

引用格式: 石翠, 孔东升, 吴尧, 等. 黑果枸杞果实不同表型特征的活性物质差异[J]. 西北植物学报, 2024, 44(12): 1946-1953. [SHI C, KONG D S, WU Y, et al. Differences of active substances in different fruit phenotypes of *Lycium ruthenicum* Murr. [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2024, 44(12): 1946-1953.] DOI: 10.7606/j.issn.1000-4025.20240339

黑果枸杞果实不同表型特征的活性物质差异

石 翠^{1,2}, 孔东升^{1,3*}, 吴 尧⁴, 包景伟⁴

(1 河西学院 甘肃省黑果枸杞保护及开发利用 2011 协同创新中心, 甘肃张掖 734000; 2 甘肃农业大学 林学院, 兰州 730070; 3 甘肃省高校河西走廊特色资源利用省级重点实验室, 甘肃张掖 734000; 4 河西学院 农业生态工程学院, 甘肃张掖 734000)

摘 要 【目的】了解黑果枸杞果实表型变异及表型与活性物质的关联, 为其资源开发利用提供参考。【方法】以黑果枸杞果实为试材, 提取 23 个表型特征, 并测定其活性物质进行分析。【结果】(1) 表型特征圆度、相关性值和熵值变异系数较小, 个体间差异小, 稳定性高, 面积、黄蓝通道值、红绿通道值、对比度和角二阶矩值变异系数较大。(2) 活性物质含量变异系数均较大, 稳定性差, 选择潜力大。表型特征和活性物质间 143 对相关系数呈极显著水平 ($P < 0.01$), 20 对相关系数呈显著水平 ($P < 0.05$)。 (3) 主成分分析表明红度、绿度、蓝度、亮度、明度、灰度、周长、面积、长度、宽度、角二阶距和能量值特征向量值较高, 可作为其果实品质评价的重要参考因子。【结论】黑果枸杞果实有较大的选择潜力, 可通过表型特征判断活性物质含量, 试验结果可为果实品质评价及无损检测提供参考。

关键词 黑果枸杞; 表型特征; 活性物质; 果实品质

中图分类号 S567.19 文献标志码 A

Differences of active substances in different fruit phenotypes of *Lycium ruthenicum* Murr.

SHI Cui^{1,2}, KONG Dongsheng^{1,3*}, WU Yao⁴, BAO Jingwei⁴

(1 Gansu Province *Lycium ruthenicum* Murr. Protection and Development and Utilization of 2011 Collaborative Innovation Center, Hexi University, Zhangye, Gansu 734000, China; 2 Forestry College, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 3 Key Laboratory of Characteristic Resources Utilization in Hexi Corridor of Universities in Gansu Province, Zhangye, Gansu 734000, China; 4 Agricultural Ecological Engineering College, Hexi University, Zhangye, Gansu 734000, China)

Abstract [Objective] The aim was to understand the phenotypic variation of *Lycium ruthenicum* Murr. fruits and the correlation between phenotype and active substances, to provide reference for its resource development and utilization. [Methods] Taking *L. ruthenicum* as materials, 23 phenotypic characteristics were extracted, and the active substances were determined and analyzed. [Results] (1) The coefficient of variation of roundness, correlation value and entropy of phenotypic characteristics was small, the difference between individuals was small, and the stability was high. The coefficient of variation of area, yellow-blue channel value, red-green channel value, contrast and angular second moment value was large. (2) The coefficient of variation of active substance content was large, the stability was poor, and the selection potential was large. The correlation coefficients between phenotypic characteristics and active substances were extremely significant in 143 pairs ($P < 0.01$) and significant in 20 pairs ($P < 0.05$). (3) Principal component analysis showed that the characteristic vector values of red, green, blue, brightness, lightness, gray, perimeter, area, length, width, angular distance, and energy value were higher, which

收稿日期: 2024-06-12; 修改稿收到日期: 2024-07-26

基金项目: 甘肃省高等学校产业支撑项目(2021CYZC-56)

作者简介: 石 翠(1996-), 女, 在读硕士研究生, 主要从事植物资源利用研究。E-mail: 2968878783@qq.com

* 通信作者: 孔东升, 博士, 教授, 主要从事植物生态植被恢复研究。E-mail: Kongdsh@sohu.com

could be used as important reference factors for fruit quality evaluation. [Conclusion] The fruits of *L. ruthenicum* have great potential for selection, and the content of active substances can be judged by phenotypic characteristics. These results provide reference for fruit quality evaluation and non-destructive testing.

