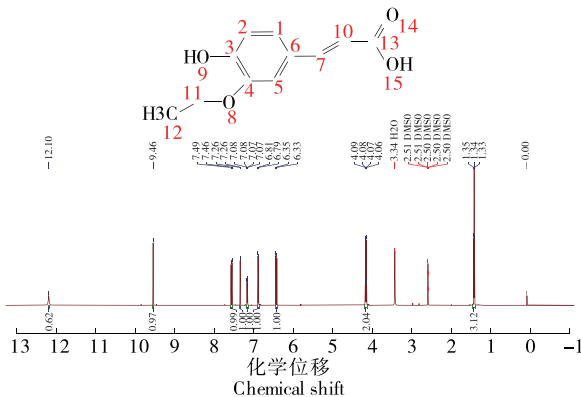


图 6 衍生物 A₃核磁共振氢谱图
Figure 6 ¹H NMR spectra of A₃

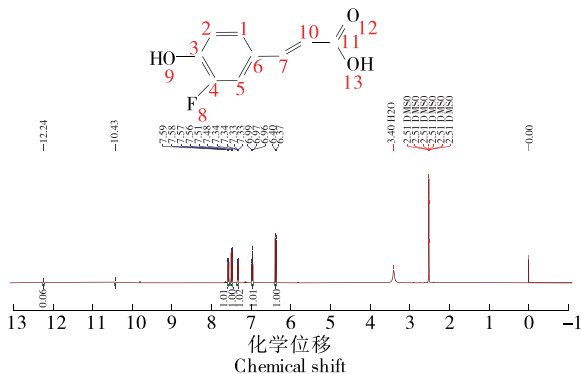


图 7 衍生物 A₄核磁共振氢谱图
Figure 7 ¹H NMR spectra of A₄

的峰;衍生物 A₄为氟取代,表现为无甲基峰。

(3) 质谱表征:采用负离子模式表征酸类化学物质。如表 2 所示,5 种化学物质的理论值与实测值的误差均不超过 5×10^{-6} ,确证了目标化合物的结构特征与理论相符。

2.2 FA 及其苯环衍生物的电子舌分析

2.2.1 FA 及其苯环取代衍生物添加量对支链氨基酸苦味的抑制效果分析 由图 8 可知,FA 及其苯环衍生物 A₁~A₄对支链氨基酸均能表现出一定的苦味抑制效果,

表 2 FA 及其苯环衍生物的质谱结果

Table 2 Results of mass spectrometry FA and its phenyl ring derivatives

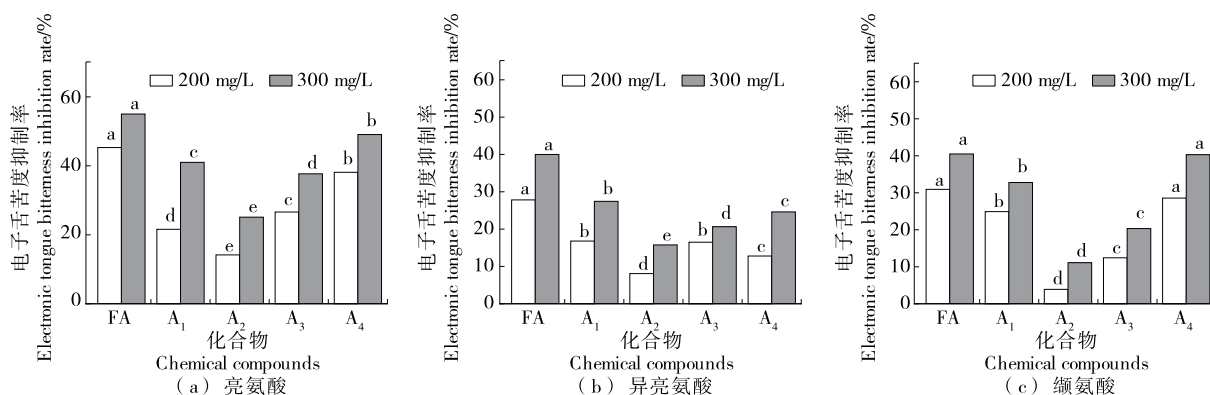
化合物	分子式	[M-H] ⁻ (m/z)		误差(10 ⁻⁶)
		计算值	实测值	
FA	C ₁₀ H ₁₀ O ₄	193.049 8	193.049 5	-1.5
A ₁	C ₉ H ₈ O ₄	179.035 0	179.034 1	-5.0
A ₂	C ₁₀ H ₁₀ O ₃	177.055 7	177.056 3	3.4
A ₃	C ₁₁ H ₁₂ O ₄	207.066 3	207.066 8	2.4
A ₄	C ₉ H ₇ FO ₃	181.030 6	181.030 1	-2.7

