

DOI: 10.16861/j.cnki.zggc.2025.0509

基于主成分分析和聚类分析的不同品种芦笋营养品质综合评价

漆慧娟¹, 岳雅妮¹, 徐继根², 王颖¹, 卢基来¹, 陈伟强¹

(1. 台州市农业科学研究院 浙江台州 318000; 2. 浙江省台州市农资股份有限公司 浙江台州 318000)

摘要: 通过评价不同品种芦笋的营养品质, 为芦笋的品种选育、品质改良及高附加值利用提供理论支撑。以三年生芦笋金冠、华淼、Grande 等 15 个品种为材料, 对其基本营养成分、矿物质元素、功能活性成分比等 16 项营养指标采用相关性分析、主成分分析和聚类分析等多元统计方法进行综合性评价。结果表明, 维生素 C 含量变异系数最大, 为 31.58%; 除了纤维素含量与其他品质指标不存在显著相关性外, 其他 15 个指标均至少与 1 个指标存在显著或极显著相关性; 采用主成分分析从 16 项品质指标提取出 6 个主成分, 累计方差贡献率达到 88.129%, 综合评分排名前三的芦笋品种分别为佳芦 2 号、Walker Pioneer、华淼; 利用聚类分析可将 15 个芦笋品种划分为三大类群: WB-231、WB-212、H2-12、UC157、WB-211、Apollo 为第一类群, Atlas、Grande、金冠、WB-234、WB-260、Purple Passion 为第二类群, 华淼、Walker Pioneer、佳芦 2 号为第三类群。综上所述, 综合营养品质优异的芦笋品种为佳芦 2 号、Walker Pioneer、华淼, 即第三类群, 可作为芦笋种质创新和品种选育的基础材料。

关键词: 芦笋; 营养品质; 主成分分析; 聚类分析

中图分类号: S644.6

文献标志码: A

文章编号: 1673-2871(2026)04-072-10

Comprehensive evaluation of nutritional quality of different *Asparagus officinalis* L. varieties based on principal component analysis and cluster analysis

QI Huijuan¹, YUE Yani¹, XU Jigen², WANG Ying¹, LU Jilai¹, CHEN Weiqiang¹

(1. Taizhou Academy of Agricultural Sciences, Taizhou 318000, Zhejiang, China; 2. Zhejiang Taizhou Agricultural Materials Co., Ltd., Taizhou 318000, Zhejiang, China)

Abstract: By evaluating the nutritional quality of different asparagus varieties, this study aims to provide theoretical support for asparagus variety breeding, quality improvement, and high-value utilization. Fifteen three-year-old asparagus varieties such as Jinguan, Huamiao, Grande and others were used as materials. A comprehensive evaluation was conducted on 16 nutritional indicators, including basic nutritional components, mineral elements, and functional active ingredient ratios, using various statistical methods such as correlation analysis, principal component analysis, and cluster analysis. The results showed that vitamin C content had the highest coefficient of variation at 31.58%. Except for cellulose content, the remaining 15 indicators each showed significant or extremely significant correlations with at least one other indicator. Principal component analysis extracted six principal components from the 16 quality indicators, with a cumulative variance contribution rate of 88.129%. The top three asparagus varieties with the highest comprehensive scores were Jialu No. 2, Walker Pioneer, and Huamiao. Cluster analysis classified the 15 asparagus varieties into three major groups: The first group includes WB-231, WB-212, H2-12, UC157, WB-211, and Apollo; the second group consists of Atlas, Grande, Jinguan, WB-234, WB-260, and Purple Passion; the third group includes Huamiao, Walker Pioneer, and Jialu No. 2. In summary, the asparagus varieties with excellent comprehensive nutritional quality are Jialu No. 2, Walker Pioneer, and Huamiao (which belong to the third group), which can serve as foundational materials for asparagus germplasm innovation and variety breeding.

