王念, 师甜梦, 沈玥, 等. 不同地区核桃雄花氨基酸多样性分析 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(16): 357−365. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060315

WANG Nian, SHI Tianmeng, SHEN Yue, et al. Analysis of Amino Acid Diversity in Walnut Male Flowers Across Different Regions[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(16): 357−365. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060315

· 分析检测 ·

不同地区核桃雄花氨基酸多样性分析

王　念[1], 师甜梦[2], 沈　玥[2], 张卢峰[3], 宋莲军[2], 王蒙慧[2], 雷凤梅[2], 李　倩[2,*]

（1.河南省林业科学研究院, 河南郑州 450002;
2.河南农业大学食品科学技术学院, 河南郑州 450002;
3.卢氏县原荣农业有限公司, 河南三门峡 472200）

摘　要: 本研究以 11 个不同地区的核桃雄花为原材料，通过全自动氨基酸分析法检测其氨基酸的组成与含量，并采用相关性分析、主成分分析及聚类分析对其进行综合评价。结果表明：11 个不同地区的核桃雄花均检测出 16 种氨基酸，其中有 7 种必需氨基酸（赖氨酸、蛋氨酸、苏氨酸、异亮氨酸、亮氨酸、缬氨酸、酪氨酸），2 种半必需氨基酸（组氨酸、精氨酸）和 7 种非必需氨基酸（甘氨酸、丙氨酸、脯氨酸、丝氨酸、胱氨酸、天冬氨酸、谷氨酸）。各个地区的氨基酸总含量在 10.53%~16.61%，其中河北地区的氨基酸总含量最高（16.61%），且呈味与调味氨基酸（26.88%）和药用氨基酸（11.88%）的含量也最高，说明该地区核桃雄花在食品研发方面具有显著的应用潜力。PCA 分析表明 3 个主成分累计方差贡献率为 96.51%，较好地反映出核桃雄花中氨基酸的综合信息。综合得分排列前 4 位的地区分别为河北、河南、江苏和山东地区。聚类分析将 11 个地区分为 3 类，与主成分分析结果一致，较好地反映出核桃雄花氨基酸组成、呈味和特殊功效的地区差异性。本研究结果为今后核桃雄花种植地区的选择、加工利用提供了良好理论基础。

关键词: 核桃雄花, 不同地区, 氨基酸, 综合评价, 主成分分析, 聚类分析

中图分类号: S664.1　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)16−0357−09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060315

本文网刊:

Analysis of Amino Acid Diversity in Walnut Male Flowers Across Different Regions

WANG Nian[1], SHI Tianmeng[2], SHEN Yue[2], ZHANG Lufeng[3], SONG Lianjun[2], WANG Menghui[2], LEI Fengmei[2], LI Qian[2,*]

（1.Forestry Academy of Henan, Zhengzhou 450002, China;
2.School of Food Science and Technology, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China;
3.Lushi County Yuanrong Agriculture Co., Ltd., Sanmenxia 472200, China）

Abstract: This study used walnut male flowers collected from 11 distinct regions to analyze their amino acid composition and content using an automatic amino acid analyzer. Correlation analysis, principal component analysis (PCA) and cluster analysis were conducted for a comprehensive evaluation. The results indicated that all samples contained 16 amino acids, including 7 essential amino acids (lysine, methionine, threonine, isoleucine, leucine, valine, tyrosine), 2 semi-essential amino acids (histidine, arginine) and 7 non-essential amino acids (glycine, alanine, proline, serine, cystine, aspartic acid, glutamic acid). The total amino acid content across regions ranged from 10.53% to 16.61%. The sample from Hebei exhibited the highest tota lamino acid content (16.61%), as well as the highest levels of flavor-related and seasoning amino acids (26.88%) and medicinal amino acids (11.88%), suggesting that walnut male flowers from this region possessed considerable potential for application in food research and development. PCA revealed that the first three principal components col-

收稿日期: 2025−06−25

基金项目: 河南省农业科学院创新团队（2024TD33）; 河南省科技兴林项目（YLK202504）; 河南省研究生联合培养基地项目（YJS2022JD16）。

作者简介: 王念（1978−）, 女, 硕士, 副研究员, 研究方向: 特色经济林遗传育种与高值化利用, E-mail: hnlkywn@163.com。

*** 通信作者:** 李倩（1983−）（ORCID: 0000−0002−6782−9521）, 女, 博士, 副教授, 研究方向: 食品营养与安全, E-mail: lgql1991@163.com。

lectively accounted for 96.51% of the total variance, effectively capturing the comprehensive amino acid profile. The top four regions based on comprehensive scores were Hebei, Henan, Jiangsu and Shandong. Cluster analysis grouped the 11 regions into three categories, consistent with the PCA findings, and accurately reflected the regional differences in amino acid composition, flavor characteristics and functional properties. These findings provide a valuable theoretical basis for selecting suitable planting regions and guiding the processing and utilization of walnut male flowers.

Key words: walnut male flowers; different regions; amino acids; comprehensive evaluation; principal component analysis; cluster analysis

核桃隶属于胡桃科(Juglandaceae)核桃属(*Juglans*)植物,因其品质优良,已经广泛应用于食品、酿酒、医疗等各个行业[1−2]。核桃雄花作为其主要的附属产品之一,产量巨大,通常在对核桃树的修剪过程中被丢弃,这不仅造成了环境的污染,更是资源的浪费[3]。研究表明[4−5],核桃雄花中富含蛋白质、维生素、矿物质等多种营养素及生物活性成分,尤其是多酚类和黄酮类含量可观[6−7],有抗氧化、抗菌、抗肿瘤、预防心血管疾病等功效[8−10],因此其具有一定的保健作用。核桃雄花可以进一步加工利用,在食品开发、生物医药、生物酶制剂等方面具有良好的市场潜力[11]。

核桃雄花中含有丰富的蛋白质资源,其含量可达 30.21%,提取率为 55.63%[12]。氨基酸作为蛋白质的基本构成单元,是维持人体生理活动的重要生物活性物质[13],按照人体内是否能够自行合成分为必需氨基酸和非必需氨基酸,二者在维持机体正常的生命活动中均起着重要作用,因此氨基酸的组成及含量是评价食品品质及营养价值的重要指标[14]。

然而,目前对核桃雄花的研究主要集中在其抗氧化活性[4,10]、营养成分分析[15] 以及不同处理方式或条件,如超声处理、漂烫、温度等对其生理活性和营养品质的影响[16−18] 等方面,缺乏对核桃雄花氨基酸多样性分析的研究,导致其自身的营养价值尚未得到充分挖掘和利用。因此,本研究对 11 个不同产地的核桃雄花进行了氨基酸组分及含量分析,通过主成分分析(principal component analysis, PCA)和聚类分析对其进行综合评价,以有效开发核桃雄花中的优质资源,并探索其更多的药用价值和食用价值。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

核桃雄花(自然晾干) 11 个产地,分别来自安徽(AH)、贵州(GZ)、山东(SD)、河南(HN)、江苏(JS)、河北(HB)、四川(SC)、云南(YN)、北京(BJ)、甘肃(GS)、陕西(SX);盐酸、衍生缓冲液、乙腈、乙酸钠(均为分析纯) 国药集团化学试剂有限公司;氨基酸衍生化试剂盒 依利特(大连)分析仪器有限公司。

