DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20250623005
引用格式: 杨静, 马小龙, 刘霞, 等. 宁夏不同产区 3 个品种枸杞酚类物质的差异性分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(1): 239–247.
YANG J, MA XL, LIU X, *et al*. Analysis of the differences in phenolic substances of 3 varieties of *Lycium barbarum* from different production areas in Ningxia [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(1): 239–247. (in Chinese with English abstract).

宁夏不同产区 3 个品种枸杞酚类物质的差异性分析

杨 静, 马小龙, 刘 霞, 吴 燕, 王彩艳, 王晓菁*

(宁夏农产品质量标准与检测技术研究所, 宁夏回族自治区农产品质量安全标准研究与评价重点实验室, 银川 750002)

摘 要: 目的 对比分析宁夏不同产区的 3 个品种枸杞中酚类物质含量差异。**方法** 采集宁夏不同产区的宁杞 1 号、宁杞 7 号、科杞 608 号的枸杞样品共计 36 份, 监测分析枸杞中黄酮、酚酸、类胡萝卜素、甜菜碱含量差异, 构建基于酚类物质的不同产区枸杞鉴别模型。**结果** 不同产区的宁杞 1 号枸杞中黄酮、酚酸、类胡萝卜素及甜菜碱在 4 个产区具有显著差异(P<0.05), 红寺堡产区的酚类物质含量显著高于其他产区。宁杞 7 号枸杞中黄酮、类胡萝卜素和甜菜碱在 5 个产区具有显著差异, 红寺堡产区的酚类物质含量显著高于其他产区。科杞 608 号枸杞中黄酮、酚酸和甜菜碱在 3 个产区具有显著差异, 中宁产区的酚类物质含量显著高于其他产区。建立了基于正交偏最小二乘判别分析方法的不同产区枸杞鉴别模型, 其整体正确判别率为 100%。**结论** 宁夏不同产区的枸杞间酚类物质含量均存在显著差异。本研究为枸杞的功能成分的开发和不同产区枸杞的品质综合评价提供参考依据。

关键词: 枸杞; 酚类物质; 差异性; 产区

Analysis of the differences in phenolic substances of 3 varieties of *Lycium barbarum* from different production areas in Ningxia

YANG Jing, MA Xiao-Long, LIU Xia, WU Yan, WANG Cai-Yan, WANG Xiao-Jing*

(*Key Laboratory of Agricultural Product Quality Safety Standard Research and Evaluation of Ningxia Hui Autonomous Region*, *Ningxia Research Institute of Quality Standards and Testing Technology for Agricultural Products*, *Yinchuan* 750002, *China*)

ABSTRACT: Objective To comparatively analyze the differences in phenolic substance content among 3 varieties of *Lycium barbarum* from different production areas in Ningxia. **Methods** A total of 36 *Lycium barbarum* samples of Ningqi No.1, Ningqi No.7 and Keqi No.608 from different production areas in Ningxia were collected. The differences in the content of flavonoids, phenolic acids, carotenoids and betaine in *Lycium barbarum* were monitored

收稿日期: 2025-06-23
基金项目: “十四五”农业高质量发展和生态保护科技创新示范项目(NGSB-2021-5); 2022 宁夏回族自治区科技创新领军人才项目(2022GKLRLX09)
第一作者: 杨静(1986—), 女, 助理研究员, 主要研究方向为特色农产品有效功能成分。E-mail: 289184175@qq.com
***通信作者:** 王晓菁(1972—), 女, 硕士, 研究员, 主要研究方向为农产品质量标准。E-mail: 894921388@qq.com

and analyzed, and identification model of *Lycium barbarum* from different production areas based on phenolic substances was constructed. **Results** The flavonoids, phenolic acids, carotenoids and betaine in Ningqi No.1 *Lycium barbarum* from different production areas showed significant differences (P<0.05) among 4 production areas. The content of phenolic substances in the Hongshibao production area was significantly higher than that in other production areas. The flavonoids, carotenoids and betaine in Ningqi 7 *Lycium barbarum* showed significant differences among the 5 production areas. The content of phenolic substances in the Hongshibao production area was significantly higher than that in the other production areas. The flavonoids, phenolic acids and betaine in Keqi 608 *Lycium barbarum* showed significant differences among the 3 production areas. The content of phenolic substances in the Zhongning production area was significantly higher than that in other production areas. An identification model of *Lycium barbarum* from different production areas based on the orthogonal partial least squares discriminant analysis discriminant analysis method was established, and its overall correct discrimination rate was 100%. **Conclusion** There are significant differences in the content of phenolic substances among *Lycium barbarum* from different production areas in Ningxia. This study provides a reference basis for the development of functional components of *Lycium barbarum* and the comprehensive quality evaluation of *Lycium barbarum* from different production areas.

KEY WORDS: *Lycium barbarum*; phenolic substance; difference; area

0 引 言

宁夏枸杞(*Lycium barbarum*)为茄科枸杞属多年生落叶灌木[1], 主要分布于中国西北部的甘肃、青海、宁夏和新疆等地区, 具有耐盐碱、耐旱及适应性强的特性, 是西北地区特色经济林作物[2–4]。宁夏枸杞是药食同源的植物资源, 也是唯一载入《中国药典》的入药枸杞[5]。枸杞中含有丰富的氨基酸、黄酮、胡萝卜素、酚酸及多糖等物质[6–8], 具有抗衰老、抗氧化性、免疫调节等作用[9–11], 备受市场亲睐。

酚类物质是一类在苯环上含有羟基的植物次生代谢物[12], 包括酚酸类、黄酮类、木酚素类、单宁类等约 8000 种不同的有效成分[13–15], 其广泛存在于蔬菜、水果、谷物、茶等植物中[16–18]。枸杞中的酚类物质可能通过减轻氧化应激, 从而对人体产生有益作用[19], 其作为枸杞的主要功效成分之一, 对人体健康的作用受到广泛关注。张文艳等[20]开展了枸杞黄酮类化合物的降糖活性研究, 发现高剂量的黄酮能有效降糖。周婷等[21]分析了枸杞酒发酵前后酚类物质的变化, 拓展了枸杞酒中多酚类成分的基础研究。陈浩等[22]找出了黑果枸杞的关键特征成分, 为黑果枸杞的差异化高值产品开发和利用提供理论依据。李曼祎等[23]以宁夏、新疆、青海、内蒙古 4 个产地枸杞为研究对象, 考察了理化指标、活性物质含量及风味化合物, 以期为枸杞品质评价及产地鉴别提供参考。王静等[24]建立了枸杞类胡萝卜素指纹图谱, 可更全面评价枸杞中药效物质。现有的研究大多只是从枸杞的主产区和品种考察其色泽、大小、口感、功效成分, 而对宁夏不同小产区的枸杞研究较少, 因此建立宁夏不同产区枸杞的质量评价具有重要意义。

本研究以宁夏不同产区的枸杞鲜果为研究对象, 采用靶向代谢组学技术, 考察不同产区、不同品种的枸杞中酚类物质代谢的差异性, 以期为枸杞的功能成分的开发和不同产区枸杞的品质综合评价提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

