DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20251216001
引用格式: 张浩, 王楠希, 杨永坛, 等. 中国 11 个省及自治区油莎豆氨基酸组成差异及其营养价值评价[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(11): 238–248.
ZHANG H, WANG NX, YANG YT, *et al*. Differences in amino acid composition and nutritional value evaluation of *Cyperus esculentus* in 11 Chinese provinces and autonomous regions [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(11): 238–248. (in Chinese with English abstract).

中国 11 个省及自治区油莎豆氨基酸组成差异及其营养价值评价

张　浩, 王楠希, 杨永坛, 孙恬恬, 罗晓宏, 陈红娟, 杜传林*
(国家粮食和物资储备局科学研究院, 北京　100037)

摘　要: 目的　探究新疆、河北、河南、山东、湖南、宁夏、云南、内蒙古、黑龙江、辽宁和吉林 11 个省及自治区油莎豆氨基酸组成特征与营养价值, 并构建基于氨基酸组成的产地溯源模型。**方法**　采用氨基酸分析仪对 11 个省及自治区不同品种的油莎豆样品进行检测, 分析产地和不同气候条件对油莎豆氨基酸含量的影响。从营养学角度, 通过必需氨基酸及支链氨基酸组成成分分析和氨基酸评分结果, 对 11 个省及自治区油莎豆氨基酸的营养价值进行综合评价。**结果**　油莎豆氨基酸种类丰富, 必需氨基酸占比在 24%~36%, 支链氨基酸占比在 12.02%~17.43%, 氨基酸评分显示, 11 个省及自治区油莎豆的第一限制性氨基酸为甲硫氨酸, 在实际食用中推荐通过膳食搭配或营养强化弥补甲硫氨酸不足的短板。西南亚热带季风气候类型下谷氨酸和天冬氨酸含量显著高于其他气候条件。通过化学计量学软件, 采用 k 最近邻法(K-nearest neighbor algorithm, KNN)、偏最小二乘判别(partial least squares discriminant analysis, PLS-DA)和支持向量机(support vector machine, SVM) 3 种模型进行产地溯源识别, 其中 KNN 模型表现最佳, 训练集识别率为 96.97%, 交叉验证识别率达 98.99%。**结论**　本研究探究了不同省及自治区油莎豆氨基酸的含量差异, 为油莎豆种植和后续油莎豆产品产业化提供参考依据。

关键词: 油莎豆; 氨基酸; 营养价值评价; 必需氨基酸; 支链氨基酸; 产地溯源

Differences in amino acid composition and nutritional value evaluation of *Cyperus esculentus* in 11 Chinese provinces and autonomous regions

ZHANG Hao, WANG Nan-Xi, YANG Yong-Tan, SUN Tian-Tian, LUO Xiao-Hong, CHEN Hong-Juan, DU Chuan-Lin*
(*Academy of National Food and Strategic Reserves Administration*, *Beijing* 100037, *China*)

ABSTRACT: Objective　To investigate the amino acid composition characteristics and nutritional value of *Cyperus*

收稿日期: 2025-12-16
基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费项目(JY2408)
第一作者: 张浩(1996—), 女, 硕士, 研究实习员, 主要研究方向为仪器分析方法开发及应用。E-mail: zh@ags.ac.cn
***通信作者:** 杜传林(1980—), 男, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为粮食油脂及植物蛋白。E-mail: dcl@chinagrain.org

esculentus from 11 provinces and autonomous regions in China (Xinjiang, Hebei, Henan, Shandong, Hunan, Ningxia, Yunnan, Inner Mongolia, Heilongjiang, Liaoning and Jilin), and establish a geolocation model based on amino acid composition. **Methods**　Amino acid analyzers were used to test *Cyperus esculentus* samples from different varieties across these 11 provinces and autonomous regions, analyzing the effects of origin and varying climatic conditions on amino acid content. From a nutritional perspective, the nutritional value of *Cyperus esculentus* amino acids across the 11 provinces and autonomous regions was comprehensively evaluated through analysis of essential amino acids, branched-chain amino acid composition and amino acid scoring results. **Results**　*Cyperus esculentus* exhibited a rich variety of amino acids, with essential amino acids accounting for 24%–36% and branched-chain amino acids ranging from 12.02%–17.43%. Amino acid scoring indicated that methionine was the primary limiting amino acid in *Cyperus esculentus* across all 11 provinces and autonomous regions. In actual consumption, it was recommended to address methionine deficiency through dietary combinations or nutritional fortification. Under the subtropical monsoon climate of Southwest Asia, the levels of glutamic acid and aspartic were significantly higher than under other climatic conditions. Using chemometric software, 3 kinds of models—K-nearest neighbor algorithm (KNN), partial least squares discriminant analysis (PLS-DA) and support vector machine (SVM)—were applied for origin tracing. The KNN model demonstrated the best performance, achieving a training set recognition rate of 96.97% and a cross-validation recognition rate of 98.99%. **Conclusion**　This study investigates amino acid content variations in *Cyperus esculentus* across different provinces and autonomous regions, providing a reference for *Cyperus esculentus* cultivation and subsequent industrialization of *Cyperus esculentus* products.

KEY WORDS: *Cyperus esculentus*; amino acids; nutritional value assessment; essential amino acids; branched-chain amino acids; origin traceability

0　引　言

油莎豆(*Cyperus esculentus*), 俗称虎坚果[1], 广泛分布于亚洲、非洲、欧洲和拉丁美洲的亚热带地区[2], 是一种古老的块茎作物, 因其卓越的耐逆性(耐旱、耐贫瘠、耐盐碱)和高产潜力[3], 近年来作为边际土地利用和可持续农业发展的候选作物受到广泛关注。传统上, 对其开发利用的研究多集中于其富含油脂(24%~28%, 富含油酸)[4]和碳水化合物(50%, 主要为淀粉和糖)[5]的特性, 使其在食用油、生物燃料及淀粉基食品工业中展现出重要价值[6]。然而, 油莎豆中含量相对可观(约 5%~8%)且品质独特的蛋白质[7]及其氨基酸组成, 作为其综合营养价值的关键组成部分, 尚未得到与其潜力相称的深入研究。深入解析油莎豆的氨基酸组成特征、含量变异规律(受品种、栽培条件、加工工艺影响)[5]及其消化吸收特性, 对于全面评估其作为新型植物蛋白源的应用价值至关重要。这不仅关乎人类营养(如开发高蛋白营养食品、代餐粉、特殊膳食)[8], 也涉及动物饲料(提高饲料蛋白品质和利用率)[9]以及潜在的功能性肽开发[10]。此外, 明确其氨基酸限制因素和营养短板, 可为育种工作[培育高必需氨基酸(essential amino acid, EAA)含量品种]和加工技术(如发酵、酶解、与其他蛋白复配)[7]提供精准靶点, 以优化其营养品质。

植物蛋白是满足全球日益增长的蛋白质需求、促进膳食多样化和可持续食物系统的关键资源[11]。油莎豆蛋白不仅含量显著高于许多常见块根块茎类作物[12], 其氨基酸谱更展现出引人瞩目的特点。现有研究表明, 油莎豆含有全部 8 种 EAA, 并且赖氨酸含量相对较高[13], 这一特性在谷物蛋白(通常赖氨酸缺乏)[14]中尤为珍贵, 暗示了其在弥补谷物蛋白营养缺陷、作为复合食品或饲料蛋白源方面的潜力。

在氨基酸组成方面, 已有研究证实油莎豆富含多种氨基酸, 其中精氨酸含量最高, *L*-甲硫氨酸(methionine, Met)含量最低[15]; 不同种质之间蛋白质和 EAA 含量差异显著, 脯氨酸变异系数最大, 丙氨酸变异系数最小[13]。但油莎豆氨基酸缺乏大范围、多产地的系统性氨基酸比较研究, 油莎豆在我国 11 个省及自治区均有种植, 但不同产区氨基酸含量的系统对比研究较少。鉴于当前对油莎豆氨基酸组成的系统性研究相对匮乏, 且其作为可持续蛋白新来源的潜力巨大, 本研究选取中国 11 个主要油莎豆种植省及自治区的样品, 通过氨基酸分析仪系统分析其氨基酸组成差异, 通过组成成分分析和氨基酸评分(amino acid score, AAS)探讨其营养价值, 并建立基于氨基酸指纹的产地溯源模型, 为油莎豆优质产区选择和产品开发提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　试剂与材料

