

俄罗斯第三代大果沙棘果实品质综合评价

戈素芬¹, 赵鑫丹¹, 高岩², 阮成江³, 李前¹, 张东为^{1*}

(1. 辽宁省旱地农林研究所, 辽宁朝阳 122000)(2. 水利部沙棘开发管理中心, 北京 100038)

(3. 大连民族大学生物技术与资源利用教育部重点实验室, 辽宁大连 116600)

摘要: 为了比较俄罗斯第三代大果沙棘优良品种果实品质特性, 该研究以 8 个进口的俄罗斯第三代大果沙棘品种为研究对象, 以目前“三北”地区大面积推广的主栽大果沙棘‘深秋红’为对照, 针对其果实的百果质量、总酚含量、维生素 E 含量等 20 项品质指标进行测定, 采用主成分分析及回归分析方法对其进行综合评价。结果表明: 8 个俄罗斯第三代大果沙棘百果质量为 25.27~73.18 g, 维生素 E 含量为 7.21~158.54 μg/g, 总酚含量为 1.26~2.68 mg/g, 可溶性糖含量为 18.46~29.86 mg/g, 甜酸比为 0.85~2.00。主成分分析共提取 5 个主成分, 代表了以上指标的 93.767% 的信息。采用逐步回归分析的方法将原有 20 项评价指标简化为维生素 E 含量、甜酸比和总酚含量 3 项指标。综合评价发现, 除‘丹棒’外, 其余 7 个俄罗斯品种综合评分均超过对照品种‘深秋红’, 且‘苏达鲁斯卡’、‘伊丽莎白’、‘皇冠’、‘橙棒’得分较高。该研究结果为不同地区栽植的大果沙棘果实品质评价和主要品质指标的确定提供了依据, 并筛选出苏达鲁斯卡’、‘伊丽莎白’、‘皇冠’、‘橙棒’4 个优良品种, 可作为优质沙棘资源重点加以推广利用。

关键词: 沙棘; 果实品质; 主成分分析; 回归分析; 综合评价

文章编号: 1673-9078(2025)07-249-259

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.7.0662

Comprehensive Evaluation of Quality of the Third-generation Sea Buckthorn Fruit from Russia

GE Sufen¹, ZHAO Xindan¹, GAO Yan², RUAN Chengjiang³, LI Qian¹, ZHANG Dongwei^{1*}

(1.Liaoning Institute of Agriculture & Forestry in Arid Areas, Chaoyang 122000, China)

(2.Sea Buckthorn Development and Management Center, Ministry of Water Resources, Beijing 100038, China)

(3.Key Laboratory of Biotechnology and Bioresources Utilization, Dalian Minzu University, Dalian 116600, China)

Abstract: In order to compare the quality characteristics of the excellent third-generation large-fruit Russian seabuckthorn varieties, eight varieties of imported third-generation large seabuckthorn fruits from Russia as the research objects of this study, and the main cultivated large-fruit seabuckthorn variety ‘Shenqihong’ that is currently promoted widely in the “Three North” region as the control. The 20 quality indicators such as fruit quality, total phenolic content, and vitamin E content were measured, and the principal component analysis and regression analysis methods were used for a comprehensive evaluation. The results showed that the fruit mass of the eight third-generation Russian sea buckthorn

引文格式:

戈素芬,赵鑫丹,高岩,等.俄罗斯第三代大果沙棘果实品质综合评价[J].现代食品科技,2025,41(7):249-259.

GE Sufen, ZHAO Xindan, GAO Yan, et al. Comprehensive evaluation of quality of the third-generation sea buckthorn fruit from Russia [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(7): 249-259.

收稿日期: 2024-05-14

基金项目: 水利部 948 项目“俄罗斯第三代沙棘良种引进”(201216); 辽宁省农业科学院院长基金项目(2023QN2424); 生物技术与资源利用教育部重点实验室开放课题(KF2025003)

作者简介: 戈素芬(1968-), 女, 本科, 副研究员, 研究方向, 沙棘良种选育与果实营养成分研究, E-mail: 892102946@qq.com

通讯作者: 张东为(1970-), 男, 硕士, 研究员, 研究方向, 沙棘良种选育与果实营养成分研究, E-mail: zhangdw2004@126.com

varieties was 25.27~73.18 g, with their vitamin E contents ranging in 7.21~158.54 $\mu\text{g/g}$, their total phenolic contents ranging in 1.26~2.68 mg/g, their soluble sugar contents ranging in 18.46~29.86 mg/g, and their sweet-acid ratios ranging in 0.85~2.00. The principal component analysis extracted a total of 5 principal components, representing 93.767% of the information of the above indicators. Using stepwise regression analysis, the original 20 evaluation indicators were simplified into three indicators: vitamin E content, sweet-acid ratio, and total phenolic content. The comprehensive evaluation found that, except for 'Danbang', the comprehensive scores of the other seven Russian varieties all exceeded that of the control variety 'Shenqihong', and 'Sudalusika', 'Yilishabai', 'Huangguan', 'Chengbang' were scored higher. The research results provide a basis for evaluating the quality of large-fruit seabuckthorn berry planted in different regions and determining their main quality indicators. And four excellent varieties, 'Shenqihong', and 'Sudalusika', 'Yilishabai', 'Huangguan', 'Chengbang' were screened out, which can be promoted and utilized as key high-quality seabuckthorn resources.

Key words: seabuckthorn; berry quality; principal component analysis; regression analysis; comprehensive evaluation

沙棘 (*Hippophae rhamnoides* L.) 是胡颓子科沙棘属落叶灌木或小乔木^[1]。我国是世界上人工种植沙棘面积最大的国家,也是天然沙棘种质资源最丰富的国家^[2]。沙棘是水土保持、防风固沙、改善生态环境的先锋树种,且其各部位营养价值丰富,已成为一种兼具生态效益、经济效益和社会效益的树种^[3]。Raal 等^[4]研究发现沙棘果实和叶片中含有 19 种黄酮类化合物,可以清除 DPPH 和 ABTS⁺ 自由基。Yang 等^[5]研究发现沙棘多糖具有很强的抗糖基化和 α -淀粉酶抑制作用,可作为预防和改善糖尿病的潜在治疗剂。Netreba 等^[6]研究发现沙棘含有类胡萝卜素、抗坏血酸、苹果酸、柠檬酸、琥珀酸等多种生物活性物质,具有一定的抑菌作用。Ren 等^[7]报道了沙棘果实含有类黄酮、酚酸、原花青素、类胡萝卜素、脂肪酸、维生素等多种生物活性物质,具有抗炎、免疫调节、抗癌、肝脏保护、心血管保护、神经保护等多种作用。

沙棘含有丰富营养物质和生物活性物质,且种质资源丰富,其果实品质的全面评价显得尤为重要,因此,建立一套系统、科学的评价方法是综合评价沙棘果实品质的基础,也更有利于沙棘资源的充分开发利用。近年来,针对沙棘果实的综合评价多采用主成分分析法或主成分分析与聚类分析相结合的方法。张东为等^[8]对采自辽宁省建平县的 18 个中国沙棘的优良单株进行研究,结果发现沙棘果实富含黄酮、多糖、多酚、维生素等多种营养活性物质,并通过主成分分析综合评价筛选出 6 株综合得分高的沙棘优株,为深入开发利用沙棘资源和沙棘新品种选育奠定了基础。王珊珊等^[9]采用主成分分析与聚类分析相结合的方法综合评价 22 份寒地沙棘种质资源果实品质,通过综合评价筛选出‘小柳树’、