且添加量越大苦味抑制效果越明显。在 200 mg/L 和 300 mg/L 添加量下,除 FA 与衍生物 A₄对缬氨酸的苦味抑制效果无显著差异($P>0.05$),衍生物 A₁~A₄的苦味抑制效果均不如 FA($P<0.05$)。衍生物 A₂的苦味抑制效果表现最差,在低添加量(200 mg/L)下,对所有苦味底物的苦味抑制率均不超过 20%。衍生物 A₄在亮氨酸和缬氨酸溶液中的苦味抑制效果优于衍生物 A₁~A₃;在异亮氨酸溶液中,苦味抑制效果表现为:FA>A₁>A₄>A₃>A₂。

分析 FA 及其苯环衍生物 A₁~A₄分子结构,探究 FA 苯环上 3 号位活性基团变化对苦味抑制效果影响规律。比较衍生物 A₂与其他衍生物分子结构,衍生物 A₂取代基为甲基,其他衍生物均含有电负性很强的氧原子或氟原子,具有优良的氢键受体,Kan 等^[23]研究发现,苦味抑制分子形成氢键能力越强与苦味受体的关键氨基酸结合能力越强;推测苯环衍生物基团的电负性可能是影响苦味抑制效果的关键因素。衍生物 A₃与 FA 相比,FA 苯环 3 号位是甲氧基,而衍生物 A₃取代基是乙氧基,甲氧基与乙氧基为烷氧基取代系列,但衍生物 A₃在高浓度下苦味抑制效果远低于 FA;推测可能是甲氧基改造为乙氧基后分子体积增大的原因导致苦味抑制效果下降。衍生物 A₁与 A₄的取代基团分别为羟基和氟取代,与 FA 一样均含电负性较强的氧原子和氟原子,进一步分析衍生物 A₁和 A₄的分子结构发现,衍生物 A₁苯环上含有两个相邻的羟基以及丙烯酸结构,易形成分子内或分子间氢键,导致原有分子构象的改变,新的分子构象可能不利于与苦味受体结合;而衍生物 A₄的氟取代较为特殊,氟是电负性最大的元素,形成的碳氟键具有很大的偶极矩^[24],分子疏水性强,以致在高浓度下衍生物 A₄的苦味抑制效果偏弱。可见,取代基团分子体积和电负性对苦味抑制分子至关重要,电负性更强的苦味抑制分子苦味抑制效果更好,而分子体积增大不利于苦味抑制效果的发挥。

2.2.2 FA 及苯环衍生物滋味特性分析

(1) FA 及其苯环衍生物的自身风味:如图 9 所示,FA 及其衍生物 A₁~A₄均表现出一定的涩味、酸味、鲜味、咸味、厚味,其中在涩味表现最为突出,其他 4 种味道



同一浓度小写字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

图 8 FA 及其苯环取代衍生物 A₁~A₄ 对不同苦味底物苦度的影响

Figure 8 Effects of FA and its phenylring derivatives A₁~A₄ on the bitterness of various bitter substances

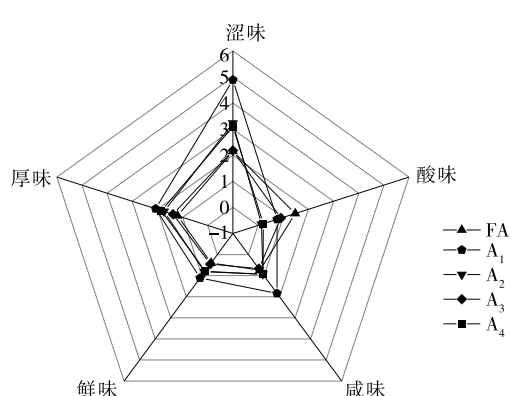


图 9 FA 及其苯环衍生物的电子舌雷达图

Figure 9 Electronic tongue radar map of FA and its phenyl ring derivatives

表现不明显。在涩味方面表现较为显著: $A_1 > A_2 > A_4 > A_3 > FA$, 表明苯环上 3 号位上基团的改变会显著影响衍生物的自身涩味。在酸味方面: 衍生物 A₂ 的酸味最大。与 FA 相比, 衍生物酸涩味均有所增强。