20 种氨基酸混标溶液[标准浓度 100 nmol/mL, 包括

磺基丙氨酸(cysteic acid, $CySO_3H$)、*L*-天冬氨酸(aspartic, Asp)、蛋氨砜(methionine sulphone, MetSON)、*L*-苏氨酸(threonine, Thr)、*L*-丝氨酸(serine, Ser)、*L*-谷氨酸(glutamic acid, Glu)、甘氨酸(glycine, Gly)、*L*-丙氨酸(alanine, Ala)、*L*-缬氨酸(valine, Val)、*L*-胱氨酸[cystine, $(Cys)_2$]、Met、*L*-异亮氨酸(isoleucine, Ile)、*L*-亮氨酸(leucine, Leu)、*L*-酪氨酸(tyrosine, Tyr)、*L*-苯丙氨酸(phenylalanine, Phe)、*L*-组氨酸(histidine, His)、*L*-赖氨酸(lysine, Lys)、氯化铵(ammonium chloride, NH_4)、*L*-精氨酸(arginine, Arg)、*L*-脯氨酸(proline, Pro)]、茚三酮(色谱纯)、钠盐缓冲液(德国曼默博尔公司); 盐酸(优级纯)、苯酚(分析纯)(国药集团化学试剂有限公司); 实验过程所用去离子水均由发生器制得。

油莎豆样品如表 1 所示, 66 个油莎豆样品于 2023 年 10 月 7 日—11 月 15 日期间分别采自新疆、河北、河南、山东、湖南、宁夏、云南、内蒙古、黑龙江、辽宁和吉林 11 个省及自治区, 样品采集地涉及 10 种不同的气候类型。所有样品经室外自然晒干后粉碎, 过 50 目筛, 通过酸水解法分析氨基酸含量。

1.2 仪器与设备

A300 型氨基酸分析仪、磺酸型钠离子分离柱(125 mm×4.0 mm)(德国曼默博尔公司); Milli-Q 去离子水发生器(美国默克密理博公司); XSE105DU 分析天平(精度 0.01 mg, 美国梅特勒托利多公司); 101-2AB 型电热鼓风干燥箱(天津市泰斯特仪器有限公司); N-EVAP 112 快速溶剂吹干器(美国奥格曼公司); JP-300A 高速多功能粉碎机(永康市久品工贸有限公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 样品处理

将采集的 11 个省及自治区油莎豆按照地区及产地分类编号, 用超纯水对已分类油莎豆颗粒清洗, 清洗后晒干, 烘干至水分 5%以下进行粉碎处理, 过 50 目不锈钢筛, 得到油莎豆粉末样品, 样品存储于–20 ℃冰箱中。称取不同地区油莎豆样品 200 mg 至水解管中, 每个水解管内加入 10 mL 浓度为 6 mol/L 的盐酸溶液(含苯酚, 质量浓度为 1 g/L), 每管内充氮气 30 s 后, 在充氮气状态下封管。将已封口的水解管放在鼓风干燥箱内, 于(110±1) ℃水解 22 h, 取出后冷却至室温。打开水解管, 将水解液过滤至 25 mL 容量瓶内, 用少量超纯水多次冲洗水解管, 水洗液移入同一 25 mL 容量瓶内, 最后用超纯水定容, 振荡混匀。准确吸取 1 mL 滤液移入到 10 mL 试管内, 在快速溶剂萃取仪中 60 ℃加热环境下充氮气干燥, 干燥后残留物用 1 mL 样品稀释液溶解, 0.22 μm 滤膜过滤后转移至仪器进样瓶中供仪器检测。氨基酸的样品预处理和含量测定依据 GB 5009.124—2016《食品安全国家标准 食品中氨基酸的测定》中茚三酮柱后衍生法进行。

1.3.2 色谱条件

色谱柱采用磺酸型钠离子分离柱(125 mm×4.0 mm); 柱温 50 ℃; 反应器温度 115 ℃; 进样量 20 μL; 流动相 A、流动相 B、流动相 C 和流动相 D 为不同 pH 的钠盐缓冲液, 0~25 min 为溶剂 A 和茚三酮溶液洗脱; 26~35 min 为溶剂 B

表 1 样品采集区域和气候条件

Table 1 Collection areas and climatic conditions of sample

产地	品种	样品数		种植区域气候
新疆	新油莎 54 号	6	6	温带大陆性季风气候
河北	河北大圆粒	6	6	温带季风气候
河南	豫油莎 1 号	6	6	暖温带半湿润大陆性季风气候
山东	中油莎 4 号	6	1	温带大陆性季风气候
			5	温带季风气候
湖南	带皮油莎豆(圆粒、长粒)	6	6	中亚热带湿润季风气候
宁夏	中油莎 1 号~4 号	6	2	温带大陆性季风气候
			4	中温带半干旱气候
云南	圆粒老品种、长粒新品种	7	2	亚热带低纬山地季风气候
			5	西南亚热带季风气候
内蒙古	中油莎 1 号	6	1	温带大陆性季风气候
			5	温带半干旱大陆性季风气候
黑龙江	吉油莎 2 号	6	6	温带大陆性季风气候
辽宁	吉油莎 2 号	4	1	暖温带湿润季风气候
			3	温带大陆性季风气候
吉林	吉油莎 2 号	7	3	中温带大陆性季风气候
			4	温带大陆性季风气候

和茚三酮溶液洗脱; 36~55 min 为溶剂 C 和茚三酮溶液洗脱; 56~75 min 为溶剂 D 和茚三酮溶液洗脱, 采用等度洗脱程序(V:V=67:33)。检测器波长 570 nm 和 440 nm。

1.3.3　氨基酸含量计算

氨基酸的含量以其质量分数计, 按公式(1)计算。

$$w/\%=\frac{n\times A_i\times V\times c\times M\times V_{st}}{A_{st}\times m\times V_i\times 10^9}\times 100\% \quad (1)$$

式中: w 为质量分数, %; n 为定容后进样前稀释倍数; A_i 为试样溶液中对应氨基酸的峰面积; V 为试样提取溶液定容体积, mL; c 为标准品浓度, nmol/mL; M 为氨基酸的摩尔质量, g/mol; V_{st} 为氨基酸标准溶液进样体积, mL; A_{st} 为氨基酸标准溶液中对应氨基酸的峰面积; m 为试样质量, g; V_i 为试样溶液进样体积, mL。

1.3.4　氨基酸评分计算

AAS 采用公式(2)计算[16]。

$$AAS/\%=\frac{\text{样品蛋白质中氨基酸含量(mg/g)}}{\text{WHO/FAO评分标准模式中相应必需氨基酸含量(mg/g)}}\times 100\% \quad (2)$$

式中: WHO 为世界卫生组织(World Health Organization), FAO 为联合国粮食及农业组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations)。

1.4　化学计量学模型数据预处理

将各省份氨基酸数据导入 Chempattern 2020 (x86)软件, 将各省份数据分类, 归为训练集, 选择识别模式对油莎豆产地溯源建模, 对数据进行标准化处理, 消除量纲影响。

1.4.1　模型构建

采用留一交叉验证(leave-one-out cross-validation, LOOCV)方法, 分别建立 k 最近邻法(K-nearest neighbor algorithm, KNN)、偏最小二乘判别(partial least squares discriminant analysis, PLS-DA)和支持向量机(support vector machine, SVM) 3 种判别模型。KNN 模型: 样本距离采用街区距离, 通过交叉验证确定最优 k 值。SVM 模型: 核函数类型选择多项式核, 通过网格搜索优化惩罚参数 C 和核参数 γ。PLS-DA 模型: 通过交叉验证确定最优主成分数。

1.4.2　模型评价指标

采用训练集识别率和交叉验证识别率评价模型性能, 比较 3 种模型的训练集识别率和交叉验证识别率高低, 识别率大于 80%认为识别效果较好。

1.5　数据处理

每个样品测定 3 次, 所有实验测定数据用 Chromatography Data Handling System 进行处理和分析并记录于 Excel 2010 软件中, 使用相应的计算公式和统计公式进行处理。采用 IBM SPSS Statistics 27.0 软件进行数据统计分析。各指标数据以平均值±标准偏差表示。采用单因素方差分析比较不同产地间氨基酸含量差异, Duncan 法进行多重比较(P<0.05)。

2　结果与分析

2.1　氨基酸组分标准品色谱图

标准品的氨基酸色谱图如图 1 所示。根据出峰时间依次为: Cya、Asp、MetSON、Thr、Ser、Glu、Gly、Ala、$(Cys)_2$、Val、Met、Ile、Leu、Tyr、Phe、His、Lys、NH_4、Arg 和 Pro。从图 1 中可以看出, 仪器的分离度好。