‘侍丛’、‘向阳’、HS-12 为寒地沙棘优异种质资源。史星雲等^[10]采用主成分分析与回归分析相结合的方法建立果桑品质评价模型,将 12 项品质指标简化成 6 项主要指标;李艳冬等^[11]采用主成分分析与回归分析相结合的方法建立蝴蝶兰质量评价模型,将 22 个性状指标简化为 7 个主要指标。可见,采用主成分分析与回归分析相结合的方法可简化评价指标,提升评价的效率和准确性。

俄罗斯是世界上沙棘育种先进国家,其选育的品种是世界上许多国家引种的首选,2012 年水利部沙棘开发管理中心承担了国家“948”项目—“俄罗斯第三代沙棘良种引进”,分别栽植于“三北”地区不同气候地理区,从中优选出了适应强且经济性状优良的沙棘品种^[10]。本研究以在辽西地区表现优良的 8 个俄罗斯第三代大果沙棘为研究对象,以目前生产上主栽的大果沙棘品种深秋红作为对照,深入探究其果实性状及主要活性物质,运用主成分分析和回归分析等方法进行综合评价,通过对比不同品种的果实品质指标,可以明确各品种在果实品质方面的优劣和差异,有助于筛选出品质优良的品种,为品种选育和果实加工提供选择依据,同时将引进的俄罗斯大果沙棘品种与‘深秋红’进行比较,可以评估引进品种在果实品质上是否具有优势或特色,有助于确定引进品种的市场潜力和推广价值,为俄罗斯沙棘良种果实综合开发利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 原料与试剂

本研究供试沙棘品种均栽植在辽宁省旱地农林研究所试验示范基地内,试验地位于辽宁省朝阳市,

坐标为 120°21'52"E、41°29'06"N，海拔 184 m。该地属暖温带半湿润半干旱气候，年平均气温 8.3℃，温差极大（-34.4℃至 43.3℃），无霜期约 150 d，日照丰富（年约 2 800 h），降水量适中（年均 450 mm），蒸发量大（年均 2 000 mm）。土壤为沙壤土，土层厚 0.6 m，有机质含量 0.8%，pH 值 7.8，地下水深约 5 m。试验基地内建有沙棘种质资源圃，目前圃内保存沙棘优良无性系及品种 70 余份。

参试的 8 个俄罗斯第三代沙棘品种分别为：‘伊丽莎白’、‘金皇后’、‘杰塞尔’、‘苏达鲁斯卡’、‘皇冠’、‘夕照’、‘丹棒’、‘橙棒’^[12]；对照品种为目前辽西大面推广的主栽大果沙棘品种：‘深秋红’。于 2022 年 8~9 月果实成熟期，依据林业采样标准 LY/T1211 进行叶片和果实采集，选择样株树冠上、中、下 3 个部位，分别在东、南、西、北 4 个方向的内、外部采集叶片和果实，充分混合，置于 -80℃冰箱冷冻保存。

维生素 C、芦丁标准品，上海源叶生物科技有限公司；维生素 E 试剂盒 南京建成生物工程研究所；无水乙醇、石油醚、硫酸、盐酸均为分析纯，成都市科龙化工试剂厂；亚硝酸钠（分析纯），广东省工程技术研究开发中心；硝酸铝（分析纯），阿拉丁试剂（上海）有限公司。

1.2 主要仪器设备

ML204 型万分之一天平，梅特勒-托利多仪器上海有限公司；MDSpectraMax190 全波长酶标仪，美国 MD 公司；T16 新世纪分光光度计，上海元析仪器有限公司。

1.3 试验方法

对参试沙棘优株随机抽取 300 粒健康果实，分为三组，每组 100 粒，利用 0.01 g 精度天平测定其百果质量；再从各单株随机抽取 30 粒果实，再分三组，每组 10 粒，用 0.01 mm 精度电子游标卡尺测量其纵径、横径及果柄长。

采用试剂盒测定样品维生素 E 含量；采用盐酸-乙醇浸提法测定花青素含量^[13]；采用福林酚比色法测定总酚含量^[14]；采用硝酸铝-亚硝酸钠法测定黄酮含量^[15]；采用比色法测定类胡萝卜素含量^[16]；采用 2,6-二氯酚酚滴定法测定维生素 C 含量^[17]；采用蒽酮硫酸比色法测定可溶性总糖、果糖、葡萄糖、蔗糖含量^[18]；采用酸碱滴定法测定可滴定酸含量^[19]；采用茚三酮显色法测定游离氨基酸总量^[20]。

甜度值的计算参考薛晓芳等^[21]的方法，以蔗糖为基准（1.00），果糖（1.75），葡萄糖（0.70）按相应系数加权求和。糖酸比和甜酸比分别定义为可溶性总糖与可滴定酸的比值，以及总甜度值与可滴定酸的比值。

1.4 数据处理

采用 Excel 2017 进行数据整理，SPSS 25.0 进行差异显著性分析、相关性分析、主成分分析和回归分析，并使用 Origin 9.1 软件绘图。

为了方便分析统计，百果质量、纵径长、横径长、果柄长、果形指数、维生素 E 含量、花青素含量、总酚含量、黄酮含量、类胡萝卜素含量、维生素 C 含量、总游离氨基酸含量、可滴定酸含量、蔗糖含量、果糖含量、葡萄糖含量、可溶性糖含量、总甜度值、糖酸比和甜酸比分别用 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 、 $\dots$ 、 X_{20} 表示。

2 结果与讨论

2.1 果实主要性状

9 个参试沙棘品种果实的主要性状见表 1。从表 1 可以看出，参试沙棘果实百果质量存在显著差异（ $P<0.05$ ），俄罗斯第三代沙棘中除‘丹棒’（25.27 g）和‘橙棒’（27.81 g）外，其余 6 个品种沙棘百果重均超过对照品种深秋红（45.53 g），其中‘金皇后’（73.18 g）、‘杰塞尔’（70.46 g）、‘苏达鲁斯卡’（57.69 g）百果重显著高于对照品种‘深秋红’（ $P<0.05$ ），分别为‘深秋红’的 1.61 倍、1.55 倍、1.27 倍。沙棘果实的纵径长为 8.63~13.81 mm，俄罗斯第三代沙棘中除‘丹棒’（8.63 mm）和‘橙棒’（9.40 mm）外，其余 6 个品种纵径长超过对照品种‘深秋红’（10.98 mm），其中‘杰塞尔’（13.81 mm）、‘金皇后’（13.23 mm）、‘皇冠’（12.84 mm）、‘苏达鲁斯卡’（12.57 mm）纵径长显著高于对照品种‘深秋红’（ $P<0.05$ ），分别为‘深秋红’的 1.26 倍、1.20 倍、1.17 倍、1.14 倍；沙棘果实的横径长为 6.81~8.85 mm，横径长度变化幅度要小于纵径变化幅度，8 个俄罗斯品种横径长均显著高于对照品种‘深秋红’（6.81 mm）（ $P<0.05$ ），其中‘金皇后’最长（8.85 mm），为‘深秋红’的 1.30 倍。果柄长度为 2.00~4.77 mm，俄罗斯第三代沙棘中‘杰塞尔’（4.77 mm）果柄长显著高于对照品种‘深秋红’（4.23 mm）（ $P<0.05$ ），其余 7 个

