

不同产地菊芋成分差异及综合品质评价

李心怡¹, 阚启鑫¹, 谭悦¹, 王祺皓¹, 韩少钦², 李院平², 刘果³, 韩勇军²,

胡华成², 肖苏尧¹, 宋明月¹, 段杉^{1*}, 曹庸^{1*}

(1. 华南农业大学食品学院, 广东省功能食品活性物重点实验室, 广东广州 510642)

(2. 湖南贵威生物科技有限公司, 湖南永州 425500) (3. 仲恺农业工程学院轻工食品学院, 广东广州 510225)

摘要: 为了探究不同产地菊芋的成分特征, 并建立一种科学的菊芋品质评价方法, 该研究以 41 个产地的菊芋为研究对象, 测定其 14 项基本品质指标含量。通过主要糖类组分指纹图谱相似度评价、相关性分析、聚类分析探究了不同产地菊芋的成分差异及气象因素对成分的影响, 利用相关性分析、主成分分析、熵权法结合灰色关联度分析等多种化学计量学方法建立菊芋综合品质评价模型。结果表明, 不同产地菊芋的理化成分含量存在显著差异 ($P<0.05$), 其中总黄酮的变异系数为 63.78%, 差异最大。主要糖类组分指纹图谱中共确定 11 个共有峰, 整体相似度在 0.890~0.999, 主要差异在于含量的不同, 其中菊芋的多种糖类组分含量与降雨量、气温、日照时长等气象因素密切相关。聚类分析将 41 个产地的菊芋分为 4 类, 相关性分析与主成分分析筛选出 4 个核心品质指标, 分别为蔗果五糖、水分、果糖和灰分。灰色关联度分析结果显示吉林白山、甘肃定西、辽宁锦州的菊芋综合品质最优。该研究为菊芋的品质评价及综合利用提供了理论基础。

关键词: 菊芋; 指纹图谱; 主成分分析; 聚类分析; 灰色关联度分析; 品质评价

文章编号: 1673-9078(2026)5-280-293

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.5.0302

Compositional Differences and Comprehensive Quality Evaluation of

Helianthus tuberosus from Different Origins

LI Xinyi¹, KAN Qixin¹, TAN Yue¹, WANG Qihao¹, HAN Shaoqin², LI Yuanping², LIU Guo³, HAN Yongjun²,

HU Huacheng², XIAO Suyao¹, SONG Mingyue¹, DUAN Shan^{1*}, CAO Yong^{1*}

(1.College of Food Science, Guangdong Provincial Key Laboratory of Nutraceuticals and Functional Foods, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)(2.Hunan Guiwei Biotechnology Co. Ltd., Yongzhou 425500, China)

(3.College of Light Industry and Food Science, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510225, China)

Abstract: To investigate compositional characteristics of *Helianthus tuberosus* from different origins and to establish a scientific quality evaluation system, samples from 41 origins were collected and analyzed for 14 fundamental quality indicators. Compositional differences among origins and the influence of meteorological factors were examined using fingerprint similarity analysis of major sugar components, correlation analysis, and cluster analysis. A comprehensive quality evaluation model for *H. tuberosus* was constructed by integrating correlation analysis, principal component analysis (PCA), the entropy weight method,

引文格式:

李心怡, 阚启鑫, 谭悦, 等. 不同产地菊芋成分差异及综合品质评价[J]. 现代食品科技, 2026, 42(5): 280-293.

LI Xinyi, KAN Qixin, TAN Yue, et al. Compositional differences and comprehensive quality evaluation of *Helianthus tuberosus* from different origins [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(5): 280-293.

收稿日期: 2025-03-04; 修回日期: 2025-04-27; 接受日期: 2025-05-01

基金项目: 贵威生物营养与健康研究院项目 (5100-PH23004); 广东省功能食品活性物重点实验室 (2018B030322010); 广东省引进创新创业团队项目 (2019ZT08N291)

作者简介: 李心怡 (1999-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品新原料与功能性食品, E-mail: lixinyi822@163.com

通讯作者: 曹庸 (1966-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品化学, E-mail: caoyong2181@scau.edu.cn; 共同通讯作者: 段杉 (1966-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 食品加工技术, E-mail: duanshan@scau.edu.cn

and grey relational analysis. The results revealed significant differences in physicochemical component contents of *H. tuberosus* from different origins ($P<0.05$), among which total flavonoids exhibited the highest coefficient of variation (63.78%). Fingerprint analysis of major sugar components identified 11 common peaks, with overall similarity values ranging from 0.890 to 0.999, indicating consistent component types but notable differences in their contents. The contents of individual sugars were closely associated with meteorological factors such as rainfall, temperature, and sunshine duration. Cluster analysis classified *H. tuberosus* samples from the 41 origins into four distinct groups. Correlation analysis and PCA identified four key quality indicators, sucrose pentasaccharide, water content, fructose, and ash, as the core contributors to quality differentiation. Grey relational analysis ranked samples from Baishan (Jilin), Dingxi (Gansu), and Jinzhou (Liaoning) as having the highest comprehensive quality. These findings provide a theoretical basis for the quality evaluation, origin differentiation, and comprehensive utilization of *H. tuberosus*.

Key words: *Helianthus tuberosus* L.; fingerprint analysis; principal component analysis; cluster analysis; grey relational analysis; quality evaluation

菊芋 (*Helianthus tuberosus* L.) 是一种菊科向日葵属的多年生宿根性植物, 原产于北美洲, 后经欧洲传入中国。菊芋抗逆性强、生长要求不高且营养价值丰富, 被联合国粮农组织称为“21 世纪人畜共用作物”, 在中国大部分地区均有种植。菊芋早期以块茎、茎叶入药, 记载于《中华本草》、《全国中草药汇编》中, 具有清热凉血、消肿等功效。菊芋块茎是主要的食用部位, 具有像芦笋一样的细腻口感和甜美味道。块茎中含有丰富的碳水化合物、蛋白质、矿物质、黄酮等营养和活性成分, 其中碳水化合物主要是菊粉型果聚糖, 具有益生元特性, 在调节血糖和脂质代谢^[1,2]、抗炎^[3]、改善便秘^[4]、降低结肠癌风险^[5]、缓解抑郁^[6]等方面具有很大潜力。因此, 菊芋在食品、生化、医药等领域都具有广阔的应用前景^[7]。

菊芋的化学成分因产地不同有所差异, 会影响其品质特性与加工方向, 因此不同产地菊芋的成分差异及品质评价在菊芋加工中具有重要的研究意义。赵孟良等^[8]以 29 份来自法国、丹麦和中国的菊芋为研究对象, 通过主成分分析和聚类分析筛选出高糖、高蛋白等品质性状优异的种质资源; 王璐等^[9]对不同来源的 34 份菊芋的植株性状、块茎产量和品质性状进行差异性分析, 筛选出高产量、高蛋白、高可溶性糖、高纤维等特异种质, 并基于主成分分析构建综合评价模型, 得出 6 份适宜在山东省盐碱地种植的种质。目前关于不同产地菊芋的研究中, 大多数报道的样本数量及品质评价指标较为有限, 且多以筛选优质种质资源为研究目的, 对菊芋加工生产的指导作用不明显。菊芋的品质评价方法也以单一的主成分分析为主, 结合多种化学计量学方法分析菊芋成分差异, 以及利用灰色关联度进行综合品质评价的研究还未见报道。

本研究对 41 个产地菊芋的基本品质指标、主要糖

类组分进行测定, 结合聚类分析、相关性分析、主成分分析、灰色关联度分析等多种化学计量学方法, 探究菊芋成分的产地差异, 并建立一种科学的菊芋综合品质评价模型, 以期对菊芋加工的产地选择、品质评价及菊芋资源的合理利用提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

41 个产地菊芋: 为确保样本具有一定代表性, 于 2023 年菊芋成熟期间, 通过线上平台、线下市场两种渠道收集菊芋样本, 其中涵盖湖南、陕西、河南等中国菊芋的主要产区, 每个产地收集新鲜菊芋约 2 kg, 样本的基本信息及产地环境信息如表 1 所示。

氢氧化钾、氢氧化钠、碳酸钠, 天津市大茂化学试剂厂; 无水乙醇, 天津市富宇精细化工有限公司; 芦丁 (分析对照品, $\geq 99\%$)、没食子酸 (分析对照品, $\geq 99\%$)、硝酸铝, 上海麦克林生化科技有限公司; 亚硝酸钠, 江苏永华化学有限公司; 果糖、葡萄糖、蔗糖、蔗果三糖、蔗果四糖、蔗果五糖、蔗果八糖 (均为标准品, $\geq 99\%$)、福林酚 (生化试剂), 上海源叶生物科技有限公司; 乙腈 (色谱纯), 瑞典 Oceanpak 公司。未特别标注试剂均为分析纯, 水为一级水。

DHG-9240A 电热鼓风干燥箱, 上海一恒科学仪器有限公司; AL104 万分之一电子分析天平, 梅特勒-托利多仪器 (上海) 有限公司; LRI2 手持折光仪, 广州市铭睿电子科技有限公司; Rapid N exceed 杜马斯快速定氮分析仪, 德国 Elementar 公司; SXL-1002 马弗炉, 上海精宏实验设备有限公司; VersaMax 光栅型酶标仪, 上海美谷分子仪器有限公司; DA-8D 电热恒温水槽, 上海森信试验仪器有限公司; JP-100 超声波清