枸杞宁夏鲜果枸杞: 2024 年采集宁夏红寺堡、中宁、大武口、平罗、盐池和园林场产区每个品种 3 个枸杞样品, 选取无损伤、无霉变、成熟度相同且大小均一的果实。

黄酮类(芦丁、异槲皮苷、槲皮素-7-O-葡萄糖苷、山奈酚-3-O-芸香糖苷、6-甲氧基山奈酚-3-O-芸香糖苷、水仙苷)(纯度>98.9%, 上海源叶公司); 酚酸类(绿原酸、4-羟基苯甲酸、咖啡酸、对香豆酸、阿魏酸、异阿魏酸)(纯度>97.8%, 上海安谱实验科技股份有限公司); 类胡萝卜素(玉米黄素、β-胡萝卜素、β-隐黄素棕榈酸酯、玉米黄素双棕榈酸酯)(纯度>99.3%, 瑞士 CaroteNature 公司); 甜菜碱(纯度>99.5%, 美国 Sigma 公司); 甲酸、乙腈、甲醇(色谱纯, 德国默克公司)。

Thermo TSQ Alits 液相色谱-三重四极杆串联质谱仪(美国赛默飞世尔科技公司); TDL-40C 离心机(上海安亭科学仪器厂); Waters 2695 高效液相色谱仪、HSS T3 C_{18} 色谱柱(100 mm×2.1 mm, 1.8 μm) (美国沃特世公司); PL202-L 电子天平(精度 0.01 g, 瑞士梅特勒-托利多仪器有限公司); MS3 digital 涡流混合器(德国 IKA 公司); R-215 旋转蒸发仪(瑞士步琦实验室仪器公司)。

1.2　实验方法

1.2.1　黄酮测定

枸杞中黄酮类物质的测定参照 T/NAIA 0287—2024《枸杞中 6 种黄酮类物质含量的测定 液相色谱-质谱/质谱法》。

1.2.2　酚酸测定

枸杞中酚酸的测定参照文献[25]的方法。准确称取 2 g 枸杞样品, 加入 20 mL 乙酸乙酯, 振荡提取 10 min 后, 上清液用旋转蒸发仪浓缩至干, 用 2 mL 甲醇定容, 过 0.22 μm 有机滤膜, 采用液相色谱法测定。

1.2.3　类胡萝卜素测定

枸杞中类胡萝卜素的测定参照 GB 5009.83—2016《食品安全国家标准 食品中胡萝卜素的测定》。

1.2.4　甜菜碱测定

枸杞中甜菜碱的测定按照 NY/T 2947—2016《枸杞中甜菜碱含量的测定 高效液相色谱法》。

1.3　数据处理

采用 Excel 2019 软件进行数据整理; 采用 SPSS 25.0 软件对不同产区的不同品种枸杞中监测指标进行单因素方差分析, 采用 SIMCA-P13.0 中的正交偏最小二乘法(orthogonal partial least squares discriminant analysis, OPLS-DA)进行不同产区枸杞鉴别模型构建及图形绘制。

2　结果与分析

2.1　不同产区枸杞中酚类物质差异分析

2.1.1　宁杞 1 号

采集红寺堡、园林场、大武口、中宁的宁杞 1 号枸杞样品, 对不同产区的宁杞 1 号中的酚类物质进行测定和方差分析。结果见表 1。

黄酮类物质作为枸杞中主要的功能成分之一, 在 4 个产区的总量为 34.16~80.49 mg/kg。芦丁为黄酮类物质中含量最高的组分, 4 个产区含量为 25.81~65.17 mg/kg。山奈酚-3-O-芸香糖苷的含量为 2.18~3.32 mg/kg。6-甲氧基山奈酚-3-O-芸香糖苷的含量为 2.41~6.89 mg/kg。水仙苷含量为 2.53~6.84 mg/kg。异槲皮苷和槲皮素-7-O-葡萄糖苷的含量在 6 种黄酮类物质中最低(0.02~0.27 mg/kg)。6-甲氧基山奈酚-3-O-芸香糖苷和水仙苷在 4 个产区具有显著差异(P<0.05), 芦丁在红寺堡和中宁产区具有显著差异, 异槲皮苷和槲皮素-7-O-葡萄糖苷在红寺堡和大武口产区具有显著差异。从不同产区宁杞 1 号枸杞中黄酮类物质总量来看, 红寺堡产区枸杞的黄酮类物质总量显著高于其他产区枸杞。

表 1　不同产区宁杞 1 号枸杞中酚类物质含量

Table 1　Content of phenolic substances in Ningqi No.1 *Lycium barbarum* from different production areas

指标		产区			
		红寺堡	园林场	大武口	中宁
黄酮类 /(mg/kg)	芦丁	65.17±0.12^{a}	28.94±0.11^{c}	25.81±0.06^{c}	37.16±0.09^{b}
	异槲皮苷	0.17±0.06^{b}	0.05±0.01^{c}	0.02±0.01^{a}	0.06±0.01^{c}
	槲皮素-7-O-葡萄糖苷	0.27±0.04^{a}	0.05±0.02^{c}	0.23±0.01^{b}	0.07±0.01^{c}
	山奈酚-3-O-芸香糖苷	3.32±0.03^{a}	3.01±0.02^{a}	2.18±0.07^{b}	2.39±0.11^{b}
	6-甲氧基山奈酚-3-O-芸香糖苷	5.73±0.04^{b}	6.89±0.01^{a}	2.85±0.07^{c}	2.41±0.07^{d}
	水仙苷	5.82±0.03^{b}	6.84±0.01^{a}	2.87±0.06^{c}	2.53±0.06^{d}
	总量	80.49±6.61^{a}	45.78±3.02^{b}	34.16±2.03^{c}	44.61±3.81^{b}
酚酸类 /(mg/kg)	绿原酸	0.70±0.081^{a}	0.42±0.03^{c}	0.54±0.01^{b}	0.27±0.03^{d}
	4-羟基苯甲酸	1.14±0.20^{a}	0.52±0.02^{b}	1.05±0.06^{a}	0.35±0.05^{b}
	咖啡酸	0.73±0.01^{a}	0.70±0.03^{a}	0.68±0.08^{a}	0.56±0.06^{b}
	对香豆酸	17.34±0.31^{a}	11.32±0.2^{c}	13.15±0.62^{b}	6.94±0.22^{d}
	阿魏酸	7.99±0.20^{a}	4.34±0.32^{b}	4.29±0.22^{b}	4.47±0.21^{b}
	异阿魏酸	1.48±0.09^{a}	0.89±0.02^{b}	0.89±0.01^{b}	0.73±0.04^{c}
	总量	29.38±0.32^{a}	18.19±0.51^{c}	20.59±0.50^{b}	13.32±0.52^{d}
类胡萝卜素 /(mg/100 g)	玉米黄素	0.07±0.01^{a}	0.02±0.01^{b}	0.02±0.01^{b}	0.02±0.01^{b}
	β-胡萝卜素	0.17±0.02^{a}	0.08±0.02^{b}	0.05±0.01^{b}	0.06±0.01^{b}
	β-隐黄素棕榈酸酯	0.87±0.10^{a}	0.59±0.03^{b}	0.51±0.02^{b}	0.41±0.03^{c}
	玉米黄素双棕榈酸酯	2.17±0.02^{a}	1.96±0.20^{a}	1.74±0.06^{b}	0.89±0.09^{c}
	总量	3.28±0.30^{a}	2.48±0.30^{b}	2.32±0.04^{b}	1.28±0.20^{c}
甜菜碱 /(g/100 g)	甜菜碱	0.16±0.02^{c}	0.24±0.01^{b}	0.28±0.02^{a}	0.21±0.01^{b}