俄罗斯品种果柄长度均显著低于对照品种‘深秋红’($P<0.05$)。果柄的长度是评估沙棘果采摘难易程度的一个关键参数, 更长的果柄提供了更大的操作空间和灵活性, 从而降低了采摘的难度, 长柄易采也应该是选育优良沙棘品种的一个重要指标, 因此‘杰塞尔’由于具有较长的果柄, 采收更为便利, 更受采摘者的青睐。9个沙棘品种的果形指数为1.06~1.67, 根据张建国^[22]的划分标准, 果形指数 <0.90 为扁圆形, 果形指数在0.91~1.10为圆形, 1.11~1.40为卵圆形, >1.41 为圆柱形。由此可知, ‘丹棒’(1.06)为圆形沙棘, ‘橙棒’(1.22)为卵圆形沙棘, 其余品种均为圆柱形沙棘。圆形和卵圆形沙棘果实百果重、纵径、横径、果柄均小于圆柱形沙棘。

2.2 果实主要成分

9个参试沙棘品种果实的主要成分见表2。从表2可以看出, 参试的不同品种沙棘果实主要成

分含量差异显著($P<0.05$)。维生素E含量为7.21~158.54 $\mu\text{g/g}$, 俄罗斯第三代沙棘中除‘丹棒’(158.54 $\mu\text{g/g}$)和‘夕照’(61.07 $\mu\text{g/g}$)外, 其余6个品种沙棘维生素E含量均低于对照品种‘深秋红’(59.37 $\mu\text{g/g}$), 其中‘丹棒’维生素E含量显著高于‘深秋红’($P<0.05$), 为‘深秋红’的2.67倍。维生素E(又称生育酚和生育三烯酚), 主要包括 α -, β -, γ -和 δ -生育酚以及 α -, β -, γ -和 δ -生育三烯酚, 是沙棘果实中重要的生物活性成分, 在沙棘果实中含有大量的 α -生育酚, α -生育酚是最有效的抗氧化剂, 并且沙棘中的维生素E含量显著高于花生、芝麻、大豆等^[23]。因此‘丹棒’等品种在食品、保健品等领域具有潜在的应用价值。本研究测定的辽西地区栽植大果沙棘果实维生素E含量7.21~158.54 $\mu\text{g/g}$, 戈素芬等^[24]测定的辽西地区栽植的杂交沙棘维生素E(76~131 $\mu\text{g/g}$)、张东为等^[8]测定的辽西地区栽植的中国沙棘的维生素E含量(42.43~145.61 $\mu\text{g/g}$)均在此范围内。

表 1 不同优株沙棘果实主要性状

Table 1 Main characteristics of berry of different superior seabuckthorn plants						
品种	X ₁ /g	X ₂ /mm	X ₃ /mm	X ₄ /mm	X ₅	果实形状
伊丽莎白	50.89 ± 6.84 ^c	11.50 ± 0.37 ^d	7.74 ± 0.15 ^c	3.14 ± 0.35 ^{cd}	1.49 ± 0.02 ^c	圆柱形
金皇后	73.18 ± 4.03 ^a	13.23 ± 0.24 ^b	8.85 ± 0.18 ^a	2.84 ± 0.44 ^d	1.50 ± 0.01 ^c	圆柱形
杰塞尔	70.46 ± 5.68 ^a	13.81 ± 0.29 ^a	8.33 ± 0.17 ^b	4.77 ± 0.27 ^a	1.66 ± 0.03 ^{ab}	圆柱形
苏达鲁斯卡	57.69 ± 2.22 ^b	12.57 ± 0.38 ^c	7.74 ± 0.36 ^c	3.39 ± 0.26 ^c	1.63 ± 0.03 ^{ab}	圆柱形
皇冠	52.06 ± 2.93 ^{bc}	12.84 ± 0.40 ^{bc}	7.75 ± 0.28 ^c	2.65 ± 0.17 ^d	1.67 ± 0.04 ^a	圆柱形
夕照	47.72 ± 2.63 ^c	11.46 ± 0.32 ^d	7.69 ± 0.04 ^c	3.49 ± 0.11 ^c	1.50 ± 0.04 ^c	圆柱形
丹棒	25.27 ± 0.29 ^d	8.63 ± 0.12 ^f	8.12 ± 0.11 ^b	2.68 ± 0.17 ^d	1.06 ± 0.01 ^c	圆形
橙棒	27.81 ± 1.55 ^d	9.40 ± 0.05 ^e	7.72 ± 0.12 ^c	2.00 ± 0.35 ^e	1.22 ± 0.02 ^d	卵圆形
深秋红(对照)	45.53 ± 1.08 ^c	10.98 ± 0.19 ^d	6.81 ± 0.04 ^d	4.23 ± 0.29 ^b	1.62 ± 0.02 ^b	圆柱形

注: 同列右肩不同的小写字母表示具有显著差异($P<0.05$); X₁、X₂、X₃、X₄、X₅分别表示百果质量、纵径长、横径长、果柄长、果形指数。

表 2 9个参试沙棘品种果实主要成分

Table 2 The main components of berries from 9 tested seabuckthorn varieties							
品种	X ₆ /($\mu\text{g/g}$)	X ₇ /(nmol/g)	X ₈ /(mg/g)	X ₉ /(mg/g)	X ₁₀ /(mg/g)	X ₁₁ /(mg/g)	X ₁₂ /(mg/g)
伊丽莎白	25.53 ± 0.64 ^f	9.22 ± 0.26 ^d	2.68 ± 0.10 ^a	2.91 ± 0.09 ^c	0.09 ± 0.01 ^d	1.08 ± 0.98 ^a	0.21 ± 0.01 ^b
金皇后	45.15 ± 1.83 ^d	10.36 ± 0.45 ^c	1.71 ± 0.07 ^{cd}	3.48 ± 0.11 ^a	0.06 ± 0.01 ^f	0.13 ± 0.59 ^h	0.24 ± 0.01 ^a
杰塞尔	32.77 ± 1.72 ^e	6.46 ± 0.12 ^f	1.83 ± 0.12 ^{bc}	2.57 ± 0.16 ^d	0.08 ± 0.01 ^{def}	0.17 ± 0.34 ^g	0.24 ± 0.01 ^a
苏达鲁斯卡	7.21 ± 0.43 ^h	13.48 ± 0.58 ^b	1.92 ± 0.13 ^b	3.10 ± 0.13 ^b	0.07 ± 0.01 ^{ef}	1.06 ± 1.96 ^b	0.18 ± 0.01 ^c
皇冠	15.44 ± 0.71 ^g	6.55 ± 0.39 ^f	1.40 ± 0.01 ^{ef}	1.83 ± 0.07 ^{fg}	0.09 ± 0.01 ^d	0.59 ± 1.69 ^d	0.16 ± 0.01 ^c
夕照	61.07 ± 0.18 ^b	7.69 ± 0.26 ^e	1.26 ± 0.08 ^f	1.70 ± 0.12 ^g	0.08 ± 0.01 ^{de}	0.52 ± 0.50 ^c	0.11 ± 0.01 ^g
丹棒	158.54 ± 7.64 ^a	15.65 ± 0.54 ^a	1.38 ± 0.07 ^{ef}	1.89 ± 0.06 ^f	0.28 ± 0.03 ^a	0.13 ± 0.68 ^h	0.17 ± 0.01 ^d
橙棒	54.95 ± 3.51 ^c	8.12 ± 0.69 ^e	1.62 ± 0.05 ^d	2.14 ± 0.05 ^e	0.18 ± 0.01 ^b	0.38 ± 0.26 ^f	0.16 ± 0.01 ^c
深秋红	59.37 ± 0.98 ^{bc}	3.15 ± 0.28 ^g	1.44 ± 0.02 ^e	0.55 ± 0.03 ^h	0.12 ± 0.01 ^c	0.96 ± 1.63 ^c	0.14 ± 0.01 ^f