洗仪, 深圳洁盟技术股份有限公司; FD-1A-50 冷冻干

色谱仪, 配备 RID-10A 检测器及 LC-Solution 15C 数

燥机, 杭州川一实验仪器有限公司; LC-15C 高效液相

据处理系统, 上海岛津有限公司。

表 1 菊芋样品的基本信息及产地环境信息

Table 1 Basic information of <i>Helianthus tuberosus</i> and origin environment information							
编号	地区类别	产地	块茎颜色	年降水量/mm	年均气温/℃	年均相对湿度/%	累积日照时长/h
S1	华北地区	河北省石家庄市	白皮	687.19	13.79	58.76	2 531.28
S2		河北省保定市	白皮	664.81	12.57	58.95	2 522.07
S3		山西省运城市	红皮	763.94	13.76	62.11	2 138.16
S4	东北地区	吉林省白山市	红皮	772.15	6.20	69.78	2 659.38
S5		辽宁省锦州市	红皮	513.57	10.88	58.79	2 872.01
S6		辽宁省铁岭市	红皮	704.46	8.74	63.89	2 816.22
S7		辽宁省沈阳市	红皮	677.69	9.75	61.41	2 750.53
S8		辽宁省大连市	红皮	691.52	11.88	65.71	2 642.43
S9	华东地区	江苏省徐州市	红皮	903.09	15.95	71.41	2 062.04
S10		江西省宜春市	白皮	1 557.32	19.06	79.06	1 543.39
S11		江西省赣州市	白皮	1 517.32	20.72	77.84	1 614.14
S12		山东省济宁市	红皮	770.28	15.33	68.11	2 352.37
S13		山东省菏泽市	白皮	781.18	15.81	68.32	2 266.32
S14		山东省潍坊市	白皮	538.77	14.94	64.59	2 358.7
S15		山东省济南市	白皮	790.95	14.01	60.7	2 449.79
S16		山东省青岛市	白皮	513.95	14.65	68.05	2480.7
S17		山东省临沂市	白皮	822.11	15.19	67.35	2 214.44
S18		山东省滨州市	白皮	616.51	14.72	62.43	2 491.12
S19	中南地区	山东省烟台市	白皮	520.69	14.32	66.59	2 561.55
S20		河南省开封市	白皮	898.19	16.35	65.5	1 945.96
S21		河南省三门峡市	白皮	867.61	13.71	64.93	2 062.4
S22		河南省商丘市	白皮	925.47	16.42	71.37	2 010.62
S23		河南省周口市	白皮	957.05	16.7	69.73	1 972.81
S24		河南省郑州市	白皮	896.75	16.12	62.82	1 918.33
S25		湖北省天门市	白皮	1 119.44	18.09	77.88	1 594.93
S26		湖北省宜昌市	白皮	1 074.92	17.64	77.55	1 400.42
S27		湖南省衡阳市	红皮	1 410.03	17.38	79.64	1 351.3
S28		湖南省株洲市	红皮	1 401.46	18.48	81.86	1 385.79
S29	西南地区	湖南省常德市	红皮	998.06	18.28	81.14	1 360.52
S30		湖南省永州市江华瑶族自治县	白皮	1 361.54	19.8	78.25	1 332.99
S31		湖南省岳阳市	白皮	1 124.32	18.9	82.29	1 464.07
S32	西北地区	湖南省益阳市	白皮	1 060.57	18.46	82.05	1 364.68
S33		重庆市梁平区	白皮	1 113.44	17.93	78.51	1 119.68
S34		四川省绵阳市	红皮	739.77	16.15	73.78	1 440.95
S35	西北地区	贵州省六盘水市	白皮	668.47	16.22	79.66	1 445.5
S36		陕西省安康市	白皮	1 152.55	16.13	74.18	1 642.48
S37		陕西省榆林市	红皮	401.68	10.47	52.44	2 794.79
S38		陕西省宝鸡市	白皮	710.79	13.48	70.14	1 986.82
S39		陕西省汉中市	白皮	980.19	15.81	75.22	1 722.45
S40	西北地区	陕西省咸阳市	白皮	737.82	13.95	65.95	2 080.37
S41		甘肃省定西市	白皮	491.34	7.95	68.13	2 151.89

注: 年降水量、年均气温、年累积日照时长、年均相对湿度均为 2023 年数据, 来源于美国国家气候数据中心。

1.2 实验方法

1.2.1 原料预处理

每个产地的样本中挑选大小均匀、完整无机械损伤的菊芋约 1 kg, 洗净去皮, 切片后于 60 °C 干燥 24 h, 粉碎后过 60 目筛, 置于干燥器内备用, 用于蛋白质、粗纤维、总黄酮、总多酚的测定。同时取 100 g 新鲜菊芋去皮后研磨制成匀浆, 用于水分、总可溶性固形物、灰分、糖类组分的测定。

1.2.2 基本指标的测定

1.2.2.1 水分的测定

参考 GB 5009.3-2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》^[10], 采用直接干燥法进行测定。

1.2.2.2 总可溶性固形物 (Total Soluble Solid, TSS) 的测定

参考 Cai 等^[11]的测定方法, 取适量样品于纱布中, 挤压出汁液。将汁液置于手持折光仪棱镜中央, 合上盖板, 对准光源或明亮处读数。

1.2.2.3 蛋白质的测定

参考 GB 5009.5-2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》^[12], 采用杜马斯燃烧定氮法进行测定。

1.2.2.4 灰分的测定

参考 GB 5009.4-2016《食品安全国家标准 食品中灰分的测定》^[13], 采用马弗炉灼烧法进行测定。

1.2.2.5 粗纤维的测定

参考 GB/T 5009.10-2003《植物类食品中粗纤维的测定》^[14], 采用酸碱水解法进行测定。

1.2.2.6 总黄酮的测定

参考 Kaszá 等^[15]的方法进行菊芋总黄酮的提取与测定, 称取 1 g 样品, 加入 1:20 (g·mL⁻¹) 的 ϕ =70% 乙醇溶液, 80 °C 超声辅助提取 30 min, 抽滤, 滤渣再次加入等量的 ϕ =70% 乙醇溶液重复提取, 合并两次滤液, 并用 ϕ =70% 乙醇溶液定容至 50 mL, 备用。采用亚硝酸钠-硝酸铝-氢氧化钠显色法测定总黄酮含量, 以不同浓度的芦丁对照品绘制标准曲线, 得到回归方程为 $y=0.543x+0.0039$ ($R^2=0.9969$)。

1.2.2.7 总多酚的测定

总多酚的提取方法同 1.2.2.6, 采用福林酚法测定总多酚含量^[16], 以不同浓度的没食子酸对照品绘制标准曲线, 得到回归方程为 $y=3.6874x-0.1032$ ($R^2=0.9905$)。

1.2.2.8 果糖、葡萄糖、蔗糖、蔗果三糖、蔗果四糖、蔗果五糖的测定

参考 Li 等^[17]的方法并作适当修改, 提取菊芋中可溶性糖。称取 5 g 样品, 加入 1:9 (g·mL⁻¹) 的水,

90 °C 水浴提取 1 h, 抽滤, 滤渣再次加入等量的水重复提取, 合并两次滤液, 并用水定容至 100 mL, 各提取液经冷冻干燥使浓度提高至原来的 5 倍。参考 GB/T 41377-2022《菊粉质量要求》^[18]中高效液相色谱法的条件, 采用 JADE-PAK 氨基色谱柱 (250 mm×4.6 mm, 5 μ m), 流动相为 ϕ =75% 乙腈水溶液, 使用配备示差检测器的高效液相色谱仪进行等浓度洗脱, 流量为 1.0 mL·min⁻¹, 进样体积为 20 μ L, 柱温为 30 °C。采用不同浓度的果糖、葡萄糖、蔗糖、蔗果三糖、蔗果四糖、蔗果五糖标准品绘制标准曲线, 得到果糖的回归方程为 $y=129137x-3354.2$ ($R^2=0.9997$), 葡萄糖的回归方程为 $y=151038x-26729$ ($R^2=0.9993$), 蔗糖的回归方程为 $y=156536x-6523.4$ ($R^2=0.9998$), 蔗果三糖的回归方程为 $y=151682x-75714$ ($R^2=0.9981$), 蔗果四糖的回归方程为 $y=134587x-5345.5$ ($R^2=0.9992$), 蔗果五糖的回归方程为 $y=123470x+2287.9$ ($R^2=0.9979$)。

1.2.2.9 菊粉的测定

参考 GB/T 41377-2022《菊粉质量要求》^[18]中高效液相色谱法的计算方法, 计算样品中的菊粉含量。

1.2.3 菊芋主要糖类组分指纹图谱的建立

1.2.3.1 精密度考察

取同一产地的提取液, 在 1.2.2.8 的色谱条件下连续进样 6 次。以分离度较好、峰面积较大、峰形稳定的 6 号共有峰作为参照峰 (S), 计算各共有峰的相对保留时间的相对标准偏差 (Relative Standard Deviation, RSD) < 0.5%, 相对峰面积 RSD < 1.0%, 表明仪器精密度良好。

1.2.3.2 重复性考察

称取同一产地的样品 5 g, 平行 6 份, 在 1.2.2.8 的条件下制备提取液并进行测定, 计算各共有峰的相对保留时间 RSD < 1.5%, 相对峰面积 RSD < 2.5%, 表明制备方法重复性良好。

1.2.3.3 稳定性考察

取同一产地的提取液, 在 1.2.2.8 的色谱条件下, 分别于 0、2、4、6、8、10、12 h 进样检测, 计算各共有峰的相对保留时间 RSD < 1.0%, 相对峰面积 RSD < 2.5%, 表明待测提取液在 12 h 内稳定性良好。

1.2.3.4 共有峰的指认

准确称取葡萄糖、果糖、蔗糖、蔗果三糖、蔗果四糖、蔗果五糖、蔗果八糖各标准品适量, 加水溶解制成 10 mg·mL⁻¹ 的混合标准储备溶液。取适量混合标准储备液加水稀释成 5 mg·mL⁻¹ 的混合标准溶液。在 1.2.2.8 色谱条件下测定, 将混合标准品溶液图谱与样品图谱进行比对。

1.2.3.5 指纹图谱的建立及相似度评价

将 41 个菊芋样品的色谱图导入《中药色谱指纹图谱相似度评价系统（2012 版）》进行分析，以 S1 样品的图谱为参照图谱，0.1 min 为时间宽度，采用中位数法，通过自动多点校正生成对照图谱 R 与叠加指纹图谱，并进行相似度计算^[19]。

1.2.4 熵权法结合灰色关联度分析

参考于艳奇等^[20]的计算方法，分别得到各指标的权重系数及各样本在各评价指标下的灰色关联系数及加权关联度，对样本进行综合评价与品质排序。

1.3 数据处理

所有指标的测定均平行重复三次，最终结果采用 $\bar{x} \pm s$ 表示。使用 SPSS 27.0 进行方差分析、主成分分析，Origin 2021 进行相关性分析、聚类分析及相关图形的绘制。采用 Excel 2016 进行熵值法和灰色关联度的计算。

2 结果与讨论

2.1 不同产地菊芋品质指标的含量

2.1.1 不同产地菊芋基本指标的含量

不同产地菊芋基本指标的含量如表 2 所示，41 个产地菊芋的水分含量为 75.23%~84.68%，TSS 含量为 14.5~22.8 °Brix，蛋白质含量为 5.67%~12.99%，灰分含量为 0.93%~1.61%，粗纤维含量为 2.34%~3.77%，总黄酮含量为 1.34~12.82 mg·g⁻¹，总多酚含量为 2.00~4.12 mg·g⁻¹。不同产地菊芋的基本指标之间存在显著差异（ $P < 0.05$ ），变异系数范围为 2.57%~63.78%。其中水分、TSS 的变异系数在 10% 以内，表明不同产地菊芋的水分、TSS 含量差异较小；而总黄酮的变异系数最大，达到 63.78%，表明菊芋的总黄酮含量受产地因素影响较大。

表 2 不同产地菊芋基本指标含量
Table 2 Basic index content of *Helianthus tuberosus* from different origins