DFY-500 小型高速磨粉机 温岭市林大机械有限公司;101-2AB 型电热鼓风干燥箱 天津市泰斯特仪器有限公司;XMTD-8222 恒温水浴锅 上海精宏实验设备有限公司;L-8900 全自动氨基酸分析仪 德国曼默博尔公司。

1.2 实验方法

1.2.1 样品前处理 参照李东梅等[14] 方法,并稍加改动。将干燥的核桃雄花研磨成粉(过 60 目筛),取 25 mg 样品,加入 5 mL 安瓿瓶中,再加入 3 mL 6 mol/L 的盐酸,然后用酒精灯高温拉丝封口,放到烘箱中 110 ℃ 下水解 24 h。将水解后的样品从安瓿瓶中转移到蒸发皿中,并用水多次洗涤安瓿瓶,洗液一并倒入蒸发皿,在 80 ℃ 条件下水浴蒸干。用衍生缓冲液多次洗涤蒸发皿,洗液转入 25 mL 容量瓶中,并用衍生缓冲液定容。用 0.45 μm 微孔滤膜过滤,备用。

1.2.2 样品衍生化 量取已经过滤的样品液 10 mL 至 50 mL 棕色试剂瓶中,加入衍生试剂 5 mL,混匀,放到 60 ℃ 水浴中,暗处反应 1 h。反应完成后,冷却至室温,加入平衡缓冲溶液稀释到刻度,静置一段时间后,用 0.45 μm 滤膜过滤,取 10 μL 进样。

1.2.3 色谱条件 色谱柱:C_{18}(4.6 mm×250 mm, 5 μm);检测信号:紫外 360 nm;柱温:28 ℃;进样体积:10 μL;流动相 A:乙腈∶水(1∶1),流动相 B:0.1 mol/L 乙酸钠水溶液;流速 1.2 mL/min[19],梯度洗脱程序见表 1。定性定量分析:采用外标法,以 16 种氨基酸混标绘制标准曲线,根据保留时间定性,峰面积定量。

表 1 梯度洗脱程序

Table 1 Gradient elution program

时间(min)	流速(mL/min)	流动相A(%)	流动相B(%)
0.00	1.20	16.00	84.00
0.30	1.20	16.00	84.00
0.40	1.20	16.00	84.00
4.00	1.20	31.00	69.00
4.10	1.20	31.00	69.00
9.50	1.20	36.00	64.00
9.60	1.20	36.00	64.00
17.00	1.20	55.00	45.00
17.10	1.20	55.00	45.00
38.00	1.20	60.00	40.00
38.10	1.20	60.00	40.00
45.00	1.20	100.00	0.00
55.00	1.20	100.00	0.00
55.10	1.20	16.00	84.00
60.10	1.20	16.00	84.00

1.2.4 氨基酸滋味活性值(Taste activity value, TAV)计算 TAV 为呈味物质含量值与呈味物质滋味阈值的比值,按如下公式计算 TAV[20−22]:

$$TAV = \frac{C}{X}$$

其中，C 为样品中呈味氨基酸含量(mg/g)；X 为氨基酸味道阈值(mg/g)。TAV 代表相应氨基酸对核桃雄花呈味特性的贡献度，TAV>1 时，则表明该氨基酸对整体风味有贡献，TAV<1 时，即该氨基酸对其贡献较小。

1.3　数据处理

每个样品重复测定 3 次，结果表示为“平均值±标准差(Means±SD)”。采用 Microsoft Excel 进行数据分析，采用 SPSS 21.0 软件进行单因素方差分析(Duncan 多重比较)和 Pearson 相关性分析，显著性水平为 P<0.05。采用 Origin 2024 软件进行 PCA 和聚类分析。

2　结果与分析

2.1　不同地区核桃雄花的氨基酸组成和含量特征

由表 2 可知，11 个地区的核桃雄花中均检测出了 16 种氨基酸，包括赖氨酸(Lys)、蛋氨酸(Met)、苏氨酸(Thr)、异亮氨酸(Ile)、亮氨酸(Leu)、缬氨酸(Val)、酪氨酸(Tyr)7 种必需氨基酸，组氨酸(His)和精氨酸(Arg)2 种半必需氨基酸以及天冬氨酸(Asp)、谷氨酸(Glu)、丝氨酸(Ser)、甘氨酸(Gly)、脯氨酸(Pro)、丙氨酸(Ala)、胱氨酸(Cys)7 种非必需氨基酸[23]。核桃雄花中水解氨基酸的平均含量由高到低依次为 Leu>Glu>Asp>Arg>His>Lys>Pro>Gly>Ser>Val>Ala>Thr>Ile>Tyr>Met>Cys。其中 Leu 的含量最高，达到了 3.13%；Cys 的含量最低，仅有 0.04%。Leu 是一种苦味氨基酸，其含量最高，可能与核桃雄花天然的苦涩味有关。

在 11 个不同地区中，HB 的氨基酸总含量最高，达到了 16.61%，而 YN 的氨基酸总含量最低，为 10.53%。各个地区核桃雄花氨基酸的含量之间存在显著的差异性(P<0.05)，可能是由于其所处的地理环境不同而导致。有研究表明，种植地区的气候因子对植物生长、发育、代谢起着调节作用，并参与了多种生理过程，包括氨基酸的积累和消耗利用，所以不同地区的气候差异会导致氨基酸含量的差异性[24]。

上述结果表明，尽管不同地区核桃雄花氨基酸的组成一致，但是由于所处的环境差异，导致其氨基酸含量仍有很大的差异性，存在显著的地区多样性。

2.2　不同地区核桃雄花的风味氨基酸分析

氨基酸在赋予食物独特风味中起着关键性作用。核桃雄花有天然独特的风味，与其所含丰富的呈味氨基酸和调味氨基酸有关。根据呈味特点[25−26]，发挥作用的呈味氨基酸可分为 4 类[27]：鲜味氨基酸(Glu、Asp、Lys)、甜味氨基酸(Thr、Gly、His、Ala、Pro、Ser)、苦味氨基酸(Met、Arg、Val、Leu、Ile)和芳香族氨基酸(Phe、Tyr、Cys)。在调味方面，起主要作用的是增香与着色氨基酸(Flavoring and coloring amino acids，FCAA)，包括 Glu、Cys、Val、Leu、Lys、His、Arg。

由表 3 可知，核桃雄花中 FCAA 的含量最高，在 6.61%~10.10% 之间，平均值为 8.10%，其中 HB 是 FCAA 含量最高的地区，含量达到了 10.10%，约占氨基酸总量的 60.18%。有研究表明，FCAA 可以通过美拉德反应生成具有特定香味的褐色物质，影响食品的风味，促进食品的增香与着色[28]，故 HB 核桃雄花的感官品质较好，可以作为原料加入到食品中。其次是苦味氨基酸的含量较高，为 4.30%~6.39%，平均值为 5.33%，其中 HB 是苦味氨基酸含量最多的地区，含量达到了 6.39%，约占氨基酸总量的 38.08%；苦味氨基酸中含量最高的为 Leu，苦味氨基酸具有抗炎、抗氧化等生理作用[29]，从而使核桃雄花具有相应的药用价值。核桃雄花中甜味氨基酸含量为 3.09%~5.12%，平均含量为 4.01%，其中 HB 是甜味氨基酸含量最高的地区，含量达到了 5.12%，约占氨基酸总量的 30.50%。核桃雄花中鲜味氨基酸含量为 2.79%~4.80%，平均值为 3.58%，其中 HB 是鲜味氨基酸含量最高的地区，含量达到了 4.80%，约占氨基酸总量的 28.58%；鲜味氨基酸中含量最高的是 Glu，其与鲜味核苷酸的协同作用可以加强食品的鲜味强度[30]。而核桃雄花中芳香族氨基酸含量较少，为 0.31%~

