

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20241120005

引用格式: 乔禹, 李庆聪, 冯岩晃, 等. 云南不同来源齿瓣石斛中氨基酸营养价值评价[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(10): 309–317.

QIAO Y, LI QC, FENG YH, *et al.* Evaluation on the nutritional value of amino acids in *Dendrobium devonianum* Paxt. from different sources in Yunnan Province [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(10): 309–317. (in Chinese with English abstract).

云南不同来源齿瓣石斛中氨基酸营养价值评价

乔禹¹, 李庆聪¹, 冯岩晃², 李泽生¹, 胡永亮¹, 陈玉芹^{1*}, 蔡文良^{2*}

(1. 云南省德宏热带农业科学研究所, 瑞丽 678600; 2. 德宏州林业科学研究所, 瑞丽 678600)

摘要: **目的** 评价云南不同来源齿瓣石斛氨基酸含量的营养价值。**方法** 采用氨基酸分析仪法测定齿瓣石斛的氨基酸含量, 通过多元统计分析方法评价其氨基酸营养价值。**结果** 29个石斛样品氨基酸总量(total amino acid, TAA)在42.00~125.40 mg/g之间; 必需氨基酸(essential amino acid, EAA)含量在16.80~44.60 mg/g之间; 天冬氨酸、谷氨酸、亮氨酸和精氨酸含量最为丰富, 分别为11.18、9.97、6.91和5.52 mg/g, 可作为齿瓣石斛的特征性氨基酸, 胱氨酸(0.92 mg/g)和蛋氨酸(1.10 mg/g)分别是第一和第二限制性氨基酸; 根据联合国粮食及农业组织和世界卫生组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations/World Health Organization, FAO/WHO)氨基酸模式谱标准, 梁河地区大棚基质栽培的齿瓣石斛[EAA/非必需氨基酸(non-essential amino acid, NEAA)为62.69%~77.21%; EAA/TAA为38.63%~43.55%]和野生品种(EAA/NEAA为61.59%~65.43%; EAA/TAA为38.12%~39.56%)的营养价值最高, 更符合人体需求; 根据品质评价模型的综合得分排名, 来源于芒市M10、M1、M7和龙陵L4、L5的样品价值较高。通过主成分分析提取到的两个主成分, 累计贡献度为83.852%, 建立了齿瓣石斛品质评价模型。以氨基酸和综合得分为变量进行聚类分析, 可将所有样品分为3大类。**结论** 齿瓣石斛的氨基酸营养丰富, 且不同来源的齿瓣石斛氨基酸含量有差异。该研究为齿瓣石斛的营养价值开发和利用提供了理论依据, 同时, 建议关注石斛的来源与栽培方式以提升市场价值。

关键词: 齿瓣石斛; 氨基酸; 主成分分析; 聚类分析

Evaluation on the nutritional value of amino acids in *Dendrobium devonianum* Paxt. from different sources in Yunnan Province

QIAO Yu¹, LI Qing-Cong¹, FENG Yan-Huang², LI Ze-Sheng¹,
HU Yong-Liang¹, CHEN Yu-Qin^{1*}, CAI Wen-Liang^{2*}

(1. Yunnan Dehong Institute of Tropical Agricultural Science, Ruili 678600, China;
2. Dehong Research Institute of Forestry, Ruili 678600, China)

收稿日期: 2024-11-20

基金项目: 英才兴边计划德宏州技术创新人才项目(2023RC005); 科技人才与平台计划项目(202205AD160041)

第一作者: 乔禹(1991—), 女, 硕士, 研究实习员, 主要研究方向为农产品质量安全。E-mail: qiaoyu626@126.com

*通信作者: 陈玉芹(1987—), 女, 副研究员, 主要研究方向为农产品质量安全与营养品质评价。E-mail: 15987146028@163.com

蔡文良(1987—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为经济林栽培研究。E-mail: 276112018@qq.com

ABSTRACT: Objective To evaluate the nutritional value of amino acid content in *Dendrobium devonianum* Paxt. from different sources in Yunnan Province. **Methods** The amino acid analyzer method was used to determine the amino acid content of *Dendrobium devonianum* Paxt., and the amino acid nutritional value was evaluated by multivariate statistical analysis methods. **Results** The total amino acid (TAA) content in 29 samples ranged from 42.00 to 125.40 mg/g; the essential amino acid (EAA) content ranged from 16.80 to 44.60 mg/g; the content of aspartic acid, glutamic acid, leucine and arginine were the most abundant, which were 11.18, 9.97, 6.91 and 5.52 mg/g respectively and could be used as the characteristic amino acids of *Dendrobium devonianum* Paxt.. The content of cystine (0.92 mg/g) and methionine (1.10 mg/g) were the first and second limiting amino acids respectively. According to the amino acid pattern spectrum standards of the Food and Agriculture Organization of the United Nations/World Health Organization (FAO/WHO), the nutritional value of *Dendrobium devonianum* Paxt. cultivated in greenhouse substrates in Lianghe Area [EAA/non-essential amino acid (NEAA) was 62.69%–77.21%; EAA/TAA was 38.63%–43.55%] and wild varieties (EAA/NEAA was 61.59%–65.43%; EAA/TAA was 38.12%–39.56%) were the highest and more in line with human needs. According to the comprehensive score ranking in the quality evaluation model, the values of the samples from Mangshi M10, M1, M7 and Longling L4, L5 were higher. Two principal components were extracted by principal component analysis, and the cumulative contribution degree was 83.852%, and a quality evaluation model of *Dendrobium devonianum* Paxt. was established. Cluster analysis was carried out with amino acids and comprehensive scores as variables respectively, and all samples could be divided into 3 major categories. **Conclusion** The amino acids of *Dendrobium devonianum* Paxt. is rich in nutrients, and the amino acid content of *Dendrobium devonianum* Paxt. from different sources varies. This study provides an important theoretical basis for the development and utilization of the nutritional value of *Dendrobium devonianum* Paxt.. At the same time, it is recommended to pay attention to the origin and cultivation methods of *Dendrobium* to enhance its market value.

KEY WORDS: *Dendrobium devonianum* Paxt.; amino acid; principal component analysis; clustering analysis

0 引言

石斛属植物含有多种化学成分, 石斛经常作为食材融入日常饮食中或纳入传统中药制剂^[1], 能够增强人体免疫力、改善肝功能及抗疲劳、降血糖等^[2-5], 有些具有甜味, 可被用来制作甜点^[6]。齿瓣石斛(*Dendrobium devonianum* Paxt.)俗称紫皮石斛、香棍草、大黄草、吊兰花, 为西南各省区石斛药材主要习用品种之一, 收录于 2005 版《云南省中药材标准》^[7], 是云南重点发展的药用石斛资源。齿瓣石斛化学成分、药理作用类似于铁皮石斛, 含有生物碱、多糖、黄酮类等^[7]。可用于热病伤津或胃阴不足之舌干口渴、阴虚津亏之虚热不退等症, 有抗疲劳、抗肿瘤和抗菌抗病毒^[8-15]等功效, 此外, 石斛提取物还可减轻神经退行性疾病、治疗骨质疏松症和胃溃疡^[16-18]。由此可见, 齿瓣石斛是一种营养丰富的天然保健品。