注: 同行不同小写字母表示差异显著(P<0.05), 表 2~3 同。

酚酸总量分别在红寺堡产区和中宁产区达到最高和最低，含量为 29.38 mg/kg 和 13.32 mg/kg。6 种酚酸类物质中，绿原酸含量最低(0.27~0.70 mg/kg)，对香豆酸含量最高(6.94~17.34 mg/kg)。酚酸类物质中绿原酸、对香豆酸在 4 个产区具有显著差异。从不同产区宁杞 1 号枸杞中 6 种酚酸类物质总量来看，红寺堡产区枸杞的 6 种酚酸类物质显著高于其他产区枸杞。

红寺堡的类胡萝卜总量为 3.28 mg/100 g，为 4 个产区最高。玉米黄素含量最低(0.02~0.07 mg/100 g)，玉米黄素双棕榈酸酯作为类胡萝卜素的主要成分，其含量最高(0.89~2.17 mg/100 g)。红寺堡产区中玉米黄素、β-胡萝卜素和 β-隐黄素棕榈酸酯与其他 3 个产区具有显著差异，玉米黄素双棕榈酸酯在大武口和中宁产区具有显著差异。从不同产区“宁杞 1 号”枸杞中 4 种类胡萝卜素总量来看，红寺堡产区枸杞的 4 种类胡萝卜素显著高于其他产区枸杞。

甜菜碱含量在大武口产区和红寺堡产区达到最高和最低，含量为 0.28 g/100 g 和 0.16 g/100 g。甜菜碱在园林场和中宁产区含量分别为 0.24 g/100 g 和 0.21 g/100 g。甜菜碱在红寺堡产区和大武口产区具有显著差异(P<0.05)，园林场产区和中宁产区不具有显著差异(P>0.05)。

2.1.2 宁杞 7 号

采集红寺堡、大武口、中宁、平罗、园林场的宁杞 7 号枸杞样品，对不同产区的宁杞 7 号中的酚类物质进行测定和方差分析。结果见表 2。

宁杞 7 号中黄酮总量为 34.09~72.36 mg/kg，芦丁含量为 22.53~51.70 mg/kg。异槲皮苷和槲皮素-7-O-葡萄糖苷的含量最低(0.03~0.18 mg/kg)。山奈酚-3-O-芸香糖苷的含量为 4.91~8.84 mg/kg; 6-甲氧基山奈酚-3-O-芸香糖苷含量为 2.53~5.81 mg/kg; 水仙苷含量为 2.61~5.83 mg/kg。山奈酚-3-O-芸香糖苷在红寺堡、大武口和中宁 3 个产区具有显著差异(P<0.05)，6-甲氧基山奈酚-3-O-芸香糖苷和水仙苷在红寺堡、中宁和平罗 3 个产区具有显著差异(P<0.05)。从不同产区“宁杞 7 号”枸杞中 6 种黄酮类物质总量来看，红寺堡产区枸杞的 6 种黄酮类物质显著高于其他产区枸杞。黄酮总量在 5 个产区具有显著差异。

酚酸总量在红寺堡和平罗产区达到最高和最低，含量为 52.29 mg/kg 和 16.97 mg/kg。6 种酚酸类物质中咖啡酸含量最低(0.46~0.84 mg/kg)，对香豆酸含量最高(11.47~42.53 mg/kg)。其他酚酸含量在 0.29~5.92 mg/kg 之间。酚酸类物质中绿原酸在红寺堡、大武口和中宁产区具有显著差异，

表 2 不同产区宁杞 7 号枸杞中酚类物质含量

Table 2 Content of phenolic substances in Ningqi No.7 *Lycium barbarum* from different production areas

指标		产区				
		红寺堡	大武口	中宁	平罗	园林场
黄酮类/(mg/kg)	芦丁	51.70±0.01^{a}	36.46±0.07^{b}	22.53±0.09^{c}	35.94±0.01^{b}	23.53±0.03^{c}
	异槲皮苷	0.11±0.09^{a}	0.10±0.01^{a}	0.09±0.01^{a}	0.04±0.01^{b}	0.03±0.01^{b}
	槲皮素-7-O-葡萄糖苷	0.11±0.09^{b}	0.09±0.01^{b}	0.18±0.04^{a}	0.05±0.01^{b}	0.08±0.01^{b}
	山奈酚-3-O-芸香糖苷	8.84±0.09^{a}	7.74±0.02^{b}	5.79±0.03^{c}	5.10±0.05^{d}	4.91±0.01^{d}
	6-甲氧基山奈酚-3-O-芸香糖苷	5.81±0.20^{a}	2.92±0.06^{c}	3.61±0.10^{b}	2.53±0.09^{d}	2.87±0.07^{c}
	水仙苷	5.83±0.01^{a}	2.98±0.06^{c}	3.78±0.02^{b}	2.61±0.01^{d}	3.01±0.01^{c}
	总量	72.36±0.70^{a}	50.28±0.90^{b}	35.98±1.40^{c}	46.27±1.58^{b}	34.09±0.12^{c}
酚酸类/(mg/kg)	绿原酸	0.69±0.03^{c}	7.79±0.11^{b}	9.54±0.20^{a}	0.29±0.06^{d}	0.37±0.09^{d}
	4-羟基苯甲酸	1.40±0.08^{a}	1.24±0.01^{b}	0.66±0.08^{cd}	0.59±0.04^{d}	0.72±0.03^{c}
	咖啡酸	0.84±0.03^{a}	0.46±0.01^{c}	0.76±0.05^{a}	0.65±0.06^{b}	0.59±0.07^{b}
	对香豆酸	42.53±2.10^{a}	14.15±0.54^{c}	26.71±1.30^{b}	11.47±0.72^{c}	13.31±1.20^{c}
	阿魏酸	5.92±0.10^{a}	3.67±0.32^{c}	4.62±0.30^{b}	3.42±0.33^{c}	2.67±0.09^{d}
	异阿魏酸	0.90±0.09^{a}	0.93±0.01^{a}	0.70±0.06^{b}	0.55±0.01^{c}	0.38±0.06^{d}
	总量	52.29±0.23^{a}	28.25±1.01^{c}	42.98±1.60^{b}	16.97±0.75^{d}	18.04±1.20^{d}
类胡萝卜素/(mg/100 g)	玉米黄素	0.02±0.01^{b}	0.04±0.01^{a}	0.02±0.01^{b}	0.02±0.01^{b}	-
	β-胡萝卜素	0.10±0.01^{a}	0.08±0.01^{b}	0.09±0.01^{b}	0.06±0.01^{c}	0.03±0.01^{d}
	β-隐黄素棕榈酸酯	0.54±0.02^{a}	0.39±0.03^{b}	0.05±0.06^{a}	0.32±0.01^{c}	0.14±0.01^{d}
	玉米黄素双棕榈酸酯	2.43±0.11^{a}	1.69±0.02^{b}	1.56±0.05^{b}	1.11±0.10^{c}	0.20±0.05^{d}
	总量	3.10±0.13^{a}	2.19±0.06^{b}	2.21±0.11^{b}	1.51±0.10^{c}	0.38±0.05^{d}
甜菜碱/(g/100 g)	甜菜碱	0.21±0.10^{d}	0.33±0.01^{a}	0.30±0.03^{b}	0.27±0.01^{c}	0.21±0.01^{d}