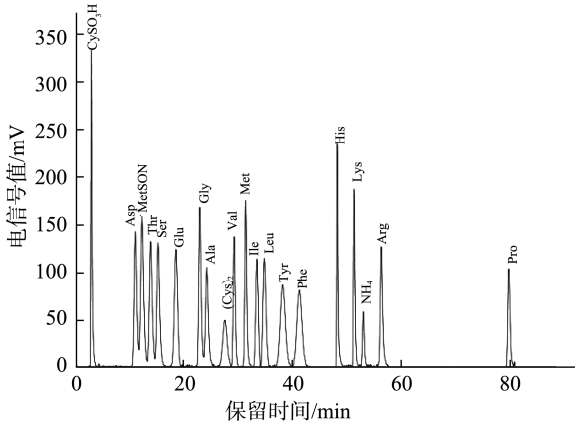


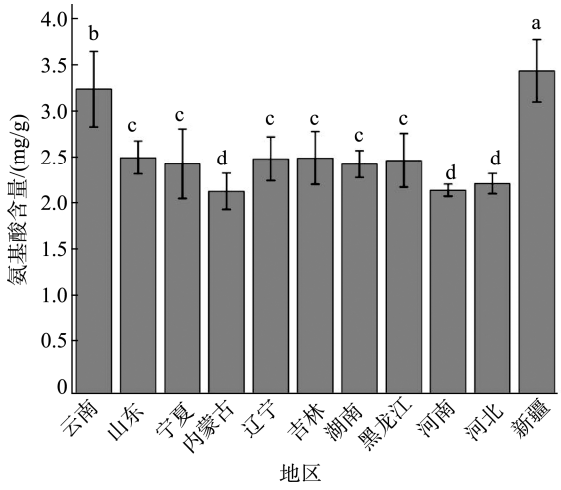
图 1　标准品氨基酸色谱图

Fig.1　Chromatogram of standard amino acids

2.2　不同产地对油莎豆氨基酸组成分析

通常一种食物的氨基酸的种类和含量决定了该种食物蛋白质的优良程度[17]。结果表明, 如图 2 所示, 我国 11 个省份油莎豆样品的氨基酸总含量最高的地区为新疆, 其次为云南, 含量最低的地区为内蒙古, 各省份氨基酸总含量除新疆和云南外差距不大。根据地区总氨基酸(total amino acids, TAA)含量差异可分为高、中、低 3 个含量组, 高含量组(>3.0 mg/g)为新疆[(3.52±0.36) mg/g]和云南[(3.35±0.42) mg/g], 中含量组(2.5~3.0 mg/g)为山东[(2.58±0.19) mg/g]、吉林[(2.57±0.31) mg/g]、辽宁[(2.55±0.28) mg/g]、黑龙江[(2.57±0.33) mg/g]、宁夏[(2.51±0.40) mg/g]和湖南[(2.51±0.16) mg/g], 低含量组(<2.5 mg/g)为河北[(2.30±0.14) mg/g]、河南[(2.22±0.07) mg/g]和内蒙古[(2.21±0.21) mg/g]。由此可见, 新疆和云南地区油莎豆 TAA 含量最高, 具有发展高品质油莎豆蛋白产业的潜力。油莎豆氨基酸包括 Asp、Thr、Ser、Glu、Gly、Ala、Val、Met、Ile、Leu、Tyr、Phe、His、Lys、NH_4、Arg 和 Pro, 其中 Arg 含量最高且与 TAA 含量呈正相关, Met 含量最低, 氨基酸种类基本齐全, 氨基酸平均含量排序前 8 种依次为: Arg、Glu、Asp、Leu、Ala、Val、Pro 和 Lys。Arg 作为一种半必需氨基酸, 既是人体合成蛋白质的基础成分,

也参与调节免疫功能、维持心血管健康等生理过程，人体可部分合成，但在疾病或高强度运动时可根据需要额外补充，其中新疆地区的 Arg 含量最高，在需要补充 Arg 时可针对性选择新疆品种油莎豆进行补充。限制 Met 可抑制肿瘤生长，并增加肝癌细胞对索拉非尼等药物的敏感性[18]。油莎豆作为一种天然低 Met 食物，可作为肿瘤患者“Met 限制饮食”中的优质碳水化合物与脂肪来源，在不增加 Met 负荷的同时提供能量。



注：不同字母表示差异显著(P<0.05)。

图 2 11 个省及自治区氨基酸总含量

Fig.2 Total amino acid content in 11 provinces and autonomous regions

比较 11 个省及自治区不同种类氨基酸含量，如表 2 所示，其中云南地区油莎豆的 Asp、Thr、Ser、Glu、Ala、Val、Leu、Tyr 含量最高；新疆地区 Thr、Ser、Gly、Phe、His、Lys、Arg 含量最高，Asp、Glu、Leu 含量仅次于云南。Glu 和 Asp 是构成鲜味的主要氨基酸[19]，新疆和云南的油莎豆两种氨基酸的含量均较高，今后在制作油莎豆加工食品(如油莎豆粉、油莎豆酱油等)时，可挑选特定产区的油莎豆进行加工，其天然鲜味和风味浓郁程度可能显著优于其他产区的产品，而湖南的 Glu 含量最低，其风味可能相对寡淡。

2.3 不同气候环境下油莎豆氨基酸组成分析

2.3.1 不同气候类型下氨基酸组成的差异规律

不同的气候条件是影响油莎豆中营养物质积累的重要因素[5]。本研究中讨论的 11 个省及自治区的油莎豆样品来自 10 种不同气候类型，由于油莎豆作为新兴油料作物，其种植区域和种植量有限，亚热带低纬山地季风气候和暖温带湿润季风气候下能采集到的样本组相对较少(少于 3 个)，因此本研究未对这两种气候下的样本进行统计分析，仅对其他 8 种气候类型下的氨基酸含量进行了统计学分析，如表 3 所示。西南亚热带季风气候分布的地区油莎豆样品中氨基酸总量最高(3.37±0.48) mg/g，其次是温带大陆性季风气候(2.83±0.53) mg/g、中温带大陆性季风气候(2.63±0.15) mg/g、温带半干旱大陆性季风气候(2.27±0.17) mg/g 和暖温带半湿润大陆性季风气候(2.22±0.07) mg/g，这一梯度差异表明，温暖湿润的气候条件更有利于氨基酸积累。

表 2 11 个省及自治区 17 种氨基酸含量(mg/g)

Table 2 Content of 17 kinds of amino acid across 11 provinces and autonomous regions (mg/g)