表 2　不同地区核桃雄花氨基酸组分和含量

Table 2　Amino acid components and contents of male flowers of walnut in different regions

地区	氨基酸含量(%)															总含量
	Asp*	Glu*	Ser*	Arg$^{\Delta}$	Gly*	Thr**	Pro*	Ala*	Val**	Met**	Cys*	Ile**	Leu**	His$^{\Delta}$	Lys**	Tyr**	
AH	1.13±0.07^{de}	1.43±0.08^{de}	0.60±0.03^{cd}	0.69±0.04^{f}	0.57±0.03^{cd}	0.45±0.03^{cd}	0.55±0.03^{de}	0.53±0.03^{d}	0.57±0.03^{cd}	0.02±0.00^{f}	0.07±0.00^{a}	0.47±0.03^{cd}	2.84±0.17^{de}	0.84±0.05^{d}	0.67±0.04^{cd}	0.33±0.01^{e}	11.75±0.67^{def}
GZ	1.17±0.07^{d}	1.56±0.09^{d}	0.61±0.04^{cd}	0.97±0.06^{c}	0.62±0.04^{c}	0.48±0.03^{c}	0.59±0.03^{cd}	0.59±0.03^{c}	0.59±0.03^{c}	0.06±0.00^{c}	0.07±0.00^{a}	0.48±0.03^{c}	3.33±0.19^{bc}	0.73±0.04^{e}	0.64±0.04^{cd}	0.31±0.01^{f}	12.80±0.72^{cd}
SD	1.37±0.07^{c}	1.57±0.08^{d}	0.68±0.03^{b}	0.87±0.04^{de}	0.69±0.04^{b}	0.55±0.03^{b}	0.64±0.03^{c}	0.63±0.03^{bc}	0.65±0.03^{b}	0.06±0.00^{c}	0.07±0.00^{a}	0.54±0.03^{b}	3.12±0.16^{bcd}	0.97±0.05^{b}	0.70±0.04^{c}	0.39±0.01^{c}	13.50±0.67^{bc}
HN	1.54±0.10^{b}	2.03±0.13^{b}	0.78±0.05^{a}	1.43±0.09^{a}	0.72±0.05^{b}	0.64±0.04^{a}	0.99±0.06^{a}	0.73±0.05^{a}	0.77±0.05^{a}	0.02±0.00^{ef}	0.06±0.00^{b}	0.61±0.04^{a}	3.24±0.20^{bc}	1.04±0.07^{b}	0.98±0.06^{a}	0.46±0.01^{a}	16.06±0.99^{a}
JS	1.38±0.07^{c}	1.74±0.09^{c}	0.77±0.04^{a}	0.81±0.04^{c}	0.84±0.04^{a}	0.67±0.03^{a}	0.74±0.04^{b}	0.76±0.04^{a}	0.81±0.04^{a}	0.08±0.00^{b}	0.06±0.00^{b}	0.65±0.03^{a}	2.91±0.14^{de}	1.01±0.05^{b}	0.91±0.05^{b}	0.44±0.01^{b}	14.56±0.70^{b}
HB	1.66±0.08^{a}	2.24±0.10^{a}	0.78±0.04^{a}	1.52±0.07^{a}	0.74±0.03^{b}	0.63±0.03^{a}	0.95±0.04^{a}	0.75±0.04^{a}	0.78±0.03^{a}	0.04±0.00^{d}	0.03±0.00^{d}	0.62±0.03^{a}	3.37±0.16^{b}	1.21±0.06^{a}	0.85±0.04^{b}	0.44±0.01^{b}	16.61±0.76^{a}
SC	1.19±0.06^{d}	1.47±0.07^{d}	0.51±0.03^{ef}	1.00±0.05^{c}	0.51±0.03^{de}	0.39±0.02^{ef}	0.50±0.03^{ef}	0.48±0.02^{d}	0.49±0.02^{e}	0.01±0.00^{g}	0.01±0.00^{f}	0.38±0.02^{ef}	2.38±0.12^{f}	0.67±0.03^{e}	0.52±0.03^{f}	0.29±0.01^{g}	10.80±0.53^{ef}
YN	1.02±0.06^{e}	1.21±0.07^{f}	0.47±0.03^{f}	0.52±0.03^{g}	0.47±0.03^{e}	0.34±0.02^{f}	0.46±0.03^{f}	0.48±0.03^{d}	0.46±0.03^{e}	0.03±0.00^{e}	0.05±0.00^{e}	0.35±0.02^{f}	2.99±0.18^{cde}	0.86±0.05^{cd}	0.53±0.03^{f}	0.28±0.01^{g}	10.53±0.63^{f}
BJ	1.04±0.05^{e}	1.58±0.08^{cd}	0.52±0.03^{ef}	1.34±0.07^{b}	0.51±0.03^{de}	0.42±0.02^{de}	0.47±0.02^{f}	0.47±0.02^{d}	0.52±0.03^{de}	0.06±0.00^{c}	0.02±0.00^{e}	0.42±0.02^{de}	2.73±0.13^{e}	0.94±0.05^{bc}	0.57±0.03^{ef}	0.30±0.01^{f}	11.92±0.58^{de}
GS	1.07±0.06^{de}	1.58±0.09^{cd}	0.56±0.03^{de}	0.91±0.05^{cd}	0.57±0.03^{cd}	0.44±0.03^{cde}	0.51±0.03^{ef}	0.53±0.03^{d}	0.55±0.03^{cd}	0.04±0.00^{d}	0.02±0.00^{e}	0.44±0.03^{cd}	3.31±0.20^{bc}	1.01±0.06^{b}	0.57±0.03^{ef}	0.30±0.01^{f}	12.43±0.73^{cd}
SX	1.17±0.08^{d}	1.30±0.08^{ef}	0.65±0.04^{bc}	0.55±0.04^{g}	0.71±0.05^{b}	0.56±0.04^{b}	0.63±0.04^{c}	0.66±0.04^{b}	0.70±0.05^{b}	0.11±0.01^{a}	0.02±0.00^{e}	0.60±0.04^{a}	4.26±0.28^{a}	1.25±0.08^{a}	0.61±0.04^{de}	0.38±0.01^{d}	14.17±0.90^{b}
平均值	1.25±0.21	1.61±0.30	0.63±0.11	0.96±0.33	0.63±0.12	0.51±0.11	0.64±0.18	0.60±0.11	0.63±0.12	0.05±0.03	0.04±0.02	0.51±0.10	3.13±0.49	0.96±0.18	0.69±0.16	0.36±0.07	13.19±2.03

注：同列字母不同表示差异显著(P<0.05)；**为必需氨基酸；Δ为半必需氨基酸；*为非必需氨基酸。

表 3 不同地区核桃雄花呈味氨基酸含量

Table 3 Flavor-active amino acid content of walnut male flowers in different regions