注: 同列右肩不同的小写字母表示具有显著差异($P<0.05$); X₆、X₇、X₈、X₉、X₁₀、X₁₁、X₁₂分别表示维生素E含量、花青素含量、总酚含量、黄酮含量、类胡萝卜素含量、维生素C含量、总游离氨基酸含量。

花青素含量为 3.15~15.65 nmol/g, 8 个俄罗斯品种沙棘花青素含量均显著高于对照品种‘深秋红’(3.15 nmol/g) ($P<0.05$), 为 6.46~15.65 nmol/g, 其中‘丹棒’、‘苏达鲁斯卡’、‘金皇后’等 3 个品种花青素含量超过 10 nmol/g, 分别为 15.65、13.48、10.36 nmol/g, 分别为‘深秋红’的 4.97 倍、4.28 倍、3.29 倍。总酚含量为 1.26~2.68 mg/g, 俄罗斯品种中除‘夕照’(1.26 mg/g)、‘丹棒’(1.38 mg/g)和‘皇冠’(1.40 mg/g)外, 其余 5 个品种沙棘总酚含量均显著高于对照品种‘深秋红’(1.44 mg/g) ($P<0.05$), ‘伊丽莎白’总酚含量最高(2.68 mg/g), 为‘深秋红’的 1.86 倍。多酚类化合物通常被认为是沙棘中主要的生物活性成分和特征成分, 具有缓解代谢紊乱^[25]、抗氧化^[26]、抗菌^[27]、保鲜^[28]等作用。鉴于‘伊丽莎白’品种沙棘总酚含量的显著优势, 该品种可以作为一种富含多酚类化合物的优质沙棘资源, 用于提取和制备具有抗氧化、抗菌、保鲜等功能的天然产物。这些天然产物在食品、保健品、医药和化妆品等领域具有广阔的应用前景。

总黄酮含量为 0.55~3.48 mg/g, 8 个俄罗斯品种沙棘总黄酮含量均显著高于对照品种‘深秋红’(0.55 mg/g) ($P<0.05$), ‘金皇后’总黄酮含量最高, 为‘深秋红’的 6.33 倍。本研究测定的辽西地区栽植大果沙棘果实中总黄酮含量阈值为 0.55~3.48 mg/g, 与戈素芬等^[24]测定的辽西地区栽植的杂交沙棘总黄酮含量(1.41~3.53 mg/g)相近, 而低于张东为等^[8]测定的辽西地区栽植的中国沙棘的总黄酮含量(1.59~11.07 mg/g)。9 个大果沙棘品种类胡萝卜素含量为 0.06~0.28 mg/g, 俄罗斯品种中‘丹棒’(0.28 mg/g)和‘橙棒’(0.18 mg/g)类胡萝卜素含量显著高于对照品种‘深秋红’(0.12 mg/g) ($P<0.05$), 分别为‘深秋红’的 2.33 倍、1.5 倍, 其余 6 个品种沙棘类胡萝卜素含量均低于对照品种‘深秋红’。维生素 C 含量为 0.13~1.08 mg/g, 俄罗斯品种‘伊丽莎白’(1.08 mg/g)和‘苏达鲁斯卡’(1.06 mg/g), 维生素 C 含量显著高于对照品种‘深秋红’(0.96 mg/g), 分别为‘深秋红’的 1.13 倍、1.10 倍, 其余 6 个品种沙棘维生素 C 含量均低于对照品种‘深秋红’。总游离氨基酸含量为 0.11~0.24 mg/g, 俄罗斯品种中除‘夕照’(0.11 mg/g)外, 其余 7 个品种沙棘总游离氨基酸含量均显著高于对照品种‘深秋红’(0.14 mg/g)

($P<0.05$), ‘金皇后’和‘杰塞尔’含量最高, 是‘深秋红’的 1.71 倍。

2.3 糖酸含量及甜酸风味分析

水果的甜酸风味源自糖与酸的共同作用, 在甜度上, 果糖、蔗糖和葡萄糖的甜度贡献值分别为 1.75、1.0 和 0.75, 其中果糖甜度最高, 而葡萄糖口感最好^[29]。从图 1a 中可以看出, 参试沙棘品种果实糖组分含量存在显著差异 ($P<0.05$)。蔗糖含量在 1.79~5.49 mg/g 之间, 8 个俄罗斯品种沙棘蔗糖含量均显著低于对照品种‘深秋红’(5.49 mg/g) ($P<0.05$), 俄罗斯品种中‘苏达鲁斯卡’蔗糖含量最高(4.59 mg/g); 果糖含量在 5.67~15.07 mg/g 之间, 俄罗斯品种中除‘丹棒’(5.67 mg/g)、‘金皇后’(6.69 mg/g)外, 其余 6 个品种沙棘果糖含量均显著高于对照品种‘深秋红’(6.73 mg/g) ($P<0.05$), ‘皇冠’果糖含量最高, 是‘深秋红’的 2.24 倍; 葡萄糖含量在 2.74~12.76 mg/g 之间, 俄罗斯品种中除‘杰塞尔’(2.74 mg/g)、‘夕照’(3.77 mg/g)、‘皇冠’(3.82 mg/g)外, 其余 5 个品种沙棘葡萄糖含量均显著高于对照品种‘深秋红’(3.92 mg/g) ($P<0.05$), ‘橙棒’葡萄糖含量最高, 是‘深秋红’的 3.26 倍。吴紫洁等^[30]研究黑龙江省农业科学院绥棱浆果研究所基地保存的 12 个沙棘品种糖含量结果表明果糖含量在 3.00~65.27 mg/g 之间, 葡萄糖含量在 41.57~94.31 mg/g 之间, 葡萄糖含量明显高于本研究结果。这可能是由于沙棘品种、栽培地点、气候条件等导致糖积累不同。

从图 1b 和图 1c 中可以看出, 参试的 9 个沙棘品种果实可溶性糖含量和总甜度值存在显著差异 ($P<0.05$)。可溶性糖含量介于 18.46~29.86 mg/g 之间, 含量从大到小依序为: ‘橙棒’>‘深秋红’>‘苏达鲁斯卡’>‘皇冠’>‘丹棒’>‘伊丽莎白’>‘金皇后’>‘夕照’>‘杰塞尔’。俄罗斯品种中仅‘橙棒’(29.86 mg/g)可溶性糖含量高于对照品种‘深秋红’(28.26 mg/g), 但差异不显著, 其余 7 个品种可溶性糖含量均低于对照品种‘深秋红’。由于每种糖对果实甜度贡献值不同, 总甜度值大小顺序与可溶性糖含量不同, 总甜度值从大到小依序为: ‘皇冠’>‘苏达鲁斯卡’>‘橙棒’>‘伊丽莎白’>‘夕照’>‘杰塞尔’>‘深秋红’>‘金皇后’>‘丹棒’。俄罗斯品种中除‘丹棒’(16.86)、‘金皇后’(18.63)外, 其余