Key words: Asparagus; Nutritional quality; Principal component analysis; Cluster analysis

收稿日期: 2025-07-16; 修回日期: 2025-10-23

基金项目: 浙江省台州市农业技术推广基金会项目(202525); 台州市农业科学研究院科技发展基金(21D02)

作者简介: 漆慧娟, 女, 农艺师, 主要从事蔬菜育种及栽培技术研究。E-mail: huijuanqi89@163.com

通信作者: 陈伟强, 男, 高级农艺师, 主要从事农业科研与推广工作。E-mail: 34557927@qq.com

芦笋(*Asparagus officinalis* L.)学名石刁柏,是天门冬科天门冬属多年生草本植物,原产地为地中海东岸及小亚细亚地区,于19世纪末引入中国,后逐渐被广泛栽培。目前,我国已成为全球芦笋生产量和出口量第一的国家,生产地主要分布在山东、山西、福建、云南、河北、江苏等^[1-2]。随着人们生活品质的不断提升和健康观念深入人心,人们对健康膳食和功能性蔬菜的需求日益增强。其中,芦笋作为一种兼具食用与药用价值的蔬菜展现出广阔的发展前景。芦笋是多年生蔬菜,品种选择对芦笋的产量和品质有较大影响^[3-5]。目前,国内外对芦笋品种方面的研究主要集中于品种选育、抗性、农艺性状及部分营养品质比较分析等方面^[6-11]。然而,针对多种芦笋品种的综合营养品质评估,采用主成分分析与聚类分析方法的报道较少,尤其是关于其功能活性成分对比的系统研究更少,而功能活性成分分析对筛选优良品种及深加工至关重要。

芦笋的食用部位为嫩茎,质地细腻、口感鲜美,营养成分丰富多样,其中含有多种游离氨基酸、大量矿物质元素,还包含甾体皂苷、黄酮类物质等多种生物活性成分^[12],因此具有广泛的药理功效^[13-18]。芦笋富含多样化的营养成分,但在营养品质上不同品种间存在差异,仅凭主观评价难以全面彰显其整体上的优越性。因此,有必要建立一种基于多指标测定的芦笋营养品质评价方法,以便于更客观、准确地进行品质评估。主成分分析(PCA)法是一种高效的多元降维统计方法,旨在通过线性变换,将众

多相互关联的指标整合为少数几个彼此独立的主成分,而这些主成分能够最大限度地保留原始数据的主要变异信息,从而实现数据的有效降维与信息浓缩^[19-22]。聚类分析则基于样品的多指标测定结果计算相似性统计量,并将相似度较高的样品归类,以实现品质的分级评价^[23]。当前,在多种蔬菜水果的品质评估中,如菜心、冬枣以及猕猴桃等,这2种方法的应用已经非常普遍^[24-27],为芦笋的综合品质分析提供了可靠参考。

笔者主要选择近年芦笋产区主栽品种,如Grande、Atlas、UC157、Apollo、金冠、华淼、Walker Pioneer、Purple Passion,同时也选择了一些正在推广的新品种,如佳芦2号、H2-12、WB-260等,系统测定了其16项营养成分指标,进而运用相关性、主成分及聚类分析等科学方法,综合评估各芦笋品种的营养品质,旨在为芦笋品种的优化选育、品质改良及高效开发利用提供坚实的科学与理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试材料为从国内外收集和引进的15个芦笋品种,具体信息见表1。