注: -为未有具体数值。

在平罗和园林场产区不具有显著差异。4-羟基苯甲酸在红寺堡、大武口、平罗和园林场产区具有显著差异。大武口产区咖啡酸与其他产区具有显著差异, 其余 4 个产区不具有显著差异。对香豆酸在红寺堡和中宁产区具有显著差异, 在其余 3 个产区不具有显著差异。阿魏酸在红寺堡、中宁和园林场具有显著差异, 在大武口和平罗产区不具有显著差异。异阿魏酸在中宁、平罗和园林场具有显著差异, 在红寺堡和大武口产区不具有显著差异。从不同产区“宁杞 7 号”枸杞中 6 种酚酸类物质总量来看, 红寺堡产区枸杞的 6 种酚酸类物质显著高于其他产区枸杞。酚酸总量在红寺堡、大武口和中宁产区具有显著差异, 在平罗和园林场产区不具有显著差异。

类胡萝卜素总量在 0.38~3.10 mg/100 g 之间。玉米黄素含量最低(0.02~0.04 mg/100 g), 且在园林场产区未检出; 玉米黄素双棕榈酸酯含量最高(0.20~2.43 mg/100 g)。*β*-胡萝卜素和*β*-隐黄素棕榈酸酯含量分别为 0.03~0.10 mg/100 g 和 0.05~0.54 mg/100 g。玉米黄素在大武口与其他产区具有显著差异, 其余产区不具有显著差异。*β*-胡萝卜素在红寺堡、平罗和园林场产区具有显著差异, 在大武口和中宁产区不具有显著差异。*β*-隐黄素棕榈酸酯在大武口、平罗和园林场产区具有显著差异, 在红寺堡和中宁产区不具有显著差异。玉米黄素双棕榈酸酯在红寺堡、平罗和园林场产区具有显著差异, 在大武口和中宁产区不具有显著差异。从不同产区宁杞 7 号枸杞中 4 种类胡萝卜素来看, 红寺堡产区枸杞的 4 种类胡萝卜素总量显著高于其他产区枸杞。类胡萝卜总量在红寺堡、平罗和园林场产区具有显著差异。

甜菜碱含量在大武口产区最高(0.33 g/100 g), 红寺堡和园林场产区最低(0.21 g/100 g)。中宁产区的含量为 0.30 g/100 g, 平罗产区含量为 0.27 g/100 g。甜菜碱在大武口、中宁和平罗产区具有显著差异, 在红寺堡和园林场产区不具有显著差异。

2.1.3　科杞 608 号

采集园林场、中宁、盐池的科杞 608 号枸杞样品, 对不同产区的科杞 608 号中的酚类物质进行测定和方差分析。结果见表 3。

科杞 608 号枸杞的黄酮总量为 25.24~53.83 mg/kg, 芦丁含量在黄酮类物质中最高(18.92~40.89 mg/kg)。异槲皮苷和槲皮素-7-O-葡萄糖苷的含量最低(0.03~0.41 mg/kg)。山奈酚-3-O-芸香糖苷的含量为 1.20~4.42 mg/kg; 6-甲氧基山奈酚-3-O-芸香糖苷含量为 1.89~4.08 mg/kg; 水仙苷含量为 1.97~4.36 mg/kg。芦丁、山奈酚-3-O-芸香糖苷、6-甲氧基山奈酚-3-O-芸香糖苷和水仙苷在 3 个产区均具有显著差异(P<0.05), 异槲皮苷和槲皮素-7-O-葡萄糖苷在 3 个产区不具有显著差异(P>0.05)。从不同产区科杞 608 号枸杞中 6 种黄酮类物质来看, 盐池产区枸杞的 6 种黄酮类物质总量显著高于其他产区枸杞。黄酮总量在 3 个产区具有显著差异。

酚酸总量在 14.87~26.25 mg/kg 之间。6 种酚酸类物质中咖啡酸(0.48~0.92 mg/kg)和绿原酸(0.34~1.40 mg/kg)含量最低, 对香豆香含量最高(9.45~10.20 mg/kg)。阿魏酸含量在中宁产区高达 11.95 mg/kg; 4-羟基苯甲酸含量为

表 3　不同产区科杞 608 枸杞中酚类物质含量

Table 3　Content of phenolic substances in Keqi No.608 *Lycium barbarum* from different production areas

指标		产区		
		园林场	中宁	盐池
黄酮类/(mg/kg)	芦丁	18.92±0.30^{c}	28.16±0.05^{b}	40.89±0.03^{a}
	异槲皮苷	0.03±0.01^{a}	0.04±0.001^{a}	0.04±0.05^{a}
	槲皮素-7-O-葡萄糖苷	0.04±0.01^{a}	0.04±0.01^{a}	0.41±0.01^{a}
	山奈酚-3-O-芸香糖苷	2.02±0.10^{b}	1.20±0.04^{c}	4.42±0.06^{a}
	6-甲氧基山奈酚-3-O-芸香糖苷	2.52±0.21^{b}	1.89±0.03^{c}	4.08±0.02^{a}
	水仙苷	2.48±0.20^{b}	1.97±0.05^{c}	4.36±0.02^{a}
	总量	25.24±2.01^{c}	30.34±3.30^{b}	53.83±1.12^{a}
酚酸类/(mg/kg)	绿原酸	0.37±0.02^{b}	1.40±0.52^{a}	0.34±0.06^{b}
	4-羟基苯甲酸	1.44±0.12^{a}	1.49±0.03^{a}	0.54±0.02^{b}
	咖啡酸	0.65±0.02^{b}	0.92±0.03^{a}	0.48±0.01^{c}
	对香豆酸	9.45±0.41^{a}	9.56±0.61^{a}	10.20±0.23^{a}
	阿魏酸	3.81±0.32^{b}	11.95±0.24^{a}	2.75±0.12^{c}
	异阿魏酸	0.71±0.03^{b}	1.54±0.02^{a}	0.56±0.04^{c}
	总量	16.43±0.23^{b}	26.25±1.02^{a}	14.87±1.61^{c}
类胡萝卜素/(mg/100 g)	玉米黄素	0.01±0.00^{c}	0.04±0.01^{a}	0.01±0.00^{b}
	β-胡萝卜素	0.04±0.01^{b}	0.09±0.01^{a}	0.08±0.01^{a}
	β-隐黄素棕榈酸酯	0.22±0.04^{b}	0.28±0.08^{b}	0.05±0.05^{a}
	玉米黄素双棕榈酸酯	5.08±0.32^{a}	3.78±0.21^{a}	3.69±0.20^{a}
	总量	1.96±0.31^{a}	1.67±0.31^{a}	1.80±0.20^{a}
甜菜碱/(g/100 g)	甜菜碱	0.22±0.01^{c}	0.47±0.04^{a}	0.29±0.03^{b}