6个品种总甜度值均显著高于对照品种‘深秋红’ (20.01) ($P<0.05$), ‘皇冠’总甜度值 (33.33) 最高, 为‘深秋红’的1.67。

从图1d中可以看出, 参试的9个沙棘品种果实的糖酸比介于0.87~1.87之间, 俄罗斯品种中‘橙棒’(1.87)糖酸比显著高于对照品种‘深秋红’(1.50), ‘金皇后’(1.55)与‘深秋红’差异不显著, 其余6个品种糖酸比均低于对照品种‘深秋红’, 仅‘杰塞尔’糖酸比 <1 。9个沙棘品种果实的甜酸比介于0.85~2.00之间, 俄罗斯品种中除‘丹棒’(0.85)、‘杰塞尔’(1.04)外, 其余6个品种甜酸比均显著高于对照品种深秋红 (1.07) ($P<0.05$), ‘皇冠’甜酸比 (2.00) 最高, 仅‘丹棒’甜酸比 <1 。果实的糖酸比影响果实的风味和品质, 但糖酸比并不能直接反映口感, 因为糖的甜度不仅与糖的含量有关, 还与种类有关, 例如, 果糖甜度

约为葡萄糖的2.3倍。由上述分析可知, ‘皇冠’的甜酸比最高, 其口感良好, 适合鲜食。而‘丹棒’、‘杰塞尔’糖酸比与甜酸比均较低, 在口感上可能相对较为平淡, 但其特点使其更适合加工为低糖产品。

2.4 果实品质相关性分析

相关性分析是检验性状间关联性的重要方法, 对果实品质研究具有重要意义^[31]。采用 Pearson 法对参试沙棘果实主要性状及成分进行相关性分析 (表3)。由相关性分析结果可知, 9个不同品种沙棘20项果实品质指标之间存在不同程度相关性。有12对指标间呈极显著相关 ($P<0.01$), 其中极显著正相关关系7对, 极显著负相关关系5对; 有15对指标间呈显著相关 ($P<0.05$), 其中显著正相关关系7对, 显著负相关关系8对。

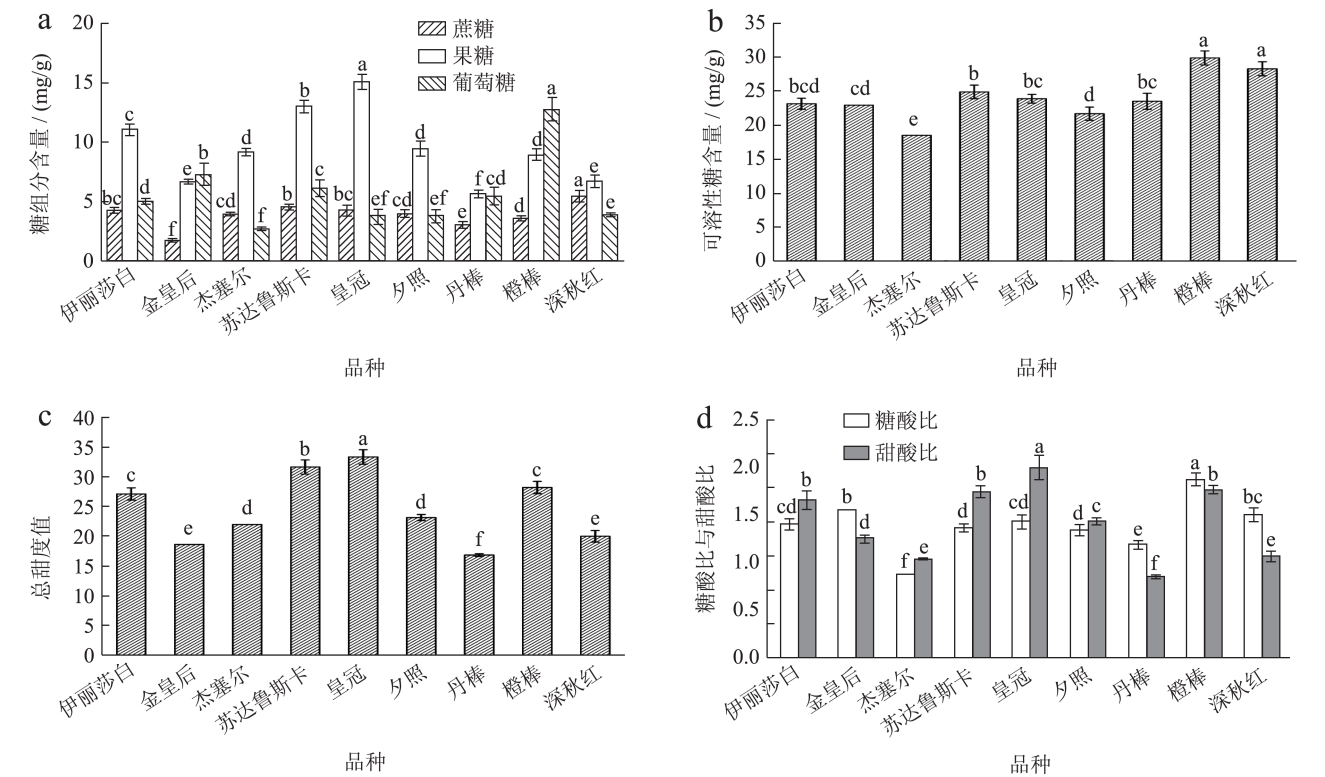


图 1 参试沙棘果实糖酸组成及酸甜品质分析

Fig.1 Analysis of sugar and acid composition and sour and sweet quality of seabuckthorn berries

注: 同列上方不同的小写字母表示具有显著差异 ($P<0.05$)。

表 3 不同优株沙棘果实主要性状及成分相关性

Table 3 The correlation between the main characteristics and components of different superior seabuckthorn berries