氨基酸	云南	山东	宁夏	内蒙古	辽宁	吉林	湖南	黑龙江	河南	河北	新疆
Asp	0.35±0.04^{a}	0.26±0.03^{bc}	0.26±0.04^{bcd}	0.23±0.02^{de}	0.26±0.02^{b}	0.27±0.05^{b}	0.25±0.01^{bcde}	0.26±0.05^{b}	0.23±0.02^{cde}	0.23±0.03^{e}	0.33±0.04^{a}
Thr	0.12±0.02^{a}	0.10±0.01^{b}	0.11±0.04^{b}	0.09±0.01^{d}	0.10±0.01^{b}	0.11±0.01^{b}	0.11±0.01^{b}	0.10±0.01^{bc}	0.09±0.01^{cd}	0.09±0.01^{cd}	0.12±0.01^{a}
Ser	0.10±0.01^{a}	0.09±0.01^{bc}	0.09±0.03^{b}	0.07±0.01^{e}	0.08±0.01^{cd}	0.09±0.02^{b}	0.09±0.01^{bc}	0.09±0.01^{bc}	0.08±0.01^{de}	0.08±0.01^{de}	0.10±0.01^{a}
Glu	0.46±0.07^{a}	0.35±0.03^{bc}	0.38±0.08^{b}	0.35±0.02^{bc}	0.32±0.03^{c}	0.35±0.09^{bc}	0.25±0.03^{d}	0.38±0.07^{b}	0.33±0.03^{c}	0.32±0.02^{c}	0.45±0.09^{a}
Gly	0.14±0.03^{a}	0.13±0.01^{b}	0.11±0.02^{c}	0.11±0.02^{bc}	0.13±0.01^{b}	0.15±0.05^{a}	0.12±0.01^{b}	0.13±0.01^{b}	0.11±0.01^{bc}	0.11±0.01^{bc}	0.15±0.02^{a}
Ala	0.19±0.04^{a}	0.15±0.02^{cd}	0.13±0.02^{ef}	0.13±0.02^{f}	0.15±0.02^{cd}	0.14±0.03^{def}	0.18±0.03^{ab}	0.14±0.02^{def}	0.14±0.03^{def}	0.15±0.02^{de}	0.17±0.02^{bc}
Val	0.19±0.09^{a}	0.14±0.04^{cd}	0.16±0.05^{abc}	0.12±0.02^{d}	0.18±0.02^{ab}	0.12±0.05^{d}	0.14±0.02^{cd}	0.14±0.02^{cd}	0.14±0.02^{cd}	0.12±0.03^{d}	0.15±0.02^{bcd}
Met	0.03±0.01^{abcd}	0.02±0.01^{d}	0.04±0.01^{a}	0.03±0.01^{ab}	0.03±0.01^{a}	0.03±0.01^{bcd}	0.03±0.02^{abc}	0.02±0.01^{cd}	0.03±0.01^{cd}	0.03±0.01^{abcd}	0.01±0.01^{e}
Ile	0.09±0.01^{b}	0.08±0.01^{bcd}	0.07±0.01^{d}	0.07±0.01^{d}	0.08±0.01^{bcd}	0.08±0.01^{bcd}	0.11±0.04^{a}	0.08±0.01^{cd}	0.07±0.01^{d}	0.09±0.05^{b}	0.09±0.01^{bc}
Leu	0.20±0.07^{a}	0.16±0.02^{cd}	0.14±0.03^{cde}	0.13±0.01^{de}	0.15±0.01^{cd}	0.16±0.01^{bc}	0.18±0.05^{ab}	0.15±0.02^{cd}	0.14±0.01^{de}	0.13±0.03^{e}	0.18±0.02^{ab}
Tyr	0.09±0.05^{a}	0.07±0.02^{abc}	0.08±0.03^{ab}	0.06±0.02^{c}	0.08±0.01^{ab}	0.06±0.01^{bc}	0.08±0.02^{abc}	0.08±0.01^{ab}	0.07±0.01^{bc}	0.06±0.01^{c}	0.07±0.01^{abc}
Phe	0.09±0.01^{b}	0.08±0.01^{bc}	0.07±0.01^{d}	0.07±0.01^{d}	0.08±0.01^{bc}	0.08±0.01^{cd}	0.09±0.01^{b}	0.08±0.01^{cd}	0.07±0.01^{d}	0.08±0.01^{cd}	0.11±0.02^{a}
His	0.05±0.01^{b}	0.05±0.02^{bc}	0.04±0.02^{c}	0.04±0.01^{c}	0.04±0.02^{bc}	0.04±0.01^{bc}	0.05±0.01^{bc}	0.04±0.01^{bc}	0.04±0.01^{bc}	0.05±0.02^{bc}	0.07±0.02^{a}
Lys	0.15±0.04^{b}	0.14±0.03^{bc}	0.10±0.02^{e}	0.11±0.02^{de}	0.12±0.03^{cde}	0.14±0.03^{b}	0.14±0.02^{bc}	0.13±0.02^{bcd}	0.12±0.01^{cde}	0.12±0.02^{de}	0.21±0.02^{a}
NH_4	0.05±0.02^{bc}	0.06±0.04^{b}	0.04±0.02^{bc}	0.03±0.01^{c}	0.03±0.01^{c}	0.04±0.01^{bc}	0.09±0.07^{a}	0.05±0.01^{bc}	0.03±0.01^{bc}	0.03±0.01^{c}	0.08±0.04^{a}
Arg	0.83±0.22^{b}	0.59±0.13^{c}	0.44±0.13^{de}	0.44±0.11^{de}	0.56±0.21^{c}	0.54±0.18^{cd}	0.50±0.14^{cde}	0.57±0.16^{c}	0.41±0.08^{e}	0.49±0.10^{cde}	1.14±0.20^{a}
Pro	0.18±0.07^{b}	0.11±0.04^{c}	0.25±0.10^{a}	0.13±0.05^{bc}	0.16±0.13^{bc}	0.17±0.09^{b}	0.10±0.06^{c}	0.13±0.09^{bc}	0.13±0.07^{bc}	0.13±0.10^{bc}	0.10±0.01^{c}

注：同行数据上标不同字母表示差异显著(P<0.05)，表 3 同。

进一步分析不同氨基酸对气候响应的差异, 发现鲜味氨基酸(Glu、Asp)对气候敏感。西南亚热带季风气候条件下, Glu 含量高达(0.50±0.05) mg/g, Asp 含量高达(0.36±0.04) mg/g, 均为各气候类型中最高。而中亚热带湿润季风气候的 Glu 含量仅(0.25±0.03) mg/g, 仅为前者 50%, 这表明 Glu 的积累对温度和降水条件敏感, 可能与谷氨酸合成酶和谷氨酰胺合成酶的活性受温度调控有关[20]。

2.3.2　气候因子调控氨基酸积累的生理机制

油莎豆为阳性植物, 具有喜温性、喜光性、喜沙性等特点[21], 西南亚热带季风气候的特点是夏季高温多雨, 冬季温和少雨, 湿度大[22], 这个地区通常具有温暖的气候、充足的日照和较大的昼夜温差。白天光合作用强, 合成大量碳水化合物, 夜晚温度降低, 呼吸作用减弱, 消耗减少, 这为氨基酸合成提供了充足的碳骨架和能量。季风气候带来了充足的雨水, 保证了氮素等矿物质营养从土壤中被吸收并运输到植株体内。

氨基酸合成涉及硝酸还原酶、谷氨酰胺合成酶、谷氨酸合成酶等一系列关键酶[20]。这些酶的活性具有温度依赖性, 最适温度通常在 25~30 ℃。西南亚热带季风气候区年均温适宜, 生长季温度正好在酶活最适范围内, 有利于氮素吸收、同化和氨基酸合成。而温带半干旱气候区生长季温度波动大, 低温期酶活受抑制, 高温期又可能因呼吸消耗加剧而降低净积累。

氨基酸合成需要充足的碳骨架, 碳骨架来源于光合作用的中间产物。新疆全年日照时数达 2600~3400 h[23], 云南达 2000~2800 h[24], 光合作用强, 为氨基酸合成提供了充足的碳骨架和能量, 光照强度与谷氨酰胺合成酶活性呈正相关[25], 强光照可诱导谷氨酰胺合成酶基因高效表达, 促进氨基酸合成。新疆和云南(特别是高海拔地区)昼夜温差大(15~20 ℃)[26], 有利于碳水化合物的积累和氨基酸的合成[25]。白天高温促进光合作用和氮同化, 光合产物积累, 夜间低温降低呼吸消耗, 为氨基酸合成提供充足底物, 这种日积夜蓄的代谢模式是氨基酸高效积累的重要生理基础。

2.4　11 个省及自治区氨基酸营养价值评价

2.4.1　EAA 及支链氨基酸组成成分分析

一种食物蛋白质的营养价值优劣可以通过其所含 EAA 的种类、数量和组成比例判断, 其组成比例越接近人体需要的氨基酸比例, 其质量越优[3]。目前还没有发现一种植物蛋白质比例完全符合 WHO/FAO 规定的 EAA/TAA 为 40%的标准[27]。如表 4 所示, 11 个省及自治区的油莎豆 EAA/TAA 在 24%~36%, 根据文献中得知玉米和大豆 EAA/TAA 比值在 33%左右[28], 油莎豆的比值虽然没有达到 WHO/FAO 标准, 但接近玉米和大豆的比值, 说明油莎豆营养价值尚可。EAA 代表蛋白质的整体质量, 食物蛋白质中 EAA 含量越高、比例越接近人体需求, 其生物价和净利用率就越高[29]。

表 3　不同气候条件下 17 种氨基酸含量(mg/g)

Table 3　Content of 17 kinds of amino acid under different climate conditions (mg/g)