1.2 方法

试验于台州市农业科学研究院台州农业科技创新园基地进行。供试的15个芦笋品种于2022年3月15日播种,2022年5月10日定植于基地单

表1 参试芦笋品种名称、来源及嫩茎颜色

Table 1 Name, source and color of tested asparagus varieties

编号 No.	品种名称 Variety name	来源 Source	嫩茎颜色 Tender stem color
1	金冠 Jinguan	山东华农芦笋科技有限公司 Shandong Huanong Asparagus Technology Co., LTD.	绿色 Green
2	Atlas	Waker Brother Seeds and Plants, LLC.(In USA)	绿色 Green
3	WB-260	Waker Brother Seeds and Plants, LLC.(In USA)	绿色 Green
4	WB-234	Waker Brother Seeds and Plants, LLC.(In USA)	绿色 Green
5	WB-231	Waker Brother Seeds and Plants, LLC.(In USA)	绿色 Green
6	WB-212	Waker Brother Seeds and Plants, LLC.(In USA)	绿色 Green
7	WB-211	Waker Brother Seeds and Plants, LLC.(In USA)	绿色 Green
8	华淼 Huamiao	山东华农芦笋科技有限公司 Shandong Huanong Asparagus Technology Co., LTD.	绿色 Green
9	Grande	Waker Brother Seeds and Plants, LLC.(In USA)	绿色 Green
10	Purple Passion	Waker Brother Seeds and Plants, LLC.(In USA)	紫色 Purple
11	H2-12	山东华农芦笋科技有限公司 Shandong Huanong Asparagus Technology Co., LTD.	绿色 Green
12	佳芦2号 Jialu No. 2	杭州佳惠农业开发有限公司 Hangzhou Jiahui Agricultural Development Co., LTD.	绿色 Green
13	Walker Pioneer	Waker Brother Seeds and Plants, LLC.(In USA)	绿色 Green
14	UC157	Waker Brother Seeds and Plants, LLC.(In USA)	绿色 Green
15	Apollo	Waker Brother Seeds and Plants, LLC.(In USA)	绿色 Green

体钢架大棚内。按一垄单行定植,株行距 0.3 m×1.5 m。各试验品种每个小区设定种植 20 株样本,占地面积 9 m²,3 次重复。各芦笋品种田间栽培管理方式一致。

试验材料为三年生芦笋,样品均于 2024 年 4 月 23 日采集,样品要求为:嫩茎长度为 25 cm 左右,茎粗为 1 cm 左右,粗细均匀、无散头、无弯曲、无病虫害,于各试验区内随机选取符合预设标准的嫩茎作为样本。每小区选取嫩茎 5 支(3 次重复),取样后立即称量鲜质量,并携带回本单位实验室进行水分含量测定;另外每小区选取嫩茎 10 支(3 次重复),委托沈阳佰奥生物科技有限公司进行检测。其中,可溶性蛋白、氨基酸、维生素 C、总糖、花色苷含量用鲜样检测,另取部分鲜芦笋样品,在 80 °C 条件下烘干至恒质量,粉碎后过 80 目筛,用于测定纤维素、总酚、类黄酮、总皂苷和矿质元素含量。

1.3 项目测定

采用直接干燥法^[28]、BCA 法^[29]、氨基酸自动分析仪分别测定^[30]水分、蛋白质、氨基酸含量;参考 Soest 等^[31]的方法、固蓝 B 盐比色法^[32]、pH 示差法^[33]分别测定纤维素、维生素 C、花色苷含量。采用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)测定矿质元素含量^[34]。采用 NeXION[®]1000 ICP-MS 测定 Ca、Mg、Fe、Mn、Zn、Se

含量。采用 3,5-二硝基水杨酸法^[35]、福林-酚法^[36]分别测定总糖、总酚含量;参考硝酸铝比色法^[37]、香草醛-高氯酸法^[38]分别测定类黄酮、总皂苷含量。

1.4 数据分析

采用 Microsoft Excel 2019 整理试验数据,计算平均值、标准差和变异系数。采用 SPSS Statistics 26.0 对数据进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同品种芦笋营养品质分析

2.1.1 基本营养成分分析 由表 2 可知,各品种鲜笋水分含量为 92.89%~95.41%,占其鲜质量的绝大部分。不同品种间水分含量差异显著,变异系数高达 16.66%,其中水分含量最高、最低的品种分别为 10 号、13 号,依次对应 95.41%和 92.89%。在 15 个芦笋品种中,维生素 C 含量差异最大,变异系数达到 31.58%,4 号含量为 14.97 mg·100 g⁻¹,显著高于其余品种,6 号的维生素 C 含量最低,仅为 6.98 mg·100 g⁻¹。此外,花色苷、纤维素及氨基酸这三种营养成分在品种间的差异亦较为明显,变异系数分别为 13.82%、13.70%、10.54%。其中,10 号紫色品种的花色苷含量最高(9.19 mg·100 g⁻¹),显著高于其他品种,而 15 号绿色品种的花色苷含量最低(3.43 mg·100 g⁻¹),这与