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{15}	X_{16}	X_{17}	X_{18}	X_{19}	X_{20}
X_1	1																			
X_2	0.959**	1																		
X_3	0.455	0.341	1																	
X_4	0.523	0.500	-0.178	1																
X_5	0.766*	0.868**	-0.170	0.613	1															
X_6	-0.640	-0.756*	0.075	-0.207	-0.821**	1														
X_7	-0.214	-0.306	0.479	-0.430	-0.567	0.423	1													
X_8	0.295	0.233	0.123	0.074	0.165	-0.440	0.127	1												
X_9	0.529	0.438	0.772*	-0.195	0.045	-0.351	0.528	0.596	1											
X_{10}	-0.847**	-0.884**	-0.080	-0.411	-0.882**	0.875**	0.430	-0.310	-0.356	1										
X_{11}	-0.011	0.062	-0.705*	0.162	0.435	-0.502	-0.190	0.461	-0.133	-0.351	1									
X_{12}	0.630	0.509	0.719*	0.167	0.147	-0.235	0.195	0.592	0.748*	-0.254	-0.284	1								
X_{13}	-0.041	-0.023	-0.120	0.633	0.033	0.293	0.035	-0.082	-0.28	0.320	-0.112	0.132	1							
X_{14}	-0.156	-0.003	-0.889**	0.458	0.459	-0.326	-0.495	0.078	-0.584	-0.151	0.761*	-0.471	0.358	1						
X_{15}	0.217	0.448	-0.156	-0.104	0.548	-0.731*	-0.100	0.237	0.194	-0.486	0.478	-0.082	-0.178	0.393	1					
X_{16}	-0.413	-0.461	0.121	-0.725*	-0.558	0.074	0.237	0.044	0.243	0.317	-0.160	0.004	-0.471	-0.369	-0.157	1				
X_{17}	-0.594	-0.573	-0.578	-0.481	-0.295	0.063	-0.134	-0.149	-0.388	0.333	0.333	-0.452	-0.305	0.262	-0.088	0.667*	1			
X_{18}	0.023	0.248	-0.260	-0.278	0.387	-0.708*	-0.094	0.250	0.165	-0.362	0.521	-0.159	-0.272	0.409	0.941**	0.151	0.206	1		
X_{19}	-0.369	-0.369	-0.264	-0.695*	-0.246	-0.121	-0.119	-0.047	-0.068	0.061	0.214	-0.319	-0.757*	-0.077	0.013	0.774*	0.843**	0.279	1	
X_{20}	0.006	0.193	-0.173	-0.482	0.286	-0.681*	-0.102	0.229	0.223	-0.389	0.451	-0.186	-0.585	0.207	0.850**	0.311	0.289	0.938**	0.513	1

注: * 表示显著性相关 ($P < 0.05$); ** 表示极显著性相关 ($P < 0.01$)。

沙棘果实的百果质量、纵径、果形指数间均互为极显著 ($P<0.01$) 或显著 ($P<0.05$) 正相关关系, 说明沙棘果实越长、果形越长、果实也越重。果实百果重与类胡萝卜素含量呈现出极显著的负相关 ($P<0.01$), 相关系数为 -0.847 , 说明果实越重, 沙棘类胡萝卜素含量越低。纵径与类胡萝卜素含量、维生素 E 含量分别呈现出极显著 ($P<0.01$) 和显著的负相关 ($P<0.05$), 相关系数分别为 -0.884 、 -0.756 , 说明果实越长, 类胡萝卜素含量和维生素 E 含量越低。果实横径与总黄酮含量呈显著正相关 ($P<0.05$), 与蔗糖含量和维生素 C 含量分别呈现出极显著 ($P<0.01$) 和显著的负相关 ($P<0.05$), 说明果实越宽, 黄酮含量越高, 而蔗糖含量和维生素 C 含量越低。果柄长与葡萄糖含量和糖酸比呈显著负相关 ($P<0.05$), 说明果柄越长, 葡萄糖含量和糖酸比越低。维生素 E 含量与类胡萝卜素含量呈现出极显著的正相关性 ($P<0.01$), 相关系数为 0.875 , 说明维生素 E 含量越高, 类胡萝卜素含量越高, 维生素 E 与类胡萝卜素是沙棘果实的重要营养成分, 张东为等^[8]对中国沙棘果实进行研究, 同样发现维生素 E 含量与类胡萝卜素含量呈极显著正相关关系 ($P<0.01$)。维生素 E 与果糖含量、总甜度值、甜酸比呈显著负相关 ($P<0.05$), 说明维生素 E 含量越高, 沙棘果实甜度越低。总黄酮含量与总游离氨基酸含量呈现显著正相关 ($P<0.05$), 相关系数为 0.748 , 说明总黄酮含量与总游离氨基酸含量相互影响。维生素 C 含量和蔗糖含量呈显著正相关 ($P<0.05$), 说明维生素 C 含量越高, 蔗糖含量也越高。

综上所述, 沙棘果实品质指标间显著相关, 反映了信息冗余, 故采用主成分分析和回归分析对 20 项指标进行简化处理。

2.5 果实品质相关性主成分分析

主成分分析通过利用变量间的强相关性实现降维, 提取其主要特征成分, 以少数关键因素反映果实多性状间的复杂关系^[32,33]。对 9 个沙棘品种 20 项品质指标进行主成分分析, 结果见表 4。基于特征值 >1 的原则, 提取 5 个主成分, 其累计方差贡献率为 93.767% , 可代表沙棘果实品质的综合信息。第一主成分的方差贡献率为 32.269% , 为 5 个主成分中最大值, 表明其对沙棘果实品质影响最大, 由表 5 可知, 第一主成分主要影响因子为百果

质量、果实纵径、果形指数、维生素 E 含量和类胡萝卜素含量, 其中百果质量、果实纵径、果形指数与第一主成分呈正相关, 表明主成分荷载值越大, 这 3 种品质指标越大, 而维生素 E 含量和类胡萝卜素含量与第一主成分呈负相关, 表明主成分荷载值越大, 其品质指标越小。第二主成分方差贡献率为 25.590% , 主要影响因子为可溶性糖含量、总甜度值、糖酸比和甜酸比, 其均与第二主成分呈正相关。第三主成分方差贡献率为 20.855% , 主要影响因子为横径、果柄、总黄酮含量、可滴定酸含量、蔗糖含量和葡萄糖含量, 其中横径、总黄酮含量、葡萄糖含量与第三主成分呈正相关, 而果柄、可滴定酸含量和蔗糖含量与第三主成分呈负相关。第四主成分、第五主成分方差贡献率分别为 8.396% 、 6.657% , 主要影响因子分别为花青素含量、总酚含量, 均与该主成分呈正相关。

表 4 总方差分析
Table 4 Decomposition of total variance

成分	特征值	方差贡献率/%	累积贡献率/%
1	6.454	32.269	32.269
2	5.118	25.590	57.859
3	4.171	20.855	78.714
4	1.679	8.396	87.11
5	1.331	6.657	93.767
6	0.665	3.323	97.089
7	0.392	1.959	99.049
8	0.19	0.951	100
9	3.43E-15	1.71E-14	100
10	6.90E-16	3.45E-15	100
11	5.27E-16	2.63E-15	100
12	3.72E-16	1.86E-15	100
13	1.85E-16	9.27E-16	100
14	1.09E-16	5.44E-16	100
15	5.79E-17	2.89E-16	100
16	-1.32E-17	-6.59E-17	100
17	-1.49E-16	-7.46E-16	100
18	-3.22E-16	-1.61E-15	100
19	-4.53E-16	-2.26E-15	100
20	-7.77E-16	-3.89E-15	100