0.54~1.49 mg/kg; 异阿魏酸含量为 0.56~1.54 mg/kg。酚酸类物质中绿原酸在中宁产区与其他产区具有显著差异, 在园林场和盐池产区不具有显著差异。4-羟基苯甲酸在盐池产区具有显著差异, 在园林场和中宁产区不具有显著差异。咖啡酸、阿魏酸、异阿魏酸和酚酸总量在 3 个产区具有显著差异。对香豆酸在 3 个产区不具有显著差异。从不同产区宁杞 7 号枸杞中 6 种酚酸类物质总量来看, 中宁产区枸杞的 6 种酚酸类物质显著高于其他产区枸杞。

类胡萝卜素总量为 1.67~1.96 mg/100 g。玉米黄素含量最低(0.01~0.04 mg/100 g); 玉米黄素双棕榈酸酯含量最高(3.69~5.08 mg/100 g)。β-胡萝卜素和 β-隐黄素棕榈酸酯含量分别为 0.04~0.09 mg/100 g, 0.05~0.28 mg/100 g。玉米黄素在 3 个产区具有显著差异。园林场产区的 β-胡萝卜素与其他产区具有显著差异, 在中宁和盐池产区不具有显著差异。β-隐黄素棕榈酸酯在盐池产区具有显著差异, 在园林场和中宁产区不具有显著差异。玉米黄素双棕榈酸酯在 3 个产区不具有显著差异。

甜菜碱含量在中宁产区最高 0.47 g/100 g, 园林场产区为 0.22 g/100 g, 盐池产区为 0.29 g/100 g。甜菜碱在 3 个产区具有显著差异。

2.2 不同产区枸杞判别模型构建

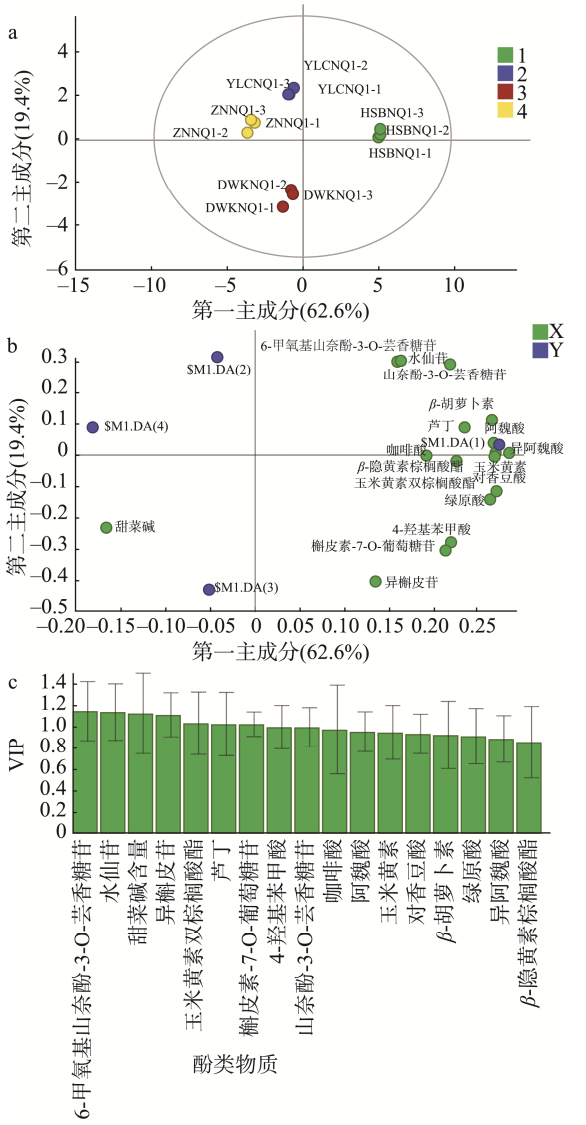
2.2.1 宁杞 1 号判别模型

为了解黄酮、酚酸、类胡萝卜和甜菜碱在不同产区枸杞鉴别中的可行性, 采用 OPLS-DA 分析, 构建宁杞 1 号枸杞的不同产区鉴别模型。结果见图 1, 图 1a 的解释变量(R^2X)和预测能力(R^2Y)分别为 0.971 和 0.988, 说明模型分类良好, 预测残差平方和(Q^2)为 0.962, 对不同产区的宁杞 1 号枸杞具有良好的预测能力。根据 OPLS-DA 的判别结果, 各产区的枸杞能明显的区分开。园林场产区在第二象限; 中宁产区在第二、第三象限的坐标轴上; 大武口产区在第三象限; 红寺堡产区在第一、第四象限的坐标轴上。从表 4 可知, 红寺堡、园林场、大武口和中宁 4 个产区的宁杞 1 号枸杞正确判别率为 100%。

为进一步找出对结果分型其贡献作用的变量, 得到 OPLS-DA 模型的 VIP 图(图 1c)。选择投影 VIP 值大于 1 作为判定标准, VIP 值越大, 变量在不同产区间差异越显著。从图 1c 可知, 6-甲氧基山奈酚-3-O-芸香糖苷(1.143)、水仙苷(1.135)、甜菜碱(1.122)、异槲皮苷(1.109)、玉米黄素双棕榈酸酯(1.030)、芦丁(1.023)、槲皮素-7-O-葡萄糖苷(1.022)。7 个指标的 VIP 值大于 1, 因此这些指标可作为区分不同产区的宁杞 1 号枸杞的重要指标。

2.2.2 宁杞 7 号判别模型

宁杞 7 号枸杞鉴别结果见图 2, 图 2a 的解释变量(R^2X)和预测能力(R^2Y)分别为 0.975 和 0.975, 说明模型分类良好, 预测残差平方和(Q^2)为 0.948, 对不同产区的宁杞 7 号枸杞具有良好的预测能力。根据 OPLS-DA 的判别结果, 各产区的枸杞能明显的区分开。大武口和中宁产区在第一象限; 平罗和园林场产区在第三象限; 红寺堡产区在第四象限。从表 5 可知, 红寺堡、大武口、中宁、平罗和园林场 5 个产区的宁杞 7 号枸杞正确判别率为 100%。



注: a. 得分图, 红寺堡产区(HSBNQ); 大武口产区(DWKNQ); 中宁产区(ZNNQ); 园林场产区(YLCNQ); b. 载荷图, 其中以字母命名为系统内置; c. 变量重要程度(variable importance in the projection, VIP)图。下同。