氨基酸是人体发育生长和新陈代谢过程中重要的营养物质和生物活性物质^[19], 曾有文献报道氨基酸既是评价药材质量和营养价值的重要指标, 也是药理作用的主要成分之一^[20-23]。有研究表明, 石斛中的蛋白质、生物碱、总黄酮等成分和活性物质含量会受石斛品种、产地、栽培模式的影响^[24-26]。但对齿瓣石斛的氨基酸组成和含量的影响

鲜见报道。石斛对湿度、温度、光照等要求比较严格, 云南虽气候适宜但由于不同产地的温湿度因素和栽培模式不同, 可能导致不同产地的石斛氨基酸含量不同。因此, 本研究选定齿瓣石斛品种为研究对象, 采用氨基酸分析仪法测定不同来源齿瓣石斛氨基酸含量, 通过氨基酸模式、主成分分析等评价其氨基酸营养价值, 并进行聚类分析, 旨在为云南齿瓣石斛氨基酸营养开发利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

齿瓣石斛(*Dendrobium devonianum* Paxt.)样品于 2015—2016 年在芒市、瑞丽市、梁河、龙陵等地采集, 样品由德宏所药用植物研究中心的李泽生研究员鉴定为齿瓣石斛。样品经过 105 °C 杀青 30 min 处理, 随后在 55 °C 下烘干至恒重, 以确保其活性成分的稳定性, 粉碎后备用。具体信息见表 1。

盐酸(分析纯, 重庆万盛川东化工有限公司); 缓冲液(pH 2.20、3.20、4.25、6.45)[大昌洋行(上海)有限公司]; AAS18-5ML 氨基酸标准品(18 个组分, 纯度 99.5%)(国家标准物质资源平台); 氮气(纯度 99.999%, 昆明梅塞尔气体产品有限公司)。

1.2 仪器与设备

RETSCH MM400 组织磨样器(济南泰和盈科商贸有限公司); ME204 电子分析天平(精度 0.0001 g, 上海恒勤仪器设备有限公司); Biochrom30⁺全自动氨基酸分析仪[大昌洋行(上海)有限公司]; PinAACle 900F 火焰原子吸收分光光度计(美国 PerkinElmer 公司); XL-2000A 智能一体马弗炉(鹤壁市恒鑫仪器仪表有限公司); 瑞士布奇 K-370 凯式定氮仪(上海晟声自动化分析仪器有限公司)。

表 1 样品基本信息

Table 1 Sample basic information

编号	生长年限	采样地点	种植模式	编号	生长年限	采样地点	种植模式
L1	4	龙陵	大棚基质	H3	4	梁河河西孟连	大棚基质
M1	4	芒市	大棚基质	M9	3	芒市	大棚基质
H1	5	梁河河西孟连	大棚基质	M10	3	芒市	大棚基质
H2	5	梁河河西孟连	大棚基质	R4	3	瑞丽勐秀小街	杉木附生
M2	2	芒市	大棚基质	R3	3	瑞丽勐秀小街	杉木附生
L2	4	龙陵	大棚基质	L4	1	龙陵象达	杉木附生
M3	5	芒市	大棚基质	L5	4	龙陵河头	杉木附生
L3	2	龙陵龙山	大棚基质	L6	4	龙陵河头	杉木附生
M4	4	芒市	大棚基质	R2	4	瑞丽勐秀小街	杉木附生
M5	3	芒市	大棚基质	R1	2	瑞丽勐秀小街	杉木附生
M6	3	芒市	大棚基质	Y1	2	瑞丽市	野生
M7	3	芒市	大棚基质	Y2	2	瑞丽市	野生
M8	4	芒市	大棚基质	Y3	1	瑞丽市	野生
L7	1	龙陵	大棚基质	Y4	3	瑞丽市	野生
L8	2	龙陵	大棚基质				

1.3 方法

1.3.1 样品前处理

准确称取齿瓣石斛粉末样品 0.2 g(精确到 0.0001 g)于 10 mL 安瓿瓶中, 加入 10 mL 6 mol/L 盐酸, 用酒精喷灯封口, 封口后放入(110 °C±1 °C)恒温干燥箱内水解 22~24 h 冷却, 取 1 mL 上清液置于蒸发皿中, 60 °C±5 °C 水浴干燥, 待液体快蒸干再加入 2 mL 去离子水, 重复操作 3 次, 蒸干。加入 2 mL pH 2.2 稀释液。混匀后过 0.45 μm 微孔滤膜过滤后备用。

1.3.2 氨基酸标准曲线绘制

取 200 μL 混合氨基酸标准品, 加入 800 μL pH 2.2 稀释液, 充分混匀, 进样 10、20、30、40 μL 上机测定, 根据各氨基酸的响应值与浓度绘制标准曲线。

1.3.3 实验条件

17 种氨基酸分离程序见表 2, 检测器: 检测器 1 波长 570 nm, 检测器 2 波长 440 nm, 进样量 20 μL, 色谱柱为 Biochrom30⁺氨基酸分析的 Na⁺专用柱。

表 2 分离程序

Table 2 Separation process

运行时间	分离柱温度	运行缓冲液	流速/(mL/h)	茚三酮泵状态	反应圈状态	命令
01:00	48	1	35.0	ON	OFF	
00:00	48	1	35.0	ON	OFF	Reset
01:00	48	1	35.0	ON	OFF	Load
06:40	48	1	35.0	ON	ON	
13:00	52	2	35.0	ON	ON	
01:00	52	5	35.0	ON	ON	
16:00	95	5	35.0	ON	ON	
04:00	95	6	35.0	ON	ON	
04:00	95	1	35.0	ON	ON	
9:00	48	1	43.0	OFF	OFF	
02:00	48	1	35.0	ON	OFF	

1.4 数据处理

数据采用 Excel 2019 对数据整理后进行 SPSS 22.0 一维方差分析 Duncan 多重比较, 结果用“平均值±标准偏差”表示, 并利用其中的因子分析主成分提取方法及系统聚类分析作图表示结果, 相关性分析结果通过 Origin 2021 作图表示。

2 结果与分析

2.1 石斛中氨基酸含量与组成

29 种不同来源的齿瓣石斛样品氨基酸含量见表 3。由表 3、4 可看出, 齿瓣石斛含有 17 种氨基酸和人体所需的 7 种必需氨基酸(essential amino acid, EAA)。Asp、Glu、Leu 和 Arg 4 种氨基酸含量最为丰富, 可作为齿瓣石斛的特征性氨基酸(表 4), 样品 M1 (20.70 mg/g)、L4 (20.60 mg/g)、M10 (19.9 mg/g)和 L5 (17.73 mg/g)的 Asp 含量最高, M10 (16.20 mg/g)、L5 (16.03 mg/g)、L4 (15.40 mg/g)和 M6 (13.70 mg/g)的 Glu 含量最高, M10 (12.00 mg/g)、L4 (11.10 mg/g)、M7 (10.70 mg/g)和 M1 (10.40 mg/g)的 Leu 含量最高, M10 (13.50 mg/g)、L5 (9.67 mg/g)、M1 (9.60 mg/g)和 L4 (8.90 mg/g) Arg 含量最高(表 3); Cys 和 Met 含量最少, 分别为第一和第二限制性氨基酸; 从变异系数来看, Arg、Asp 和 Leu 变异程度较高, 分别为 49.31%、42.93%和 40.23%; 齿瓣石斛的氨基酸总量(total amino acid, TAA)、EAA、药效氨基酸和鲜味氨基酸含量分别为 42.00~125.40、16.80~44.60、24.00~75.30、10.30~36.10 mg/g; 变异系数分别为 31.40%、28.47%、32.85%、37.79%, 呈中等变异。