表 5 因子载荷量

Table 5 Load capacity of factors

指标	主成分				
	1	2	3	4	5
X ₁	0.829	-0.447	0.133	-0.258	0.086
X ₂	0.918	-0.286	0.08	-0.211	-0.094
X ₃	0.052	-0.742	0.641	-0.057	-0.171
X ₄	0.503	-0.387	-0.713	-0.027	0.218
X ₅	0.929	0.089	-0.257	-0.200	-0.018
X ₆	-0.895	-0.343	-0.211	0.081	-0.080
X ₇	-0.373	-0.307	0.467	0.577	-0.147
X ₈	0.431	-0.019	0.338	0.509	0.597
X ₉	0.356	-0.380	0.795	0.241	0.116
X ₁₀	-0.917	-0.042	-0.106	0.308	-0.063
X ₁₁	0.409	0.657	-0.219	0.339	0.349
X ₁₂	0.360	-0.640	0.433	0.134	0.362
X ₁₃	-0.038	-0.418	-0.663	0.440	-0.005
X ₁₄	0.305	0.576	-0.696	0.261	0.118
X ₁₅	0.650	0.491	0.175	0.318	-0.438
X ₁₆	-0.471	0.347	0.658	-0.116	0.24
X ₁₇	-0.443	0.752	0.067	-0.157	0.325
X ₁₈	0.486	0.684	0.277	0.301	-0.298
X ₁₉	-0.293	0.706	0.461	-0.375	0.237
X ₂₀	0.397	0.728	0.473	0.092	-0.263

2.6 果实品质的综合评价

根据主成分分析法，计算 5 个主成分与原 20

项果实品质指标的标准化数据的线性组合，即各主成分的表达式为（Z 表示各沙棘品质指标标准化后的数据）：

$$F_1=0.33Z_1+0.36Z_2+0.02Z_3+0.20Z_4+0.37Z_5-0.35Z_6-0.15Z_7+0.17Z_8+0.14Z_9-0.36Z_{10}+0.16Z_{11}+0.14Z_{12}-0.01Z_{13}+0.12Z_{14}+0.26Z_{15}-0.19Z_{16}-0.17Z_{17}+0.19Z_{18}-0.12Z_{19}+0.16Z_{20}$$

$$F_2=-0.20Z_1-0.13Z_2-0.33Z_3-0.17Z_4+0.04Z_5-0.15Z_6-0.14Z_7-0.01Z_8-0.17Z_9-0.02Z_{10}+0.29Z_{11}-0.28Z_{12}-0.18Z_{13}+0.25Z_{14}+0.22Z_{15}+0.15Z_{16}+0.33Z_{17}+0.30Z_{18}+0.31Z_{19}+0.32Z_{20}$$

$$F_3=0.07Z_1+0.04Z_2+0.31Z_3-0.35Z_4-0.13Z_5-0.10Z_6+0.23Z_7+0.17Z_8+0.39Z_9-0.05Z_{10}-0.11Z_{11}+0.21Z_{12}-0.32Z_{13}-0.34Z_{14}+0.09Z_{15}+0.32Z_{16}+0.03Z_{17}+0.14Z_{18}+0.23Z_{19}+0.23Z_{20}$$

$$F_4=-0.20Z_1-0.16Z_2-0.04Z_3-0.02Z_4-0.15Z_5+0.06Z_6+0.452Z_7+0.39Z_8+0.19Z_9+0.24Z_{10}+0.26Z_{11}+0.10Z_{12}+0.34Z_{13}+0.20Z_{14}+0.25Z_{15}-0.09Z_{16}-0.12Z_{17}+0.23Z_{18}-0.29Z_{19}+0.07Z_{20}$$

$$F_5=0.07Z_1-0.08Z_2-0.15Z_3+0.19Z_4-0.02Z_5-0.07Z_6-0.13Z_7+0.52Z_8+0.10Z_9-0.05Z_{10}+0.30Z_{11}+0.31Z_{12}+0.00Z_{13}+0.10Z_{14}-0.38Z_{15}+0.21Z_{16}+0.28Z_{17}-0.26Z_{18}+0.21Z_{19}-0.23Z_{20}$$

基于主成分分析的权重，构建沙棘果实品质的综合评价函数 $F=0.344F_1+0.273F_2+0.222F_3+0.090F_4+0.070F_5$ ，其权重根据各主成分的相对方差贡献率确定。该评价函数综合反映了果实品质，得分越高则表明果实综合品质越佳。

表 6 参试沙棘果实得分及排名

Table 6 Score and ranking of sea buckthorn fruits in the trial

品种	主成分					综合得分	排名
	1	2	3	4	5		
伊丽莎白	1.545	0.731	0.964	1.553	1.456	1.187	2
金皇后	0.427	-2.626	3.042	-1.933	0.583	-0.028	5
杰塞尔	2.547	-3.599	-1.519	0.248	-0.023	-0.423	7
苏达鲁斯卡	2.148	1.166	0.765	1.585	-0.034	1.368	1
皇冠	1.907	1.958	0.209	-0.197	-2.016	1.078	3
夕照	-0.093	0.333	-1.119	-0.997	-1.249	-0.367	6
丹棒	-5.088	-2.268	-0.592	1.432	-0.586	-2.413	9
橙棒	-2.928	2.690	2.048	-0.509	0.429	0.166	4
深秋红	-0.465	1.613	-3.798	-1.183	1.439	-0.568	8

根据 5 个主成分的线性组合以及综合得分公式,求得 9 个参试沙棘果实的综合得分,如表 6 所示。9 个参试沙棘综合得分值范围为 -2.413~1.368,表明不同品种沙棘果实品质差异明显。从表 6 中可看出 9 参试沙棘果实综合得分由高到低依次为:‘苏达鲁斯卡’>‘伊丽莎白’>‘皇冠’>‘橙棒’>‘金皇后’>‘夕照’>‘杰塞尔’>‘深秋红’(对照品种)>‘丹棒’。除‘丹棒’外,其余 7 个俄罗斯品种果实品质均优于对照品种‘深秋红’,其中‘苏达鲁斯卡’、‘伊丽莎白’、‘皇冠’、‘橙棒’综合得分为正值,表明其果实综合品质高于平均水平。

2.7 品质评价预测模型构建

以沙棘样品综合得分为因变量,20 个果实品质指标作为自变量,通过 SPSS 软件逐步回归分析,构建沙棘果实品质的理论预测模型(表 7),模型为 $Y=-2.017-0.014X_6+1.300X_{20}+0.528X_8$,说明维生素 E 含量、甜酸比、总酚含量 3 个性状指标可以作为俄罗斯第三代沙棘果实品质评价模型内的重要因子。其调整 R^2 值为 0.975,显著性小于 0.05。将自变量代入模型计算出的 Y 值与综合得分 F 高度相关($R^2=0.992$),验证了模型的科学性和可靠性。该回归模型在主成分分析的基础上,将原有 20 项指标简化为 3 项,为沙棘果实品质的预测提供了有利参考。

表 7 沙棘果实品质预测模型回归系数
Table 7 Regression coefficients of seabuckthorn berry quality prediction model

模型	非标准化系数		标准系数		显著性
	B	标准误差	试用版	t	
常量	-2.017	0.55		-3.67	0.014
X ₆	-0.014	0.002	-0.545	-6.513	0.001
X ₂₀	1.300	0.23	0.438	5.664	0.002
X ₈	0.528	0.171	0.195	3.091	0.027

3 结论

本研究基于 8 个俄罗斯第三代大果沙棘品种及目前“三北”地区大面积推广的主栽大果沙棘‘深秋红’等 9 个沙棘品种果实的主要性状和成分分析,通过主成分分析提取了 5 个特征值显著(>1)的成分,累计方差贡献率高达 93.767%,能够较全面代表样品原始信息。主成分综合得分结果显示,除‘丹棒’外,其余 7 个俄罗斯引进第三代沙

棘品种果实品质均优于对照品种‘深秋红’,特别是‘苏达鲁斯卡’、‘伊丽莎白’、‘皇冠’、‘橙棒’得分较高,可作为优质沙棘资源重点加以推广利用。结合主成分分析,采用逐步回归分析方法,对评价指标进行简化,并得到评价模型: $Y=-2.017-0.014X_6+1.300X_{20}+0.528X_8$,将原有 20 项评价指标简化为维生素 E 含量、甜酸比和总酚含量等 3 项指标,基于该模型可对辽西地区俄罗斯第三代沙棘果实品质进行综合评价,简化了沙棘果实品质评价指标,可为沙棘果实品质评价提供理论依据。

参考文献

[1] 冯丽娟.沙棘果渣总黄酮不同提取方法比较[J].山西林业科技,2022,51(1):19-21.