Key words *Lycium ruthenicum*; phenotypic traits; active substances; fruit quality

果实品质主要由其外部表型特征和内部营养物质含量来评价,果实表型特征是林果产品品质好坏最直观、最简单的判断依据,但传统的果实营养成分的评价方式主要采用人工化验进行评价,化验过程费工费时、重复性较差、实时性不佳等^[1]。随着计算机信息技术的快速发展,利用机器视觉和图像处理方法,可准确、快速地获得具有内在联系的各种表型数据,通过人机学习结合统计学方法探究果实表型和活性物质的变异及表型与活性物质的关联机制,确定果实品质的评价因子,是 21 世纪现代化农业领域的重大革命^[2-3]。

黑果枸杞(*Lycium ruthenicum* Murr.)主要分布于中国西北干旱半干旱地区,是一种集经济和生态价值为一体的优良荒漠灌木,其紫黑色果实含有丰富的天然花色苷等有效活性物质,在营养、保健等方面具有广阔的市场前景^[4]。现阶段,计算机与图像处理技术相结合不仅能在表型上对植物外观进行识别和判定,也能对植物病虫害、植物果实营养成分和活性物质含量高低进行预测^[5]。Ruiz-Altisent 等^[6]对桃进行研究,发现近红外光谱在 450 nm 和 680 nm 波长条件下果实的反射率可分别反映类胡萝卜素和叶绿素含量,进而通过叶绿素含量的高低判定桃的成熟度;Pace 等^[7]采用图像分析方法确定了油桃外观颜色与其内部褐变的相关性;王家保等^[8]对荔枝的研究发现花色苷与果实着色指数极显著正相关,说明荔枝果皮呈现红色主要是液胞中花色苷的作用。Arslan 等^[9]应用近红外光谱建立了黑果枸杞干果粉末的花色苷、胡萝卜素和总酸预测模型;周志磊等^[10]应用傅里叶近红外光谱扫描不同产地的黑果枸杞果实,结合测定的理化指标,对其所含活性物质建立了预测模型,表明近红外光谱技术在黑果枸杞果实有效成分检测中具有良好的应用潜力。但黑果枸杞果实表型和活性物质的变异及二者的相关性鲜见报道。

该试验采用种子表型全自动化系统扫描提取黑果枸杞果实的形态、颜色和纹理 23 个表型特征,并对应测定活性物质花色苷、多酚和黄酮的含量。从计算机视觉和定量分析建模的方法探究黑果枸杞果实活性物质对其表型特征变异的响应关系,以期在黑果枸杞果实品质快速无损检测技术寻找新突破,

并为全面提升果实品质检测的工作效率和数据客观性提供技术支撑。

1 材料和方法

1.1 试验材料

2022 年 7 月 28—30 日在新疆维吾尔自治区昌吉州的人工栽培地采集黑果枸杞果实,并自然晾晒至干燥,保持干燥进行贮藏,晾干果实百粒重为 (7.576 ± 0.104) g。

试验试剂:氯化钾、氯化氢、福林酚试剂、无水碳酸钠、没食子酸、芦丁、亚硝酸钠、氢氧化钠、硝酸铝、无水乙醇,均购于上海源叶生物科技有限公司。

1.2 表型指标和活性物质的提取与测定

随机选取 90 粒黑果枸杞果实,分别提取其表型特征并测定其每粒果实活性物质的含量。表型特征提取采用种子表型全自动化提取系统(PhenoSeed, 南京智农云芯大数据科技有限公司),表型特征形态指标包括长度、宽度、长宽比(L/W)、投影面积、周长、圆度;颜色指标包括红度值(R)、绿度值(G)、蓝度值(B)、亮度值(I)、红绿通道值(a)、黄蓝通道值(b)、色相值(H)、饱和度(S)、明度(V)、灰度值(Gray);纹理指标包括灰度通道下的对比度、相异度、同质性、能量、相关性、角二阶矩(ASM)。

将提取表型特征后的每粒黑果枸杞果实进行研磨,用 30% 的乙醇料液比以 1:10 超声提取,并收集滤液 4 000 r/min 离心 20 min,取上清液测定活性物质含量。用 pH 示差法^[11]测定花色苷含量;用 NaNO_2 - $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ 比色法^[12]测定黄酮含量,以芦丁为标准品,以标准溶液浓度和吸光度值为横、纵坐标绘制标准曲线,得到线性方程为 $y = 1.1979x + 0.0191$, $R^2 = 0.9972$;根据线性方程计算样品中的黄酮含量;采用福林酚法^[13]测定多酚含量,以没食子酸为标准品,以标准溶液浓度和吸光度值为横、纵坐标绘制标准曲线,得到线性方程为 $y = 0.0053x + 0.1046$, $R^2 = 0.9991$,根据线性方程计算样品中的多酚含量。

1.3 数据处理及绘图

用 Excel 计算表型特征的最小值、最大值、平均值、标准差和变异系数,用 SPSS 2021 分析 Pearson 相关性和主成分。

2 结果与分析

2.1 黑果枸杞表型特征和活性物质变异系数分析

变异系数可以用来衡量作物表型特征的离散程度,变异系数绝对值越大表示离散程度越大^[14-15]。从表 1 可知,黑果枸杞果实表型特征和活性物质指标均存在不同程度变异。表型特征的变异系数绝对值为 2.924%~37.663%,平均变异系数为 17.364%;活性物质指标的变异系数绝对值为 20.804%~50.737%,平均变异系数为 38.070%。表型性状圆度、相关性值和熵值的变异系数值为 6.421%、2.924%和 5.049%,说明个体间差异较小、稳定性较高。在形态指标中,面积的均值为 46.490 mm²,变异系数值为 27.726%,变异最大;颜色指标值中,红绿通道值