表 2 不同品种芦笋基本营养成分含量

Table 2 Basic nutritional content of different asparagus varieties

品种编号 Variety No.	w(水分) Moisture content/%	w(蛋白质) Protein content/ (mg·g ⁻¹)	w(氨基酸) Amino acid content/ (mg·g ⁻¹)	w(纤维素) Cellulose content/ (mg·g ⁻¹)	w(维生素 C) Vitamin C content/ (mg·100 g ⁻¹)	w(花色苷) Anthocyanin content/ (mg·100 g ⁻¹)
1	94.41±0.16 abcd	48.21±0.96 b	3.01±0.21 de	189.32±2.27 c	8.58±0.40 f	5.14±0.39 fg
2	94.83±0.15 ab	35.80±2.53 f	2.66±0.11 f	192.88±12.29 c	8.59±0.20 f	5.55±0.26 f
3	93.25±0.22 cde	32.13±1.17 gh	3.28±0.25 cd	187.29±4.43 c	9.93±0.20 cde	6.60±0.09 e
4	93.27±0.20 cde	37.13±1.92 ef	3.02±0.07 de	202.14±13.41 c	14.97±1.00 a	5.60±0.09 f
5	93.17±0.18 cde	42.88±1.40 c	2.48±0.14 f	189.92±3.25 c	11.91±0.37 b	8.03±0.36 b
6	93.70±1.53 bcde	42.19±1.67 cd	3.22±0.20 cd	189.83±8.89 c	6.98±0.23 g	4.76±0.31 gh
7	93.04±0.39 de	46.54±1.64 b	4.40±0.30 a	166.00±7.09 d	9.60±0.46 de	7.54±0.26 cd
8	94.61±1.44 abc	30.93±1.74 h	3.06±0.22 de	258.02±18.28 a	7.26±0.13 g	4.80±0.28 gh
9	94.84±0.44 ab	34.83±1.57 fg	3.19±0.13 cd	201.60±11.44 c	8.67±0.25 f	7.70±0.29 bc
10	95.41±0.53 a	39.88±0.93 de	3.16±0.19 cd	191.64±11.50 c	10.55±0.64 c	9.19±0.14 a
11	93.64±1.25 bcde	34.98±0.83 fg	3.22±0.06 cd	186.27±13.10 c	7.06±0.48 g	3.91±0.15 i
12	94.25±0.99 abcde	51.30±1.24 a	3.49±0.23 bc	229.11±11.36 b	10.39±0.73 cd	7.10±0.37 d
13	92.89±0.18 e	35.81±2.80 f	3.05±0.17 de	245.77±11.54 ab	9.37±0.32 ef	4.40±0.28 h
14	93.59±0.38 bcde	32.27±1.64 gh	3.72±0.20 b	203.95±6.91 c	7.05±0.26 g	4.77±0.34 gh
15	93.92±0.68 bcde	39.62±0.75 de	2.72±0.08 ef	159.43±5.60 d	7.46±0.10 g	3.43±0.17 j
平均值 Mean	93.92	38.97	3.18	199.55	9.22	5.90
变异系数 CV/%	16.66	7.56	10.54	13.70	31.58	13.82

注:同列数字后不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。下同。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences at 0.05 level. The same below.