地区	氨基酸含量(%)					
	鲜味氨基酸	甜味氨基酸	苦味氨基酸	芳香族氨基酸	增香与着色氨基酸	总含量
AH	3.26	3.58	4.63	0.40	7.17	19.03
GZ	3.41	3.66	5.48	0.38	7.96	20.89
SD	3.68	4.20	5.29	0.46	8.03	21.67
HN	4.60	4.95	6.15	0.52	9.66	25.88
JS	4.07	4.84	5.30	0.50	8.33	23.03
HB	4.80	5.12	6.39	0.48	10.10	26.88
SC	3.21	3.09	4.30	0.31	6.61	17.52
YN	2.79	3.11	4.40	0.34	6.69	17.32
BJ	3.23	3.37	5.12	0.33	7.79	19.83
GS	3.26	3.66	5.31	0.323	8.04	20.60
SX	3.12	4.50	6.28	0.41	8.78	23.09
平均值	3.58	4.01	5.33	0.40	8.10	21.43

0.52%, 平均值为 0.40%, 其中 HN 是芳香族氨基酸含量最高的地区, 含量达到了 0.52%, 约占氨基酸总量的 3.21%。在 11 个地区中, HB 是苦味氨基酸、鲜味氨基酸、甜味氨基酸和增香与着色氨基酸含量最高的地区, 并且芳香族氨基酸也处于较高水平, 说明此地区的核桃雄花呈味均衡, 食用口感较好。

各类氨基酸所具有的不同的呈味特征与其阈值存在直接关联, 高含量的氨基酸对食品的风味贡献未必显著, 因此, 需要根据各氨基酸阈值计算其 TAV, 其值越大, 对样品的呈味贡献越大, 反之亦然。由表 4 可知, Asp、Glu、Lys、His、Arg、Val 和 Leu 的 TAV 值均大于 1, 对各地区核桃雄花滋味的贡献较大; Cys 除在 SC 的 TAV 值小于 1 外, 在其余各地区 TAV 值均大于 1; Ala 仅在 GZ、SD、HN、JS、HB 及 SX 的 TAV 值大于 1, 在其他地区 TAV 值小于 1; 其余氨基酸的 TAV 值均小于 1, 对各地区核桃雄花滋味影响较小。在所有氨基酸中, Glu 的 TAV 值最大, 平均值可达 5.42, 说明其为最主要的呈鲜物质, 对其风味具有突出贡献。

综合分析表明, 不同地区核桃雄花的风味氨基酸含量由高到低依次为: 增香与着色氨基酸>苦味氨基酸>甜味氨基酸>鲜味氨基酸>芳香族氨基酸。在 11 个地区中, HB 的风味氨基酸总含量最高, 且苦味氨基酸、鲜味氨基酸、甜味氨基酸和增香与着色氨基酸含量也为最高。在所有氨基酸中, Glu 对核桃雄花的滋味贡献最大, 其 TAV 值在 4.09~7.54 之间, 平均值为 5.42, 属于鲜味氨基酸, 可以有效增加核桃雄花的鲜味特征。

2.3 不同地区核桃雄花特殊功效氨基酸的组成及含量

氨基酸是构成人体基本物质的重要组分, 除了在呈味方面有显著作用外, 其在调节人体机能和医疗健康中也起着不可估量的作用。对人体有益的特殊功效的氨基酸包括支链氨基酸(Branched chain amino acids, BCAA)、芳香族氨基酸(Aromatic amino acids, AAA)、药用氨基酸(Medicinal amino acids, MAA)、抗菌氨基酸(Antibacterial amino acids, ABAA)、伯胺基氨基酸(Primary amine amino acids, PAAA)和儿童必需氨基酸(Essential amino acids in children, CE)等[31]。

由表 5 可知, 不同地区的 MAA 平均含量最高, 可达 9.79%, 其中 MAA 含量最高的是 HB (11.88%), 最低的是 SC(7.71%)。有研究表明[32], MAA 可以用于术后恢复的蛋白质补充, 也是肠外营养的基本成分, 并且可以调节代谢, 帮助治疗部分特异性疾病, 因此, 核桃雄花中的 MAA 为其开发出各种保健食品和药品提供了一定的物质基础。其次, PAAA、BCAA 的平均含量仅次于 MAA, 分别达到了 7.09%、4.31%, 其中 HB 的 PAAA 含量最高, 为 9.54%, SX 的 BCAA 含量最高, 为 5.61%。AAA 的平均含量为 0.36%, 其中 HN 的 AAA 含量最高, 为 0.46%。AAA、PAAA 和 BCAA 在排毒、免疫、防治肝肾功能衰竭、心血管健康和运动表现中起着关键性的作用[28]。CE 对儿童的生长发育尤其重要, 能够促进其神经系统和机体的发育[33]。CE 的平均含量为 1.94%, 其中 HB 的 CE 含量最高, 为 2.76%, 提示 HB 地区核桃雄花可以被用于儿童保健食品。一定浓度的抗菌氨基酸 ABAA 能够抑制导致食物腐败的微生物[33], 不同地区 ABAA 的平均含量为 0.64%,

表 4 不同地区核桃雄花氨基酸 TAV

Table 4 TAV of amino acids in male flowers of walnuts in different regions

地区	鲜味氨基酸			甜味氨基酸						苦味氨基酸					芳香族氨基酸	
	Asp	Glu	Lys	Ser	Gly	Pro	Ala	His	Thr	Met	Arg	Val	Leu	Ile	Cys	Tyr
AH	1.14	4.80	1.36	0.40	0.44	0.19	0.89	4.22	0.18	0.08	1.39	1.44	1.51	0.52	3.37	0.17
GZ	1.19	5.24	1.30	0.41	0.48	0.20	1.00	3.66	0.19	0.21	1.97	1.48	1.77	0.54	3.37	0.17
SD	1.38	5.30	1.42	0.46	0.54	0.21	1.06	4.90	0.21	0.20	1.76	1.64	1.66	0.61	3.29	0.21
HN	1.55	6.84	1.99	0.53	0.56	0.33	1.23	5.24	0.25	0.08	2.90	1.95	1.72	0.69	2.80	0.24
JS	1.39	5.86	1.84	0.52	0.65	0.25	1.27	5.10	0.26	0.27	1.63	2.04	1.55	0.72	2.91	0.23
HB	1.68	7.54	1.72	0.53	0.57	0.32	1.26	6.12	0.24	0.15	3.06	1.98	1.79	0.69	1.65	0.23
SC	1.20	4.95	1.05	0.34	0.39	0.17	0.80	3.40	0.15	0.04	2.01	1.24	1.27	0.42	0.74	0.15
YN	1.03	4.09	1.07	0.32	0.37	0.15	0.81	4.33	0.13	0.10	1.06	1.17	1.59	0.40	2.54	0.15
BJ	1.05	5.33	1.16	0.35	0.40	0.16	0.79	4.75	0.16	0.20	2.71	1.30	1.45	0.47	1.18	0.16
GS	1.08	5.33	1.15	0.38	0.44	0.17	0.90	5.11	0.17	0.15	1.83	1.40	1.76	0.50	1.05	0.16
SX	1.18	4.38	1.23	0.44	0.55	0.21	1.10	6.32	0.22	0.38	1.11	1.76	2.26	0.67	1.21	0.20

表 5　不同地区核桃雄花特殊功效氨基酸含量

Table 5　Amino acid content with special efficacy in walnut male flowers across different regions