产地编号	水分/%	TSS/°Brix	蛋白质/(%, DW)	灰分/%	粗纤维/(%, DW)	总黄酮/(mg·g ⁻¹ , DW)	总多酚/(mg·g ⁻¹ , DW)
S1	80.01 ± 0.93 ^{efghijkl}	17.6 ± 0.7 ^{mnpqqr}	10.49 ± 0.10 ^{de}	1.24 ± 0.11 ^{efghij}	2.49 ± 0.00 ^{rst}	6.27 ± 0.14 ^h	3.02 ± 0.03 ^{fg}
S2	82.07 ± 0.88 ^{cdef}	17.8 ± 0.3 ^{lmnopq}	9.74 ± 0.08 ^{fgh}	1.28 ± 0.02 ^{defghi}	2.71 ± 0.02 ^{nopqr}	2.67 ± 0.06 ^{mn}	3.17 ± 0.07 ^e
S3	80.55 ± 1.50 ^{defghijkl}	17.8 ± 0.5 ^{lmnopq}	9.66 ± 0.13 ^{gh}	1.31 ± 0.05 ^{cdefgh}	3.30 ± 0.11 ^{de}	5.83 ± 0.14 ⁱ	3.04 ± 0.07 ^f
S4	79.22 ± 1.00 ^{ijklmn}	20.2 ± 0.3 ^{cdef}	8.98 ± 0.46 ^{kl}	1.26 ± 0.08 ^{defghij}	3.22 ± 0.08 ^{defg}	9.97 ± 0.64 ^c	3.68 ± 0.07 ^c
S5	78.87 ± 1.06 ^{ijklmn}	19.5 ± 0.5 ^{defghi}	10.24 ± 0.27 ^{ef}	1.22 ± 0.12 ^{efghij}	3.19 ± 0.01 ^{defgh}	5.84 ± 0.11 ⁱ	3.07 ± 0.05 ^{ef}
S6	79.64 ± 1.06 ^{ghijklmn}	20.1 ± 0.8 ^{cdef}	7.59 ± 0.48 ^{nopqrs}	0.94 ± 0.08 ^{op}	2.68 ± 0.00 ^{opqr}	2.30 ± 0.02 ^{no}	2.48 ± 0.06 ^{nop}
S7	75.23 ± 1.47 ^p	22.5 ± 1.7 ^a	7.26 ± 0.23 ^{rst}	1.16 ± 0.03 ^{ijklmn}	3.77 ± 0.04 ^a	3.85 ± 0.22 ^l	2.55 ± 0.04 ^{mn}
S8	81.43 ± 0.41 ^{defghi}	18.1 ± 0.7 ^{ijklmnopq}	8.25 ± 0.11 ^{mn}	1.04 ± 0.05 ^{mnpop}	3.52 ± 0.02 ^{bc}	2.96 ± 0.18 ^m	2.72 ± 0.05 ^{jk}
S9	79.42 ± 1.24 ^{hijklmn}	20.3 ± 0.5 ^{cde}	7.52 ± 0.18 ^{pqrst}	1.16 ± 0.03 ^{ijklmn}	2.51 ± 0.01 ^{rst}	6.86 ± 0.09 ^g	2.85 ± 0.08 ^{hi}
S10	79.39 ± 2.99 ^{hijklmn}	18.8 ± 0.3 ^{ghijklmn}	8.85 ± 0.25 ^l	1.12 ± 0.02 ^{ijklmn}	2.83 ± 0.06 ^{lmnop}	1.65 ± 0.02 ^{qrs}	2.22 ± 0.04 ^{tu}
S11	82.16 ± 0.63 ^{bcde}	17.0 ± 0.7 ^{pqr}	10.04 ± 0.50 ^{efg}	1.14 ± 0.04 ^{ijklmn}	3.02 ± 0.13 ^{ghijkl}	1.87 ± 0.03 ^{pqr}	2.45 ± 0.02 ^{nop}
S12	77.38 ± 1.36 ^{no}	21.0 ± 0.8 ^{bc}	11.34 ± 0.21 ^{bc}	1.32 ± 0.02 ^{cdefg}	2.71 ± 0.09 ^{nopqr}	3.88 ± 0.10 ^l	2.53 ± 0.04 ^{mno}
S13	79.94 ± 0.64 ^{efghijkl}	18.2 ± 0.4 ^{ijklmnopq}	9.02 ± 0.38 ^{ijkl}	1.13 ± 0.04 ^{ijklmn}	3.01 ± 0.06 ^{ghijkl}	5.72 ± 0.10 ^{ij}	3.09 ± 0.10 ^{ef}
S14	79.54 ± 1.08 ^{hijklmn}	20.5 ± 0.7 ^{cd}	6.41 ± 0.20 ^u	1.17 ± 0.08 ^{hijklmn}	2.46 ± 0.04 st	1.79 ± 0.12 ^{qr}	2.14 ± 0.02 ^{uvw}
S15	78.73 ± 0.29 ^{ijklmn}	18.2 ± 1.0 ^{ijklmnopq}	9.44 ± 0.17 ^{hijk}	1.34 ± 0.04 ^{cde}	2.45 ± 0.11 st	12.82 ± 0.34 ^a	4.02 ± 0.15 ^b
S16	78.38 ± 1.36 ^{lmno}	21.9 ± 0.9 ^{ab}	7.83 ± 0.15 ^{nopqrs}	1.43 ± 0.07 ^{bc}	2.59 ± 0.02 ^{qrs}	1.35 ± 0.05 ^s	2.05 ± 0.01 ^{wxy}
S17	77.56 ± 0.92 ^{mno}	22.0 ± 1.2 ^{ab}	7.75 ± 0.51 ^{opqrst}	1.06 ± 0.08 ^{lmnop}	2.34 ± 0.12 ^t	1.34 ± 0.04 ^s	2.18 ± 0.02 ^{uv}
S18	81.51 ± 0.46 ^{defgh}	17.4 ± 0.2 ^{mnpqqr}	10.51 ± 0.12 ^{de}	1.32 ± 0.08 ^{cdefg}	2.99 ± 0.10 ^{hijkl}	2.19 ± 0.10 ^{op}	2.43 ± 0.02 ^{opq}
S19	79.89 ± 0.16 ^{efghijkl}	19.3 ± 0.5 ^{defghij}	10.09 ± 0.21 ^{efg}	1.53 ± 0.12 ^{ab}	2.80 ± 0.07 ^{lmnopq}	2.62 ± 0.13 ^{mn}	2.25 ± 0.06 ^{stu}
S20	79.49 ± 0.08 ^{hijklmn}	19.3 ± 0.6 ^{defghij}	7.89 ± 0.06 ^{nopq}	1.25 ± 0.06 ^{efghij}	2.84 ± 0.06 ^{klmnop}	7.38 ± 0.25 ^f	3.03 ± 0.06 ^f
S21	78.56 ± 0.41 ^{klmno}	18.8 ± 0.7 ^{fghijklmn}	8.12 ± 0.22 ^{no}	1.17 ± 0.09 ^{hijklmn}	2.74 ± 0.07 ^{mnpopq}	8.73 ± 0.09 ^d	3.32 ± 0.07 ^d
S22	80.78 ± 0.68 ^{defghijk}	19.2 ± 0.5 ^{defghijk}	6.40 ± 0.08 ^u	1.21 ± 0.01 ^{efghij}	2.86 ± 0.11 ^{klmno}	5.58 ± 0.06 ^{ij}	2.66 ± 0.04 ^{kl}
S23	81.32 ± 0.88 ^{defghi}	17.3 ± 0.7 ^{nopqr}	7.35 ± 0.24 ^{qrst}	1.18 ± 0.08 ^{fghijkl}	3.06 ± 0.01 ^{fghijk}	10.62 ± 0.17 ^b	3.33 ± 0.02 ^d
S24	81.81 ± 0.99 ^{defg}	19.7 ± 0.8 ^{defgh}	11.00 ± 0.06 ^{cd}	1.24 ± 0.07 ^{efghij}	2.98 ± 0.04 ^{hijkl}	1.67 ± 0.11 ^{qrs}	2.15 ± 0.09 ^{uvw}

续表2

产地编号	水分/%	TSS/°Brix	蛋白质/(%, DW)	灰分/%	粗纤维/(%, DW)	总黄酮/(mg·g ⁻¹ , DW)	总多酚/(mg·g ⁻¹ , DW)
S25	82.30 ± 1.38 ^{bcd}	16.9 ± 0.8 ^{qr}	5.67 ± 0.23 ^v	1.33 ± 0.02 ^{cde}	2.98 ± 0.13 ^{hijkl}	1.98 ± 0.10 ^{opq}	2.00 ± 0.02 ^y
S26	81.81 ± 0.60 ^{defg}	17.9 ± 0.9 ^{klmnopq}	10.96 ± 0.48 ^{cd}	1.27 ± 0.04 ^{defghi}	3.09 ± 0.13 ^{efghij}	1.51 ± 0.12 ^{rs}	2.06 ± 0.05 ^{wxy}
S27	79.34 ± 0.48 ^{hijklmn}	19.8 ± 0.6 ^{cdefg}	7.13 ± 0.00 ^l	0.98 ± 0.07 ^{op}	3.28 ± 0.04 ^{def}	7.87 ± 0.32 ^e	3.30 ± 0.11 ^d
S28	79.53 ± 0.76 ^{hijklmn}	19.1 ± 0.5 ^{efghijkl}	8.09 ± 0.36 ^{nop}	1.06 ± 0.11 ^{lmnop}	2.91 ± 0.13 ^{ijklmn}	7.26 ± 0.15 ^f	3.32 ± 0.05 ^d
S29	80.05 ± 0.29 ^{efghijkl}	18.5 ± 0.5 ^{ghijklmn}	9.55 ± 0.11 ^{ghij}	0.93 ± 0.00 ^p	2.95 ± 0.05 ^{ijklm}	4.55 ± 0.14 ^k	2.59 ± 0.04 ^{lm}
S30	75.24 ± 0.41 ^p	22.8 ± 0.3 ^a	6.47 ± 0.06 ^u	1.02 ± 0.05 ^{nop}	2.79 ± 0.13 ^{lmnopq}	6.53 ± 0.46 ^{gh}	2.90 ± 0.06 ^h
S31	80.91 ± 1.18 ^{defghij}	18.3 ± 0.5 ^{hijklmnop}	7.24 ± 0.10 st	1.32 ± 0.06 ^{cdef}	2.87 ± 0.04 ^{ijklmno}	5.70 ± 0.42 ^{ij}	2.77 ± 0.05 ^{ij}
S32	80.41 ± 1.14 ^{defghijkl}	18.5 ± 0.3 ^{ghijklmn}	9.91 ± 0.25 ^{fgh}	1.61 ± 0.00 ^a	3.26 ± 0.04 ^{def}	1.99 ± 0.17 ^{opq}	2.11 ± 0.02 ^{vwx}
S33	84.06 ± 0.55 ^{abc}	16.3 ± 0.5 ^r	12.69 ± 0.13 ^a	1.07 ± 0.06 ^{klmno}	3.70 ± 0.23 ^{ab}	2.73 ± 0.08 ^m	2.33 ± 0.03 ^{qrs}
S34	79.74 ± 0.42 ^{ghijklm}	19.7 ± 0.6 ^{defg}	9.07 ± 0.23 ^{ijkl}	1.20 ± 0.02 ^{efghijkl}	3.23 ± 0.25 ^{defg}	2.97 ± 0.09 ^m	2.31 ± 0.07 ^{rst}
S35	84.13 ± 1.26 ^{ab}	17.1 ± 0.6 ^{opqr}	7.84 ± 0.42 ^{nopqr}	0.97 ± 0.08 ^{op}	3.16 ± 0.12 ^{efghi}	2.87 ± 0.17 ^m	2.23 ± 0.05 ^{stu}
S36	82.26 ± 0.66 ^{bcd}	16.9 ± 0.8 ^{qr}	9.62 ± 0.43 ^{ghi}	1.18 ± 0.12 ^{ghijklm}	3.55 ± 0.01 ^{bc}	8.43 ± 0.51 ^d	3.68 ± 0.12 ^c
S37	79.33 ± 1.35 ^{hijklmn}	18.4 ± 0.8 ^{ghijklmno}	12.99 ± 0.32 ^a	1.22 ± 0.01 ^{efghij}	3.26 ± 0.16 ^{def}	7.57 ± 0.10 ^{ef}	3.58 ± 0.08 ^c
S38	76.63 ± 1.62 ^{op}	22.3 ± 1.1 ^a	7.28 ± 0.33 ^{rst}	1.13 ± 0.04 ^{ijklmn}	2.62 ± 0.01 ^{pqrs}	1.55 ± 0.05 ^{rs}	2.37 ± 0.01 ^{pqr}
S39	84.68 ± 0.08 ^a	14.5 ± 0.1 ^s	11.73 ± 0.27 ^b	1.13 ± 0.03 ^{ijklmn}	3.40 ± 0.05 ^{cd}	10.31 ± 0.20 ^{bc}	4.12 ± 0.03 ^a
S40	79.75 ± 1.93 ^{ghijklm}	17.6 ± 0.5 ^{mnpqr}	9.96 ± 0.57 ^{efgh}	1.39 ± 0.07 ^{cd}	2.99 ± 0.13 ^{hijkl}	5.43 ± 0.17 ^j	2.92 ± 0.02 ^{gh}
S41	79.49 ± 0.55 ^{hijklmn}	19.5 ± 0.5 ^{defghij}	8.71 ± 0.27 ^{lm}	1.20 ± 0.08 ^{efghijk}	2.58 ± 0.08 ^{qrs}	1.74 ± 0.12 ^{qrs}	2.02 ± 0.03 ^{xy}
最小值	75.23	14.5	5.67	0.93	2.34	1.34	2.00
最大值	84.68	22.8	12.99	1.61	3.77	12.82	4.12
平均值	80.06	18.9	8.94	1.20	2.97	4.80	2.76
标准差	2.06	1.79	1.73	0.15	0.35	3.06	0.57
变异系数/%	2.57	9.46	19.40	12.25	11.67	63.78	20.74