和黄蓝通道值的均值分别为 1.487 和 -2.746,变异系数分别是 24.062 和 37.663,变异较大;纹理指标值中,对比度和角二阶矩值的均值为 64.826 和 0.064,变异系数值为 31.731%和 28.174%,变异较大;活性物质花色苷、多酚和黄酮含量的均值为 8.754 mg/g、24.729 mg/g 和 24.614 mg/g,变异系数值分别为 50.737%、20.804%和 42.670%,变异值均较大,表明这些性状个体间存在较大的差异。

2.2 黑果枸杞表型特征及活性物质的关系

对黑果枸杞果实 23 个表型特征和 3 个活性物质含量进行相关性分析,结果(表 2)表明,果实表型数据和活性物质含量间存在相关性,其中 143 对相关系数呈极显著水平($P < 0.01$),20 对相关系数呈显著水平($P < 0.05$)。

表 1 黑果枸杞果实表型特征和活性物质变异系数

Table 1 Coefficient of variation of phenotypic traits and active substances of *L. ruthenicum*

性状类型 Trait type	指标 Index	均值 Mean	标准差 S	最小值 Min	最大值 Max	变异系数 CV/%
形态 Morphology	宽度 Width/mm	7.140	1.046	5.250	10.020	14.652
	长度 Length/mm	8.410	1.253	5.680	12.450	14.892
	长宽比 L/W	1.180	0.162	1.012	1.659	13.593
	面积 Area/mm ²	46.490	12.891	22.844	97.094	27.726
	周长 Perimeter/mm	27.801	3.954	19.341	40.129	14.224
	圆度 Roundness	0.746	0.048	0.555	0.825	6.421
颜色 Color and lustre	红度值 R	26.430	5.128	16.238	41.411	19.400
	绿度值 G	26.519	4.432	17.930	39.985	16.713
	蓝度值 B	31.117	3.672	23.713	41.321	11.800
	亮度值 I	9.987	2.049	6.216	16.233	20.521
	红绿通道值 a	1.487	0.358	0.716	2.519	24.062
	黄蓝通道值 b	-2.746	1.034	-5.736	-0.509	37.663
	色相值 H	84.021	14.478	56.695	116.806	17.231
	饱和度 S	76.584	12.065	55.181	111.646	15.754
	明度 V	33.335	4.432	24.628	47.131	13.295
	灰度值 Gray	26.981	4.525	18.186	40.534	16.772
纹理特征 Texture characteristics	对比度 Contrast	64.826	20.570	28.863	126.692	31.731
	相异性 Dissimilarity	3.480	0.786	2.015	5.747	22.572
	同质性 Homogeneity	0.487	0.050	0.344	0.600	10.357
	能量值 Energy	0.251	0.035	0.179	0.346	13.847
	相关性值 Correlation	0.886	0.026	0.818	0.936	2.924
	角二阶矩值 ASM	0.064	0.018	0.032	0.120	28.174
	熵值 Entropy	4.874	0.246	4.228	5.535	5.049
活性物质 Active ingredient	花色苷含量 Anthocyanin content/(mg/g)	8.754	4.442	0.819	21.571	50.737
	多酚含量 Polyphenol content/(mg/g)	24.729	5.145	14.013	38.936	20.804
	黄酮含量 Flavonoid content/(mg/g)	24.614	10.503	6.706	57.439	42.670

表 2 黑果枸杞果实活性物质与表型特征相关性分析
Table 2 Correlation analysis between active substances and phenotypic characteristics of *L. ruthenicum*