其嫩茎表皮颜色显示度相符。15号的纤维素含量最低($159.43 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$),食用含渣比较少,而8号的纤维素含量最高($258.02 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$);7号的氨基酸含量最高($4.40 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$),5号含量最低($2.48 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)。蛋白质含量在各品种中差异较小,变异系数仅为7.56%,其中12号的蛋白质含量最高($51.30 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$),8号含量最低($30.93 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)。在15个品种当中,仅7号(WB-211)和12号(佳芦2号)两个品种在蛋白质、氨基酸、维生素C、花色苷含量上均超过平均值。

2.1.2 多种矿质元素含量分析 从表3可知,各品种芦笋中Mg含量平均值为 $247.37 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$,是所测矿质元素指标中含量最高的,其中12号含量最高($303.73 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$)。各品种芦笋中Ca含量较高,平均值为 $119.08 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$,其中12号含量

最高($158.27 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$)。相对而言,Mn、Zn和Fe在各品种中的含量较少,平均值分别仅为2.31、9.92、 $14.02 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ 。其中,12号中的Fe和Mn含量均最高;各品种Zn含量的变异系数较大,为28.71%,11号中的Zn含量最高($13.49 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$)。各品种芦笋中Se含量为 $8.38 \sim 24.94 \mu\text{g} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$,变异系数达到了23.64%,其中Se含量最高、最低的分别是9号和5号。在15个品种当中,仅12号这一个品种在Ca、Mg、Fe、Mn、Zn、Se这6种矿质元素含量上均超过平均值。

2.1.3 功能活性成分分析 由图1可知,在各品种中,总糖和总酚含量均相对较高,总皂苷和类黄酮含量均较低。所有品种中总糖含量显著较高的是10号、7号品种(29.93 、 $28.71 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$),而13号品种

表3 不同品种芦笋矿质元素含量

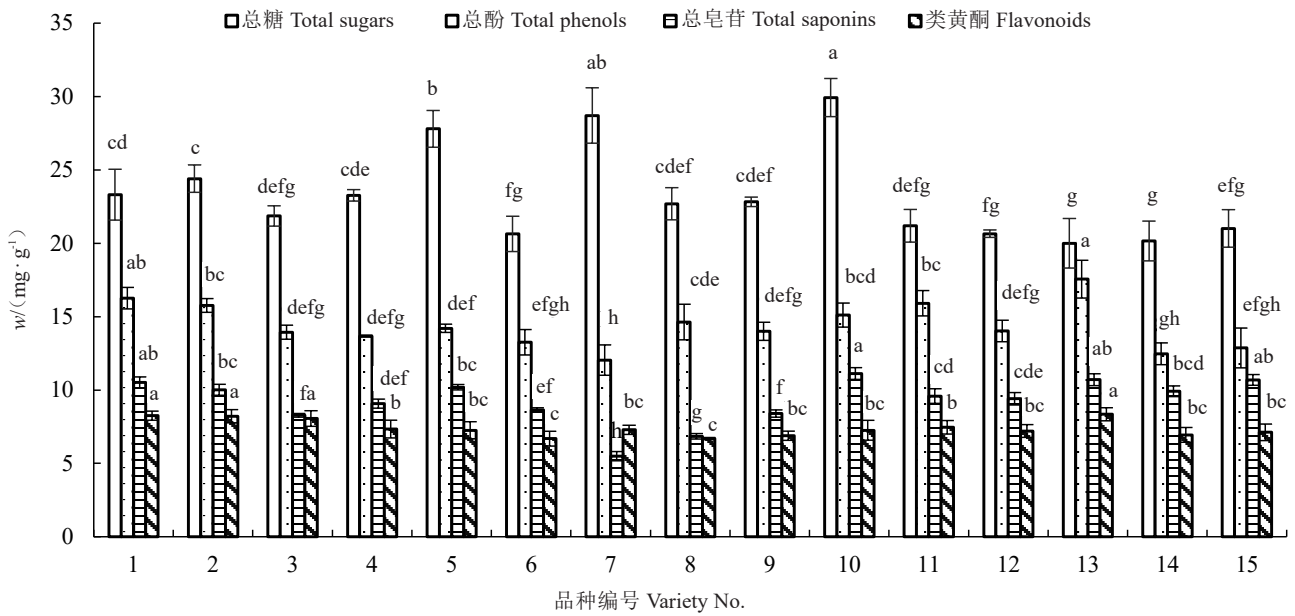
Table 3 Mineral element content of different asparagus varieties