注：同列不同字母表示存在显著性差异（ $P<0.05$ ）。

水分含量对农产品加工、贮藏产生较大的影响，菊芋平均水分含量是 80.06%，采后极易发生腐烂，需要及时通过干燥、冷冻等方式进行贮藏。其中重庆梁平、贵州六盘水、陕西汉中的菊芋水分含量最高，均在 84% 以上。而湖南永州（75.24%）、辽宁沈阳（75.23%）水分含量最低，其干物质含量相对较高。TSS 是果实中所有溶于水的化合物总称，包括糖、酸、维生素等，通常用于衡量果实的成熟度，对果实内部品质、感官风味具有重要作用^[21]。菊芋平均 TSS 含量是 18.9 °Brix，湖南永州、辽宁沈阳、陕西宝鸡的 TSS 含量最高，均在 22.0 °Brix 以上。菊芋中含有较多的蛋白质，在干样中平均含量为 9.02%。菊芋蛋白质的氨基酸组成丰富，包含 6 种人体必需氨基酸，7 种非必需氨基酸，其中精氨酸含量是其他薯芋类作物的 3~7 倍，属于优质的蛋白质^[22]。陕西汉中、陕西榆林、重庆梁平、山东济宁、河南郑州的蛋白质含量最高，均在 11% 以上，适宜用于蛋白质及活性多肽的提取制

备^[23,24]及作为动物饲料的原辅料。灰分主要代表矿物质、维生素、无机盐等成分，菊芋块茎中矿物元素含量丰富，其中钙元素是其他薯芋类作物的 1~4 倍，钾元素是其他薯芋类作物的 1~3 倍，铁元素是其他薯芋类作物的 2~7 倍^[25]。菊芋中平均灰分含量为 1.20%，其中湖南益阳、山东烟台灰分含量最高，均在 1.50% 以上。粗纤维是膳食纤维的一部分，包括纤维素、木质素等难以被消化水解的成分，同样对人体的健康具有多种益处^[26]。菊芋干样中平均粗纤维含量为 2.97%，其中陕西安康、重庆梁平、辽宁沈阳、辽宁大连的粗纤维含量最高，均在 3.50% 以上。

菊芋中还含有黄酮、多酚等活性成分，具有抗氧化活性^[27]。其中总黄酮含量最高的产地是山东济南、河南周口、陕西汉中，均在 10 mg·g⁻¹ 以上，而山东青岛、山东临沂只有 1.35、1.34 mg·g⁻¹，含量差异较大。山东济南和陕西汉中的菊芋总多酚含量同样最高，达到 4 mg·g⁻¹ 以上，可用于功能性产品的开发^[28]。

表 3 不同产地菊芋基本糖类组分含量

Table 3 Basic sugar components content of *Helianthus tuberosus* from different origins

产地编号	果糖/(mg·g ⁻¹)	葡萄糖/(mg·g ⁻¹)	蔗糖/(mg·g ⁻¹)	蔗果三糖/(mg·g ⁻¹)	蔗果四糖/(mg·g ⁻¹)	蔗果五糖/(mg·g ⁻¹)	菊粉/%
S1	2.95 ± 0.01 ^c	1.45 ± 0.12 ^{jk}	32.96 ± 0.18 ^f	17.87 ± 0.02 ^h	18.95 ± 0.03 ^{ef}	14.45 ± 0.03 ⁱ	12.58 ± 0.04 ^q
S2	1.81 ± 0.11 ^j	1.52 ± 0.02 ^{ij}	34.95 ± 0.10 ^{de}	17.87 ± 0.03 ^h	14.74 ± 0.03 ^m	12.43 ± 0.02 ^l	9.50 ± 0.01 ^x
S3	2.81 ± 0.01 ^{de}	1.19 ± 0.02 ^{no}	18.96 ± 0.01 ^r	12.76 ± 0.03 ^m	10.82 ± 0.03 ^{qr}	10.76 ± 0.04 ^o	14.32 ± 0.04 ^{hi}
S4	2.89 ± 0.16 ^{cd}	1.24 ± 0.01 ^{mno}	35.24 ± 0.06 ^d	24.30 ± 0.01 ^a	24.86 ± 0.04 ^a	25.06 ± 0.03 ^a	13.04 ± 0.08 ^m
S5	3.49 ± 0.01 ^a	1.37 ± 0.02 ^{kl}	20.94 ± 0.06 ^{pq}	15.13 ± 0.04 ^j	12.23 ± 0.03 ^p	12.92 ± 0.03 ^{jk}	13.43 ± 0.06 ^l
S6	1.01 ± 0.01 ^a	1.86 ± 0.03 ^g	26.84 ± 0.01 ^{lm}	18.18 ± 0.02 ^g	18.92 ± 0.04 ^f	16.04 ± 0.04 ^g	11.19 ± 0.01 ^u
S7	1.36 ± 0.02 ^{mn}	1.86 ± 0.02 ^g	21.48 ± 0.02 ^{op}	19.05 ± 0.04 ^f	19.94 ± 0.02 ^{cd}	23.31 ± 0.04 ^b	12.93 ± 0.02 ⁿ
S8	2.05 ± 0.04 ⁱ	1.37 ± 0.03 ^{kl}	34.30 ± 0.03 ^e	22.14 ± 0.04 ^c	17.47 ± 0.01 ⁱ	16.17 ± 0.02 ^g	9.78 ± 0.04 ^w
S9	2.75 ± 0.01 ^e	1.41 ± 0.01 ^k	38.42 ± 0.03 ^b	22.75 ± 0.04 ^c	17.97 ± 0.04 ^h	17.06 ± 0.03 ^e	14.02 ± 0.01 ^j
S10	2.41 ± 0.06 ^g	1.42 ± 0.13 ^k	26.35 ± 0.08 ^{lm}	20.36 ± 0.03 ^e	16.54 ± 0.04 ^j	16.14 ± 0.04 ^g	15.31 ± 0.04 ^e
S11	1.03 ± 0.02 ^{pq}	1.46 ± 0.02 ^{jk}	35.05 ± 0.01 ^{de}	17.95 ± 0.06 ^{gh}	13.04 ± 0.04 ^o	11.47 ± 0.04 ⁿ	9.98 ± 0.03 ^v
S12	1.99 ± 0.04 ⁱ	2.31 ± 0.04 ^d	21.99 ± 0.98 ^o	13.37 ± 0.03 ^l	14.85 ± 0.03 ^m	14.23 ± 0.04 ⁱ	14.91 ± 0.02 ^f
S13	2.44 ± 0.01 ^g	3.21 ± 0.01 ^a	26.03 ± 0.02 ^m	16.37 ± 0.02 ⁱ	17.10 ± 0.01 ⁱ	16.15 ± 0.04 ^g	14.55 ± 0.01 ^g
S14	1.30 ± 0.05 ⁿ	1.29 ± 0.09 ^{lm}	27.82 ± 0.05 ^{jk}	18.53 ± 0.04 ^g	19.68 ± 0.02 ^{de}	20.47 ± 0.03 ^d	16.89 ± 0.01 ^b
S15	1.79 ± 0.10 ^j	1.23 ± 0.03 ^{mno}	31.02 ± 2.07 ⁱ	13.81 ± 0.03 ^l	9.23 ± 0.02 ^s	7.55 ± 0.04 ^q	8.37 ± 0.02 ^z
S16	1.36 ± 0.03 ^{mn}	1.72 ± 0.02 ^h	37.08 ± 0.04 ^c	19.35 ± 0.02 ^f	14.85 ± 0.03 ^m	13.36 ± 0.02 ^j	14.29 ± 0.01 ⁱ
S17	1.53 ± 0.01 ^l	1.58 ± 0.03 ⁱ	35.53 ± 0.04 ^d	20.26 ± 0.04 ^c	18.50 ± 0.05 ^g	20.11 ± 0.02 ^d	16.50 ± 0.07 ^c
S18	1.09 ± 0.01 ^{opq}	1.72 ± 0.01 ^h	24.67 ± 0.03 ⁿ	15.75 ± 0.04 ^j	15.35 ± 0.03 ^l	15.38 ± 0.03 ^h	11.63 ± 0.03 ^t
S19	1.05 ± 0.01 ^{opq}	1.31 ± 0.01 ^{lm}	26.13 ± 0.03 ^m	15.76 ± 0.02 ^j	16.55 ± 0.04 ^j	17.15 ± 0.02 ^e	14.53 ± 0.02 ^g
S20	1.12 ± 0.13 ^{op}	1.24 ± 0.06 ^{mno}	31.64 ± 0.78 ^{hi}	19.25 ± 0.03 ^f	18.86 ± 0.02 ^f	20.07 ± 0.03 ^d	16.50 ± 0.01 ^c
S21	2.57 ± 0.03 ^f	2.16 ± 0.01 ^e	31.70 ± 0.04 ^{hi}	15.39 ± 0.04 ^j	13.98 ± 0.02 ⁿ	14.37 ± 0.03 ⁱ	8.26 ± 0.02 ^z
S22	1.13 ± 0.08 ^{op}	1.58 ± 0.04 ⁱ	28.47 ± 0.02 ^j	20.12 ± 0.03 ^e	20.20 ± 0.04 ^c	20.46 ± 0.01 ^d	15.25 ± 0.04 ^e
S23	0.87 ± 0.02 ^r	1.00 ± 0.03 ^q	20.43 ± 0.23 ^q	14.66 ± 0.04 ^k	11.14 ± 0.04 ^q	11.96 ± 0.02 ^m	9.61 ± 0.04 ^w
S24	1.45 ± 0.01 ^{lm}	1.56 ± 0.01 ⁱ	32.25 ± 0.03 ^{fgh}	17.45 ± 0.04 ^h	16.04 ± 0.01 ^j	15.64 ± 0.03 ^h	11.83 ± 0.04 ^s
S25	2.54 ± 0.03 ^f	2.01 ± 0.01 ^f	20.34 ± 0.02 ^q	16.54 ± 0.02 ⁱ	15.97 ± 0.04 ^{jk}	15.34 ± 0.03 ^h	12.11 ± 0.02 ^r
S26	0.53 ± 0.02 ^t	0.81 ± 0.01 ^t	31.83 ± 0.02 ^{hi}	19.66 ± 0.03 ^f	17.54 ± 0.02 ⁱ	16.96 ± 0.03 ^{ef}	12.84 ± 0.02 ^{op}
S27	0.46 ± 0.06 ^t	0.90 ± 0.03 ^{rs}	5.82 ± 0.28 ^w	2.00 ± 0.00 ^p	5.83 ± 0.03 ^u	5.34 ± 0.04 ^s	15.59 ± 0.01 ^d
S28	0.70 ± 0.01 ^s	1.52 ± 0.01 ^{ij}	6.38 ± 0.18 ^w	7.00 ± 0.05 ^o	5.21 ± 0.02 ^u	6.52 ± 0.04 ^r	12.82 ± 0.02 ^p
S29	1.14 ± 0.01 ^o	0.91 ± 0.01 ^{rs}	7.42 ± 0.51 ^v	6.51 ± 0.01 ^o	6.94 ± 0.02 ^t	5.87 ± 0.03 ^s	11.49 ± 0.01 ^t
S30	2.21 ± 0.01 ^h	1.51 ± 0.01 ^{ij}	10.81 ± 0.40 ^u	9.68 ± 0.01 ⁿ	9.17 ± 0.02 ^s	9.56 ± 0.02 ^p	17.02 ± 0.02 ^a
S31	0.73 ± 0.01 ^s	1.25 ± 0.01 ^{mn}	27.87 ± 0.02 ^{jk}	18.15 ± 0.04 ^g	16.65 ± 0.02 ^j	15.49 ± 0.03 ^h	13.59 ± 0.02 ^k
S32	0.27 ± 0.01 ^u	0.97 ± 0.02 ^{qr}	27.04 ± 0.02 ^{kl}	18.04 ± 0.04 ^g	18.93 ± 0.03 ^f	16.01 ± 0.01 ^g	14.36 ± 0.04 ^h
S33	1.27 ± 0.03 ⁿ	1.11 ± 0.01 ^p	16.85 ± 0.03 ^t	12.04 ± 0.04 ^m	10.06 ± 0.02 ^r	10.15 ± 0.04 ^o	12.89 ± 0.01 ^{no}
S34	1.42 ± 0.02 ^m	1.40 ± 0.04 ^k	17.69 ± 0.01 ^s	12.96 ± 0.05 ^{ml}	12.83 ± 0.04 ^{op}	13.20 ± 0.04 ^j	11.96 ± 0.02 ^s
S35	0.36 ± 0.02 ^u	0.82 ± 0.01 st	46.45 ± 0.01 ^a	24.88 ± 0.02 ^a	20.84 ± 0.01 ^c	15.52 ± 0.03 ^h	11.28 ± 0.03 ^u
S36	2.27 ± 0.02 ^h	2.51 ± 0.03 ^c	34.89 ± 0.16 ^{de}	23.45 ± 0.03 ^b	17.65 ± 0.03 ^{hi}	11.16 ± 0.02 ⁿ	11.59 ± 0.02 ^t
S37	1.83 ± 0.03 ^j	2.64 ± 0.08 ^b	20.20 ± 0.05 ^q	16.18 ± 0.04 ⁱ	17.51 ± 0.02 ⁱ	13.05 ± 0.04 ^j	13.31 ± 0.01 ^l