指标 Index	宽度 Width	长度 Length	长宽比 L/W	面积 Area	周长 Perimeter	圆度 Roundness	红色 R	绿色 G	蓝色 B	亮度 I	红绿通道值 a	黄蓝通道值 b	色相 H	饱和度 S	明度 V	灰度 Gray	对比度 Contrast	相异性 Dissimilarity	同质性 Homogeneity	能量值 Energy	相关性 Correlation	二阶段 ASM	熵值 Entropy	花色苷含量 Anthocyanin content	多酚含量 Polyphenol content
长度 Length	0.709**	1.000																							
长宽比 L/W	-0.462**	0.289**	1.000																						
面积 Area	0.924**	0.899**	-0.124	1.000																					
周长 Perimeter	0.904**	0.920**	-0.072	0.974**	1.000																				
圆度 Roundness	-0.263*	-0.477**	-0.246**	-0.314**	-0.511**	1.000																			
红色 R	-0.066	-0.154	-0.104	-0.097	-0.129	0.177	1.000																		
绿色 G	-0.034	-0.131	-0.116	-0.075	-0.097	0.120	0.965**	1.000																	
蓝色 B	-0.105	-0.194	-0.098	-0.152	-0.163	0.106	0.935**	0.983**	1.000																
亮度 I	-0.044	-0.142	-0.117	-0.085	-0.108	0.131	0.976**	0.999**	0.982**	1.000															
红绿通道值 a	-0.253*	-0.141	0.132	-0.200	-0.189	0.051	-0.479**	-0.866**	-0.614**	-0.650**	1.000														
黄蓝通道值 b	0.306**	0.255*	-0.106	0.337**	0.273**	0.139	0.344**	0.219*	0.041	0.230*	-0.161	1.000													
色相 H	-0.209*	-0.010	0.244*	-0.158	-0.133	-0.056	-0.622**	-0.594**	-0.463**	-0.593**	0.502*	-0.743**	1.000												
饱和度 S	0.009	-0.042	-0.079	-0.037	0.012	-0.169	-0.705**	-0.685**	-0.610**	-0.682**	0.485**	-0.461**	0.571**	1.000											
明度 V	-0.089	-0.188	-0.113	-0.136	-0.153	0.127	0.965**	0.991**	0.991**	0.993**	-0.587**	0.119	-0.543**	-0.821**	1.000										
灰度 Gray	-0.050	-0.146	-0.112	-0.090	-0.114	0.135	0.980**	0.998**	0.981**	1.000**	-0.617**	0.234*	-0.593**	-0.689**	0.993**	1.000									
对比度 Contrast	-0.257*	-0.359**	-0.094	-0.313	-0.342**	0.188	0.604**	0.617**	0.639**	0.659**	-0.490**	0.107	-0.363**	-0.467**	0.637**	0.641**	1.000								
相异性 Dissimilarity	-0.155	-0.273**	-0.121	-0.211*	-0.235*	0.251*	0.678**	0.704**	0.678**	0.698**	-0.515**	0.213*	-0.458**	-0.577**	0.685**	0.701**	0.921**	1.000							
同质性 Homogeneity	0.192	0.296**	0.103	0.241*	0.308**	-0.388**	-0.730**	-0.713**	-0.674**	-0.715**	0.423*	-0.306**	0.528**	0.706**	-0.692**	-0.720**	-0.725**	-0.872**	1.000						
能量值 Energy	0.194	0.346**	0.180	0.275**	0.347**	-0.462**	0.024	0.081	0.074	0.071	-0.210*	-0.011	-0.017	-0.110	0.059	0.066	-0.094	-0.124	0.372**	1.000					
相关性 Correlation	0.394**	0.394**	-0.045	0.431**	0.431**	-0.132	0.316**	0.300**	0.286**	0.308**	-0.133	0.139	-0.193	-0.072	0.306**	0.305**	-0.441**	-0.333**	0.178	0.211*	1.000				
角二阶段 ASM	0.188	0.346**	0.188	0.273**	0.344**	-0.462**	0.022	0.078	0.071	0.068	-0.206	-0.010	-0.018	-0.113	0.056	0.063	-0.090	-0.117	0.363**	0.998**	0.204	1.000			
熵值 Entropy	-0.020	-0.173	-0.187	-0.075	-0.144	0.347**	0.790**	0.774**	0.754**	0.760**	-0.420**	0.244*	-0.484**	-0.485**	0.778**	0.783**	0.613**	0.718**	-0.823**	-0.448**	0.158	-0.447**	1.000		
花色苷含量 Anthocyanin content	-0.061	-0.005	0.101	-0.012	-0.036	0.088	0.343**	0.402**	0.409**	0.392**	-0.381**	-0.029	-0.132	-0.341**	0.385**	0.391**	0.307**	0.368**	-0.324**	0.153	0.018	0.159	0.296**	1.000	
多酚含量 Polyphenol content	-0.065	0.053	0.136	0.004	0.011	-0.067	-0.012	0.064	0.062	0.048	-0.241*	-0.059	-0.072	0.084	0.050	0.044	0.092	0.062	0.033	0.037	0.045	0.042	0.041	0.443**	
黄酮含量 Flavonoid content	-0.072	-0.047	0.018	-0.072	-0.062	-0.048	-0.117	-0.082	-0.085	-0.087	-0.064	-0.023	-0.008	0.263*	-0.084	-0.092	-0.061	-0.130	0.191	0.006	0.063	0.004	-0.140	0.562**	

注: *和 ** 分别表示在 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 水平显著相关。
Note: * and ** indicated significant correlation at $P < 0.05$ and $P < 0.01$, respectively.

形态指标中面积和周长与长宽比相关性较弱,其他指标之间均呈显著或极显著相关;颜色指标中蓝度、红绿通道值与黄蓝通道值相关性较弱,其他指标之间均呈显著或极显著相关;纹理指标中对比度、相异性与能量值和角二阶距相关性较弱,其他指标之间均呈显著或极显著相关性相关。

形态与颜色指标,宽度与红绿通道值和色相值呈显著或极显著相关,长、宽、面积和周长与黄蓝通道均呈极显著相关,其他形态与颜色指标相关性均较弱;形态与纹理指标,宽度与相异性、同质性、能量值、角二阶矩和熵值相关性较弱,长度与熵值相关性较弱,长宽比与相关性值的相关性较弱,面积和周长与熵值相关性较弱,圆度与对比度和相关性值呈弱相关,其余纹理指标与形态指标之间均呈显著或极显著相关;纹理与颜色指标,能量值与红度、绿度、亮度、黄蓝通道值、色相、饱和度、明度和灰度相关性较弱,相关性值与红绿通道值、黄蓝通道值、色相和饱和度相关性较弱,其他指标之间均呈显著或极显著