氨基酸	温带大陆性季风气候	温带季风气候	暖温带半湿润大陆性季风气候	中亚热带湿润季风气候	中温带大陆性季风气候	温带半干旱大陆性季风气候	中温带半干旱气候	西南亚热带季风气候
Asp	0.28±0.05^{c}	0.24±0.04^{cd}	0.23±0.02^{d}	0.25±0.01^{cd}	0.28±0.04^{c}	0.24±0.02^{d}	0.24±0.04^{d}	0.36±0.04^{a}
Thr	0.11±0.02^{bc}	0.10±0.01^{cde}	0.09±0.01^{e}	0.11±0.01^{bcd}	0.11±0.01^{bc}	0.09±0.01^{de}	0.09±0.01^{de}	0.12±0.01^{b}
Ser	0.09±0.02^{bc}	0.08±0.01^{cd}	0.08±0.01^{d}	0.09±0.01^{bc}	0.09±0.01^{bc}	0.07±0.01^{d}	0.07±0.01^{d}	0.11±0.01^{a}
Glu	0.39±0.09^{b}	0.34±0.04^{bc}	0.33±0.03^{bc}	0.25±0.03^{d}	0.38±0.06^{b}	0.35±0.02^{bc}	0.31±0.05^{cd}	0.50±0.05^{a}
Gly	0.13±0.02^{bc}	0.12±0.02^{bc}	0.11±0.01^{bc}	0.12±0.01^{bc}	0.17±0.07^{a}	0.11±0.02^{bc}	0.10±0.01^{c}	0.15±0.03^{a}
Ala	0.15±0.02^{b}	0.15±0.02^{b}	0.14±0.03^{bc}	0.18±0.03^{a}	0.13±0.04^{bc}	0.13±0.03^{bc}	0.12±0.01^{c}	0.20±0.04^{a}
Val	0.15±0.03^{b}	0.13±0.04^{bc}	0.14±0.02^{bc}	0.14±0.02^{bc}	0.10±0.08^{c}	0.12±0.02^{bc}	0.13±0.04^{bc}	0.20±0.11^{a}
Met	0.03±0.01^{abc}	0.03±0.01^{abc}	0.03±0.01^{abc}	0.03±0.02^{abc}	0.02±0.01^{bc}	0.04±0.01^{ab}	0.03±0.02^{abc}	0.03±0.01^{abc}
Ile	0.08±0.01^{bc}	0.09±0.03^{bc}	0.07±0.01^{c}	0.11±0.05^{a}	0.08±0.01^{bc}	0.07±0.01^{c}	0.07±0.01^{c}	0.10±0.01^{ab}
Leu	0.16±0.02^{bc}	0.14±0.03^{cd}	0.14±0.01^{cd}	0.18±0.04^{b}	0.16±0.01^{bc}	0.14±0.01^{cd}	0.12±0.01^{d}	0.22±0.08^{a}
Tyr	0.08±0.03^{ab}	0.06±0.01^{bc}	0.07±0.02^{bc}	0.08±0.01^{ab}	0.07±0.01^{bc}	0.06±0.01^{bc}	0.04±0.01^{c}	0.09±0.06^{a}
Phe	0.08±0.02^{ab}	0.08±0.01^{abc}	0.07±0.01^{bc}	0.09±0.01^{a}	0.08±0.01^{ab}	0.07±0.01^{bc}	0.07±0.02^{c}	0.09±0.02^{a}
His	0.05±0.02^{ab}	0.05±0.02^{ab}	0.04±0.01^{ab}	0.05±0.01^{ab}	0.05±0.01^{ab}	0.04±0.01^{ab}	0.03±0.01^{b}	0.05±0.02^{a}
Lys	0.15±0.05^{a}	0.13±0.03^{ab}	0.12±0.01^{ab}	0.14±0.02^{ab}	0.15±0.03^{a}	0.12±0.03^{ab}	0.11±0.02^{b}	0.15±0.04^{a}
NH_4	0.05±0.03^{b}	0.04±0.03^{b}	0.03±0.01^{b}	0.09±0.07^{a}	0.04±0.01^{b}	0.03±0.01^{b}	0.03±0.01^{b}	0.05±0.02^{b}
Arg	0.68±0.33^{bc}	0.52±0.12^{cd}	0.41±0.08^{d}	0.50±0.15^{cd}	0.54±0.19^{cd}	0.44±0.12^{d}	0.44±0.06^{d}	0.78±0.24^{ab}
Pro	0.16±0.01^{ab}	0.12±0.08^{ab}	0.13±0.07^{ab}	0.10±0.07^{b}	0.17±0.10^{ab}	0.14±0.05^{ab}	0.20±0.13^{ab}	0.17±0.08^{a}
总量	2.83±0.53^{b}	2.43±0.21^{cd}	2.22±0.07^{d}	2.51±0.16^{bcd}	2.63±0.15^{bc}	2.27±0.17^{cd}	2.21±0.21^{d}	3.37±0.48^{a}

表 4 EAA 和 BCAA 含量占比
Table 4 Percentage of EAA and BCAA content

地区	EAA 占比/%	BCAA 占比/%
云南	26.07^{e}	14.38^{c}
山东	28.36^{bcd}	14.77^{bc}
宁夏	27.70^{d}	15.05^{bc}
内蒙古	28.69^{bcd}	14.78^{bc}
辽宁	29.46^{bc}	16.17^{b}
吉林	28.15^{cd}	14.42^{c}
湖南	32.03^{a}	17.43^{a}
黑龙江	27.37^{d}	14.27^{c}
河南	29.74^{b}	15.79^{bc}
河北	28.57^{bcd}	14.77^{bc}
新疆	24.75^{e}	12.02^{d}

注：同列不同字母表示差异显著(P<0.05)；支链氨基酸(branched-chain amino acids, BCAA)。

11 个省及自治区 EAA 占比排序依次为：湖南 32.03%、河南 29.74%、辽宁 29.46%、内蒙古 28.69%、河北 28.57%、山东 28.36%、吉林 28.15%、宁夏 27.70%、黑龙江 27.37%、云南 26.07%和新疆 24.75%，EAA 占比合理(24.75%~32.03%)，消化率高，是优质的植物蛋白来源。BCAA (Val、Ile、Leu)代表蛋白质的特定功能性，对人体肌肉合成和血糖调节有重要作用。11 个省及自治区 BCAA 占比最高的是湖南(17.43%)，占比最低的是新疆(12.02%)。湖南油莎豆的 TAA 含量虽然不是最高，但其 EAA 和 BCAA 占比均为最高，从营养学角度看综合营养价值最高，不仅能为人体提供均衡的 EAA，满足日常生理需求，同时还富含具有促进肌肉合成、抗疲劳功能的 BCAA，适合作为运动人群和大众饮食的营养补充。

2.4.2 氨基酸评分分析结果

FAO/WHO 提出的“理想蛋白质”模式，定义了人体所需各种 EAA 的理想比例，用于评估食物蛋白质的营养价值[30]。AAS 是评价食物蛋白质营养价值的重要方法[31]，根据 FAO/WHO 模式的氨基酸含量计算出油莎豆的 AAS，如表 5 所示。结果表明，11 个省及自治区的油莎豆氨基酸第一限制性氨基酸均为 Met，这意味着 Met 是油莎豆蛋白中最缺乏、最影响其整体蛋白质质量的氨基酸，其 AAS 在 7.1~22.4 之间，远低于其他 EAA。虽然 Met 是其短板，但严重程度在不同地区差异较大，如图 3 所示，评分范围从 7.1(新疆、山东)到 22.4(宁夏)，最高值是最低值的 3 倍多，说明不同生长环境对油莎豆氨基酸组成，特别是限制性氨基酸的含量有明显影响。宁夏和河北的 Met 评分相对较高，说明 Met 的缺乏程度远低于其他地区，选择这两个省区的油莎豆作为食品或饲料原料的营养价值更具有优势。大多数植物性蛋白质都存在含硫氨基酸相对不足的问题，大豆的第一限制性氨基酸也为 Met[32]，在日常食用时可根据蛋白质互补策略，与富含 Met 的食物，如谷物(通常第一限制性氨基酸为 Lys[33])一起食用，实现氨基酸互补，从而提高整体蛋白质利用率。

Met 是蛋白质合成中重要的含硫氨基酸，作为起始氨基酸参与真核生物蛋白质翻译的启动过程，同时是 S-腺苷 Met 的前体，参与甲基化反应、多胺合成及谷胱甘肽生成等关键代谢通路[34]。植物源性蛋白中 Met 普遍缺乏，主要因其在种子或块茎储存蛋白中的含量较低，且其合成受硫吸收、同化及氮代谢效率的共同调控[35]。

表 5 11 个省及自治区油莎豆 AAS
Table 5 AAS of *Cyperus esculentus* in 11 provinces and autonomous regions

氨基酸	Thr	Val	Met	Ile	Leu	Phe+Tyr	Lys
新疆	44.0	43.4	7.1	35.8	38.3	40.0	60.6
云南	62.1	37.3	10.9	35.4	35.9	34.2	43.3
山东	41.3	38.6	7.1	35.4	38.3	40.3	37.9
宁夏	42.1	55.0	22.4	31.7	28.8	33.3	27.6
内蒙古	33.3	38.3	14.8	27.9	29.8	30.0	31.8
辽宁	45.4	61.7	19.0	37.5	39.3	52.2	42.4
吉林	41.3	41.7	19.1	35.4	34.5	38.9	25.8
湖南	43.8	46.0	16.7	47.1	67.4	40.6	36.1
黑龙江	48.3	62.0	19.1	35.4	35.7	36.1	27.9
河南	39.6	48.3	15.7	31.3	35.5	26.1	40.9
河北	41.7	55.0	21.4	56.7	28.8	37.5	24.2
均值	43.9	47.9	19.0	44.7	37.5	37.2	36.2