地区	氨基酸含量(%)						
	BCAA	AAA	MAA	ABAA	PAAA	CE	总含量
AH	3.91	0.33	8.73	0.58	6.20	1.54	21.28
GZ	4.43	0.31	9.58	0.63	6.85	1.72	23.52
SD	4.35	0.40	10.02	0.70	7.24	1.86	24.57
HN	4.68	0.46	11.61	0.73	9.24	2.50	29.22
JS	4.41	0.44	10.82	0.85	8.09	1.83	26.44
HB	4.81	0.44	11.88	0.74	9.54	2.76	30.18
SC	3.28	0.29	7.71	0.51	6.24	1.69	19.72
YN	3.84	0.29	7.92	0.48	5.22	1.39	19.13
BJ	3.71	0.30	8.92	0.51	6.57	2.30	22.31
GS	4.36	0.31	9.36	0.58	6.38	1.94	22.93
SX	5.61	0.39	11.17	0.72	6.40	1.82	26.11
平均值	4.31	0.36	9.79	0.64	7.09	1.94	24.13

注：BCAA支链氨基酸：Leu、Ile、Val；AAA芳香族氨基酸：Phe、Tyr、Trp；MAA药用氨基酸：Trp、Phe、Lys、Leu、Ile、Val、Thr、Met、Tyr、Cys、His、Arg、Gly、Gln、Ala、Ser；ABAA抗菌氨基酸：Phe、Trp、Gly；PAAA伯胺基氨基酸：Asp、Glu、Pro、Gly、Ala、Lys、Arg；CE儿童必需氨基酸：His、Arg。

其中 JS 的 ABAA 含量最高，为 0.85%，说明此地区核桃雄花在抑菌方面具有一定潜力。特殊功效氨基酸总含量最高的地区是 HB，最低的地区是 YN，说明 HB 的核桃雄花氨基酸具有多种特殊功效，为功能性食品的进一步研究和开发提供了可能。

综合分析表明，HB 的 MAA、PAAA、CE 的含量均达到最高水平，且其特殊功效氨基酸的总含量也为最高，这表明该地区的核桃雄花具有巨大的潜在药用价值，并且在儿童食品领域中具有一定的应用前景。

2.4　不同地区核桃雄花的氨基酸含量相关性分析

对不同地区核桃雄花 16 种氨基酸含量进行相关性分析，结果如表 6 所示。Tyr 含量与 Asp、Ser、Gly、Thr、Pro、Ala、Val、Ile、Lys 含量均极显著相关（P<0.01），与 Glu、His 含量显著相关（P<0.05）。Tyr 是一种重要的芳香族氨基酸，在神经、内分泌、代谢和细胞调控中均发挥着重要的作用[34]，其与其他氨基酸之间有着高度的相关性，这体现了生物系统的协同性，为进一步探究人体氨基酸代谢背后的分子机制以及营养干预和疾病治疗均具有促进作用。Lys 含量与 Asp、Glu、Ser、Gly、Thr、Pro、Ala、Val、Ile 含量均极显著相关（P<0.01），与其他氨基酸含量无显著相关关系。Lys 作为一种必需氨基酸，与其他氨基酸的相关性揭示了生物体在能量代谢、结构维持和功能调控上的高度整合，对理解蛋白质工程、代谢疾病和营养干预策略有重要意义。Met、Cys 含量均与其他氨基酸含量无显著相关，说明他们的代谢过程比较独立，可能更依赖于特定生理需求。His 含量仅与 Gly、Thr、Ala、Val、Ile、Leu 含量显著相关（P<0.05）。Ile 含量与 Asp、Ser、Gly、Thr、Pro、Ala、Val 含量极显著相关（P<0.01），与 Glu 含量显著相关（P<0.05）。Asp 含量与 Glu、Ser、Gly、Thr、Pro、Ala、Val 含量极显著相关（P<0.01）。Ser 含量与 Gly、Thr、Pro、Ala、Val 含量极显著相关（P<0.01）。Gly 含量与 Thr、Pro、Ala、Val 含量极显著相关（P<0.01）。Glu 含量与 Arg 极显著相关（P<0.01），与 Thr、Ala、Val 含量显著相关（P<0.05），与 Gly含量无显著相关关系。Leu 含量仅与 His 含量显著相关（P<0.05），与其他氨基酸含量相关性不显著。其他氨基酸之间均为极显著相关（P<0.01）。

综合分析说明，各种氨基酸之间均存在不同程度的相关性，部分氨基酸之间有着高度的协同性，而另一些则保持着代谢独立性，不同相关性的氨基酸存在不同的信息重叠现象[35]，因此通过某一种氨基酸指标评价核桃雄花的优劣是不客观的，可以使用 PCA 来对其进行综合评价。

表 6　不同地区核桃雄花氨基酸相关性分析

Table 6　Correlation analysis of amino acid contents in male flowers of walnuts from different regions

氨基酸	Asp	Glu	Ser	Arg	Gly	Thr	Pro	Ala	Val	Met	Cys	Ile	Leu	His	Lys	Tyr
Asp	1															
Glu	0.88**	1														
Ser	0.90**	0.78**	1													
Arg	0.60	0.86**	0.42	1												
Gly	0.76**	0.58	0.94**	0.17	1											
Thr	0.84**	0.70*	0.98**	0.34	0.98**	1										
Pro	0.95**	0.87**	0.92**	0.560	0.76**	0.87**	1									
Ala	0.87**	0.71*	0.98**	0.32	0.96**	0.98**	0.90**	1								
Val	0.84**	0.71*	0.98**	0.34	0.97**	1.00**	0.88**	0.99**	1							
Met	−0.12	−0.06	−0.05	0.01	−0.02	−0.08	−0.09	−0.02	−0.10	1						
Cys	0.20	0.04	0.34	−0.19	0.31	0.27	0.21	0.30	0.25	0.38	1					
Ile	0.78**	0.63*	0.96**	0.27	0.97**	0.99**	0.83**	0.97**	0.99**	−0.08	0.24	1				
Leu	0.16	0.02	0.36	−0.18	0.45	0.40	0.31	0.46	0.43	0.14	−0.05	0.53	1			
His	0.47	0.41	0.60	0.17	0.62*	0.64*	0.56	0.64*	0.68*	−0.42	−0.22	0.72*	0.72*	1		
Lys	0.85**	0.79**	0.94**	0.48	0.83**	0.91**	0.91**	0.90**	0.90**	−0.09	0.43	0.85**	0.14	0.44	1	
Tyr	0.89**	0.73*	0.97**	0.39	0.92**	0.97**	0.92**	0.96**	0.97**	−0.22	0.28	0.95**	0.35	0.66*	0.93**	1

注：**在0.01水平（双尾），极显著相关；*在0.05水平（双尾），显著相关。

2.5 不同地区核桃雄花的氨基酸的主成分分析

对不同地区核桃雄花的氨基酸含量进行主成分分析发现，不同地区的核桃雄花氨基酸分别集中在不同的区域，如图 1 所示。SX 和 SD 位于第一象限，YN、GS 和 GZ 位于第二象限，AH、BJ 和 SC 位于第三象限，HN 和 HB 位于第四象限，JS 位于横轴上。JS 位于横轴上，AH 距离横轴较近，说明其主要受 PC1 影响；GZ、SD 距离横轴和纵轴均比较近，说明其受 PC1 和 PC2 的影响都比较大。但是 SX 远离其他地区，说明这个地区的核桃雄花氨基酸组成和含量与其他地区的差异较大。在 SX 地区，由于其气候特征表现为炎热干燥，降水量稀少，以及一些地理条件的不利因素[24]，导致该地区核桃雄花的氨基酸含量相较于其他地区普遍偏低；相比之下，SD、JS、HN、HB 地区的气候条件较为相似，降水量和温度均比较适宜，因此这些地区的氨基酸总含量普遍较高，且药用氨基酸含量较高；其他地区的氨基酸含量呈现出围绕平均水平的波动。