[2] 卢顺光,卢健,温秀凤.沙棘植物资源分布与营养学应用综述[J].中国水土保持,2019,7:45-49.

[3] 王鑫,郭月峰,姚云峰,等.环境因子变化对砒砂岩区平茬沙棘细根现存量的影响[J].东北林业大学学报,2021,49(6):40-45.

[4] RAAL A, RUSALEPP L, CHIRU T, et al. Polyphenolic compounds and antioxidant activity of sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.) [J]. Journal, 2023, 92(11): 2965-2979.

[5] YANG Y, L M, SUN J W, et al. Microwave-assisted aqueous two-phase extraction of polysaccharides from *Hippophae rhamnoides* L.: Modeling, characterization and hypoglycemic activity [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 254(P1): 127626.

[6] NETREBA N, SANDULACHI E, MACARI A, et al. A study on the fruiting and correlation between the chemical indicators and antimicrobial properties of *Hippophae rhamnoides* L [J]. Horticulturae, 2024, 10(2): 137.

[7] REN R R, LI N, WANG Y L, et al. The bioactive components as well as the nutritional and health effects of sea buckthorn [J]. RSC ADVANCES, 2020, 10(73): 44654-44671.

[8] 张东为,赵鑫丹,戈素芬,等.沙棘果实品质的主成分分析及综合评价[J].经济林研究,2023,41(2):1-10.

[9] 王珊珊,张萍,张冰冰,等.寒地沙棘种质资源果实品质分析与综合评价[J].农业工程学报,2023,39(13):281-289.

[10] 史星雲,徐珊珊,柳丽萍,等.基于主成分分析果桑品质评价模型的建立[J].中国果树,2024,3:54-59.

[11] 李艳冬,李运兴,殷益明,等.基于主成分分析蝴蝶兰质量评价模型建立[J].北方园艺,2024,6:61-68.

[12] 胡建忠,单金友,张东为,等.俄罗斯第三代沙棘良种引进试验示范[M].北京:中国环境出版集团,2021.

[13] BENJARUK V, VARAPORN L. Antioxidant properties and color stability of anthocyanin purified extracts from Thai Waxy Purple corn cob [J]. Journal of Food and Nutrition Research,

- 2015, 3(10): 629-636.
- [14] ATAKILT A, TEKLAY K H, ALEMAYEHU M, et al. Assessment on antioxidant activity of the aqueous leaf extracts of *Combretum microphyllum* and the effect of Co(II)-leaf extract complex on antibacterial activity of leaf extracts of the plant material [J]. Scientific African, 2022, 18: e01432.
- [15] 牛新奎, 韩小贤, 郑学玲. 黑小麦粉的抗氧化成分及活性 [J]. 现代食品科技, 2022, 38(9): 292-297.
- [16] ČULINA P, ZORIĆ Z, GAROFULIĆ I E, et al. Optimization of the spray-drying encapsulation of Sea buckthorn berry oil [J]. Foods (Basel, Switzerland), 2023, 12(13): 2448.
- [17] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB/T 5009.86-2016, 食品安全国家标准 食品中抗坏血酸的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [18] 赵时珊, 蔡芳, 隋勇, 等. 不同品种甘薯全粉品质特性比较 [J]. 现代食品科技, 2022, 38(8): 218-228.
- [19] GOELTZ J C, CUEVAS L A. Guided inquiry activity for teaching titration through total titratable acidity in a general chemistry laboratory course [J]. Journal of Chemical Education, 2021, 98(3): 882-887.
- [20] 刘建军, 陈猛, 罗影, 等. 春季不同时期绿茶品质化学成分研究[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(16): 146-154.
- [21] 薛晓芳, 赵爱玲, 焦文丽, 等. 枣品种资源果实的糖酸含量特征分析[J]. 植物遗传资源学报, 2024, 25(1): 60-71.
- [22] 张建国. 沙棘属植物育种研究[M]. 北京: 中国林业出版社, 2010.
- [23] YANG X J, LIU Y R, TANG Z H, et al. Total flavonoids of *Hippophae rhamnoides* L. improves type 2 diabetes symptoms in rats through down-regulating of the DAG/PRKCA/MAPK10/p65/TNF- α signalling pathway [J]. Journal of Ethnopharmacology, 2023, 318(Pt A): 116962.
- [24] 戈素芬, 张东为, 赵鑫丹, 等. 5个杂交沙棘品种果实营养成分比较分析[J]. 食品工业科技, 2022, 43(22): 328-335.
- [25] YUAN L P, ZHANG W L, FANG W X, et al. Sea buckthorn polyphenols alleviate high-fat-diet-induced metabolic disorders in mice via reprogramming hepatic lipid homeostasis owing to directly targeting fatty acid synthase [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2024, 72(15): 8632-8649.
- [26] ČULINA P, REPAJIĆ M, GAROFULIĆ I E, et al. Evaluation of polyphenolic profile and antioxidant activity of sea buckthorn (*Elaeagnus rhamnoides* (L.) A. Nelson) leaf and berry extracts obtained via optimized microwave-assisted and accelerated solvent extraction [J]. Processes, 2024, 12(1): 126.
- [27] ABEBE M, RANJAN C B, LINGARAJ S, et al. Optimization of polyphenol extraction from *Hippophae salicifolia* D. Don leaf using supercritical CO₂ by response surface methodology [J]. 3 Biotech, 2022, 12(11): 292.
- [28] HUANG H, LI Y T, GUI F X, et al. Optimizing the purification process of polyphenols of sea buckthorn seed and its potential freshness effect [J]. LWT, 2023, 173: 114380.
- [29] ZHAO J B, LIANGZ C, YANG J, et al. Differences of sugar and acid contents among peach, flat peach, nectarine and their progeny populations [J]. Acta Horticulturae Sinica, 2009, 36(1): 93-98.
- [30] 吴紫洁, 阮成江, 李贺, 等. 12个沙棘品种的果实可溶性糖和有机酸组分研究[J]. 西北林学院学报, 2016, 31(4): 106-112.
- [31] 索婷, 杨书林, 林娜, 等. 小麦粉特性与生湿面品质的关系研究[J]. 食品与生物技术学报, 2024, 43(3): 54-65.
- [32] 刘楚海, 李文钊, 程建凯, 等. 饮料用酵母抽提物风味特性分析及应用效果初探[J]. 食品与生物技术学报, 2024, 43(1): 87-97.
- [33] LI Q L, TAN W, ZHAO L, et al. A comprehensive evaluation of 45 pomegranate (*Punica granatum* L.) cultivars based on principal component analysis and cluster analysis [J]. International Journal of Fruit Science, 2023, 23(1): 135-150.