续表3

产地编号	果糖/(mg·g ⁻¹)	葡萄糖/(mg·g ⁻¹)	蔗糖/(mg·g ⁻¹)	蔗果三糖/(mg·g ⁻¹)	蔗果四糖/(mg·g ⁻¹)	蔗果五糖/(mg·g ⁻¹)	菊粉/%
S38	1.68 ± 0.04 ^k	1.59 ± 0.02 ⁱ	32.84 ± 0.16 ^{fg}	21.44 ± 0.02 ^d	21.84 ± 0.04 ^b	22.76 ± 0.04 ^c	12.54 ± 0.03 ^q
S39	2.17 ± 0.03 ^h	1.27 ± 0.04 ^{mn}	32.04 ± 0.02 ^{gh}	15.49 ± 0.05 ^j	10.95 ± 0.03 ^{qr}	9.18 ± 0.04 ^p	9.00 ± 0.04 ^y
S40	3.23 ± 0.03 ^b	1.73 ± 0.01 ^h	36.58 ± 0.02 ^c	19.13 ± 0.04 ^f	15.23 ± 0.03 ^l	11.13 ± 0.01 ⁿ	9.97 ± 0.06 ^v
S41	3.45 ± 0.03 ^a	1.16 ± 0.02 ^{op}	30.94 ± 0.04 ⁱ	19.94 ± 0.04 ^{ef}	19.03 ± 0.03 ^e	17.34 ± 0.03 ^e	12.79 ± 0.03 ^p
最小值	0.27	0.81	5.82	2.00	5.21	5.34	8.26
最大值	3.49	3.21	46.45	24.88	24.86	25.06	17.02
平均值	1.72	1.51	26.98	16.86	15.46	14.57	12.79
标准差	0.87	0.50	9.11	4.74	4.43	4.59	2.32
变异系数/%	50.74	33.08	33.76	28.13	28.64	31.51	18.12

注：同列不同字母表示存在显著性差异（*P* < 0.05）。

2.1.2 不同产地菊芋基本糖类组分的含量

不同产地菊芋基本糖类组分的含量如表 3 所示，41 个产地菊芋的果糖含量为 0.27~3.49 mg·g⁻¹，葡萄糖含量为 0.81~3.21 mg·g⁻¹，蔗糖含量为 5.82~46.45 mg·g⁻¹，蔗果三糖为 2.00~24.88 mg·g⁻¹，蔗果四糖为 5.21~24.86 mg·g⁻¹，蔗果五糖为 5.34~25.06 mg·g⁻¹，菊粉含量为 8.26~17.02%。不同产地菊芋的基本糖类组分含量存在显著差异（*P* < 0.05），变异系数范围为 18.12%~50.74%，其中果糖的变异系数最大，菊粉的变异系数最小。

果糖、葡萄糖、蔗糖对鲜食菊芋的甜度和风味产生重要影响，菊芋中果糖、葡萄糖含量较低，而蔗糖含量相对较高，这可能与蔗糖作为合成其他果聚糖的重要原料有关^[29]。辽宁锦州、陕西咸阳、甘肃定西的果糖含量最高，均在 3 mg·g⁻¹ 以上；山东菏泽、陕西榆林的葡萄糖含量最高，均在 2.5 mg·g⁻¹ 以上；江苏徐州、山东青岛、贵州六盘水的蔗糖含量最高，均在 37.0 mg·g⁻¹ 以上。蔗果三糖、蔗果四糖、蔗果五糖是菊芋中的短链低聚果糖（Short-chain Fructooligosaccharides, scFOS），能促进双歧杆菌属生长，具有益生元特性，在生产中常通过菊粉水解或蔗糖合成的方式获得^[30-32]。其中吉林白山的蔗果三糖、蔗果四糖、蔗果五糖含量均较高，三者含量合计可达 74.22 mg·g⁻¹；而湖南衡阳、湖南株洲、湖南常德的蔗果三糖、蔗果四糖、蔗果五糖含量均较低，三者含量合计不到 20.0 mg·g⁻¹，呈现明显的地域差异。菊粉是菊芋中主要的碳水化合物，也是菊芋中主要加工利用的物质。菊粉除了可以直接作为产品，还能作为原料生产高果糖浆^[33]、功能性复合固体饮料^[34]等高值化产品。湖南永州、山东潍坊、山东临沂的菊粉含量最高，约为 16%~17%，适宜用于菊粉的加工生产。

总体来看，菊芋基本糖类组分中单双糖含量较低，菊粉含量较高，而菊粉不会显著影响血糖水平，因此菊芋对糖尿病和肥胖有多种有益作用^[35]。

2.2 菊芋成分的产地差异分析

2.2.1 菊芋主要糖类组分指纹图谱的建立及相似度分析

为探究菊芋中糖类成分组成的差异情况，将 41 个产地菊芋的色谱图进行叠加分析，如图 1 所示。菊粉型果聚糖成分复杂，是一种由 D-呋喃果糖通过 β-2,1 糖苷键连接而成的果聚糖混合物，通常末端带有葡萄糖残基^[36]。随着果聚糖聚合度的增加，色谱峰呈现“变宽变矮”的趋势，且出峰时间也逐渐延长。该研究对出峰时间在 80 min 之前的菊芋中主要的糖类组分进行分析，共确定 11 个共有特征峰，其峰面积占总峰面积的 97% 以上。以 6 号峰为参比峰（S），计算各共有峰的相对峰面积 *RSD* 为 12.31%~96.96%，相对保留时间 *RSD* 为 1.98%~6.99%。由此可见菊芋主要糖类组分在组成上差异较小，而含量的差异较大。将 41 个菊芋色谱图生成的对照图谱与混合标准品色谱图进行比对，指认了共有峰中的 7 个成分，如图 2 所示。值得注意的是，在蔗果三糖和蔗果四糖之间还存在一个共有峰，可能是菊芋的果聚糖中还存在果果三糖或果果四糖等末端不含葡萄糖基的非典型菊粉果聚糖^[37]。