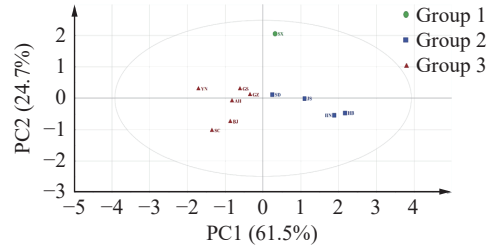


图 1 不同地区核桃雄花的 PCA 得分图

Fig.1 PCA score plot of walnut male flowers across different regions

2.6 不同地区核桃雄花氨基酸的综合评价

对不同地区核桃雄花氨基酸进行综合评价，结果如表 7 和表 8 所示。

表 7 总方差分析结果

Table 7 Results of total variance analysis

PC	初始特征值	方差贡献率(%)	累计方差贡献率(%)
1	0.35	52.82	52.82
2	0.24	36.12	88.94
3	0.05	7.57	96.51

表 8 不同地区核桃雄花的成分得分和综合得分

Table 8 Component scores and comprehensive scores of male flowers of walnuts in different regions

编号	Y_1	Y_2	Y_3	Y	排序
HB	5.27	−0.24	−0.52	2.75	1
HN	5.05	−0.26	−0.39	2.63	2
JS	4.46	−0.52	0.11	2.25	3
SD	4.31	−0.76	−0.24	2.06	4
GZ	4.24	−0.90	−0.53	1.94	5
BJ	3.89	−0.36	−0.78	1.93	6
GS	4.18	−0.99	−0.61	1.87	7
SX	4.79	−1.94	−0.43	1.86	8
SC	3.50	−0.27	−0.42	1.78	9
AH	3.81	−0.77	−0.22	1.78	10
YN	3.57	−1.11	−0.37	1.51	11

由表 7 可知，前 3 个 PC 累计方差贡献率达到了 96.51%，因此使用前 3 个 PC 来对不同地区核桃雄花进行综合评价是可行的，具有一定的可信度[20]。以 16 个水解氨基酸指标为初始自变量，经过 PCA 最终得到的 3 个 PC 因子的方程表达式如下：

$$Y_1=0.172X_1+0.157X_2+0.187X_3+0.172X_4+0.273X_5+0.162X_6+0.094X_7+0.295X_8+0.164X_9+0.249X_{10}+0.204X_{11}+0.392X_{12}+0.276X_{13}+0.571X_{14}+0.019X_{15}+0.003X_{16}$$

$$Y_2=0.021X_1+0.029X_3+0.052X_4+0.130X_5+0.031X_6+0.029X_7+0.185X_8+0.002X_9-0.107X_{10}+0.128X_{11}+0.385X_{12}+0.510X_{13}-0.712X_{14}-0.035X_{15}+0.002X_{16}$$

$$Y_3=0.204X_1+0.176X_2+0.226X_3+0.195X_4+0.158X_5+0.208X_6+0.127X_7+0.235X_8+0.262X_9-0.032X_{10}+0.308X_{11}-0.077X_{12}-0.661X_{13}-0.321X_{14}+0.308X_{15}+0.050X_{16}$$

以 3 个 PC 对应的方差相对贡献率为权重，将各个地区的 PC 得分和相应的权重进行线性加权求和建立综合评价函数 $Y=0.547Y_1+0.374Y_2+0.078Y_3$，计算各个地区核桃雄花的综合评价得分，以反映其氨基酸综合品质，综合得分越高，说明该地区核桃雄花的氨基酸营养品质越好[27]。结果如表 8 所示，综合得分前 4 的地区分别为 HB、HN、JS 和 SD，说明这 4 个地区的核桃雄花的氨基酸综合品质较好。

2.7 不同地区核桃雄花氨基酸的聚类分析

对不同地区核桃雄花中的氨基酸进行聚类分析，结果如图 2 所示。所有的地区可以分为 3 类：第一类为 SX，SX 在 PCA 中远离其他地区，说明 SX 和其他地区的核桃雄花氨基酸组成和含量差异性较大；第二类为 HN、HB、SD 和 JS，这些地区的核桃雄花的氨基酸综合品质均比较好；第三类为 BJ、SC、YN、AH、GS 和 GZ，这些地区的核桃雄花中的药用氨基酸含量相近，且都低于其他地区的药用氨基酸含量，并且他们的氨基酸综合品质靠后。聚类结果和前述 PCA 结果一致。因此，此分析结果可为核桃雄花的种植地区推广、加工利用以及氨基酸营养价值评价提供良好参考。

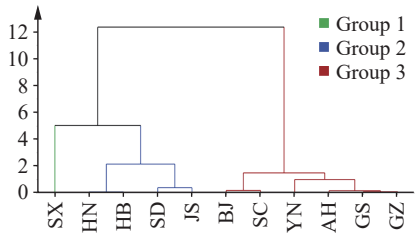


图 2 不同地区核桃雄花的聚类分析图

Fig.2 Clustering analysis diagram of male flowers of walnut in different regions

2.8 不同地区核桃雄花必需氨基酸的营养价值评价

食物中蛋白质营养价值的优劣主要取决于其中所含必需氨基酸的种类、数量和组成比例。2013 年

世界卫生组织(WHO)和联合国粮农组织(FAO)对人类理想的蛋白质模型进行了修订，并提出了评价食物的必需氨基酸模式图[36]。在理想模式中，必需氨基酸(essential amino acids, EAA)占总氨基酸(total amino acid, TAA)的比值(EAA/TAA)为 40%，必需氨基酸占非必需氨基酸(non essential amino acid, NEAA)的比值(EAA/NEAA)为 60%，食物中氨基酸的组成比例越接近 FAO/WHO 的氨基酸模式要求，其蛋白质和氨基酸营养价值越高，越能满足人体的需求[33]。

EAA 的组成和含量与氨基酸的营养价值密切相关，EAA 含量越高，代表氨基酸的营养价值越高[37]。如表 9 所示，在 11 个地区中，7 种 EAA 种类齐全，其中 Leu 含量最高，Met 含量最低，与姜仲茂等[38] 的结果一致，说明 Leu 在 EAA 中起着关键性的作用。从表 9 可知，EAA 含量最高的地区是 SX，其次是 HN、HB、JS 和 SD，EAA 含量最低的地区为 SC；所有地区核桃雄花中的氨基酸均达到了 FAO/WHO 标准值，说明这些地区核桃雄花中必须氨基酸的营养均衡值达标，具有较好的开发利用价值。

表 9　不同地区核桃雄花必须氨基酸的营养价值评价
Table 9　Nutritional evaluation of essential amino acids in male flowers of walnut from different regions

地区	TAA	EAA	NEAA	EAA/TAA(%)	EAA/NEAA(%)
AH	11.87	5.40	4.92	45.54	109.74
GZ	12.93	5.95	5.27	45.99	112.89
SD	13.64	6.08	5.70	44.57	106.59
HN	16.22	6.80	6.92	41.94	98.29
JS	14.71	6.53	6.34	44.42	103.04
HB	16.78	6.80	7.23	40.50	94.02
SC	10.91	4.51	4.72	41.32	95.59
YN	10.63	5.04	4.20	47.39	119.96
BJ	12.04	5.07	4.67	42.10	108.57
GS	12.56	5.73	4.90	45.58	116.93
SX	14.31	7.30	5.20	50.99	140.44