从生理机制来看, 油莎豆中 Met 含量低可能与其块茎中储存蛋白的类型密切相关。油莎豆主要储存蛋白为清蛋白和球蛋白, 其含硫氨基酸残基比例天然偏低[12]。此外, 土壤有效硫含量、温度及水分条件对甲硫氨酸合成关键酶(如胱硫醚-γ-合酶)的表达具有显著调控作用[36]。本研究中, 宁夏和河北样品 Met 评分相对较高(>20), 可能与当地土壤硫素水平较高或生长期温度更适宜相关。

在应用机制层面, Met 的限制性特征为油莎豆的膳食搭配与产品开发提供了明确靶点。根据蛋白质互补原则, 油莎豆可与富含 Met 的谷物(如玉米、小麦)或豆类(如大豆、黑豆)复配, 实现氨基酸互补, 提高蛋白质利用率[37]。油莎豆作为天然低 Met 资源, 可在不增加 Met 负荷的前提下提供能量与脂肪, 具有一定的临床营养潜力。

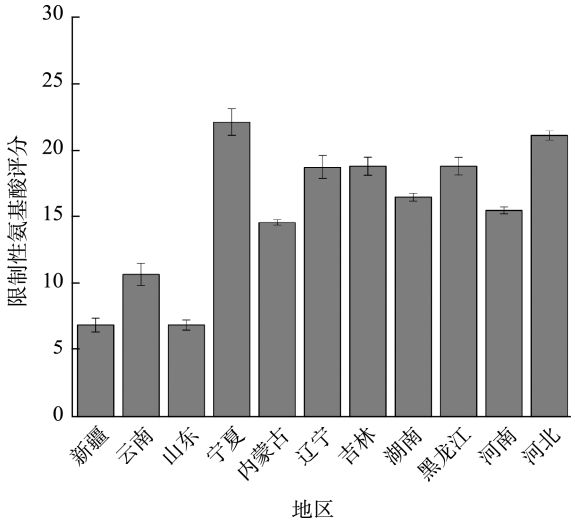


图 3　11 个省及自治区限制性氨基酸评分
Fig.3　Limiting amino acid score for 11 provinces and autonomous regions

2.5　化学计量学模型评价

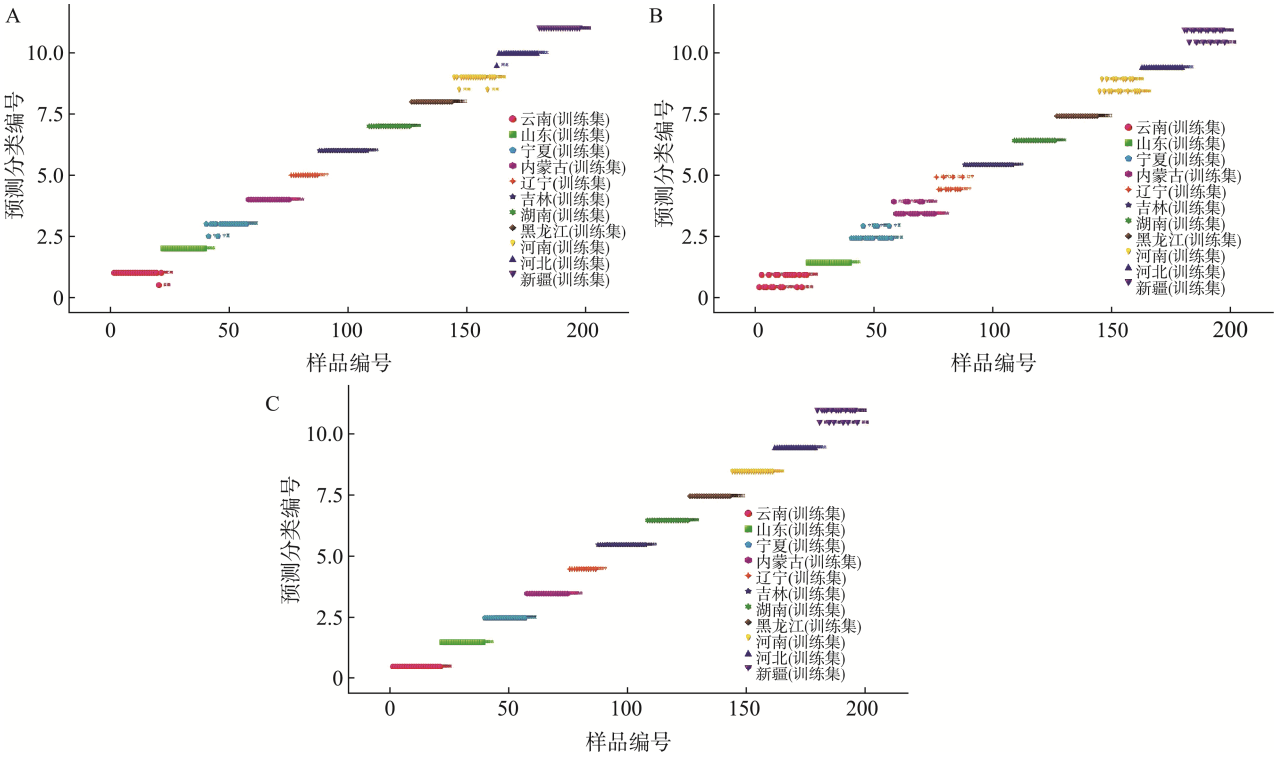
化学计量学模型中 KNN 算法分离度结果最好, 除河北、河南和宁夏有个别样本偏离且偏离度均小于 1, 其他地区样本分离度良好, PLS-DA 样本分离度次之, 其中云南、内蒙古、辽宁、河南和新疆样本较为分散, SVM 样本分离度最不理想, 湖南样本判别有误, 见图 4。KNN 模式下, 采用留一交叉验证方法, 样本距离为街区距离, 确定 k 值参数为 3, 识别效果良好, KNN 训练集识别率为 96.97%, 模型交叉验证识别率为 98.99%, 识别率高度一致, 表明模型既学到了数据的普遍规律, 又具有良好的泛化能力, 过拟合程度仅 2.02%。KNN 算法基于样本间的距离进行分类, 从图 4A 可以看出, 除河北、河南和宁夏有个别样本轻微偏离(偏离度小于 1)外, 其余省份的样本在特征空间中均呈现出良好的聚类效果, 这说明不同产地油莎豆氨基酸组成具有独特的地理指纹特征, 同一产地样本的氨基酸谱高度相似, 不同产地间存在可区分的差异。模型采用街区距离作为相似性度量, 这种度量方式在高维空间中对异常值的敏感性较低, 适合氨基酸这类具有生物学变异但整体模式稳定的数据。Pareto 标度化预处理在保留数据相对结构的同时降低量纲影响, 进一步强化了同类样本的聚集性。较小 k 值意味着模型主要依赖与待测样本最相似的少数几个邻居进行判别, 既避免了因 k 值过大导致类别边界模糊, 又能够有效排除异常样本干扰。KNN 模型表现优异, 这为油莎豆产品的产地认证和质量控制提供了技术支撑。该模型可应用于: 优质油莎豆产品的产地标识(如新疆油莎豆、云南油莎豆), 打击产地欺诈, 保护优质产区品牌; 油莎豆产品质量控制和供应链溯源。PLS-DA 模式下, 采用留一交叉验证方法, 识别效果不理想, PLS-DA 训练集识别率为 23.74%, 模型交叉验证识别率为 24.24%。SVM 模式下, 采用留一交叉验证方法, 核函数类型选择多项式核, 验证识别效果不理想, SVM 训练集识别率为 97.98%, 模型交叉验证识别率为 6.06%, 出现过拟合现象, 原因可能包括: 样本量与特征维度不匹配, SVM 训练集识别率高达 97.98%, 但交叉验证识别率仅 6.06%, 呈现典型的维度灾难特征。本研究的特征数为 17 种氨基酸, 而训练样本总量相对有限(11 个省份, 每个省份样本数最少的为 4 个, 最多的为 7 个, 总样本数 66 个), 见表 6。样本量相对不足, 在样本量不足的情况下, SVM(特别是采用多项式核)有足够的能力将训练样本完美区分, 甚至学习了数据中的噪音和偶然模式, 导致模型在未见样本上几乎完全失效。如图 4C 所示, SVM 的判别结果中湖南样本明显误判, 这反映了模型在学习过程中过度拟合了某些特定样本的特征, 导致决策边界过于复杂, 面对交叉验证中的新样本时, 这些复杂边界无法正确泛化。KNN 的优异表现反衬出 SVM 的过拟合可能源于模型复杂度过高, 氨基酸数据具有局部聚集、全局可分的特点, KNN 的局部学习策略恰好契合, 而 SVM 的全局优化策略在小样本下难以捕捉真实规律。