相似度是一种整体性的评价方法，将 41 个产地菊芋的色谱图与对照图谱进行相似度评价，结果见表 4。整体相似度范围在 0.890~0.999，其中湖南衡阳（S27）、湖南株洲（S28）的相似度 < 0.900，这两个产地菊芋的蔗糖和 scFOS 含量均显著低于其他产地，与其他产地有较大差异，而其余产地样本间具有较好的一致性^[38]。

表 4 不同产地菊芋的相似度评价

Table 4 Similarity evaluation of *Helianthus tuberosus* from different origins

产地编号	相似度	产地编号	相似度
S1	0.990	S22	0.992
S2	0.979	S23	0.998
S3	0.991	S24	0.995
S4	0.992	S25	0.986
S5	0.985	S26	0.998
S6	0.991	S27	0.890
S7	0.940	S28	0.894
S8	0.989	S29	0.940
S9	0.994	S30	0.936
S10	0.996	S31	0.999
S11	0.971	S32	0.996
S12	0.983	S33	0.999
S13	0.993	S34	0.989
S14	0.989	S35	0.973
S15	0.938	S36	0.975
S16	0.982	S37	0.987
S17	0.996	S38	0.992
S18	0.998	S39	0.958
S19	0.996	S40	0.967
S20	0.995	S41	0.998
S21	0.991		

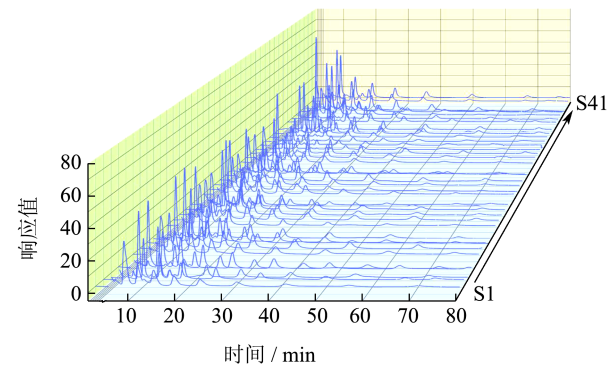


图 1 41 个产地菊芋 HPLC 叠加图谱

Fig.1 HPLC superimposed fingerprint of *Helianthus tuberosus* from 41 origins

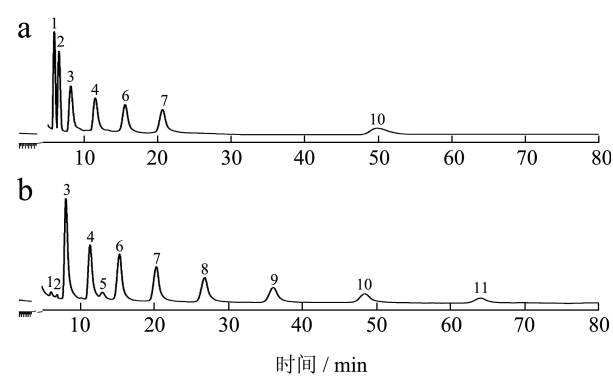


图 2 混合标准品色谱图与对照图谱

Fig.2 Chromatogram of mixed standards and control

注: 1-果糖, 2-葡萄糖, 3-蔗糖, 4-蔗果三糖, 6-蔗果四糖, 7-蔗果五糖, 10-蔗果八糖; 图中出现的断点 (3~5 min) 为溶剂峰所在位置。a 为标准品色谱图; b 为对照图谱。

2.2.2 菊芋品质指标与气象因子的相关性分析

中国不同地区的气候类型相差较大, 为探究产地的环境因素对菊芋成分的影响, 利用品质指标与降雨量、气温、相对湿度、日照时长等气象数据进行相关性分析。图 3 结果表明菊芋中糖类组分与多个气象因素密切相关, 此外水分与累积日照时长呈显著负相关 ($P<0.05$), 这可能与日照影响菊芋水分的蒸发量有关, 其余指标与这 4 项气象因子无明显关联。

在糖类组分与气象因子的相关性中, 蔗糖、scFOS 与年均降雨量呈显著负相关 ($P<0.05$), 果糖、scFOS 与年均气温呈显著负相关 ($P<0.05$), 果糖、葡萄糖与年均相对湿度呈显著负相关 ($P<0.05$), 果糖、葡萄糖、scFOS 与累积日照时长呈显著正相关 ($P<0.05$), 表明较高的温度、日照时长可能有利于糖分的积累, 这可能与光合作用及菊芋体内果聚糖的代谢调节有关^[39]。果聚糖不仅在植物中作为储备碳水化合物, 而且在渗透调节和非生物或生物胁迫反应中也起着重要作用, 因此环境因素会影响菊芋果聚糖的合成、运输和分布^[40]。

气象因素是环境因素的重要部分, 此外还有土壤、地形海拔、种植方式、季节变化等多种其他方面的环境因素, 也会对菊芋成分产生一定影响。在已有的研究中, 菊芋中果聚糖水解酶活性会发生季节性波动, 从而导致不同时期采收的菊芋中果聚糖的平均聚合度 (Degree of Polymerization, DP) 不同^[41]; 低聚糖 ($DP<5$) 可能是抵抗盐胁迫的主要碳水化合物, 通过水解改变果聚糖的 DP, 菊芋可以抵抗盐胁迫等不良环境因素, 在盐碱地中仍然能够生长^[42]; 施氮和施磷的

水平不同会影响菊芋品质、产量和植株特性^[43,44]。由于产地中往往包含了环境、品种等多种差异因素，是一种综合性的影响，比单一因素的分析更为复杂。因此还需继续收集多方面的数据，建立一个多维全面的相关性评价，以更科学地解释和预测菊芋成分的差异。

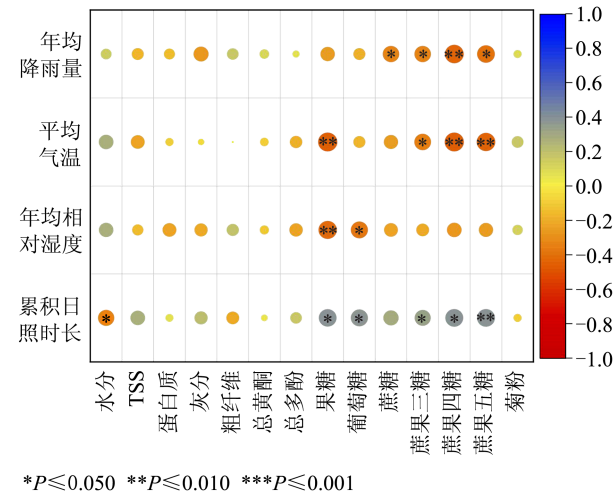


图 3 品质指标与气象因子相关性分析
Fig.3 Correlation analysis between quality indexes and meteorological factors

2.2.3 不同产地菊芋的聚类热图分析

聚类分析是将样本划分为不同类群的方法，可以客观地评价不同样本之间的联系及差异特征。采用欧氏距离平方法（Ward 法），对标准化处理后的指标数据进行系统聚类分析，如图 4 所示。41 个产地菊芋可大致分为 4 类，分别代表了不同的成分特征。

第一类共有 16 个产地，包括 S4、S6~7、S9~10、S12、S14、S16~17、S19~20、S22、S31~32、S38、S41，其代表性特征是 TSS、蔗糖、菊粉、scFOS 含量均较高，水分、粗纤维、蛋白质、总黄酮及总多酚含量较低；第二类共有 4 个产地，包括 S27~S30，均来自湖南。其代表性特征是 TSS、菊粉含量较高，但与第一类不同的是蔗糖、scFOS、灰分等含量较低，表明这两类菊芋中果聚糖的聚合度分布可能存在差异；第三类共有 10 个产地，包括 S2、S8、S11、S18、S24~26、S33~35，其代表性特征是水分、粗纤维、蛋白质、scFOS 等含量较高，而 TSS、菊粉、总黄酮、总多酚含量较低；第四类包含剩余的 11 个产地，其代表性特征是总黄酮、总多酚、果糖、葡萄糖含量较高，TSS、菊粉含量较低。

综上分析，第一、二类菊芋菊粉含量较高，且水分含量较低，适宜用于菊粉的加工生产，特别是 S27 和 S30，同时还具备低蛋白、低灰分、低蔗糖的特点，有利于提高菊粉的产量与纯度。第三类菊芋营养成分

较为丰富，水分较多，是鲜食、腌制加工的优质食品原料。第四类菊芋功能活性成分含量较高，甜度较高，适宜用于功能性饮料及益生菌发酵饮料的开发^[45,46]。

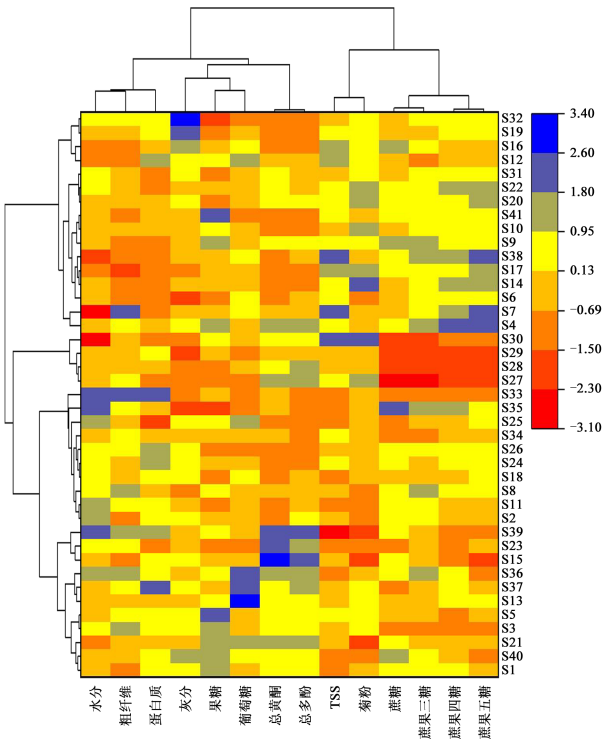


图 4 不同产地菊芋聚类分析热图
Fig.4 Cluster analysis heat map of *Helianthus tuberosus* from different origins

2.3 不同产地菊芋综合品质评价模型的建立

2.3.1 菊芋品质指标的相关性分析

为明确各指标间的关联性，对菊芋的品质指标进行相关性分析。图 5 结果表明各指标之间存在一定相关性，其中正相关性越显著说明同时获得该指标的高含量种质资源的可能性较大，反之可能性较小。水分与 TSS、菊粉呈极显著负相关 ($P<0.01$)，与蛋白质、粗纤维呈显著正相关 ($P<0.05$)；TSS 与菊粉、蔗糖五糖呈现极显著正相关 ($P<0.01$)，与蛋白质、粗纤维呈显著的负相关 ($P<0.05$)。由此可见，通过 TSS 含量可快速预测菊芋中菊粉含量的高低。总多酚与总黄酮呈极显著正相关 ($P<0.001$)，这与多酚黄酮的化学结构密切相关^[47]。