相关,角二阶距与所有颜色指标相关性均较弱,其余纹理指标与颜色指标均呈显著或极显著相关。

活性物质花色苷含量与形态指标均无显著相关关系,与颜色指标红度、绿度、蓝度、亮度、红绿通道值、饱和度、明度和灰度均呈极显著相关($P < 0.01$),与纹理指标对比度、相异性、同质性和熵值呈极显著相关($P < 0.01$);多酚含量与颜色指标红绿通道值呈显著相关($P < 0.05$),与其他表型指标均无显著性相关($P > 0.05$);黄酮含量与颜色指标饱和度呈显著性相关($P < 0.05$),与其他表型指标均无显著性相关。

2.3 黑果枸杞表型特征和活性物质主成分分析

基于黑果枸杞果实表型特征间存在很高的相关性,为充分反映其果实表型特征变异的主要来源及不同性状对变异的贡献,对 23 个表型特征进行主成分分析,并计算相关矩阵的特征值、特征向量以及累计贡献率(表 3)。提取的特征值大于 1 的 6 个主成分的累计贡献率达到 91.971%。

表 3 黑果枸杞果实表型评价因子的特征值和累计贡献率

Table 3 Eigenvalues and cumulative contribution rates of phenotypic evaluation factors of *L. ruthenicum*

表型特征 Phenotypic trait	第 1 主成分 PC1	第 2 主成分 PC2	第 3 主成分 PC3	第 4 主成分 PC4	第 5 主成分 PC5	第 6 主成分 PC6
特征值 Eigenvalues	9.865	4.941	2.419	1.549	1.246	1.133
贡献率 Contribution rate/%	42.893	21.483	10.518	6.733	5.418	4.926
累计贡献率 Cumulative contribution rate/%	42.893	64.375	74.893	81.626	87.045	91.971
宽度 Width	-0.116	0.815	-0.448	0.009	-0.321	-0.025
长度 Length	-0.249	0.849	-0.103	-0.126	0.166	0.375
长宽比 L/W	-0.151	-0.038	0.490	-0.179	0.637	0.516
面积 Area	-0.173	0.887	-0.338	-0.061	-0.075	0.149
周长 Perimeter	-0.219	0.919	-0.225	-0.063	-0.097	0.190
圆度 Roundness	0.262	-0.505	-0.402	0.104	0.114	-0.279
红度 R	0.950	0.124	0.064	0.159	0.130	-0.052
绿度 G	0.963	0.164	0.140	0.146	-0.024	0.013
蓝度 B	0.931	0.086	0.225	0.236	-0.094	0.079
亮度 I	0.963	0.153	0.132	0.162	-0.002	0.003
红绿通道值 a	-0.623	-0.364	-0.088	0.165	0.292	-0.064
黄蓝通道 b	0.300	0.359	-0.456	-0.369	0.470	-0.374
色相 H	-0.644	-0.318	0.272	0.221	-0.209	0.362
饱和度 S	-0.730	-0.191	-0.026	0.280	-0.325	0.053
明度 V	0.949	0.104	0.170	0.219	-0.033	0.022
灰度 Gray	0.965	0.146	0.130	0.160	0.009	0.003
对比度 Contrast	0.758	-0.261	0.084	-0.419	-0.285	0.128
相异性 Dissimilarity	0.829	-0.173	-0.038	-0.400	-0.201	0.137
同质性 Homogeneity	-0.856	0.231	0.243	0.215	-0.071	-0.145
能量值 Energy	-0.083	0.572	0.715	-0.172	-0.070	-0.297
相关性 Correlation	0.117	0.596	-0.006	0.718	0.251	-0.082
角二阶矩 ASM	-0.083	0.567	0.716	-0.184	-0.065	-0.292
熵值 Entropy	0.847	-0.084	-0.346	0.168	-0.001	0.256

主成分 1 的特征值为 9.865,贡献率为 42.893%,对应的红度、绿度、蓝度、亮度、明度和灰度 6 个性状的特征向量值较大,起主要作用,主要描述黑果枸杞果实色泽指标的变异;主成分 2 的特征值为 4.941,贡献率为 21.483%,对应的宽度、长度、面积和周长 4 个性状的特征向量值较高,主要描述果实大小的变异;主成分 3 的特征值为 2.419,贡献率为 10.518%,对应的能量值、角二阶距 2 个性状的特征向量值较高,主要描述果实纹理特征的变异;第 4、第 5 和第 6 主成分特征值为 1.549、1.246 和 1.133,贡献率分别是 6.733%、5.418% 和 4.926%,其特征向量值均较低,且前 3 个主成分累计贡献率达 74.893%,几乎已经覆盖黑果枸杞果实表型特征的所有信息。