本研究建立的 KNN 产地溯源模型交叉验证识别率达 98.99%, 显著优于 PLS-DA (24.24%)和 SVM (6.06%), 表明 KNN 在小样本、多特征、非线性分布的农产品溯源数据中具有明显优势。首先, KNN 作为一种非参数分类方法, 不依赖于数据分布假设, 适合氨基酸组成这类受多因素(气候、土壤、品种)交互影响、分布形态复杂的生物指纹数据[38]。其次, KNN 基于样本间的距离度量, 在高维特征空间中能有效捕捉同类样本的局部聚集性。本研究中, 同一省份油莎豆氨基酸谱高度相似, 不同省份间存在系统差异, 符合 KNN 的“同类相聚”分类逻辑。相比之下, PLS-DA 作为一种线性判别方法, 在特征与类别关系复杂时易受非线性干扰, 导致判别能力下降。SVM 虽在训练集表现良好, 但在小样本条件下易出现过拟合, 尤其当核函数复杂时, 模型倾向于记忆噪声而非学习真实规律[39]。本研究中 SVM 训

练集识别率达 97.98%，但交叉验证识别率仅 6.06%，正是典型的小样本过拟合表现。

农产品溯源研究常面临样本量有限、产地类别多、特征维度高的实际约束。本研究总样本量为 66，特征数为 17 种氨基酸，属于典型的小样本高维数据。在此类数据条件下，KNN 具有显著优势：KNN 为惰性学习算法，不构建全局判别函数，避免了参数估计过程中的过拟合风险；局部决策机制：KNN 仅依赖待测样本附近少数邻居进行判别，对全局噪声不敏感，具有较强的鲁棒性；过拟合程度可控：本研究中 KNN 训练集与交叉验证识别率差值为 2.02%，远低于中度过拟合阈值(20%)，表明模型既学习了数据的普遍规律，又具备良好的泛化能力。而 SVM 在训练过程中试图构建复杂的全局决策边界，当样本量不足以支撑高维空间中的边界优化时，极易将样本特异性特征(如实验误差、个体差异)纳入模型，导致过拟合。本研究 SVM 过拟合程度高达 91.92%，验证了这一判断。

KNN 因其无需训练、结构简单、易于解释、对异常值鲁棒性较强等优势，已成为地理标志产品溯源、掺假鉴别等领域的重要工具[40]。本研究中 KNN 模型采用街区距离和 Pareto 标度化预处理，进一步增强了其对生物学变异数据的适应能力，为油莎豆产地认证、品牌保护和供应链溯源提供了可靠的技术支撑。



注：A. KNN 模型图；B. PLS-DA 模型图；C. SVM 模型图。

图 4 KNN、PLS-DA 和 SVM 识别结果

Fig.4 Recognition results of KNN, PLS-DA and SVM

表 6 3 种模式建模识别结果

Table 6 Modeling identification results for 3 kinds of patterns

模式	验证方法	数据预处理	训练集识别率/%	验证识别率/%	过拟合程度/%
KNN	留一交叉验证	Pareto 标度化	96.97	98.99	2.02
PLS-DA	留一交叉验证	中心化	23.74	24.24	0.50
SVM	留一交叉验证	Pareto 标度化	97.98	6.06	91.92

注：过拟合程度根据训练集与交叉验证识别率差值判断；差值小于 5%为无过拟合，5%~20%为轻度，大于 20%为中度。

3 结 论

本研究系统分析了中国 11 个省及自治区油莎豆的氨基酸组成特征，油莎豆氨基酸产地差异显著。新疆[(3.52±0.36) mg/g]地区油莎豆氨基酸总量最高，其次云南[(3.35±0.42) mg/g]，具有发展高品质蛋白产业的优势。Arg 含量以新疆最高[(1.14±0.20) mg/g]，Lys 含量云南和新疆均较高。氨基酸含量受气候影响明显，西南亚热带季风气候

类型下 Glu、Asp 含量显著高于其他气候条件, 这与充足降水、适宜温度和较大昼夜温差密切相关。营养价值评价方面, EAA/TAA 比值为 24%~36%, 接近大豆和玉米 EAA/TAA 比值水平。湖南样品 BCAA 占比最高(17.43%), 综合营养价值最优。所有样品第一限制性氨基酸均为 Met (AAS 为 7.1~22.4), 宁夏和河北 Met 评分相对较高, 建议与谷物搭配食用, 实现蛋白质互补。结合化学计量学软件进行产地溯源模型, KNN 模型表现最佳(交叉验证识别率 98.99%), 可用于油莎豆产品的产地认证和质量控制。本研究为油莎豆优质产区选择、定向育种、产品配方设计和产地认证提供了科学依据, 未来需进一步研究品种、栽培管理和加工对氨基酸组成的影响, 以及油莎豆蛋白的消化率和生物利用度。

参考文献

[1] 邱树毅, 汪继超, 刘杰. 虎坚果植物蛋白饮料的研制[J]. 食品工业科技, 2002(5): 44–45.
QIU SY, WANG JC, LIU J. Development of a plant-based protein beverage from tiger nuts [J]. Food Industry Science and Technology, 2002(5): 44–45.

[2] YU Y, LU XY, ZHANG TH, *et al*. Tiger nut (*Cyperus esculentus* L.): Nutrition, processing, function and applications [J]. Foods, 2022, 11(4): 601.

[3] BOOT N, HERMANS WJH, WARNKE I, *et al*. Evaluation of processing of canola protein isolate on postprandial plasma amino acid profiles in healthy, young females [J]. Amino Acids, 2025, 57(1): 50.

[4] 乐伍. 辐照对油莎豆油脂品质影响及标志物形成与迁移规律研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2025.
LE W. Study on the effect of irradiation on the oil quality and the formation and migration of markers in the tiger nut [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2025.

[5] 陈红娟, 罗晓宏, 王楠希, 等. 不同产地油莎豆中水溶性糖分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(4): 145–152.
CHEN HJ, LUO XH, WANG NX, *et al*.Analysis of water soluble sugars in *Cyperus esculentus* collected in different producing areas [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(4): 145–152.

[6] ZHAN GY, SUN S. Tiger nut (*Cyperus esculentus L.*) oil: A review of bioactive compounds, extraction technologies, potential hazards and applications [J]. Food Chemistry X, 2023, 19: 100868.

[7] 学梓玉, 杨永坛, 王楠希, 等. 区域和气候条件对油莎豆膳食纤维和蛋白质含量的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(21): 29–36.
XUE ZY, YANG YT, WANG NX, *et al*. Effects of regions and climatic conditions on the dietary fiber and protein content of *Cyperus esculentus* [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(21): 29–36.

[8] GASPARRE N, PAN J, DA-SILVA PL, *et al*. Tiger nut (*Cyperus esculentus*) as a functional ingredient in gluten-free extruded snacks [J]. Foods, 2020, 9(12): 1770.

[9] 孙倩文, 姜文强, 林艳, 等. 全植物蛋白饲料中添加蛋氨酸与牛磺酸对团头鲂幼鱼生长、血液生理与抗氧化能力的影响[J]. 水产学报, 2025, 49(10): 33–47.
SUN QW, JIANG WQ, LIN Y, *et al*. Effects of methionine and taurine addition to a whole-plant protein diet on growth, hematological parameters, and antioxidant capacity in juvenile yellow croaker [J]. Journal of Fisheries of China, 2025, 49(10): 33–47.

[10] SONG Y, ZHANG Z, CAO Y, *et al*. Stimulus-responsive amino acids behind in situ assembled bioactive peptide materials [J]. Chembiochem, 2023, 24(3): e202200497.

[11] 高扬, 宋溢涵, 黄雨洋, 等. 大豆分离蛋白和谷朊粉配比对高水分挤压植物肉产品特性和多孔纤维结构的影响[J]. 大豆科学, 2025, 44(6): 100–112.
GAO Y, SONG YH, HUANG YY, *et al*. Effects of soybean protein isolate and wheat gluten ratios on product characteristics and porous fiber structure of plant-based high moisture meat analogues [J]. Soybean Science, 2025, 44(6): 100–112.