表 3 齿瓣石斛氨基酸含量(mg/g)
Table 3 Amino acid content in *Dendrobium devonianum* Paxt. (mg/g)

氨基酸	编号																												
	L1	M1	H1	H2	M2	L2	M3	L3	M4	M5	M6	M7	M8	L7	L8	H3	M9	M10	R4	R3	L4	L5	L6	R2	R1	Y1	Y2	Y3	Y4
天冬氨酸(Asp)	5.3	20.7	5.1	6.4	17.2	8.2	11.2	7.85	13.1	6.79	16	15.6	14	8.9	8.9	7.2	10.6	19.9	12.4	10.8	20.6	17.73	7.5	12.5	12.5	7	7.1	6.7	6.4
苏氨酸(Thr)	2.3	5.3	2	2.6	5.1	3.1	4.43	4.5	4.9	2.67	4.9	5.8	4.8	3.5	3.9	2.8	3.8	5.9	4.9	4.2	6.6	4.6	3.1	4.3	4	2.9	2.6	2.8	2.9
丝氨酸(Ser)	2.4	4.9	2.1	2.4	4.6	2.8	4.43	4.2	4.5	2.83	5	5	4.8	3.5	3.5	2.7	3.6	5.1	4.9	4.2	6.3	4.05	3.1	4.2	3.9	3	2.5	2.7	3.1
谷氨酸(Glu)	5.9	13.5	5.2	6.1	13.2	7.5	10.87	6.2	11.6	7.98	13.7	13.3	13.5	8.8	8.5	6.9	9.7	16.2	11.3	10.7	15.4	16.03	7.3	10.7	10	7.2	6.6	6.9	7
脯氨酸(Pro)	2.2	4.3	2	2.1	4	2.6	4.32	2.21	3.5	3.91	3.2	4.4	5.4	3.2	5.7	2.9	4.2	5	4.3	5.4	5	3.57	2.4	3.6	3.5	2.8	2.6	2.6	2.9
甘氨酸(Gly)	2.5	5.3	1.9	2.6	5.2	3.1	4.33	1.9	4.5	2.57	5.2	5.8	5	3.5	3.5	3.1	3.8	6	4.7	4.1	5.9	4.73	2.9	4.5	4.1	3.1	2.7	2.5	3.1
丙氨酸(Ala)	2.8	5.5	2.3	2.7	5.2	3.1	4.64	0.8	4.6	2.9	5.4	5.5	5.3	4	3.6	3.5	3.9	6	4.9	4.3	6.6	5.2	3.1	4.6	4.4	3.4	2.9	2.9	3.5
胱氨酸(Cys)	0.6	0.7	1	0.7	0.9	0.7	0.90	0.77	1	1.56	1.1	1	1	1	0.8	0.7	0.8	1	0.9	0.9	2	0.86	1.6	0.8	0.8	0.7	0.6	0.7	0.7
缬氨酸(Val)	2.6	5.3	3	2.6	4.7	3	4.22	2.91	4.7	3.1	5.2	4.9	4.9	3.7	3.4	3	3.6	5.5	4.5	3.8	6.6	4.51	3.2	4.2	4.4	3.1	2.6	2.8	3.4
蛋氨酸(Met)	0.9	2	1.1	0.7	0.8	0.9	1	0.79	2.3	1.47	1.9	0.9	0.9	1.4	0.8	0.9	0.9	1	0.9	0.9	1.1	0.97	1.2	0.8	0.9	1	1.1	1.1	1.4
异亮氨酸(Ile)	2.5	5.2	2.2	6	4.9	3	4.73	0.4	4.8	3.04	5.6	5.1	5	3.9	3.4	2.9	3.8	5.8	4.5	4	5.7	4.46	3.3	4.2	4.1	3.3	2.5	3.1	3
亮氨酸(Leu)	4	10.4	3.4	4.8	10.2	5.7	8.25	5.5	9.5	5.07	9.9	10.7	9.4	6.4	6.4	5.3	7.3	12	8.5	0.8	11.1	8.34	2.8	8	7.2	4.9	4.7	4.8	5.1
酪氨酸(Tyr)	2.7	5	2	2.3	4	2.9	4.22	2.9	4.1	2.21	5.1	4.6	4.5	2.8	2.8	2.4	3.3	4.9	4.7	3.8	4.7	5.08	2.8	3.8	3.7	2.8	2.5	2.6	2.8
苯丙氨酸(Phe)	3	6	2.5	2.9	5.5	3.5	5.23	3.6	5.1	2.97	5.9	5.9	5.5	4	4	3.4	4.3	6.6	5.5	4.2	5.3	5.33	3.4	4.8	4.4	3.4	3.3	2.8	3.6
组氨酸(His)	1.3	2.8	1.2	1.4	2.7	1.6	2.32	2.22	2.3	1.36	2.8	2.7	2.4	1.8	1.8	1.7	2	3.2	2.3	0	3.4	2.87	1.7	2.2	1.9	1.5	1.5	1.3	1.7
赖氨酸(Lys)	2.7	6.6	2.6	3.1	6.5	3.6	5.34	2.8	5.5	2.82	6.5	6.4	5.9	4	3.9	3.7	4.5	7.8	5.6	6.2	8	5.82	3.6	5.3	4.5	3.4	3.1	2.9	3.6
精氨酸(Arg)	2.6	9.6	2.4	2.3	7.6	3.7	6.73	8.9	6.3	2.73	7.7	7.7	7.1	4.1	4.1	3	4.7	13.5	5.8	7.7	8.9	9.67	3.8	5.6	5.4	3.8	3.2	2.9	3.6

由表 5 可以看出,不同来源的齿瓣石斛氨基酸含量具有显著影响,来源于大棚基质和杉木附生两种模式下氨基酸含量接近或高于野生品种。除 CysMet 和 His 含量无显著差异,芒市大棚基质栽培、瑞丽和龙陵地区杉木附生栽培的齿瓣石斛氨基酸含量整体上显著高于野生种,也显著高于龙陵、梁河地区的大棚基质栽培石斛;其中,来源于芒市大棚基质和龙陵杉木附生的栽培方式下,齿瓣石斛的各氨基酸含量较丰富,前者 TAA、EAA、药效氨基酸、鲜味氨基酸分别达到 96、35、58 和 26 mg/g 以上,后者可分别达到 94、33、56、28 mg/g 以上,而梁河大棚基质栽培的大部分氨基酸含量最低,以 TAA、EAA、药效氨基酸含

量从高到低排序均为大棚基质(芒市)>杉木附生(龙陵)>杉木附生(瑞丽)>大棚基质(龙陵)>野生>大棚基质(梁河)。此外,据联合国粮食及农业组织和世界卫生组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations/World Health Organization, FAO/WHO)氨基酸模式谱标准, EAA/NEAA 在 60%以上, EAA/TAA 为 40%左右时说明植物蛋白于人体而言有较高的营养价值。相比而言,梁河的大棚基质栽培齿瓣石斛的 EAA/NEAA 在 62.69%~77.21%之间, EAA/TAA 在 38.63%~43.55%之间,营养价值更符合人体需求,野生次之,其 EAA/NEAA 在 61.59%~65.43%之间, EAA/TAA 在 38.12%~39.56%之间。

表 4 齿瓣石斛氨基酸含量的描述性统计
Table 4 Descriptive statistics of amino acid content in *Dendrobium devonianum* Paxt.