(2) FA 及其苯环衍生物对支链氨基酸其他味道的影响: 以亮氨酸为底物, 考察 FA 及其衍生物在抑制支链氨基酸苦味的同时, 对其他味觉的影响。如图 10 所示, 添加苦味抑制衍生物分子后, 只有咸味无显著变化, 但会带来涩味、鲜味、酸味、厚味方面的异味变化。在涩味方面: 衍生物 A₂ 与衍生物 A₁ 表现出强烈的涩味; FA 及 A₁~A₄ 均表现出一定程度的鲜味、酸味、厚味增强作用。

3 结论

研究的核心是探索阿魏酸苯环 3 号位活性基团改变对苦味抑制效果和呈味特性的影响。通过化学合成的方法得到 5 种苯环取代衍生物分子, 并经红外光谱、核磁共振、高分辨质谱等手段进行了结构确证。基于电子舌评价 5 种苯环取代衍生物对支链氨基酸的苦味抑制效果, 结果表明, 在苦味抑制分子添加量为 200, 300 mg/L 时,

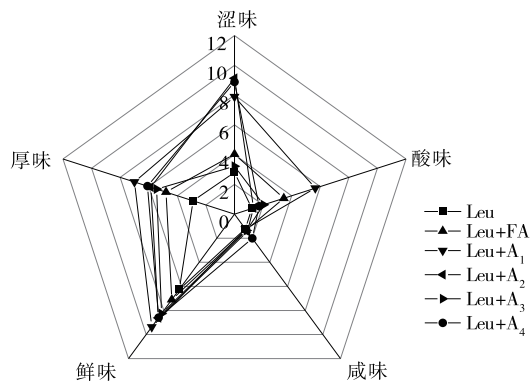


图 10 含不同苦味抑制化合物亮氨酸溶液的电子舌雷达图

Figure 10 Electronic tongue radar map of leucine solution containing different bitterness inhibiting compounds

衍生物均表现出一定的苦味抑制效果, 其中甲氧基取代衍生物的苦味抑制效果最优, 分子基团体积和电负性可能是影响苦味抑制效果的关键因素。在呈味特性方面, 5 种衍生物均表现较强的涩味、鲜味、酸味、厚味, 可能在实际应用中会带来异味。研究确认了苯环 3 号位上甲氧基对苦味抑制效果的关键作用。研究合成了 5 种衍生物, 后续需要进一步探讨苯环上活性基团改造后衍生物的苦味抑制效果, 如将苯环 3 号位替换为硝基、乙基、丙氧基等, 以及在苯环空位上添加活性基团等, 完善苦味抑制分子的构效关系。对于具有潜力的苦味抑制分子进行安全性和应用特性评价, 如毒理性研究、物理性质研究、感官评价等, 发现能够高效改善食品苦味且安全性好的新型苦味抑制剂。

参考文献

- [1] 任建敏, 吴四维. 功能食品苦味功能因子生理活性及其掩苦技术的研究进展[J]. 食品工业科技, 2013, 34(3): 396-400.