3 讨 论

3.1 黑果枸杞果实表型数据用于良种选育

良种选育是一场“持久战”,育种结果的调查依赖于果实表型的评价,通过对大量植物表型数据的分析,结合分子辅助育种技术,可以有效地加速育种过程,提高品种改良或选育的效率和成功率。在全球数字化趋势中,基于光学传感器的数字技术可以非接触、高通量的方式进行种子表型的数字化,从而显著提高育种效率^[16]。植物表型特征是植物基因型和环境共同作用的结果,表型特征变异能直观反映表型遗传多样性的丰富程度,是研究植物遗传多样性最直接和有效的指标^[17-18]。为明确黑果枸杞种质资源主要表型和品质性状遗传多样性,王晓洁等^[19]以野生黑果枸杞为研究材料对其主要表型、品质性状的果实横径、枝粗、枝长、单枝成熟果实数和叶宽进行研究,发现黑果枸杞种质资源具有丰富的遗传多样性,高粉红^[20]采用分子生物学方法从分子水平深入开展黑果枸杞果实种质资源的遗传多样性研究。本文基于光学传感器的数字技术在黑果枸杞果实外部可见表型(EVP)和内部不可见特征(IIP)的研究中发现,23 个表型特征与活性物质 3 个指标均存在变异,表型特征中圆度、相关性值和熵值的变异系数较小,说明个体间差异较小、稳定性较高;表型特征面积、黄蓝通道值、角二阶距值和对数比度,以及活性物质花色苷、多酚和黄酮含量的变异系数较高。说明黑果枸杞果实特征变异类型多、幅度大,遗传多样性丰富,具有较大的果实品质选择潜力。

3.2 黑果枸杞果实表型指标与和活性物质相关性

植物器官颜色通常是由特定的类黄酮、类胡萝

卜素和生物碱等次生代谢物的种类和积累量的差异引起的。花青素是最重要的类黄酮化合物之一,普遍存在于许多植物和水果中,对植物器官的色素沉着起着至关重要的作用。在全球数字化趋势中,基于光学传感器的数字技术可以非接触、高通量的方式进行种子、果实表型的数字化,从而显著提高种子、果实品质鉴定的效率^[16]。植物表型识别技术的成熟与化学计量学方法的丰富使得两者相结合运用到物质的定性和定量分析成为一种趋势。

有研究表明,类黄酮生物合成途径中基因表达水平的变化导致植物器官中花青素大量积累,从而导致颜色多态性^[21];Moustaka 等发现花青素显著影响紫红色菊花花瓣、深紫色茄子果实和粉红色百合花朵^[22]。Boss 等发现一品红红叶和葡萄红黑莓的颜色均与花青素的积累有显著的相关性^[23]。Mizuta 等在紫色杜鹃花花朵中检测到多种花青素,而白色花瓣中没有检测到花青素,表明杜鹃花花瓣颜色较深的原因是其胚和种皮中含有大量花青素^[24]。Morita 等^[25]在日本牵牛花中鉴定出一种花青素合成增强基因 *EFP*,发现敲除 *EFP* 基因使牵牛花和斗牛花中花青素的含量显著降低,表现为花色褪去,这些研究结果表明颜色的增强与花青素水平的提高密切相关。郑先哲等^[26]通过对蓝靛果的研究发现 RGB 三原色通过处理后的色相、饱和度等颜色特征参数与活性物质花色苷含量有显著相关性。

本试验黑果枸杞果实表型和活性物质相关性结果表明,形态、颜色、纹理和活性物质指标内部均有很强的相关性。活性物质花色苷含量与形态无显著相关性、与颜色指标红度、绿度、蓝度、蓝度、红绿通道值、饱和度、明度和灰度呈极显著相关性,与纹理指标对比度、相异性、同质性和熵值呈极显著相关;多酚含量与颜色指标红绿通道值呈显著相关,与其他表型指标均无显著相关性;黄酮含量与颜色指标饱和度呈显著性相关,与其他表型指标均无显著相关性。本研究结果与上述学者的研究结果相似。因此,通过表型特征颜色和纹理指标可判断果实活性物质含量的高低,对判断果实品质具有一定的研究价值。

3.3 黑果枸杞果实表型形状的主成分分析

为了更加系统、全面地分析解决黑果枸杞表型相关性的实际问题,需要尽可能多地考虑各项表型性状,但这样必然会增加研究表型性状的个数,表型性状的指标个数过多,会增加计算量及分析问题的复杂性,另外也会存在部分信息的重叠。因此在利用统计学方法研究多因子、多变量的问题时,学者在

定量分析过程中希望用最少的表型性状个数获得最全面的信息量,在这种需求与趋势下,主成分分析方法在多性状分析问题上的应用越来越广泛。通过数量性状的主成分分析,根据贡献率大小,从主成分中筛选出红度、绿度、蓝度、亮度、明度和灰度、角二阶距、能量值的特征向量值较高,是黑果枸杞种质资源表型差异的主要因素,表明这些性状起主要作用,可作为黑果枸杞果实评价的主要性状。