名称	最小值	最大值	平均值	标准差	方差	变异系数/%	偏度	峰度
Asp	5.10	20.70	11.18	4.80	23.03	42.93	0.67	-0.71
Thr	2.00	6.60	3.94	1.20	1.44	30.45	0.36	-0.71
Ser	2.10	6.30	3.77	1.06	1.12	28.06	0.35	-0.62
Glu	5.20	16.20	9.97	3.27	10.67	32.77	0.45	-0.99
Pro	2.00	5.70	3.58	1.08	1.17	30.16	0.35	-0.89
Gly	1.90	6.00	3.91	1.17	1.36	29.82	0.24	-1.08
Ala	2.30	6.60	4.16	1.13	1.27	27.02	0.26	-0.84

表 4(续)

名称	最小值	最大值	平均值	标准差	方差	变异系数/%	偏度	峰度
Cys	0.60	2.00	0.92	0.31	0.10	33.85	2.09	4.78
Val	2.60	6.60	3.91	1.04	1.07	26.48	0.64	-0.16
Met	0.70	2.30	1.10	0.38	0.15	34.85	1.86	3.10
Ile	2.20	6.00	4.04	1.10	1.21	27.20	0.17	-1.12
Leu	0.80	12.00	6.91	2.78	7.73	40.23	-0.03	-0.65
Tyr	2.00	5.10	3.52	1.00	1.00	28.38	0.24	-1.43
Phe	2.50	6.60	4.34	1.16	1.34	26.65	0.21	-1.22
His	0.00	3.40	2.00	0.72	0.51	35.82	-0.32	0.90
Lys	2.60	8.00	4.75	1.56	2.45	32.94	0.41	-0.88
Arg	2.30	13.50	5.52	2.72	7.41	49.31	1.03	0.98
TAA	42.00	125.40	77.52	24.34	592.48	31.40	0.43	-1.02
EAA	16.80	44.60	28.85	8.22	67.50	28.47	0.42	-1.05
NEAA	25.20	80.80	48.67	16.33	266.55	33.55	0.44	-1.00
药效氨基酸	24.00	75.30	46.21	15.18	230.38	32.85	0.44	-1.11
鲜味氨基酸	10.30	36.10	21.15	7.99	63.91	37.79	0.54	-0.96

注: 非必需氨基酸(non-essential amino acid, NEAA); 药效氨基酸包含 Glu、Asp、Arg、Gly、Tyr、Met、Leu、Lys, 鲜味氨基酸包含 Lys、Glu、Asp。表 5 同。

表 5 不同来源齿瓣石斛的氨基酸的种类与含量(mg/g)

Table 5 Amino acid species and content of *Dendrobium devonianum* Paxt. under different sources (mg/g)

氨基酸	大棚基质 (芒市)	大棚基质 (龙陵)	大棚基质 (梁河)	杉木附生 (瑞丽)	杉木附生 (龙陵)	野生
Asp ^Δ	14.51±4.30 ^c	7.83±1.49 ^{ab}	6.23±1.06 ^a	12.05±0.83 ^{bc}	15.28±6.89 ^c	6.80±0.32 ^a
Thr [*]	4.76±0.96 ^c	3.25±0.60 ^{ab}	2.47±0.42 ^a	4.35±0.39 ^{bc}	4.77±1.76 ^c	2.80±0.14 ^a
Ser ^Δ	4.47±0.72 ^b	3.06±0.47 ^a	2.40±0.30 ^a	4.30±0.42 ^b	4.48±1.64 ^b	2.83±0.28 ^a
Glu ^Δ	12.35±2.36 ^c	7.66±1.13 ^{ab}	6.07±0.85 ^a	10.68±0.53 ^{bc}	12.91±4.87 ^c	6.93±0.25 ^a
Pro ^Δ	4.22±0.65 ^b	3.18±1.47 ^{ab}	2.33±0.49 ^a	4.20±0.88 ^b	3.66±1.30 ^{ab}	2.73±0.15 ^a
Gly ^Δ	4.77±1.02 ^c	3.16±0.41 ^{ab}	2.53±0.60 ^a	4.35±0.30 ^{bc}	4.51±1.51 ^c	2.85±0.30 ^a
Ala ^Δ	4.89±0.92 ^c	3.52±0.56 ^{ab}	2.83±0.61 ^a	4.55±0.26 ^{bc}	4.97±1.76 ^c	3.18±0.32 ^a
Cys ^Δ	1.00±0.23 ^a	0.77±0.15 ^a	0.80±0.17 ^a	0.85±0.06 ^a	1.49±0.58 ^b	0.68±0.05 ^a
Val [*]	4.61±0.77 ^b	3.12±0.43 ^a	2.87±0.23 ^a	4.23±0.31 ^b	4.77±1.71 ^b	2.98±0.35 ^a
Met [*]	1.32±0.56 ^a	0.96±0.25 ^a	0.90±0.20 ^a	0.88±0.05 ^a	1.09±0.12 ^a	1.15±0.17 ^a
Ile [*]	4.79±0.82 ^c	3.17±0.52 ^{ab}	3.70±2.02 ^{abc}	4.20±0.22 ^{abc}	4.49±1.20 ^{bc}	2.98±0.34 ^a
Leu [*]	9.27±1.97 ^b	5.60±0.98 ^a	4.50±0.98 ^a	6.13±3.59 ^b	7.41±4.23 ^b	4.88±0.17 ^a
Tyr ^Δ	4.19±0.88 ^b	2.82±0.08 ^a	2.23±0.21 ^a	4.00±0.47 ^b	4.19±1.22 ^b	2.68±0.15 ^a
Phe [*]	5.30±1.03 ^c	3.62±0.41 ^{ab}	2.93±0.45 ^a	4.73±0.57 ^{bc}	4.68±1.11 ^{bc}	3.28±0.34 ^a
His ^Δ	2.46±0.51 ^{bc}	1.74±0.34 ^{ab}	1.43±0.25 ^a	1.60±1.08 ^{ab}	2.66±0.87 ^c	1.50±0.16 ^a
Lys [*]	5.78±1.37 ^b	3.70±0.61 ^a	3.13±0.55 ^a	5.40±0.71 ^b	5.81±2.20 ^b	3.25±0.31 ^a
Arg ^Δ	7.36±2.85 ^c	3.68±0.63 ^{ab}	2.57±0.38 ^a	6.13±1.06 ^c	7.46±3.19 ^c	3.38±0.40 ^{ab}
TAA	96.05±19.79 ^c	60.81±9.19 ^{ab}	50.00±7.30 ^a	82.60±6.28 ^{bc}	94.61±34.15 ^c	54.83±3.15 ^a
EAA	35.43±6.67 ^c	23.40±3.43 ^{ab}	20.55±3.26 ^a	29.90±4.36 ^{bc}	33.01±11.93 ^c	21.30±1.45 ^{ab}
NEAA	60.62±13.32 ^c	37.41±5.80 ^{ab}	29.45±4.49 ^a	52.70±2.53 ^{bc}	61.60±22.45 ^c	33.53±1.78 ^a
药效氨基酸	58.09±12.51 ^c	35.69±5.47 ^{ab}	30.05±5.26 ^a	48.40±5.04 ^{bc}	56.17±21.48 ^c	32.10±1.33 ^a
鲜味氨基酸	26.87±6.51 ^c	15.50±2.60 ^{ab}	12.31±1.92 ^a	22.73±0.95 ^{bc}	28.19±11.65 ^c	13.73±0.34 ^a
(EAA/TAA)/%	37.04±1.57	38.50±0.72	41.09±2.46	36.07±2.93	35.03±1.95	38.84±0.72
(EAA/NEAA)/%	58.92±3.95	62.63±1.88	69.95±7.26	56.65±6.88	54.00±4.55	63.51±1.92