可溶性糖中单双糖、scFOS 之间具有显著相关性，如果糖与葡萄糖，蔗糖、蔗糖三糖、蔗糖四糖、蔗糖五糖之间存在显著正相关性 ($P<0.05$)。此外，可溶性糖与总黄酮、总多酚等功能活性成分之间也存在相关性。如菊粉、蔗糖五糖与总多酚呈显著负相关 ($P<0.05$)，蔗糖四糖、蔗糖五糖与总黄酮呈显著负

相关 ($P<0.05$)。因此各指标间存在大量的信息重叠,需要对品质指标进行降维处理以简化综合评价的过程。

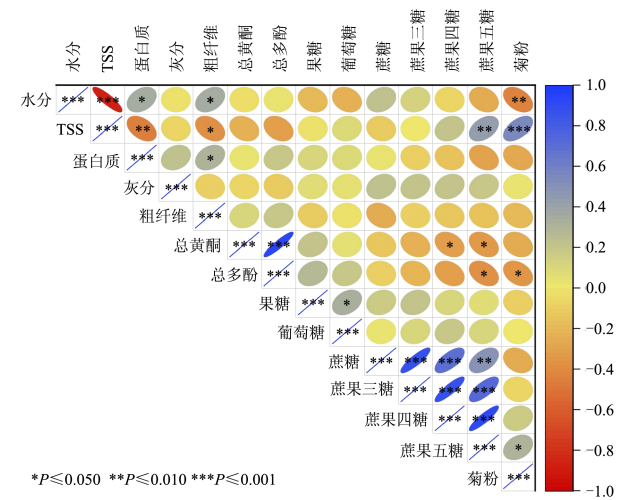


图 5 菊芋品质指标相关性分析

Fig.5 Correlation analysis of *Helianthus tuberosus* quality indexes

2.3.2 主成分分析

采用主成分分析将 14 项评价指标转化为少数不相关的核心指标来代表菊芋的整体品质,结果如表 5 所示。以特征值大于 1 为原则,共提取出 5 个主成分 (Principal Component, PC),累计贡献率为 78.982%,表明所提取的主成分能够代表菊芋中大部分品质信息。

表 5 各主成分的特征值及方差贡献率

Table 5 Eigenvalues and variance contribution rates of principal components

主成分	特征值	方差贡献率/%	累计贡献率/%
1	3.995	28.539	28.539
2	2.815	20.105	48.644
3	2.009	14.353	62.997
4	1.211	8.649	71.646
5	1.027	7.336	78.982
6	0.885	6.322	85.304
7	0.623	4.452	89.755
8	0.524	3.739	93.495
9	0.489	3.489	96.984
10	0.229	1.633	98.617
11	0.066	0.468	99.085
12	0.05	0.358	99.443
13	0.042	0.298	99.741
14	0.036	0.259	100

表 6 各指标的主成分因子载荷矩阵

Table 6 Loading matrix of principal components for each index

指标	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
水分	-0.343	0.709	-0.486	-0.111	0.035
TSS	0.547	-0.723	0.218	0.002	0.023
蛋白质	-0.364	0.454	-0.079	0.615	-0.006
灰分	0.224	0.261	0.020	0.554	-0.491
粗纤维	-0.392	0.274	-0.192	0.140	0.710
总黄酮	-0.544	0.104	0.663	-0.295	-0.047
总多酚	-0.579	0.214	0.684	-0.203	0.041
果糖	0.076	0.195	0.662	0.249	-0.061
葡萄糖	0.122	0.053	0.545	0.435	0.349
蔗糖	0.574	0.683	0.098	-0.205	-0.213
蔗果三糖	0.747	0.598	0.101	-0.153	0.079
蔗果四糖	0.866	0.366	0.091	-0.039	0.191
蔗果五糖	0.892	0.110	0.072	-0.058	0.216
菊粉	0.396	-0.609	-0.073	0.208	0.126

由表 6 可知, PC1 的方差贡献率为 28.539%, scFOS 在 PC1 的载荷值较高, 均为正向影响, 主要反映 scFOS 的品质。其中蔗果五糖、蔗果四糖、蔗果三糖的载荷值分别为 0.892、0.866、0.747, 由于它们之间存在极显著的正相关, 选取蔗果五糖作为 PC1 的代表性指标; PC2 的方差贡献率为 20.105%, 水分、TSS、蔗糖、菊粉在 PC2 的载荷值较高, 其中水分和蔗糖为正向影响, 载荷值分别为 0.709、0.683。TSS 和菊粉为负向影响, 载荷值分别为 -0.723、-0.609, 正向影响与负向影响相差不大。水分与 TSS、菊粉存在极显著的负相关, 而蔗糖与其他指标无显著相关性, 选取水分、蔗糖作为 PC2 的代表指标; PC3 的方差贡献率为 14.353%, 总多酚、总黄酮、果糖、葡萄糖在 PC3 的载荷值较高, 分别为 0.684、0.663、0.662、0.545, 均为正向影响。其中总多酚与总黄酮呈极显著正相关, 果糖与葡萄糖呈显著正相关, 因此分别选取总多酚、果糖作为 PC3 代表指标; PC4 的方差贡献率为 8.649%, 蛋白质、灰分在 PC4 的载荷值较高, 分别为 0.615、0.554, 且无显著相关性, 因此都作为 PC4 的代表指标; PC5 的方差贡献率为 7.336%, 粗纤维在 PC5 的载荷值较高, 作为 PC5 的代表指标, 5 个主成分基本涵盖了 14 项品质指标。

综合分析各主成分代表指标的相关性, 蔗果五糖与蔗糖呈显著正相关, 与总多酚呈显著负相关, 水分

与蛋白质、粗纤维呈显著正相关。因此最终选取蔗果五糖、水分、果糖、灰分这4个指标为核心指标。各指标具有相对独立性，可用于各产地菊芋品质的综合评价^[48]。

2.3.3 熵权法确定权重

为避免人为主观因素对评价指标加权的影响，采用熵权法通过熵值的大小来确定权重。熵值越小，其包含的信息量越大，赋予的权重越大，反之赋予的权重越小。蔗果五糖、果糖、灰分代表了菊芋重要的品质成分，数值越大越好，作为正向指标处理。而水分会影响干物质的含量及菊芋品质的稳定性，作为负向指标处理。表7的结果显示，各指标的权重系数大小顺序依次为果糖、灰分、蔗果五糖、水分。

表 7 各指标的权重系数			
Table 7 Weight coefficients of each index			
指标	信息熵值	信息效用值	权重系数/%
蔗果五糖	0.962	0.038	23.04
水分	0.969	0.031	18.64
果糖	0.947	0.053	31.78
灰分	0.956	0.044	26.54

2.3.4 灰色关联度评价菊芋综合品质

灰色关联度已被广泛应用于鲜桃^[49]、百香果^[50]、铁皮石斛^[51]等农产品及中药材的品质评价，往往结合熵权法得到的指标权重建立品质评价模型，通过与参考值关联度的大小来评价综合品质。加权关联度越大，表示样本与“理想样本”越接近，品质越好。以蔗果五糖、果糖、灰分的最大值，水分含量的最小值作为参考序列，各样本的实际含量作为子序列，进行灰色关联度计算，得到结果如表8所示。

不同产地菊芋的加权关联度在0.420~0.758，其中排名前5位的产地有吉林白山（S4）、甘肃定西（S41）、辽宁锦州（S5）、陕西咸阳（S40）、河北石家庄（S1），加权关联度分别为0.810、0.787、0.774、0.749、0.700，综合品质较好。其中S4、S41均属于聚类分析中第一类菊芋，适宜用于菊粉的加工利用。值得注意的是，得到的菊芋品质高低是由各个核心指标共同决定的结果，综合品质越高表示直接食用或加工利用的价值较高。此外，菊芋品质还可能受外观、质构、风味成分等因素影响，需根据具体的应用方向进一步探究。

表 8 不同产地菊芋的灰色关联度分析						
Table 8 Grey correlation analysis of <i>Helianthus tuberosus</i> from different origins						
产地编号	灰色关联系数				加权关联度	排序
	蔗果五糖	水分	果糖	灰分		
S1	0.521	0.885	0.749	0.667	0.700	5
S2	0.478	0.847	0.489	0.689	0.606	27
S3	0.447	0.875	0.702	0.710	0.677	9
S4	1.000	0.902	0.729	0.680	0.810	1
S5	0.488	0.909	1.000	0.656	0.774	3
S6	0.562	0.893	0.393	0.526	0.560	34
S7	0.868	1.000	0.430	0.623	0.688	6
S8	0.565	0.858	0.528	0.564	0.608	26
S9	0.591	0.897	0.684	0.623	0.686	7
S10	0.564	0.898	0.599	0.601	0.647	16
S11	0.460	0.845	0.395	0.612	0.552	36
S12	0.516	0.943	0.518	0.717	0.650	14
S13	0.565	0.887	0.605	0.605	0.648	15
S14	0.716	0.895	0.423	0.625	0.632	19
S15	0.398	0.912	0.486	0.733	0.611	22
S16	0.497	0.920	0.430	0.805	0.636	17
S17	0.700	0.939	0.451	0.575	0.632	20
S18	0.544	0.857	0.401	0.716	0.602	29
S19	0.594	0.888	0.397	0.897	0.667	11
S20	0.699	0.896	0.404	0.672	0.635	18
S21	0.520	0.916	0.636	0.628	0.659	13
S22	0.715	0.870	0.405	0.652	0.629	21
S23	0.469	0.860	0.380	0.635	0.558	35
S24	0.551	0.851	0.440	0.667	0.603	28
S25	0.543	0.843	0.629	0.726	0.675	10
S26	0.588	0.852	0.352	0.688	0.589	32
S27	0.370	0.899	0.347	0.541	0.507	41
S28	0.384	0.895	0.365	0.572	0.523	39
S29	0.376	0.885	0.407	0.522	0.519	40
S30	0.427	1.000	0.557	0.555	0.609	25
S31	0.547	0.868	0.368	0.719	0.596	30
S32	0.561	0.877	0.333	1.000	0.664	12
S33	0.437	0.814	0.420	0.579	0.540	37
S34	0.494	0.891	0.437	0.642	0.589	31
S35	0.548	0.813	0.339	0.538	0.529	38
S36	0.454	0.844	0.568	0.631	0.610	24
S37	0.490	0.899	0.492	0.653	0.610	23
S38	0.834	0.962	0.470	0.607	0.682	8
S39	0.421	0.805	0.549	0.607	0.583	33
S40	0.454	0.891	0.861	0.771	0.749	4
S41	0.600	0.896	0.976	0.646	0.787	2

3 结论

本研究对 41 个产地的菊芋进行了成分分析, 结果表明不同产地菊芋的基本指标之间存在显著差异, 其中变异系数最大的成分是总黄酮和果糖。不同产地菊芋的主要糖类组分整体相似性较高, 在组成上基本相同, 而含量上有所差异, 含量的差异可能与气温、降水量、日照时长等气象因素密切相关。聚类分析可将 41 个产地菊芋分为 4 类, 每类具有不同的代表性特征, 有不同的加工特性和应用价值。通过相关性分析和主成分分析将 14 项评价指标简化为 4 个核心指标, 分别为蔗果五糖、水分、果糖和灰分, 能够代表菊芋的整体品质。采用熵权法确定核心指标的权重, 结合灰色关联度分析建立了菊芋综合品质评价模型, 根据加权关联度大小排序得到综合品质较优的产地为吉林白山、甘肃定西、辽宁锦州, 开发利用价值较高。本研究为菊芋鲜食及加工的产地优选提供参考, 为菊芋的综合利用、品质评价提供了理论依据, 以期推动菊芋资源的开发应用。