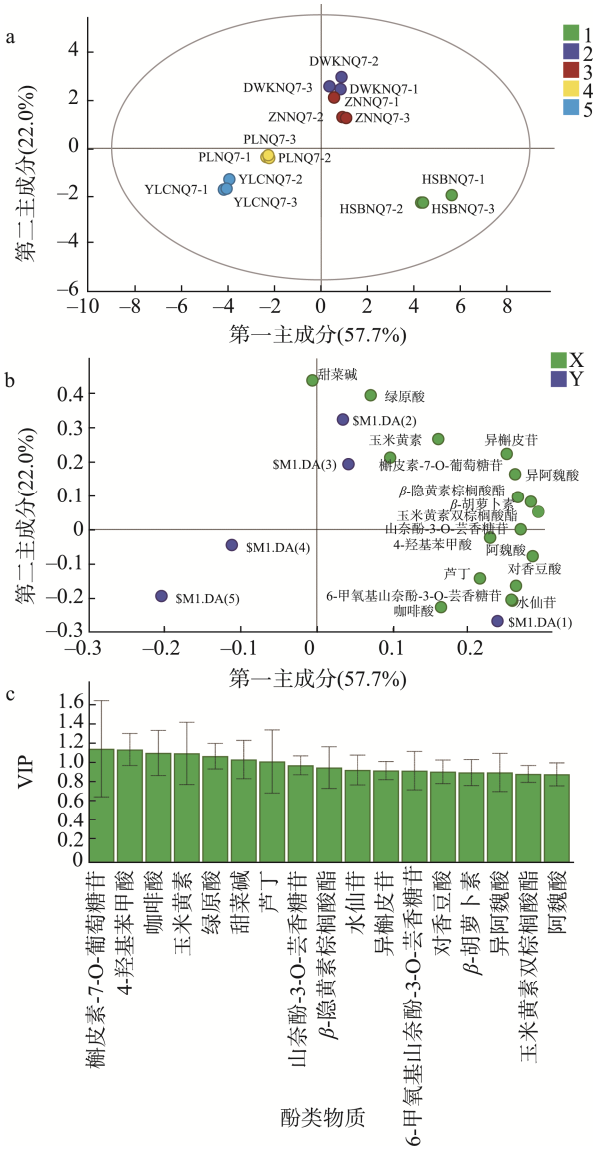
图 1 基于 OPLS-DA 的不同产区宁杞 1 号枸杞的判别分析

Fig.1 Discriminant analysis of Ningqi No.1 *Lycium barbarum* from different production areas based on OPLS-DA

表 4 基于 OPLS-DA 的不同产区宁杞 1 号枸杞分类结果(n=3)

Table 4 Classification results of Ningqi No.1 *Lycium barbarum* from different production areas based on OPLS-DA (n=3)

产区	红寺堡	园林场	大武口	中宁	正确判别率/%
红寺堡	3	0	0	0	100
园林场	0	3	0	0	100
大武口	0	0	3	0	100
中宁	0	0	0	3	100



注：平罗产区(PLNQ)。

图 2　基于 OPLS-DA 的不同产区宁杞 7 号枸杞的判别分析

Fig.2　Discriminant analysis of Ningqi No.7 *Lycium barbarum* from different production areas based on OPLS-DA

表 5　基于 OPLS-DA 的不同产区宁杞 7 号枸杞分类结果(n=3)

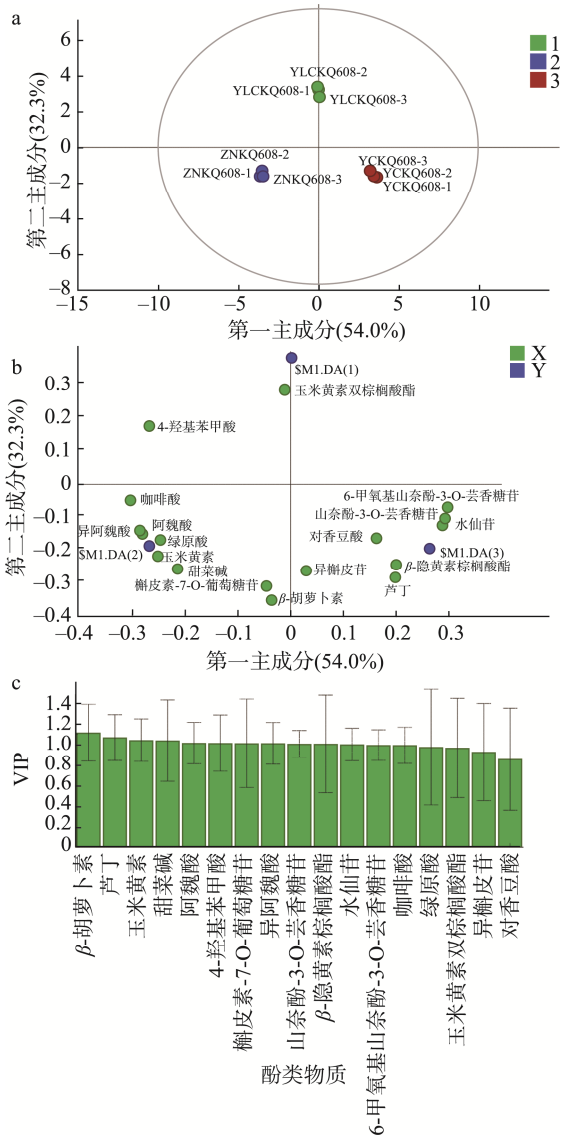
Table 5　Classification results of Ningqi No.7 *Lycium barbarum* from different production areas based on OPLS-DA (n=3)

产区	红寺堡	大武口	中宁	平罗	园林场	正确判别率/%
红寺堡	3	0	0	0	0	100
大武口	0	3	0	0	0	100
中宁	0	0	3	0	0	100
平罗	0	0	0	3	0	100
园林场	0	0	0	0	3	100

为进一步找出对结果分型其贡献作用的变量，得到 OPLS-DA 模型的 VIP 图(图 2c)。从图 2c 可知，槲皮素-7-O-葡萄糖苷(1.151)、4-羟基苯甲酸(1.144)、咖啡酸(1.109)、玉米黄素(1.105)、绿原酸(1.076)、甜菜碱(1.043)、芦丁(1.023)。8 个指标的 VIP 值大于 1，因此这些指标可作为区分不同产区的宁杞 7 号枸杞的重要指标。

2.2.3　科杞 608 号判别模型

科杞 608 号枸杞鉴别结果见图 3，图 3a 的解释变量(R^2X)和预测能力(R^2Y)分别为 0.973 和 0.996，说明模型分类良好，预测残差平方和(Q^2)为 0.981，对不同产区的科杞 608 号枸杞具有良好的预测能力。根据 OPLS-DA 的判别结果，各产区的枸杞能明显的区分开。园林场产区在第一、第二象限间的坐标轴上；中宁产区在第三象限；盐池产区在第四象限。从表 6 可知，园林场、中宁和盐池 3 个产区的科杞 608 号枸杞正确判别率为 100%。