4 结 论

(1)黑果枸杞果实 23 个表型特征与活性物质的 3 个指标均存在变异,表型特征的变异系数绝对值为 2.924%~37.663%,平均变异系数为 17.364%;活性物质指标的变异系数绝对值为 20.804%~50.737%,平均变异系数为 38.070%。表型性状圆度、相关性值和熵值的变异系数较小,表明个体间差异较小、稳定性较高。活性物质花色苷和黄酮的含量以及表型特征面积、黄蓝通道值、角二阶距值和对比度表型特征的变异系数较高。说明黑果枸杞果实特征变异类型多、幅度大,遗传多样性丰富,具有较大的果实品质选择潜力。

(2)黑果枸杞果实表型和活性物质相关性结果

表明,形态、颜色、纹理和活性物质指标间均有很强相关性,其中 143 对相关系数呈极显著水平($P < 0.01$),20 对相关系数呈显著水平($P < 0.05$)。活性物质花色苷含量与形态无显著相关性、与颜色指标红度、绿度、蓝度、亮度、红绿通道值、饱和度、明度和灰度呈极显著相关性,与纹理指标对比度、相异性、同质性和熵值呈极显著相关;多酚含量与颜色指标红绿通道值呈显著相关,与其他表型指标均无显著相关性;黄酮含量与颜色指标饱和度呈显著性相关,与其他表型指标均无显著相关性。表明可以通过果实表型特征判断活性物质的高低。

(3)主成分分析结果表明黑果枸杞果实颜色、形态和纹理依次影响其表型特征的变异,主成分 1 中红度、绿度、蓝度、亮度、明度和灰度 6 个性状的特征向量值较大,主成分 2 中宽度、长度、面积和周长 4 个性状的特征向量值较高,主成分 3 中能量值、角二阶距 2 个性状的特征向量值较高,表明这些性状起主要作用,可作为黑果枸杞果实评价的主要因子。

用计算机视觉和定量分析果实表型和活性物质的变异和关联机制,可为果实品质早期良种选育提供新的方法,也为果实品质快速无损检测技术寻找新的途径。

参考文献:

[1] 邱立军,张真真,刘洁琪.晚稻杨梅果实外观指标与可溶性固形物含量的关系[J].浙江农业科学,2021,62(4):768-770.
 QIU L J, ZHANG Z Z, LIU J Q. Correlation analysis between fruit appearance and soluble solid content of red bayberry var. Wandao[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2021, 62(4): 768-770.

[2] 王宇航,曹洪武.计算机视觉技术在农业领域的应用[J].现代农业科技,2024(4):178-181.
 WANG Y H, CAO H W. Application of computer vision technology in the field of agriculture[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2024(4): 178-181.

[3] 高宇,高军萍,李寒,等.植物表型监测技术研究进展及发展对策[J].江苏农业科学,2017,45(11):5-10.
 GAO Y, GAO J P, LI H, et al. Research progress and development countermeasures of plant phenotype monitoring technology[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2017, 45(11): 5-10.

[4] 雷春英,彭钊植,刘畅,等.盐生药用植物黑果枸杞研究进展[J].中国野生植物资源,2021,40(7):55-60.
 LEI C Y, PENG M Z, LIU C, et al. The review of ecological and economic values of halophyte medicinal plant *Lycium ru-*

thenicum[J]. *Chinese Wild Plant Resources*, 2021, 40(7): 55-60.

[5] 臧园园.近红外光谱技术在小麦品质检测中的应用进展[J].粮食与食品工业,2023,30(1):22-27.
 ZANG Y Y. Application progress of near infrared spectroscopy in wheat quality detection[J]. *Cereal & Food Industry*, 2023, 30(1): 22-27.

[6] RUIZ-ALTISENT M, LLEÓ L, RIQUELME F. Instrumental quality assessment of peaches: Fusion of optical and mechanical parameters[J]. *Journal of Food Engineering*, 2006, 74(4): 490-499.

[7] PACE B, CEFOLA M, RENNA F, et al. Relationship between visual appearance and browning as evaluated by image analysis and chemical traits in fresh-cut nectarines[J]. *Post-harvest Biology and Technology*, 2011, 61(2/3): 178-183.

[8] 王家保,刘志媛,杜中军,等.荔枝果实发育过程中果皮颜色形成的相关分析[J].热带作物学报,2006,27(2):11-17.
 WANG J B, LIU Z Y, DU Z J, et al. Analysis of the factors related to pericarp color formation during fruit development of *Litchi*[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2006, 27(2): 11-17.