3　结论

本研究针对 11 个不同地区核桃雄花中的氨基酸组成、含量、呈味特性以及特殊功效等进行多样性分析，结果表明：不同地区核桃雄花中均含有 16 种氨基酸，TAA 含量在 10.53%~16.61%，其中平均含量最高的氨基酸为 Leu，TAA 含量最高的地区是河北地区。11 个地区核桃雄花中氨基酸的组成一致，但是其氨基酸含量具有显著差异性(P<0.05)。核桃雄花中呈味与调味氨基酸含量由高到低依次是增香与着色氨基酸、苦味氨基酸、甜味氨基酸、鲜味氨基酸和芳香族氨基酸，其中河北地区的风味氨基酸总含量最高，风味较为均衡。进一步计算各氨基酸的 TAV 值发现，在所有氨基酸中，Glu 的 TAV 值最大，平均值可达 5.42，对核桃雄花的滋味贡献最大。在特殊功效氨基酸中，河北地区核桃雄花的药用氨基酸含量最高，说明此地区核桃雄花具有巨大的潜在药用价值。PCA 和聚类分析结果表明，3 个 PC 累计方差贡献率达到了 96.51%，11 个地区核桃雄花可以分为 3 类。进行综合评价可得，核桃雄花品质较好的地区依次为河北地区、河南地区、江苏地区和山东地区。本研究成果为以后核桃雄花的种植领域提供了新的选择，有助于对其在食品和医药等领域中进行更进一步的加工和利用，对后续研究具有一定的启发意义。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] XU Ying, BI Shuang, XIONG Chunhui, et al. Identification of aroma active compounds in walnut oil by monolithic material adsorption extraction of RSC18 combined with gas chromatography-olfactory-mass spectrometry[J]. Food Chemistry, 2023, 402: 134303.

[2] ALI G, ZEB A. Bioactive composition and medicinal properties of Walnut kernels[J]. Journal of Agriculture and Food Research, 2024, 18: 101442.

[3] 王纪辉, 何佳丽, 耿阳阳, 等. 基于超声效应与 HPLC 分析核桃不同部位多酚含量及组成[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2022, 43(5): 55−64. [WANG Jihui, HE Jiali, GENG Yangyang, et al. Analyzing the change of polyphenol content and composition of different parts of walnut based on ultrasound effect combined with HPLC[J]. Journal of Yangzhou University (Agricultural and Life Science Edition), 2022, 43(5): 55−64.]

[4] YU Chenchen, LI Shengyun, ZHANG Xuemei, et al. Purification and ultra-high-performance liquid chromatography tandem mass spectrometry analysis of phenolics extracted from male walnut flowers[J]. International Journal of Food Properties, 2022, 25(1): 1792−1803.

[5] POP A, FIZEŞAN I, VLASE L, et al. Enhanced recovery of phenolic and tocopherolic compounds from walnut (*Juglans regia* L.) male flowers based on process optimization of ultrasonic assisted-extraction: Phytochemical profile and biological activities[J]. Antioxidants, 2021, 10(4): 607.

[6] 李雪, 王长雷, 史斌斌, 等. 不同基因型核桃雄花营养品质及抗氧化活性分析[J]. 果树学报, 2017, 34(11): 1394−1400. [LI Xue, WANG Changlei, SHI Binbin, et al. Analysis of nutritional quality and antioxidant activity of male flowers in walnut[J]. Journal of Fruit Science, 2017, 34(11): 1394−1400.]

[7] ZHANG Yige, KAN Huan, CHEN Shengxiong, et al. Comparison of phenolic compounds extracted from *Diaphragma juglandis* fructus, walnut pellicle, and flowers of *Juglans regia* using methanol, ultrasonic wave, and enzyme assisted-extraction[J]. Food Chemistry, 2020, 321: 126672.

[8] YAN Mengmeng, CHEN Meng, ZHOU Fei, et al. Separation and analysis of flavonoid chemical constituents in flowers of *Juglans regia* L. by ultra-high-performance liquid chromatography-hybrid quadrupole time-of-flight mass spectrometry[J]. Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis, 2019, 164: 734−741.

[9] MUZAFFER U, PAUL V I. Phytochemical analysis, *in vitro* antioxidant and antimicrobial activities of male flower of *Juglans regia* L[J]. International Journal of Food Properties, 2018, 21(1): 345−356.

[10] ŻUREK N, PAWŁOWSKA A, PYCIA K, et al. Phenolic profile and antioxidant, antibacterial, and antiproliferative activity of *Juglans regia* L. Male flowers[J]. Molecules, 2022, 27(9): 2762.