注：园林场产区(YLCKQ)；中宁产区(ZNKQ)；盐池产区(YCKQ)。

图 3　基于 OPLS-DA 的不同产区科杞 608 号枸杞的判别分析

Fig.3　Discriminant analysis of Keqi No.608 *Lycium barbarum* from different production areas based on OPLS-DA

表 6 基于 OPLS-DA 的不同产区科杞 608 号枸杞分类结果(*n*=3)
Table 6 Classification results of Keqi No.608 *Lycium barbarum* from different production areas based on OPLS-DA (*n*=3)

产区	园林场	中宁	盐池	正确判别率/%
园林场	3	0	0	100
中宁	0	3	0	100
盐池	0	0	3	100

为进一步找出对结果分型其贡献作用的变量，得到 OPLS-DA 模型的 VIP 图(图 3c)。从图 3c 可知，*β*-胡萝卜素(1.112)、芦丁(1.064)、玉米黄素(1.038)、甜菜碱(1.035)、阿魏酸(1.011)、4-羟基苯甲酸(1.010)、槲皮素-7-O-葡萄糖苷(1.008)、异阿魏酸(1.007)、山奈酚-3-O-芸香糖苷(1.003)、*β*-隐黄素棕榈酸酯(1.002)。10 个指标的 VIP 值大于 1，因此这些指标可作为区分不同产区的科杞 608 号枸杞的重要指标。

3 讨 论

本研究以不同产区宁杞 1 号、宁杞 7 号和科杞 608 号 3 个品种的枸杞为研究对象，通过所含黄酮类、酚酸类、类胡萝卜素和甜菜碱物质的差异性进行分析。

黄酮类物质中芦丁和槲皮素-7-O-葡萄糖苷在 3 个品种中均为关键差异物质，可能是由于黄酮代谢通路对产区环境响应敏感导致[26–27]。红寺堡产区中黄酮含量均较高，这与干旱(强光)诱导黄酮合成有关。酚酸类物质中宁杞 1 号枸杞中的对香豆酸含量最高，而科杞 608 号枸杞以阿魏酸、异阿魏酸为标志物，这可能因品种中苯丙氨酸解氨酶的途径偏好不同[28]。类胡萝卜素中玉米黄素及其酯类(双棕榈酸酯)在 3 个品种中均为关键物质，表明类胡萝卜素代谢对光强的响应保守[29–30]。科杞 608 号枸杞中 *β*-胡萝卜素贡献显著，其余 2 个品种更依赖玉米黄素，可能因科杞 608 号枸杞中 *β*-胡萝卜素羟化酶活性较低导致。甜菜碱在所有品种中均具产区差异，证实其作为渗透调节物质对逆境(盐碱、干旱)的普遍响应。宁杞 1 号枸杞中在大武口产区含量最高，而科杞 608 号枸杞在中宁产区更高，可能与品种耐盐阀值或土壤 Na^+浓度差异有关。

4 结 论

本研究考察了宁夏不同产区的 3 个品种枸杞酚类物质的差异性，结果发现不同产区的枸杞间酚类物质含量均存在显著差异，酚类物质在红寺堡产区中达到最高。本研究建立了基于 OPLS-DA 判别分析方法的不同产区枸杞鉴别模型，其整体正确判别率为 100%。本研究结果有助于建立基于不同产区的品质数据库，为有效区分不同产区的枸杞提供数据支撑。以期为枸杞资源的合理利用、合理分配及其产品开发提供数据支撑。

参考文献

[1] 刘德帅, 袁苗, 冯美, 等. 不同采收期宁夏枸杞果实品质差异及抗氧化特性分析[J]. 植物生理学报, 2024, 60(5): 837–849.
LIU DS, YUAN M, FENG M, *et al*. Study on the quality differences and antioxidant properties of *Lycium barbarum* fruits at different harvesting periods [J]. Plant Physiology Journal, 2024, 60(5): 837–849.

[2] 孙志刚. 宁夏枸杞药理研究进展[J]. 西北药学杂志, 2001(3): 133–135.
SUN ZG. Research progress on the pharmacology of Ningxia wolfberry [J]. Northwest Pharmaceutical Journal, 2001(3): 133–135.

[3] 魏雪松, 王海洋, 孙智轩, 等. 宁夏枸杞化学成分及其药理活性研究进展[J]. 中成药, 2018, 40(11): 2513–2520.
WEI XS, WANG HY, SUN ZX, *et al*. Research progress on the chemical components and pharmacological activities of Ningxia wolfberry [J]. Chinese Traditional Patent Medicine, 2018, 40(11): 2513–2520.

[4] ZHANG QY, CHEN WW, ZHAO JH, *et al*. Functional constituents and antioxidant activities of eight Chinese native Goji genotypes [J]. Food Chemistry, 2016, 200(1): 230–236.

[5] 胡明珍, 刘慧燕, 潘琳, 等. 基于非靶向代谢组学分析副干酪乳杆菌发酵枸杞汁各阶段代谢差异[J]. 食品科学, 2022, 43(8): 142–149.
HU MZ, LIU HY, PAN L, *et al*. On-targeted metabolomics analysis of differential metabolite profiles of goji juice fermented by *Lactobacillus paracasei* [J]. Food Science, 2022, 43(8): 142–149.

[6] KULCZYŃSKI B, GRAMZA-MICHAŁOWSKA ANNA. Goji berry (*Lycium barbarum*): Composition and health effects-a review [Z]. 2016.

[7] JELENA J, JASNA MB, GORDANA S, *et al*. Bioactive compounds and antioxidant properties of Goji fruits (*Lycium barbarum* L.) [J]. Cultivated in Serbia, Journal of the American College of Nutrition, 2016, 35(8): 692–698.

[8] 汤丽华, 马雪梅, 张瑶, 等. 基于非靶向代谢组学分析不同品种宁夏枸杞差异性代谢物[J]. 食品安全质量检测报, 2022, 13(24): 8083–8090.
TANG LH, MA XM, ZHANG Y, *et al*. Differential metabolites analysis on different varieties of *Lycium barbarum* L. based on non-targeted metabolomics [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(24): 8083–8090.

[9] VIDOVIĆ BB, MILINČIĆD D, MARČETIĆ MD, *et al*. Health benefits and applications of Goji berries in functional food products development: A review [J]. Antioxidants, 2022, 11: 248.

[10] 汤丽华, 张瑶, 马雪梅, 等. 基于UPLC-QE-Orbitrap-MS的宁夏枸杞鲜果和枸杞干果差异性代谢物分析[J]. 食品工业科技, 2023, 44(8): 9–16.
TANG LH, ZHANG Y, MA XM, *et al*. Analysis of differentially expressed metabolites of fresh and dried wolfberry fruit in ningxia based on UPLC-QE-Orbitrap-MS [J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(8): 9–16.

[11] DONNO D, BECCARO GL, MELLANO MG, *et al*. Goji berry fruit (*Lycium* spp.): Antioxidant compound fingerprint and bioactivity evaluation [J]. Functional Foods, 2014, 18: 1070–1085.