品种编号 Variety No.	w(Ca) Ca content/ ($\text{mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$)	w(Mg) Mg content/ ($\text{mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$)	w(Fe) Fe content/ ($\text{mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$)	w(Mn) Mn content/ ($\text{mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$)	w(Zn) Zn content/ ($\text{mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$)	w(Se) Se content/ ($\mu\text{g} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$)
1	110.62±2.62 g	217.72±5.16 g	13.60±0.23 d	2.03±0.05 i	9.61±0.28 ef	22.65±0.96 b
2	112.17±0.77 g	226.66±5.10 g	13.35±0.19 d	2.34±0.05 fg	9.27±0.21 g	19.06±0.41 ed
3	100.20±1.63 h	245.64±4.30 ef	12.61±0.33 e	1.98±0.09 i	9.78±0.19 e	12.86±0.44 h
4	101.31±2.59 h	221.95±3.52 g	10.47±0.12 g	1.41±0.02 k	8.72±0.05 h	9.18±0.18 j
5	116.07±2.05 f	267.16±3.96 c	11.62±0.10 f	1.80±0.06 j	9.37±0.05 fg	8.38±0.13 k
6	120.32±1.56 de	267.72±2.83 c	15.97±0.17 b	2.42±0.05 ef	10.38±0.17 d	16.25±0.49 g
7	126.54±3.27 b	244.56±7.15 ef	14.71±0.36 c	2.05±0.08 i	11.41±0.27 c	16.97±0.35 g
8	124.98±4.12 bc	248.33±7.48 e	13.66±0.13 d	2.47±0.10 e	9.69±0.16 e	18.20±0.26 f
9	117.10±1.89 ef	237.05±7.55 f	14.62±0.32 c	2.53±0.07 de	9.37±0.20 fg	24.94±0.55 a
10	118.08±1.53 def	201.36±4.26 h	13.42±0.14 d	2.25±0.05 h	8.85±0.03 h	19.85±0.43 d
11	120.09±1.06 de	257.84±5.15 d	15.59±0.11 b	2.21±0.05 h	13.49±0.07 a	20.73±0.56 c
12	158.27±2.26 a	303.73±4.98 a	16.60±0.12 a	3.16±0.05 a	11.90±0.07 b	19.54±0.44 ed
13	117.87±1.33 def	238.33±2.42 f	13.48±0.15 d	2.62±0.08 cd	8.27±0.16 i	18.78±0.23 ef
14	120.65±0.54 de	284.27±5.21 b	14.68±0.21 c	2.75±0.07 b	9.32±0.14 fg	10.49±0.34 i
15	121.86±2.02 cd	248.26±6.52 e	15.86±0.30 b	2.65±0.07 bc	9.32±0.16 fg	9.52±0.42 j
平均值 Mean	119.08	247.37	14.02	2.31	9.92	16.49
变异系数 CV/%	18.44	11.97	10.66	11.10	28.71	23.64

的总糖含量最低($20.00 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)。对比结果显示,13号和1号的总酚含量显著较高,分别为17.55、 $16.26 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,而7号含量最低($12.04 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)。类黄酮含量较高的品种有4个,分别为13号、1号、2号及3号,依次为8.35、8.25、8.21、 $8.06 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,显著高于其他11个品种,而6号中含量最低($6.69 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)。各品种芦笋中的总皂苷含量在 $5.49 \sim 11.12 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,其中10号品种含量最高($11.12 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$),略高于13号、15号和1号品种,显著高于其余11个品种,而7号品种含量最低($5.49 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)。

2.2 不同品种芦笋营养品质相关性分析

由表4可知,在16个共有的品质指标中,不同芦笋品种间品质指标相互关联程度各异,其中7对指标有极显著相关性,7对指标有显著相关性。花色苷含量和总糖含量、Fe含量和Mn含量、总酚含量和类黄酮含量呈极显著正相关,另外Ca含量与Mg、Fe、Mn含量也呈极显著正相关,但维生素C含量与Fe含量却呈极显著负相关。水分含量与Se含量、蛋白质含量与Ca含量、Mg含量与Fe含量、Mg含量与Mn含量、Fe含量与Zn含量存在显著正



注：同一成分的不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。

Note: Different lowercase letters of the same component indicate significant differences at 0.05 level.