参考文献

- [1] LI J, JIA S, YUAN C, et al. Jerusalem artichoke inulin supplementation ameliorates hepatic lipid metabolism in type 2 diabetes mellitus mice by modulating the gut microbiota and fecal metabolome [J]. Food & Function, 2022, 13(22): 11503-11517.
- [2] LIGHTOWLER H, THONDRE S, HOLZ A, et al. Replacement of glycaemic carbohydrates by inulin-type fructans from chicory (oligofructose, inulin) reduces the postprandial blood glucose and insulin response to foods: report of two double-blind, randomized, controlled trials [J]. European Journal of Nutrition, 2018, 57(3): 1259-1268.
- [3] LI M, DUAN J, WANG X, et al. Inulin inhibits the inflammatory response through modulating enteric glial cell function in type 2 diabetic mellitus mice by reshaping intestinal flora [J]. ACS Omega, 2023, 8(40): 36729-36743.
- [4] MICKA A, SIEPELMEYER A, HOLZ A, et al. Effect of consumption of chicory inulin on bowel function in healthy subjects with constipation: a randomized, double-blind, placebo-controlled trial [J]. International Journal of Food Sciences and Nutrition, 2017, 68(1): 82-89.
- [5] YANG J, HONG W, LIN Y F, et al. High soluble fiber promotes colorectal tumorigenesis through modulating gut microbiota and metabolites in mice [J]. Gastroenterology, 2024, 166(2): 323-337.
- [6] ZOU H, GAO H, LIU Y, et al. Dietary inulin alleviated constipation induced depression and anxiety-like behaviors: involvement of gut microbiota and microbial metabolite short-chain fatty acid [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 259(2): 129420.
- [7] CHAUHAN D S, VASHISHT P, BEBARTTA R P, et al. Jerusalem artichoke: a comprehensive review of nutritional composition, health benefits and emerging trends in food applications [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2025, 24(1): e70114.
- [8] 赵孟良, 刘明池, 钟启文, 等. 不同来源菊芋种质资源品质性状多样性分析[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2018, 46(2): 104-112.
- [9] 王璐, 刘芳芳, 郭洪海, 等. 34份菊芋种质资源农艺性状及块茎品质综合评价[J]. 山东农业科学, 2023, 55(11): 65-72.
- [10] GB 5009.3-2016, 食品安全国家标准 食品中水分的测定[S].
- [11] CAI L, ZHANG Y, CAI Z, et al. Detection of soluble solids content in tomatoes using full transmission Vis-NIR spectroscopy and combinatorial algorithms [J]. Frontiers in Plant Science, 2024, 15: 1500819.
- [12] GB 5009.5-2016, 食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定[S].
- [13] GB 5009.4-2016, 食品安全国家标准 食品中灰分的测定[S].
- [14] GB/T 5009.10-2003, 植物类食品中粗纤维的测定[S].
- [15] KASZÁS L, KOVÁCS Z, KOROKNAI J, et al. Identification of key parameters and phytochemical composition of fiber and brown juice by-products from green biomass of Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) [J]. Biomass and Bioenergy, 2024, 188: 107332.
- [16] SINGLETON V L, ORTHOFER R, LAMUELA-RAVENTÓS R M. Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of Folin-Ciocalteu reagent [J]. Methods Enzymol, 1999, 299: 152-178.
- [17] LI W, ZHANG J, YU C, et al. Extraction, degree of polymerization determination and prebiotic effect evaluation of inulin from Jerusalem artichoke [J]. Carbohydrate Polymers, 2015, 121: 315-319.
- [18] GB/T 41377-2022, 菊粉质量要求[S].
- [19] WEN S, LUO Y, LIU L, et al. Spectrum-effect relationship between HPLC fingerprints and antioxidant activities of *Bletilla striata* [J]. Journal of Chromatography B, 2024, 1248: 124351.
- [20] 于艳奇, 杨明源, 吕春茂, 等. 基于主成分及聚类分析的板栗品质综合评价[J]. 食品工业科技, 2025, 46(2): 280-291.
- [21] XIA Y, ZHANG W, CHE T, et al. Comparison of diffuse reflectance and diffuse transmittance Vis/NIR spectroscopy for assessing soluble solids content in kiwifruit coupled with chemometrics [J]. Applied Sciences, 2024, 14(21): 10001.
- [22] 赵孟良, 刘明池, 钟启文, 等. 29份菊芋种质资源氨基酸含量和营养价值评价[J]. 种子, 2018, 37(3): 55-60.
- [23] MAUMELA P, RENSBERG E, CHIMPHANGO A F A, et al. Sequential extraction of protein and inulin from the tubers of Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) [J]. Journal of Food Science and Technology, 2020, 57(2): 775-786.
- [24] 范三红, 胡雅楠, 何亚. 响应面法优化菊芋渣酶解制备抗氧化肽工艺[J]. 食品科学, 2015, 36(8): 49-53.
- [25] 赵孟良, 刘明池, 钟启文, 等. 菊芋种质资源主要矿质营养元素含量特征与分析评价[J]. 河北农业大学学报, 2017, 40(4): 31-36.
- [26] BARBER T M, KABISCH S, PFEIFFER A F H, et al. The health benefits of dietary fibre [J]. Nutrients, 2020, 12(10): 3209.
- [27] AFOAKWAH N A, TCHABO W, OWUSU-ANSAH P. Ultrasound-assisted extraction (UAE) of Jerusalem artichoke tuber bio-active ingredient using optimized conditions of Box-Behnken response surface methodology [J]. Heliyon, 2024, 10(4): e25645.

- [28] OSZMIANŃSKI J, LACHOWICZ S, NOWICKA P, et al. Evaluation of innovative dried Purée from Jerusalem artichoke-*in vitro* studies of its physicochemical and health-promoting properties [J]. *Molecules*, 2021, 26(9): 2644.
- [29] WANG Y, WANG G, ZHOU Z, et al. Transcriptome analysis for genes involved in fructan biosynthesis in the Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) [J]. *Biotechnology & Biotechnological Equipment*, 2022, 36(1): 472-480.
- [30] NGAMPANYA B, KEAYARSA S, JATURAPIREE P, et al. Characterization of transfructosylating activity enzyme from tubers of tropical Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) for production of fructooligosaccharides [J]. *International Food Research Journal*, 2016, 23(5): 1965-1972.
- [31] SINGH R S, SINGH R P, KENNEDY J F. Recent insights in enzymatic synthesis of fructooligosaccharides from inulin [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2016, 85: 565-572.
- [32] CARVALHO CARDOSO E S, MARTINS N Q, AZEVEDO R A, et al. Production and application of inulinase by new isolates of *Aspergillus welwitschiae* from fermented peach-palm waste for the production of fructooligosaccharides [J]. *Food Chemistry*, 2025, 465: 141978.
- [33] XU L, LIANG J, XU H, et al. Characterization of a salt-tolerated exo-fructanase from *Microbacterium* sp. XL1 and its application for high fructose syrup preparation from inulin [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 282: 137288.
- [34] 王磊,黄燕巧,杨瑞利,等.一种益生元复合固体饮料配方及通便功能研究[J].*食品科技*,2023,48(11):114-122.
- [35] TAKAHASHI H, NAKAJIMA A, MATSUMOTO Y, et al. Administration of Jerusalem artichoke reduces the postprandial plasma glucose and glucose-dependent insulinotropic polypeptide (GIP) concentrations in humans [J]. *Food & Nutrition Research*, 2022, 66: 7870.
- [36] APOLINÁRIO A C, LIMA DAMASCENO B P G, MACÊDO BELTRÃO N E, et al. Inulin-type fructans: a review on different aspects of biochemical and pharmaceutical technology [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2014, 101: 368-378.
- [37] MUDANNAYAKE D C, JAYASENA D D, WIMALASIRI K M S, et al. Inulin fructans-food applications and alternative plant sources: a review [J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2022,57(9): 5764-5780.
- [38] 张靖年,张晓丹,李素梅,等.菊苣HPLC指纹图谱及含量测定研究[J].*中药材*,2023,46(2):419-423.
- [39] 张任,张鹏程,邬欢欢,等.气象因子对南疆地区骏枣果实品质的影响[J].*中国农业科技导报*,2018,20(7):113-122.
- [40] SHAO T, CHEN Y, GAO X, et al. Salt stress affects the biomass of industrial crop Jerusalem artichoke by affecting sugar transport and metabolism [J]. *Heliyon*, 2023, 9(3): e14107.
- [41] KRIVOROTOVA T, SEREIKAITĖ J. Correlation between fructan exohydrolase activity and the quality of *Helianthus tuberosus* L. tubers [J]. *Agronomy*, 2018, 8(9): 184.
- [42] LUO R, SONG X, LI Z, et al. Effect of soil salinity on fructan content and polymerization degree in the sprouting tubers of Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2018, 125: 27-34.
- [43] 张铎,李岚涛,林迪,等.施磷水平对菊芋块茎产量、品质、植株生理特性与磷利用率的影响[J].*草业学报*,2022,31(6):139-149.
- [44] 李岚涛,张铎,盛开,等.施氮量对菊芋块茎产量、品质与植株生理特性的影响[J].*植物营养与肥料学报*,2022,28(3):496-506.
- [45] LEE Y, LEE M, YU S, et al. Changes in physicochemical characteristics and antioxidant activities of Jerusalem artichoke tea infusions resulting from different production processes [J]. *Food Science and Biotechnology*, 2014, 23(6): 1885-1892.
- [46] DIMITROVSKI D, VELICKOVA E, DIMITROVSKA M, et al. Synbiotic functional drink from Jerusalem artichoke juice fermented by probiotic *Lactobacillus plantarum* PCS26 [J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2016,53(1): 766-774.
- [47] CHEN Y, PAN H, HAO S, et al. Evaluation of phenolic composition and antioxidant properties of different varieties of Chinese citrus [J]. *Food Chemistry*, 2021, 364: 130413.
- [48] 李跃红,冉茂乾,徐孟怀,等.不同产地红心猕猴桃品质的主成分及聚类分析[J].*食品工业科技*,2021,42(10):222-228.
- [49] 郑霄,闫新焕,郑晓冬,等.基于灰色关联度分析的鲜食桃果实综合品质评价[J].*中国果菜*,2023,43(10):36-41.
- [50] 马文霞,倪玉洁,谢倩,等.鲜食百香果果实品质综合评价模型的建立及应用[J].*食品科学*,2020,41(13):53-60.
- [51] 王柳璿,郭焕佳,姬生国.基于熵权法和灰色关联度法的铁皮石斛质量评价[J].*中成药*,2023,45(2):483-487.