[12] 张婉婷, 王红红, 董先校, 等. 酶解联合发酵对油莎豆粕饮料营养品质及风味特性的影响[J/OL]. 食品工业科技, 1–16. [2025-12-16]. https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2025060122
ZHANG WT, WANG HH, DONG XX, *et al*. Impact of enzymatic hydrolysis combined with fermentation on the nutritional quality and flavor characteristics of *Cyperus esculentus* L. meal beverage [J]. Science and Technology of Food Industry, 1–16. [2025-12-16]. https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2025060122

[13] 朱淑娟, 康才周, 安红燕, 等. 10 种油莎豆种质资源蛋白质氨基酸组成及其相互关系[J]. 安徽农业科学, 2024, 52(21): 102–106.
ZHU SJ, KANG CZ, AN HY, *et al*. Composition & interrelation of protein and amino acid of 10 germplasm resources of *Cyperus esculentus* [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2024, 52(21): 102–106.

[14] 高亚婷. 基因工程提高高粱籽粒赖氨酸含量的研究[D]. 太原: 山西大学, 2021.
GAO YT. A study on genetic engineering to increase lysine content in sorghum grains [D]. Taiyuan: Shanxi University, 2021.

[15] 宋万献, 翟允汝, 于美琴, 等. 油莎豆微量营养素含量测定及经口毒理试验的评估[J]. 中国粮油学报, 2024, 39(9): 126–134.
SONG WX, ZHAI YR, YU MQ, *et al*. Determination of nutritional components and evaluation by oral toxicology test of *Cyperus esculentus* [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2024, 39(9): 126–134.

[16] 张仕林, 贾定洪, 何晓兰, 等. 不同品种毛木耳营养成分及氨基酸营养价值评价[J]. 浙江农业学报, 2025, 37(10): 2190–2197.
ZHANG SL, JIA DH, HE XL, *et al*. Evaluatution of nutritional components and amino acid nutritional value in different varieties of *Auricularia cornea* Ehrenb [J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2025, 37(10): 2190–2197.

[17] FRIEDMAN M. Applications of the ninhydrin reaction for analysis of amino acids, peptides, and proteins to agricultural and biomedical sciences [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2004, 52(3): 385–406.

[18] 吴烨, 刘晓迪, 许燕妮, 等. 甲硫氨酸条件性缺乏增加瑞戈非尼对肝癌细胞药物敏感性的研究[J]. 岭南现代临床外科, 2022, 22(1): 24–29.
WU Y, LIU XD, XU YN, *et al*. A study on the effect of conditional methionine deprivation on increasing the sensitivity of hepatocellular carcinoma cells to regorafenib [J]. Lingnan Modern Clinics in Surgery, 2022, 22(1): 24–29.

[19] ZHANG Z, CHEN W, TAO L, *et al*. Ethylene treatment promotes umami taste-active amino acids accumulation of *Torreya grandis* nuts

post-harvest by comparative chemical and transcript analyses [J]. Food Chemistry, 2023, 408: 135214.

[20] 宋建民, 田纪春, 赵世杰. 小麦光合碳、氮代谢平衡调节酶研究进展[J]. 麦类作物学报, 1997(6): 52–55, 66.
SONG JM, TIAN JC, ZHAO SJ. Recent advances in research on enzymes regulating the balance of photosynthetic carbon and nitrogen metabolism in wheat [J]. Journal of Triticeae Crops, 1997(6): 52–55, 66.

[21] 邢媛媛. 油莎豆在新疆防风固沙中的应用价值[J]. 现代园艺, 2025, 48(10): 126–127, 130.
XING YY. The value of *Cyperus esculentus* in windbreak and sand fixation in Xinjiang [J]. Contemporary Horticulture, 2025, 48(10): 126–127, 130.

[22] LUO C, SHEN Z, LI Y, *et al*. Determinants of post-fire regeneration demography in a subtropical monsoon-climate forest in Southwest China [J]. Science Total Environment, 2021, 766: 142605.

[23] 许玥, 王文栋, 姚杰, 等. 现代气候、古气候和生境异质性对新疆不同生长型种子植物多样性的影响[J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(10): 1–10.
XU Y, WANG WD, YAO J, *et al*. Effects of current climate, paleoclimate and habitat heterogeneity on diversity of seed plants with different growth forms in Xinjiang of Northwestern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(10): 1–10.

[24] 胡安顺. 云南气候与农作物网络建模及适生区分析[D]. 大理: 大理大学, 2024.
HU ANS. Modeling the Yunnan climate and crop network and analysis of suitable growth zones [D]. Dali: Dali University, 2024.

[25] HONG M, MA Z, WANG X, *et al.* Effects of light intensity and ammonium stress on photosynthesis in *Sargassum fusiforme* seedlings [J]. Chemosphere, 2021, 273: 128605.

[26] CIKUTOVIC M, FUENTES N, BUSTOS-OBREGÓN E. Effect of intermittent hypoxia on the reproduction of rats exposed to high altitude in the Chilean Altiplano [J]. High Altitude Medicine & Biology, 2009, 10(4): 357–363.

[27] 杨春霞. 宁夏枸杞蛋白氨基酸产地差异与营养价值评价[J/OL]. 食品工业科技, 1–15. [2025-12-16]. https: //doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2025060266
YANG CX. Regional differences in protein amino acids and nutritional value evaluation of Ningxia *Lycium barbrum* L [J]. Science and Technology of Food Industry, 1–15. [2025-12-16]. https: //doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2025060266

[28] 毛军伟. 含大豆、玉米和小米烘烤婴幼儿营养米粉的糊化特性研究和营养评价[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
MAO JW. Study on the gelatinization characteristics and nutritional evaluation of roasted infant rice cereal containing soybeans, corn, and millet [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.

[29] ZHAO J, ZHANG X, LIU H, *et al*. Dietary protein and gut microbiota composition and function [J]. Current Protein & Peptide Science, 2019, 20(2): 145–154.

[30] MILGEN JV, DOURMAD J. 猪理想蛋白质理念及应用[J]. 中国饲料, 2015(12): 39–42.
MILGEN JV, DOURMAD J. The concept of ideal protein for swine and its applications [J]. China Feed, 2015(12): 39–42.

[31] 潘雨行, 夏嘉蓓, 梅星雨, 等. 黄精植株各部位蛋白质分析与营养评价[J]. 中国食品学报, 2025, 25(7): 341–352.
PAN YX, XIA JB, MEI XY, *et al*. Protein analysis and nutritional evaluation of various parts of polygonatum plants [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2025, 25(7): 341–352.

[32] FERNANDEZ SR, AOYAGI S, HAN Y, *et al.* Limiting order of amino acids in corn and soybean meal for growth of the chick [J]. Journal of Poultry Science, 1994, 73(12): 1887–1896.

[33] MATTHEWS DE. Review of lysine metabolism with a focus on humans [J]. Journal of Nutrition, 2020, 150(Suppl 1): 2548s–2555s.

[34] BROSNAN JT, BROSNAN ME. The sulfur-containing amino acids: An overview [J]. Journal of Nutrition, 2006, 136(6 Suppl): 1636s–1640s.

[35] AMIR R, HACHAM Y, GALILI G. Cystathionine *γ*-synthase and threonine synthase operate in concert to regulate carbon flow towards methionine in plants [J]. Trends in Plant Science, 2002, 7(4): 153–156.

[36] LIU W, ZHANG W, CHENG H, *et al*. Rhizobia cystathionine *γ*-lyase-derived H2S delays nodule senescence in soybean [J]. Plant Physiology, 2024, 196(4): 2232–2250.

[37] YOUNG VR, PELLETT PL. Plant proteins in relation to human protein and amino acid nutrition [J]. American Journal of Clinical Nutrition, 1994, 59(5 Suppl): 1203s–1212s.

[38] GRANATO D, PUTNIK P, KOVAČEVIĆ DB, *et al*. Trends in chemometrics: Food authentication, microbiology, and effects of processing [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2018, 17(3): 663–677.

[39] 倪永年, 黄春芳. 化学计量学在食品分析中的应用与进展[J]. 食品科学, 2003(2): 154–158.
NI YN, HUANG CF. Applications and advances in chemometrics in food analysis [J]. Food Science, 2003(2): 154–158.

[40] 申兆栋, 黄冬梅, 蔡友琼, 等. 氨基酸与脂肪酸指纹分析技术在农产品产地溯源中的应用研究[J]. 农产品质量与安全, 2020(5): 80–85.
SHEN ZD, HUANG DM, CAI YQ, *et al.* Application of amino acid and fatty acid fingerprinting techniques in the traceability of agricultural products [J]. Quality and Safety of Agro-products, 2020(5): 80–85.

(责任编辑: 安香玉 蔡世佳)