注: *表示 EAA; Δ表示 NEAA。表中数据为平均值±标准偏差, 同一行数据后不同小写字母代表在 0.05 水平上差异显著(P<0.05)。

2.2 主成分分析

2.2.1 各氨基酸之间相关性分析

Met 和 Cys 与其他氨基酸的正相关性最弱; Pro 与 Ile、Leu 及 His 的正相关性较弱, 与 Met 之间几乎没有相关性; 其他氨基酸之间正相关性普遍较强(图 1), 说明适合进行主成分分析。

2.2.2 齿瓣石斛氨基酸主成分分析

由表 6 共同度所示, 主成分可以涵盖所测定的绝大部分氨基酸 55% 以上的信息, 其中 Gly、Ala 和 Thr 等 9 种氨基酸可被提取 90% 以上的信息量, Cys 和 Pro 信息量则损失

最多。由图 2 所示, 所提取到的两个主成分共同解释了 83.852% 的方差(分别为 77.088% 和 6.764%), 即这两个主成分包含了 17 个氨基酸中 83.852% 的信息, 效果较为理想, 说明具有研究意义。此外, 通过主成分分析后的成分得分系数, 可获得主成分线性表达式为:

$$F_1=0.071X_1+0.080X_2+0.067X_3+\dots+0.033X_{15}+0.087X_{16}+0.090X_{17}$$

$$F_2=0.023X_1-0.011X_2+0.039X_3+\dots+0.133X_{15}-0.044X_{16}-0.073X_{17}$$

齿瓣石斛氨基酸品质综合评价模型为 $IFI=0.771F_1+0.068F_2$ 。IFI 值的高低代表齿瓣石斛氨基酸品质的好坏。

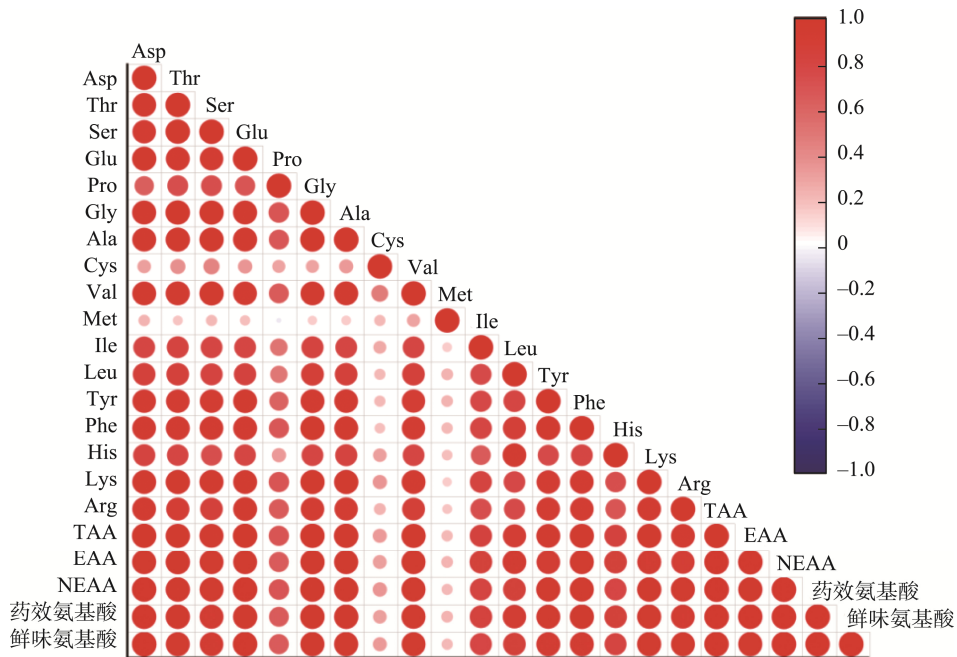


图 1 齿瓣石斛中各氨基酸指标的相关性矩阵
Fig.1 Matrix of correlation on amino acids in *Dendrobium devonianum* Paxt.

表 6 齿瓣石斛中氨基酸共同度、因子载荷与成分得分系数矩阵

Table 6 Matrix of communalities, factor loading and component score coefficient on amino acids in *Dendrobium devonianum* Paxt.

氨基酸	共同度		因子载荷		成分得分系数		氨基酸	共同度		因子载荷		成分得分系数	
	初始	提取	1	2	1	2		初始	提取	1	2	1	2
Asp	1.0	0.941	0.970	0.006	0.071	0.023	Met	1.0	0.731	0.215	0.828	-0.151	0.704
Thr	1.0	0.966	0.982	-0.034	0.080	-0.011	Ile	1.0	0.690	0.831	-0.003	0.062	0.012
Ser	1.0	0.942	0.970	0.026	0.067	0.039	Leu	1.0	0.781	0.882	0.060	0.053	0.066
Glu	1.0	0.949	0.974	-0.038	0.080	-0.015	Tyr	1.0	0.899	0.947	-0.051	0.081	-0.027
Pro	1.0	0.566	0.695	-0.287	0.109	-0.230	Phe	1.0	0.941	0.966	-0.083	0.088	-0.053
Gly	1.0	0.983	0.987	-0.090	0.092	-0.059	His	1.0	0.693	0.821	0.140	0.033	0.133
Ala	1.0	0.968	0.983	-0.046	0.082	-0.022	Lys	1.0	0.949	0.971	-0.072	0.087	-0.044
Cys	1.0	0.431	0.358	0.550	-0.084	0.472	Arg	1.0	0.866	0.925	-0.105	0.090	-0.073
Val	1.0	0.959	0.970	0.133	0.045	0.130							

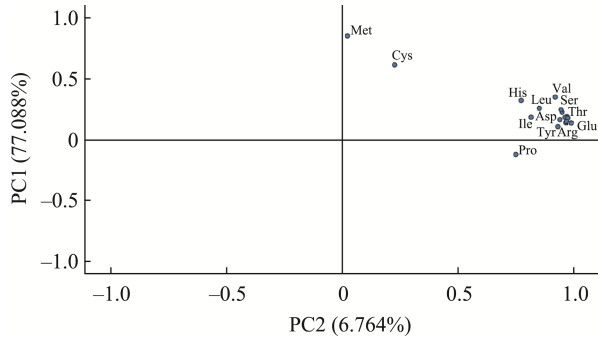


图 2 齿瓣石斛氨基酸主成分分析图
Fig.2 Principal component analysis chart of amino acids in *Dendrobium devonianum* Paxt.