[9] ARSLAN M, ZOU X B, HU X T, et al. Near infrared spectroscopy coupled with chemometric algorithms for predicting

- chemical components in black goji berries (*Lycium ruthenicum* Murr.)[J]. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 2018, 26(5): 275-286.
- [10] 周志磊, 衡洋洋, 陈超, 等. 黑果枸杞果实中主要成分的傅里叶变换近红外光谱预测模型构建[J]. 食品工业科技, 2024, 45(5): 234-242.
ZHOU Z L, HENG Y Y, CHEN C, *et al.* Construction of Fourier transform near infrared spectroscopy prediction model for main components in *Lycium ruthenicum* Murr. [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2024, 45(5): 234-242.
- [11] 韦婷, 杨艳宇, 李炎艳, 等. pH 示差法测定苹果皮花色苷含量[J]. 食品与发酵科技, 2022, 58(2): 130-136.
WEI T, YANG Y Y, LI X Y, *et al.* Determination content of anthocyanin in apple skin by pH differential method[J]. *Food and Fermentation Science & Technology*, 2022, 58(2): 130-136.
- [12] 刘靖崧, 谢继芳, 杨凯, 等. 小豆种质资源总黄酮含量测定及其与农艺性状相关分析[J]. 中国粮油学报, 2020, 35(8): 153-159.
LIU J S, XIE J F, YANG K, *et al.* Assay of total flavonoids content of germplasm and correlation analysis between agronomic traits in adzuki bean[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2020, 35(8): 153-159.
- [13] 李巨秀, 王柏玉. 福林-酚比色法测定桑椹中总多酚[J]. 食品科学, 2009, 30(18): 292-295.
LI J X, WANG B Y. Folin-ciocalteu colorimetric determination of total polyphenols in mulberry fruits[J]. *Food Science*, 2009, 30(18): 292-295.
- [14] 林存学, 杨晓华, 刘海荣. 东北寒地 96 份李种质资源表型性状遗传多样性分析[J]. 园艺学报, 2020, 47(10): 1917-1929.
LIN C X, YANG X H, LIU H R. Genetic diversity analysis of 96 plum germplasm resources by phenotypic traits in northeast cold area[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2020, 47(10): 1917-1929.
- [15] 高风, 文仕知, 韦铄星, 等. 不同种源香合欢种子和叶表型性状变异分析[J]. 中南林业科技大学学报, 2023, 43(2): 57-66.
GAO F, WEN S Z, WEI S X, *et al.* Variation analysis of seed and leaf phenotypic traits of *Albizia odoratissima* from different provenances[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2023, 43(2): 57-66.
- [16] 何勇, 李禧尧, 杨国峰, 等. 室内高通量种质资源表型平台研究进展与展望[J]. 农业工程学报, 2022, 38(17): 127-141.
HE Y, LI X Y, YANG G F, *et al.* Research progress and prospect of indoor high-throughput germplasm phenotyping platforms[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(17): 127-141.
- [17] 岑海燕, 朱月明, 孙大伟, 等. 深度学习在植物表型研究中的应用现状与展望[J]. 农业工程学报, 2020, 36(9): 1-16.
CEN H Y, ZHU Y M, SUN D W, *et al.* Current status and future perspective of the application of deep learning in plant phenotype research[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(9): 1-16.
- [18] 孙珍珠, 李秋月, 王小柯, 等. 宽皮柑橘种质资源表型多样性分析及综合评价[J]. 中国农业科学, 2017, 50(22): 4362-4383.
SUN Z Z, LI Q Y, WANG X K, *et al.* Comprehensive evaluation and phenotypic diversity analysis of germplasm resources in mandarin[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(22): 4362-4383.
- [19] 王晓洁, 黎美霞, 陶蕾, 等. 48 份黑果枸杞种质主要表型和品质性状的遗传多样性研究[J]. 河南农业科学, 2023, 52(9): 78-90.
WANG X J, LI M X, TAO L, *et al.* Study on the genetic diversity of phenotypic and quality traits of 48 germplasm resources of *Lycium ruthenicum* Murr. [J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2023, 52(9): 78-90.
- [20] 高粉红. 黑果枸杞 ISSR 分析、良种繁殖与新种质创制[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2020.
- [21] YE L J, MÖLLER M, LUO Y H, *et al.* Differential expressions of anthocyanin synthesis genes underlie flower color divergence in a sympatric *Rhododendron sangwineum* complex [J]. *BMC Plant Biology*, 2021, 21(1): 204.
- [22] MOUSTAKA J, TANOU G, GIANNAKOULA A, *et al.* Anthocyanin accumulation in *Poinsettia* leaves and its functional role in photo-oxidative stress[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2020, 175: 104065.
- [23] BOSS P K, DAVIES C. Molecular biology of anthocyanin accumulation in grape berries [M] // ROUBELAKIS-ANGELAKIS K A. *Grapevine Molecular Physiology & Biotechnology*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2009: 263-292.
- [24] MIZUTA D, BAN T, MIYAJIMA I, *et al.* Comparison of flower color with anthocyanin composition patterns in evergreen Azalea [J] *Scientia Horticulturae*, 2009, 122(4): 594-602.
- [25] MORITA Y, TAKAGI K, FUKUCHI-MIZUTANI M, *et al.* A Chalcone isomerase-like protein enhances flavonoid production and flower pigmentation[J]. *The Plant Journal*, 2014, 78(2): 294-304.
- [26] 郑先哲, 赵兴隆, 刘成海, 等. 基于果实颜色特征的蓝靛果忍冬花青素含量预测[J]. 农业工程学报, 2023, 39(2): 242-251.
ZHENG X Z, ZHAO X L, LIU C H, *et al.* Prediction of the anthocyanin content of *Lonicera edulis* based on fruit color characteristics[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(2): 242-251.