[12] 刘梦瑶. 宁夏黄果枸杞酚类物质分析及抗氧化、体外消化和发酵特性研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
LIU MY. Phenolic analysis, antioxidant activity, *in vitro* digestion and fermentation characteristics of *Lycium barbarum* L. var. auranticarpum K. F. Ching [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2021.

[13] WU S, SHEN D, WANG R, *et al*. Phenolic profiles and antioxidant activities of free, esterified and bound phenolic compounds in walnut kernel [J]. Food Chemistry, 2021, 350: 129217.

[14] 刘予煊, 程焕, 叶兴乾, 等. 不同菌株发酵枸杞汁中生物活性物质与香气组成物质含量变化[J]. 浙江农业学报, 2020, 32(3): 499–509.
LIU YX, CHENG H, YE XQ, *et al*. Changes of bioactive compounds and volatile compounds contents in goji juice fermented by different probiotics [J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2020, 32(3): 499–509.

[15] 王琴, 刘凤兰, 毛金梅, 等. '黑杞一号'与野生黑果枸杞的酚类物质分析[J]. 西北植物学报, 2019, 39(10): 1835–1841.

WANG Q, LIU FL, MAO JM, *et al*. Analysis of phenolic compounds of 'Heiqi No. 1'and Wils *Lycium ruthenicum* Murr [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2019, 39(10): 1835–1841.

[16] 宋靖仪, 张莹予, 刘钰, 等. 谷子(小米)中的酚类物质: 组成、生物活性及在加工过程中的变化[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2025, 45(6): 132–140.
SONG JY, ZHANG YY, LIU Y, *et al.* Phenolic compounds in *Setaria italica* (L.): Composition, bioactivity, and changes during processing [J]. Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition), 2025, 45(6): 132–140.

[17] 娄凤华, 黄国培, 杨军, 等. 超临界流体色谱-质谱法测定生姜中 4 种姜酚类物质[J]. 分析测试学报, 2025, 44(5): 913–918.
LOU FH, HUANG GP, YANG J, *et al*. Determination of four gingerol compounds in ginger by supercritical fluid chromatography-mass spectrometry [J]. Journal of Instrumental Analysis, 2025, 44(5): 913–918.

[18] 肖欣, 龙富, 李志荣, 等. LC-MS/MS 法同时测定不同产地木瓜中 14 种酚类成分含量及其抗氧化活性分析[J]. 现代食品科技, 2025, 41(8): 286–294.
XIAO X, LONG F, LI ZR, *et al*. Simultaneous determination of 14 kinds of phenolic compounds in *Chaenomeles fructus* by LC-MS/MS and analysis of their antioxidant activity [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(8): 286–294.

[19] WANG Y, GAO Y, DING H, *et al*. Subcritical ethanol extraction of flavonoids from *Moringa oleifera* leaf and evaluation of antioxidant activity [J]. Food Chemistry, 2017, 218: 152–158.

[20] 张文艳, 林宇琪, 刘宏莹, 等. 枸杞中黄酮类化合物降糖活性研究[J]. 黑龙江科学, 2022, 13(16): 1–3, 18.
ZHANG WY, LIN YQ, LIU HY, *et al*. Study on the hypoglycemic activity of flavonoids from *Lycium barbarum* [J]. Heilongjiang Science, 2022, 13(16): 1–3, 18.

[21] 周婷, 田晓菊, 周桂珍, 等. 基于超高效液相色谱-离子阱-静电场轨道阱质谱的代谢组学方法分析枸杞酒发酵前后酚类物质的变化[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(21): 262–268.
ZHOU T, TIAN XJ, ZHOU GZ, *et al*. Changes of phenolic substances in fermented *Lycium barbarum* wine analyzed by UPLC-LTQ-Orbitrap-MS [J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(21): 262–268.

[22] 陈浩, 迟明, 李莹, 等. 基于非靶向代谢组学的特色浆果白刺和黑枸杞关键特征成分分析[J]. 食品科学, 2025, 46(11): 243–252.
CHEN H, CHI M, LI Y, *et al*. Analysis of key characteristic components of *Nitraria tangutorum* Bobrov and black *Lycium barbarum* berries based on non-targeted metabolomics [J]. Food Science, 2025, 46(11): 243–252.

[23] 李曼祎, 沈天辰, 刘春凤, 等. 不同产地枸杞品质差异研究[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(24): 56–63.
LI MY, SHEN TC, LIU CF, *et al*. Research on the quality of *Lycium barbarumfrom* different production areas [J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(24): 56–63.

[24] 王静, 王杰, 阿娜尔, 等. 枸杞类胡萝卜素指纹图谱的建立及其抗氧化活性谱效关系研究[J]. 中国药房, 2022, 33(5): 575–578.
WANG J, WANG J, A NER, *et al*. Establishment of carotenoid fingerprint in *Lycium barbarum* and study on its antioxidant activity spectrum-effect relationship [J]. China Pharmacy, 2022, 33(5): 575–578.

[25] 杨春霞. 高效液相色谱法测定枸杞中 9 种酚酸化合物含量[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(20): 148–153.
YANG CX. Determination of nine kinds of phenolic acids in *Lycium barbarum* L. using high-performance liquid hromatography [J]. Food Research and Development, 2021, 42(20): 148–153.

[26] 孙霞芝, 马瑞雪, 杨超, 等. 基于蛋白组学分析不同产地"宁杞 1 号"枸杞黄酮类化合物差异研究[J/OL]. 中国食品学报, 1-12. [2025-06-18]. https://link.cnki.net/urlid/11.4528.TS.20241111.1714.005
SUN XZ, MA RX, YANG C, *et al*. Study on the difference of biosynthesis of flavonoids in "Ningqi No.1" Goji berry from different regions based on proteomic analysis [J/OL]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 1-12. [2025-06-18]. https://link.cnki.net/urlid/11.4528.TS.20241111.1714.005

[27] 贾西贝. 基于 WGCNA 对不同果色枸杞果实类黄酮代谢调控差异研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2024.
JIA XB. Differential regulation of flavonoid metabolism in *Lycium* berries with different fruit colors based on WGCNA [D]. Lanzhou: Gansun Agricultural University, 2024.

[28] 马茜, 张渌淘, 禄璐, 等. 宁夏枸杞酚类及其衍生物的研究与应用进展[J]. 食品科学, 2024, 45(17): 316–325.
MA Q, ZHANG LT, LU L, *et al*. Progress in research and application of phenols and their derivatives from *Lycium barbarum* L. [J]. Food Science, 2024, 45(17): 316–325.

[29] 沈齐若男. 枸杞玉米黄素绿色高效提取及其抗皮肤光损伤作用研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2022.
SHEN QRN. Green and efficient extraction of zeaxanthin from *Lycium barbarum* L. and its anti-photodamage effect on skin [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2022.

[30] 尹跃. LbaBCH1 及其调控因子 LbaMYB44 在枸杞和番茄果实类胡萝卜素积累中的功能研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2024.
YIN Y. Function characterizations of LbaBCH1 and its regulator LbaMYB44 in carotenoid accumulation in *Lycium barbarumand* tomato fruits [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2024.

(责任编辑: 韩晓红　于梦娇)