2.2.3 齿瓣石斛氨基酸品质分析

通过主成分分析得出各类氨基酸成分得分系数(表 6), 根据上述氨基酸品质综合评价模型计算出 29 个样品最终综合得分并进行排名(表 7), 排名前 5 名分别为 M10、L4、M1、M7 和 L5。

2.3 聚类分析

对 29 种齿瓣石斛的 17 种氨基酸和 TAA、EAA、NEAA、药效氨基酸、鲜味氨基酸为变量进行聚类分析。如图 3、4 所示, 分别以氨基酸和综合得分为变量进行分类, 可将所有样品分为 3 大类, 发现除第三类的下级分类

表 7 氨基酸品质主成分分析的综合得分与排名
Table 7 Comprehensive score and ranking of amino acid quality principal component analysis

编号	主成分得分		综合得分	排名	编号	主成分得分		综合得分	排名
	F1	F2				F1	F2		
L1	3.185	0.568	2.494	28	H3	3.899	0.548	3.043	22
M1	7.924	1.088	6.184	3	M9	5.309	0.335	4.116	15
H1	2.726	1.047	2.173	29	M10	9.097	0.080	7.019	1
H2	3.544	0.641	2.776	27	R4	6.478	0.355	5.019	9
M2	7.340	0.430	5.689	6	R3	5.718	-0.880	4.349	14
L2	4.111	0.589	3.210	19	L4	8.635	1.193	6.738	2
M3	6.174	0.342	4.783	11	L5	7.486	0.339	5.795	5
L3	4.295	0.615	3.353	18	L6	3.774	1.133	2.986	23
M4	6.208	1.687	4.901	10	R2	6.006	0.408	4.658	12
M5	3.644	1.188	2.890	24	R1	5.646	0.537	4.390	13
M6	7.239	1.469	5.681	7	Y1	3.983	0.554	3.108	20
M7	7.549	0.404	5.848	4	Y2	3.582	0.635	2.805	25
M8	7.152	0.152	5.524	8	Y3	3.545	0.754	2.784	26
L7	4.657	1.025	3.660	17	Y4	3.918	0.873	3.080	21
L8	4.958	-0.099	3.816	16					

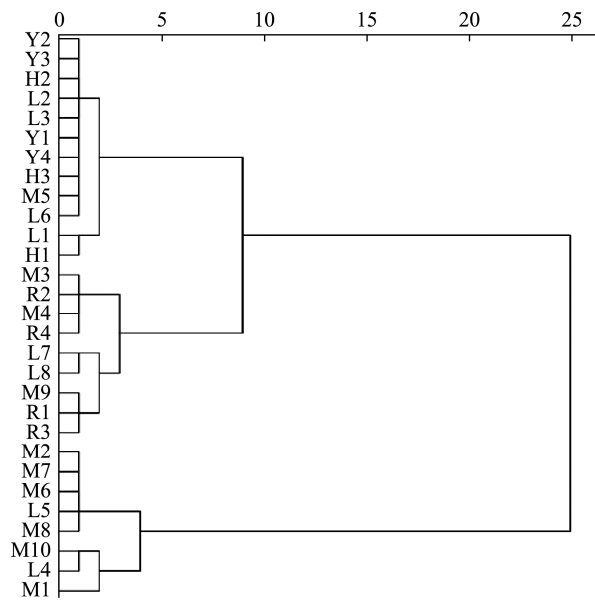


图 3 以氨基酸为变量聚类
Fig.3 Clustering analysis with amino acids as variables

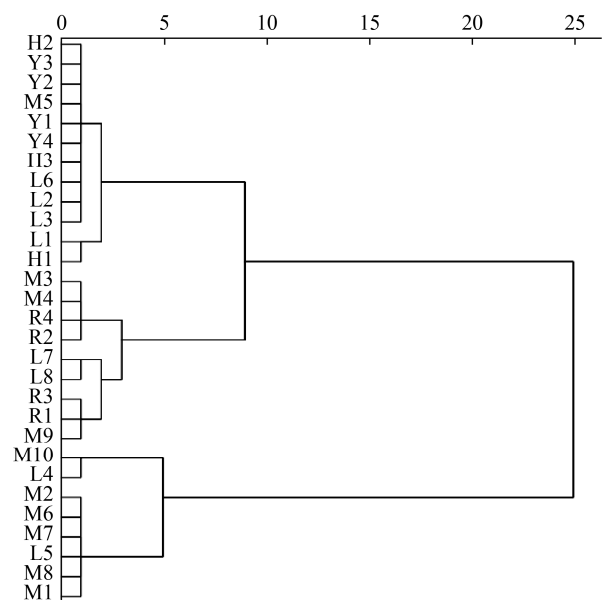


图 4 以综合得分为变量聚类
Fig.4 Clustering analysis with comprehensive score as variables

有细微差别外, 其他分类一致: 即 Y2、Y3、H2、L2、L3、Y1、Y4、H3、M5 等 12 种齿瓣石斛为一类; M3、R2、M4、R4、L7、L8、M9 等 9 种齿瓣石斛为一类; M2、M7、M6、L5、M8 等 8 种齿瓣石斛为一类。