- REN J M, WU S W. Research progress in bioactivities of the bitter compounds in functional foods and their bitter taste masking technology[J]. Food Industry Science and Technology, 2013, 34(3): 396-400.
- [2] 代丽凤, 罗理勇, 罗江琼, 等. 植物苦味物质概况及其在食品工业的应用[J]. 中国食品学报, 2020, 20(11): 305-318.
- DAI L F, LUO L Y, LUO J Q, et al. Overview of bitter substances in plants and their application in food industry[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2020, 20(11): 305-318.
- [3] SUN-WATERHOUSE D, WADHWA S S. Industry-relevant approaches for minimising the bitterness of bioactive compounds in functional foods: A review[J]. Food and Bioprocess Technology, 2013, 6(3): 607-627.
- [4] LEY J P. Masking bitter taste by molecules [J]. Chemosensory Perception, 2008, 1(1): 58-77.
- [5] 王伟江, 郑建仙. 天然苦味抑制剂的研发与应用[J]. 中国调味品, 2006(2): 13-16, 53.
- WANG W J, ZHENG J X. Research and application of natural bitterness inhibitors[J]. China Condiment, 2006(2): 13-16, 53.
- [6] RIEMER J A. Bitterness inhibitors: US5336513A[P]. 1994-08-09.
- [7] 崔明明, 汲广全, 郑建仙. 复合苦味抑制剂对安塞蜜苦味抑制效果研究[J]. 中国调味品, 2013, 38(3): 112-115.
- CUI M M, JI G Q, ZHENG J X. Inhibition effect of compound bitterness inhibition on acesulfame K[J]. China Condiment, 2013, 38(3): 112-115.
- [8] 崔明明, 汲广全, 郑建仙. 阿魏酸苦味抑制效果研究[J]. 中国食品添加剂, 2013(1): 170-174.
- CUI M M, JI G Q, ZHENG J X. Inhibition effect of ferulic acid on bitterness[J]. China Food Additives, 2013(1): 170-174.
- [9] RAMZAN I, ARDAVANI A, VANWEERT F, et al. The association between circulating branched chain amino acids and the temporal risk of developing type 2 diabetes mellitus: A systematic review & meta-analysis[J]. Nutrients, 2022, 14(20): 4 411.
- [10] MARTINHO D V, NOBARI H, FARIA A, et al. Oral branched-chain amino acids supplementation in athletes: A systematic review[J]. Nutrients, 2022, 14(19): 4 002.
- [11] AKITOMI H, TAHARA Y, YASUURA M, et al. Quantification of tastes of amino acids using taste sensors[J]. Sensors and Actuators B-Chemical, 2013, 179: 276-281.
- [12] TOKUYAMA E, SHIBASAKI T, KAWABE H, et al. Bitterness suppression of BCAA solutions by L-ornithine[J]. Chemical & Pharmaceutical Bulletin, 2006, 54(9): 1 288-9 122.
- [13] 王兴亚, 庞广昌, 李阳. 电子舌与真实味觉评价的差异化研究进展[J]. 食品与机械, 2016, 32(1): 213-216, 220.
- WANG X Y, PANG G C, LI Y. Research progress of difference between electronic tongue and real taste evaluation[J]. Food & Machinery, 2016, 32(1): 213-216, 220.
- [14] 刘忠英, 冉乾松, 张拓, 等. 基于电子舌与人工感官的茶叶滋味属性参考物呈味强度相关性分析[J]. 食品与机械, 2022, 38(11): 40-45.
- LIU Z Y, RAN Q S, ZHANG T, et al. Correlation analysis of taste intensity of tea flavor attribute reference based on electronic tongue and artificial senses[J]. Food & Machinery, 2022, 38(11): 40-45.
- [15] 苏智敏, 黄小平, 刘飞, 等. 电子舌技术在食用盐模糊感官评价中的应用[J]. 食品与机械, 2020, 36(8): 53-56.
- SU Z M, HUANG X P, LIU F, et al. Application of electronic tongue technology for fuzzy sensory evaluation of edible salts[J]. Food & Machinery, 2020, 38(11): 40-45.
- [16] SLIWINSKA M, WISNIEWSKA P, DYMERSKI T, et al. Food analysis using artificial senses[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2014, 62(7): 1 423-1 448.
- [17] ITO M, IKEHAMA K, YOSHIDA K, et al. Bitterness prediction of H1-antihistamines and prediction of masking effects of artificial sweeteners using an electronic tongue[J]. International Journal of Pharmaceutics, 2013, 441(1/2): 121-127.
- [18] NAKAMURA T, TANIGAKE A, MIYANAGA Y, et al. The effect of various substances on the suppression of the bitterness of quinine-human gustatory sensation, binding, and taste sensor studies[J]. Chemical & Pharmaceutical Bulletin, 2002, 50(12): 1 589-1 593.
- [19] WU X, ONITAKE H, HARAGUCHI T, et al. Quantitative prediction of bitterness masking effect of high-potency sweeteners using taste sensor [J]. Sensors and Actuators B-Chemical, 2016, 235: 11-17.
- [20] WU X, MIYAKE K, TAHARA Y, et al. Quantification of bitterness of coffee in the presence of high-potency sweeteners using taste sensors[J]. Sensors and Actuators B-Chemical, 2020, 309: 127784.
- [21] SHIRAISHI S, HARAGUCHI T, NAKAMURA S, et al. Suppression in bitterness intensity of bitter basic drug by chlorogenic acid[J]. Chemical & Pharmaceutical Bulletin, 2017, 65(2): 151-156.
- [22] 朱婉清. 阿魏酸及其衍生物的合成与苦味抑制研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013: 18-26.
- ZHU W Q. The synthesis and inhibition study of ferulic acid and its derivative [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013: 18-26.
- [23] KAN R, YU Z, ZHAO W J L. Identification and molecular action mechanism of novel TAS2R14 blocking peptides from egg white proteins[J]. LWT-Food Science and Technology, 2023, 180: 114716.
- [24] 赵芸, 焦晓光, 郭冰之, 等. 含氟聚氨酯的制备及性能研究[J]. 北京理工大学学报, 2021, 41(9): 1 015-1 022.
- ZHAO Y, JIAO X G, GUO B Z, et al. Preparation of fluorinated polyurethane and property analysis[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2021, 41(9): 1 015-1 022.