[11] PYCIA K, PAWŁOWSKA A M, KASZUBA J, et al. Walnut male flowers (*Juglans regia* L.) as a functional addition to wheat bread[J]. Foods, 2022, 11(24): 3988.
[12] 胡伯凯, 张东亚, 何佳丽, 等. 核桃雄花蛋白提取工艺[J]. 食品工业, 2019, 40(8): 16−18. [HU Bokai, ZHANG Dongya, HE Jiali, et al. Extraction technology of walnut male flower protein[J]. The Food Industry, 2019, 40(8): 16−18.]
[13] 柳利龙, 张爱琴, 徐瑞, 等. 甘肃省陇中地区小米游离氨基酸组成及综合评价[J]. 食品工业科技, 2024, 45(13): 281−291. [LIU Lilong, ZHANG Aiqin, XU Rui, et al. Composition and comprehensive evaluation of free amino acids in millet from longzhong area in Gansu Province[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(13): 281−291.]
[14] 李东梅, 张思维, 孙建云, 等. 不同产地金耳中氨基酸含量分析及营养价值评价[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(1): 237−244. [LI Dongmei, ZHANG Siwei, SUN Jianyun, et al. Content analysis and nutritional value evaluation of amino acid in *Tremella aurantialba* from different origins[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(1): 237−244.]
[15] 胡大佐, 白瑞亮, 王成忠, 等. 不同生长阶段鸡爪绵核桃雄花的营养成分分析[J]. 食品工业科技, 2020, 41(24): 309−313. [HU Dazuo, BAI Ruiliang, WANG Chengzhong, et al. Analysis on the nutritional composition of male flowers of jizhaomian walnut in different growth stages[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(24): 309−313.]
[16] 张文娥, 王长雷, 李雪, 等. 漂烫时间对铁核桃雄花序营养成分含量及抗氧化活性的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(18): 99−105. [ZHANG Wene, WANG Changlei, LI Xue, et al. Effects of blanching time on nutritional quality and antioxidant activities of walnut (*Juglans sigillata*) male inflorescences[J]. Food Science, 2017, 38(18): 99−105.]
[17] 王纪辉, 尹爽, 耿阳阳, 等. 超声处理对泡核桃雄花总多酚提取效果的影响及其特性[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2025, 46(1): 121−131. [WANG Jihui, YIN Shuang, GENG Yangyang, et al. Effects of ultrasound treatment on the extraction of *Juglans sigillata* Dode male flower total polyphenols and its characteristics[J]. Journal of Yangzhou University (Agricultural and Life Science Edition), 2025, 46(1): 121−131.]
[18] ZHANG Wene, WANG Changlei, SHI Binbin, et al. Effect of storage temperature and time on the nutritional quality of walnut male inflorescences[J]. Journal of Food and Drug Analysis, 2017, 25(2): 374−384.
[19] 卢柏山, 董会, 赵久然, 等. 不同鲜食玉米品种适采期氨基酸含量分析[J]. 中国农业科技导报, 2023, 25(11): 132−142. [LU Boshan, DONG Hui, ZHAO Jiuran, et al. Amino acid content analysis of different fresh corn varieties at suitable harvest time[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2023, 25(11): 132−142.]
[20] 朱凯, 丁茁蔑, 吴艺飞, 等. 不同品种菜薹游离氨基酸组成分析及综合评价[J]. 食品工业科技, 2025, 46(5): 230−238. [ZHU Kai, DING Zhuoyi, WU Yifei, et al. Composition and comprehensive evaluation of free amino acids in different *Brassica* campestris cultivars[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(5): 230−238.]
[21] 罗秀群, 孙光城, 林丹, 等. 基于模糊数学感官评价法优化香辣牛肉牛肝菌酱工艺及游离氨基酸分析[J]. 中国调味品, 2024, 49(4): 66−73,95. [LUO Xiuqun, SUN Guangcheng, LIN Dan, et al. Optimization of technology of spicy beef *Boletus sauce* based on fuzzy mathematics sensory evaluation method and analysis of free amino acids[J]. China Condiment, 2024, 49(4): 66−73,95.]
[22] 谢辉, 尹明雨, 张玉非, 等. 不同产地雌性中华绒螯蟹感官品质与滋味品质的差异性[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(6): 114−120,126. [XIE Hui, YIN Mingyu, ZHANG Yufei, et al. The effect of different culturing region on the sensory and taste quality of Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*)[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(6): 114−120,126.]
[23] SALMAN S, YıLMAZ C, GÖKMEN V, et al. Effects of fermentation time and shooting period on amino acid derivatives and free amino acid profiles of tea[J]. LWT, 2021, 137: 110481.
[24] 熊武来, 李佳佳, 国靖, 等. 不同枸杞品种嫩茎游离氨基酸的区域化差异[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(19): 265−273. [XIONG Wulai, LI Jiajia, GUO Jing, et al. Regional difference in free amino acids in tender stems of different *Lycium barbarum* varieties[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(19): 265−273.]
[25] ZHAO C J, SCHIEBER A, GÄNZLE M G. Formation of taste-active amino acids, amino acid derivatives and peptides in food fermentations - A review[J]. Food Research International, 2016, 89 (Pt 1): 39-47.
[26] 文英杰, 刘海伦, 姜永华, 等. 不同品种荔枝游离氨基酸组成分析及综合评价[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(14): 343−352. [WEN Yingjie, LIU Hailun, JIANG Yonghua, et al. Analysis and comprehensive evaluation of free amino acids in different varieties of lychee[J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(14): 343−352.]
[27] 顾晓敏, 童川, 韩延超, 等. 不同品种莲藕游离氨基酸多样性分析[J]. 食品科学, 2022, 43(4): 183−189. [GU Xiaomin, TONG Chuan, HAN Yanchao, et al. Diversity of free amino acids among different lotus rhizomes[J]. Food Science, 2022, 43(4): 183−189.]
[28] 颜孙安, 姚清华, 林香信, 等. 成熟度对‘红地球’葡萄氨基酸营养价值的影响[J]. 果树学报, 2021, 38(1): 64−72. [YAN Sun'an, YAO Qinghua, LIN Xiangxin, et al. Effects of maturity on amino acid nutrition in ‘Red Globe’ grape (*Vitis vinifera* L.)[J]. Journal of Fruit Science, 2021, 38(1): 64−72.]
[29] LUO Tingting, HE Yanni, JIANG Lanxin, et al. Flavor perception and biological activities of bitter compounds in food[J]. Food Chemistry, 2025, 477: 143532.
[30] LIN Yilin, XUAN Xie, ARTHUR FABRICE K M, et al. Effects of alkaline water-assisted tea polyphenol soaking on the physicochemical, biochemical, bacterial structure, and free amino acid composition of grass carp fillets during storage at 4 ℃[J]. Food Control, 2025, 174: 111249.
[31] 颜孙安, 史梦竹, 林香信, 等. 基于主成分与聚类分析不同品种鲜食葡萄的氨基酸品质评价[J]. 食品工业科技, 2022, 43(6): 372−379. [YAN Sun'an, SHI Mengzhu, LIN Xiangxin, et al. Principal component analysis and cluster analysis for evaluating amino acid of different table grapes (*Vitis vinifera* L.) varieties[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(6): 372−379.]
[32] 黄小兰, 何旭峰, 杨勤, 等. 不同产地地参中 17 种氨基酸的测定与分析[J]. 食品科学, 2021, 42(2): 255−261. [HUANG Xiaolan, HE Xufeng, YANG Qin, et al. Determination of 17 amino acids in the dried rhizome of *Lycopus lucidus* turcz. var. hirtus regel from different habitats[J]. Food Science, 2021, 42(2): 255−261.]
[33] 郝苑汝, 陈芮蝶, 翟梅枝. 不同品种核桃氨基酸组成及营养价值评价[J]. 食品工业科技, 2025, 46(16): 281−290. [HAO Yuanru, CHEN Ruidie, ZHAI Meizhi. Evaluation on amino acid composition and nutritional value from different walnut varieties[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(16): 281−

290.］
［34］ WANG Zhe, REN Yongjiao, ZHOU Boxi, et al. Rapid determination for tyrosine isomers in food based on N-acetyl-L-cysteine/Upconversion nanomaterials target-induced quench by chiral Electrochemiluminescence sensor［J］. Food Chemistry, 2025, 463: 141169.
［35］ 王丽艳, 荆瑞勇, 郭永霞, 等. 基于氨基酸含量的市售 14 种食用蘑菇的综合评价［J］. 食品科学, 2021, 42(16): 203−208. ［WANG Liyan, JING Ruiyong, GUO Yongxia, et al. Comprehensive evaluation of 14 edible mushroom varieties from the Chinese market based on amino acid contents［J］. Food Science, 2021, 42(16): 203−208.］
［36］ SÁ A G A, WAN Zhongyang, JHA A B, et al. Influence of different amino acid scoring patterns on the protein quality of field peas［J］. Journal of Food Composition and Analysis, 2024, 127: 105938.
［37］ 胡杨, 朱教胜, 杨强, 等. 基于热图和聚类分析新疆 7 个产地荒漠肉苁蓉中氨基酸含量及其营养价值评价［J］. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(11): 310−318. ［HU Yang, ZHU Jiaosheng, YANG Qiang, et al. Determination of amino acids content in *Cistanche deserticola* from 7 habitats of Xinjiang based on heatmap and cluster analysis and their nutrition value evaluation［J］. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(11): 310−318.］
［38］ 姜仲茂, 乌云塔娜, 王森, 等. 不同产地野生长柄扁桃仁氨基酸组成及营养价值评价［J］. 食品科学, 2016, 37(4): 77−82. ［JIANG Zhongmao, WUYUN T N, WANG Sen, et al. Amino acid composition and nutritional quality evaluation of wild *Amygdalus pedunculatus* Pall. Kernels from different growing regions［J］. Food Science, 2016, 37(4): 77−82.］