3 结论与讨论

本研究对云南不同来源的齿瓣石斛进行氨基酸含量的测定和分析, 结果表明不同来源的齿瓣石斛中氨基酸的含量具有一定的差异。29 个样品中均含有 17 种氨基酸和人体所需的 7 种 EAA。其中 Asp、Glu、Leu 和 Arg 4 种氨基酸含量在齿瓣石斛中最为丰富, Cys 和 Met 含量最少, 分别为第一和第二限制性氨基酸, 这与王晓媛等^[27]的研究结果基本一致。Asp 虽不是 EAA, 但作为药效氨基酸能用于增强肝脏功能、治疗心血管疾病及合成维生素 B₆ 等^[28]。Glu 是一种多功能氨基酸, 它处于多种代谢途径的十字路口, 不仅参与消化系统和免疫系统, 还与大脑健康密切相关, 能够改善儿童智力发育、治疗脑震荡和神经损伤等疾病^[29]。Leu 作为一种 EAA, 在各种生理过程中发挥着关键作用, 包括蛋白质合成、调节血糖和作为信号分子参与多种信号通路。在饮食中适当补充 Leu 可以缓解高血糖, 改善高胆固醇, 增加胰岛素敏感性^[30]。有研究发现 Arg 在抗肿瘤中起到一定作用, 能够降低术后感染并发症发生率, 促进免疫功能和营养状况的恢复^[31]。齿瓣石斛作为富含以上 4 类氨基酸的载体, 在未来具有广阔的发展前景和潜力。FAO/WHO 氨基酸模式, 是 FAO/WHO 1973 年提出的人体 EAA 模式。它通过比较食物蛋白质中各种 EAA 的构成比例与人体蛋白质氨基酸模式的接近程度, 来判断食物蛋白质的质量。这种方法能够反映食物蛋白质在人体内的利用效率, 以及其对人体健康的贡献^[32]。本研究发现梁河的大棚基质栽培齿瓣石斛氨基酸营养价值更符合人体需求, 野生次之。通过对氨基酸品质进行排名, 前 5 名的样品分别为 M10、L4、M1、M7、L5, 说明大棚基质和杉木附生栽培的石斛氨基酸品质比野生的更好。分别以氨基酸和综合得分作为变量进行聚类分析, 将 29 个样品分为 3 类, 说明聚类分析结果较好地体现了不同产地石斛氨基酸含量的差异性, 为云南省齿瓣石斛的营养价值评价、资源开发等提供理论指导。

栽培模式对石斛的生长和品质有重要作用^[24-26]。本研究发现同一种栽培模式不同产地对齿瓣石斛氨基酸含量积累有影响, 可能由于生长环境的气候、温度、湿度影响了石斛氨基酸积累, 存在地域性差异; 来自龙陵的不同栽培模式的样品氨基酸含量有显著差异, 说明同一产地不同栽培模式对齿瓣石斛氨基酸含量形成也有影响, 这与黄彪等^[33]得出栽培模式对铁皮石斛游离氨基酸含量有影响作用的研究结论相似。本研究对采自云南不同产地 29 个齿瓣石斛样品进行氨基酸含量的分析及营养价值评价, 有效补充了云南

齿瓣石斛营养成分分析方向的不足, 为后续的相关研究奠定基础。本次研究不足之处, 样品采摘过程中未充分考虑石斛的种植年限、各地栽培管理水平, 且野生品种采样量较少, 对数据分析的规律性具有一定影响。因此, 在后续研究中应加大样品数量, 充分考虑种植年限、管理水平、减少环境因素带来的影响, 同时进一步对石斛生境进行多维度测量, 来明确各类环境因素对齿瓣石斛氨基酸含量的影响权重, 以便为其栽培模式提供更准确的科学理论支撑。

参考文献

- [1] XIE GJ, YIN ZC, ZHANG ZL, *et al.* Microbial diversity and potential functional dynamics within the rhizocompartments of *Dendrobium huoshanense* [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2024, 15: 1450716.
- [2] 吴琼, 柴艺汇, 刘春艳, 等. 石斛化学成分和药理作用研究进展[J]. *贵州中医药大学学报*, 2021, 43(5): 99-103.
WU Q, CHAI YH, LIU CY, *et al.* Advances in chemical compounds and pharmacological effects of *Dendrobii caulis* [J]. *Journal of Guizhou University of Traditional Chinese Medicine*, 2021, 43(5): 99-103.
- [3] 孙乐, 陈晓梅, 吴崇明, 等. 铁皮石斛多糖药理活性研究进展[J]. *药理学学报*, 2020, 55(10): 2322-2329.
SUN L, CHEN XM, WU CM, *et al.* Advances and prospects of pharmacological activities of *Dendrobium officinale* Kimura et Migo polysaccharides [J]. *Acta Pharmaceutica Sinica*, 2020, 55(10): 2322-2329.
- [4] 王治丹, 代云飞, 罗尚娟, 等. 铁皮石斛化学成分及药理作用的研究进展[J]. *华西药学期刊*, 2022, 37(4): 472-476.
WANG ZD, DAI YF, LUO SJ, *et al.* Research progress on chemical constituents and pharmacological effects of *Dendrobium officinale* [J]. *West China Journal Pharmaceutical Sciences*, 2022, 37(4): 472-476.
- [5] 赵菊润, 王艺涵, 金艳, 等. 石斛属植物化学成分及药理活性研究进展[J]. *中国中药杂志*, 2022, 47(9): 2358-2372.
ZHAO JR, WANG YH, JIN Y, *et al.* Research advances in chemical constituents and pharmacological activities of *Dendrobium* plants [J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2022, 47(9): 2358-2372.
- [6] AIDAN K, IAN F, CHARFEDINNE A, *et al.* A flavour perspective of Tiepishihu (*Dendrobium officinale*)—an emerging food ingredient from popular traditional Chinese medicinal plants: A review [J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2023 58(10): 4921-4930.
- [7] 倪凯, 何鹏飞, 梁志庆, 等. 齿瓣石斛研究进展[J]. *云南中医中药杂志*, 2023, 44(1): 86-89.
NI K, HE PF, LIANG ZQ, *et al.* Research progress of *Dendrobium devonianum* Paxt. [J]. *Yunnan Journal of Traditional Chinese Medicine and Materia Medica*, 2023, 44(1): 86-89.
- [8] 董寿堂, 杨娇, 张旭强, 等. 紫皮石斛抗小鼠体力疲劳作用[J]. *中国应用生理学杂志*, 2019, 35(1): 44-46.
DONG ST, YANG J, ZHANG XQ, *et al.* Effect of *Dendrobium devonianum* Paxt. on anti-physical fatigue in mice [J]. *Chinese Journal of Applied Physiology*, 2019, 35(1): 44-46.
- [9] TONG LT. Antitumor activity of *Dendrobium devonianum* polysaccharides based on their immunomodulatory effects in S180 tumor-bearing mice [J]. *RSC Advances*, 2016, 6(46): 40250-40257.
- [10] ZHAO Y, ZHU ST, LI Y, *et al.* Integrated component identification, network pharmacology, and experimental verification revealed mechanism of *Dendrobium officinale* Kimura et Migo against lung cancer [J]. *Journal*

- of Pharmaceutical and Biomedical Analysis, 2024, 243: 116077.
- [11] LI LM, NONG JJ, LI JG, *et al.* Dendrobine suppresses tumor growth by regulating the PD-1/PD-L1 checkpoint pathway in lung cancer [J]. *Current Cancer Drug Targets*, 2024. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39297473/>
- [12] NAPACHANOK MS, THANYAWAN P, RUNGPAILIN K, *et al.* *In vitro* inhibitory effects on free radicals, pigmentation, and skin cancer cell proliferation from *Dendrobium* hybrid extract: A new plant source of active compounds [J]. *Heliyon*, 2023, 9(9): e20197.
- [13] WANG L, WANG T, YANG M, *et al.* Preliminary study on the antibacterial effect of *Dendrobium devonianum* Paxt. extracts *in vitro* [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2012, 40(17): 9338–9339.
- [14] WANG B, TAN HH, SUN XY, *et al.* Inhibition of *Candida albicans* virulence by moscatin from *Dendrobium nobile* lindl [J]. *Microbial Pathogenesis*, 2024, 197: 107089.
- [15] WEI XP, SUN W, ZHU PP, *et al.* Refined polysaccharide from *Dendrobium devonianum* resists H1N1 influenza viral infection in mice by activating immunity through the TLR4/MyD88/NF- κ B pathway [J]. *Frontiers in Immunology*, 2022, 13: 999945.
- [16] WEI X, WANG D, XU ZM, *et al.* Research progress on the regulatory and pharmacological mechanism of chemical components of *Dendrobium* [J]. *Heliyon*, 2024, 10(18): e37541.
- [17] LI Q, MA XY, XU XD, *et al.* A study on the rationality of baicalein in the treatment of osteoporosis: A narrative review [J]. *Current Protein & Peptide Science*, 2024. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39473099/>
- [18] 杨红芹, 张旭强, 董寿堂, 等. 齿瓣石斛多糖对小鼠胃溃疡的防治作用及机制研究[J]. *中国野生植物资源*, 2024, 43(9): 1–7.
- YANG HQ, ZHANG XQ, DONG ST, *et al.* Study on the preventive effect and mechanism of *Dendrobium devonianum* polysaccharides on gastric ulcer in mice [J]. *Chinese Wild Plant Resources*, 2024, 43(9): 1–7.
- [19] 刘振艳, 宋耀新, 刘洋, 等. 黑龙江不同产地北苍术中氨基酸的组成特征及营养评价[J]. *食品安全质量检测学报*, 2023, 11(1): 305–314.
- LIU ZY, SONG YX, LIU Y, *et al.* Amino acid composition characteristics and nutritional evaluation in *Atractylodes chinensis* (DC.) Koidz. from different regions of Heilongjiang [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2023, 11(1): 305–314.
- [20] 陈玉芹, 赵成法, 沐远, 等. 刺通草的营养成分分析及其氨基酸评价[J]. *食品安全质量检测学报*, 2024, 15(7): 305–313.
- CHEN YQ, ZHAO CF, MU Y, *et al.* Nutrient composition analysis and amino acid evaluation of *Trevesia palmate* [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2024, 15(7): 305–313.
- [21] 杨晓琳, 孙好强, 何昌芬, 等. 不同产地山茱萸氨基酸含量分析及其营养价值评价[J]. *食品安全质量检测学报*, 2022, 13(22): 7200–7209.
- YANG XL, SUN HQ, HE CF, *et al.* Analysis of amino acid composition and nutritional evaluation of *Corni Fructus* from different habitats [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2022, 13(22): 7200–7209.
- [22] ZHAO M, FAN JK, LIU QT, *et al.* Phytochemical profiles of edible flowers of medicinal plants of *Dendrobium officinale* and *Dendrobium devonianum* [J]. *Food Science & Nutrition*, 2021, 9(12): 6575–6586.
- [23] 李洪华, 安丽华. 中药材的氨基酸含量测定与分析技术研究现状[J]. *农村经济与科技*, 2019, 30(16): 101–103.
- LI HB, AN LH. Research status of amino acid content determination and analysis technology of Chinese medicinal materials [J]. *Rural Economy and Science-Technology*, 2019, 30(16): 101–103.
- [24] 吴挺佳, 吴二焕, 左静, 等. 不同栽培模式对铁皮石斛产量和品质的影响[J]. *热带林业*, 2024, 52(1): 46–50.
- WU TJ, WU ERH, ZUO J, *et al.* Effects of different cultivation modes on yield and quality of *Dendrobium officinale* Kimura et Migo [J]. *Tropical Forestry*, 2024, 52(1): 46–50.
- [25] 黄丽莉, 贾全全, 朱灵芝, 等. 两种栽培模式下铁皮石斛中主要活性物质活性研究[J]. *山东中医药大学学报*, 2022, 46(4): 516–523.
- HUANG LL, JIA QQ, ZHU LZ, *et al.* Study on activity of main components in Tiepi Shihu (*Dendrobil officinalis* Caulis) under two cultivation modes [J]. *Journal of Shandong University of Traditional Chinese Medicine*, 2022, 46(4): 516–523.
- [26] 秦宁, 付均惠, 刘涛, 等. 栽培基质对铁皮石斛产量和品质的影响[J]. *山东林业科技*, 2023(1): 48–51.
- QIN N, FU JH, LIU T, *et al.* Effects of culture substrate on yield and quality of *Dendrobium officinale* [J]. *Shangdong Forestry Science and Technology*, 2023(1): 48–51.
- [27] 王晓媛, 王彦兵, 陈玉芹, 等. 6 种石斛属植物氨基酸组成及营养价值评价[J]. *天然产物研究与开发*, 2019, 31: 601–607.
- WANG XY, WANG YB, CHEN YQ, *et al.* Amino acid composition and nutritional value evaluation of 6 kinds of species of *Dendrobium* [J]. *Natural Product Research and Development*, 2019, 31: 601–607.
- [28] 王远山, 徐建妙, 陈小龙, 等. 药用氨基酸的应用及其生物催化与生物转化法生产[J]. *中国现代应用药学*, 2005, 22(9): 825–828.
- WANG YS, XU JM, CHEN XL, *et al.* Applications, biocatalytic synthesis and biotransformation of pharmaceutical amino acids [J]. *Chinese Journal of Modern Applied Pharmacy*, 2005, 22(9): 825–828.
- [29] 杨鲜, 祝慧凤, 王涛, 等. 重庆巫山等多地党参氨基酸及营养价值比较与分析[J]. *食品科学*, 2014, 35(15): 251–257.
- YANG X, ZHU HF, WANG T, *et al.* Comparative analysis of amino acid composition and nutritional value of roots of *Codonopsis pilosula* from Wushan and other growing regions in China [J]. *Food Science*, 2014, 35(15): 251–257.
- [30] 余灏南. 亮氨酸缺失对肝脏脂质代谢的调节功能研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2023.
- YU HN. Mechanical exploration of leucine deprivation modulating hepatic lipid metabolism [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2023.
- [31] 刘向荣, 刘英华. 免疫营养素在恶性肿瘤防治中的研究进展[J]. *肿瘤代谢与营养电子杂志*, 2024, 11(4): 443–449, 438.
- LIU XR, LIU YH. The research progress of immunonutrients in the prevention and treatment of malignant tumors [J]. *Electronic Journal Metabolism and Nutrition of Cancer*, 2024, 11(4): 443–449, 438.
- [32] 朱圣陶, 吴坤. 蛋白质营养价值评价—氨基酸比值系数法[J]. *营养学报*, 1988(2): 187–190.
- ZHU ST, WU K. Nutritional evaluation of protein—ratio coefficient of amino acid [J]. *Acta Nutrimenta Sinica*, 1988(2): 187–190.
- [33] 黄彪, 刘文静, 李巍, 等. 不同人工栽培模式下铁皮石斛活性成分及抗氧化活性比较[J]. *食品安全质量检测学报*, 2022, 13(8): 2665–2671.
- HUANG B, LIU WJ, LI W, *et al.* Comparative analysis of active constituents and antioxidant activities of *Dendrobium officinale* in different artificial cultivation models [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2022, 13(8): 2665–2671.

(责任编辑: 于梦娇 韩晓红)