图 1 不同品种芦笋的总糖、总酚、总皂苷、类黄酮含量比较

Fig. 1 Comparison of the contents of total sugars, total phenols, total saponins, and flavonoids in different asparagus varieties

相关,而氨基酸含量与总皂苷含量、维生素 C 含量与 Mn 含量呈显著负相关。由于芦笋各品种品质指标的相关性错综复杂且原始数据信息有重叠,可采用主成分分析方法进一步简化这 16 项品质指标,以提高芦笋品质综合评价的分析效率。

2.3 不同品种芦笋营养品质综合评价

2.3.1 主成分分析 利用主成分分析法对不同品种芦笋营养品质指标进行综合分析,结果如表 5、图 2 所示,其中 6 个核心主成分达到了 88.129% 的累计贡献率,表明这些关键成分能代表所检测品质指标 88.129% 的信息,可以较为全面地呈现出不同芦笋品种的品质特征与差异。

从表 5~6 可以看出,第一主成分贡献率是 28.207%,维生素 C、Ca、Mg、Fe、Mn 和 Zn 含量对该主成分影响较大,且维生素 C 含量与之呈负相关,Ca、Mg、Fe、Mn 和 Zn 含量与之呈正相关;第二主成分贡献率为 18.599%,总酚含量对其作用较大且二者呈正相关;第三主成分贡献率为 14.807%,水分和花色苷含量对其影响较大且与之呈正相关;第四主成分贡献率为 9.264%,蛋白质含量对其作用较大且与之呈正相关;第五主成分贡献率为 8.993%,类黄酮含量对其影响较大且与之呈负相关;第六主成分贡献率为 8.258%,纤维素含量对其影响较大且与之呈正相关。

把主成分载荷矩阵(见表 6)里各项指标数值除

以对应主成分特征值的平方根,就能得出 6 个主成分各自包含的指标系数即特征向量,设 6 个主成分得分分别对应 $F_1 \sim F_6$,用这些特征向量作权重,构建出下面这样的主成分得分计算公式:

$$F_1 = 0.028X_1 + 0.107X_2 + 0.225X_3 + 0.065X_4 - 0.296X_5 - 0.111X_6 + 0.385X_7 + 0.350X_8 + 0.433X_9 + 0.376X_{10} + 0.296X_{11} + 0.122X_{12} - 0.213X_{13} - 0.145X_{14} - 0.221X_{15} - 0.126X_{16};$$

$$F_2 = 0.187X_1 - 0.196X_2 - 0.312X_3 + 0.270X_4 - 0.238X_5 - 0.304X_6 - 0.039X_7 - 0.091X_8 + 0.068X_9 + 0.229X_{10} - 0.133X_{11} + 0.231X_{12} - 0.313X_{13} + 0.451X_{14} + 0.241X_{15} + 0.332X_{16};$$

$$F_3 = 0.452X_1 + 0.297X_2 + 0.056X_3 + 0.010X_4 + 0.052X_5 + 0.424X_6 + 0.199X_7 - 0.243X_8 + 0.080X_9 + 0.073X_{10} + 0.067X_{11} + 0.471X_{12} + 0.379X_{13} + 0.192X_{14} + 0.061X_{15} + 0.031X_{16};$$

$$F_4 = -0.275X_1 + 0.543X_2 - 0.182X_3 - 0.048X_4 + 0.333X_5 + 0.040X_6 + 0.274X_7 + 0.277X_8 + 0.005X_9 + 0.050X_{10} + 0.081X_{11} - 0.208X_{12} - 0.048X_{13} + 0.148X_{14} + 0.281X_{15} + 0.419X_{16};$$

$$F_5 = 0.254X_1 - 0.123X_2 - 0.241X_3 + 0.391X_4 + 0.197X_5 + 0.239X_6 + 0.209X_7 + 0.175X_8 - 0.135X_9 + 0.232X_{10} - 0.413X_{11} - 0.238X_{12} + 0.028X_{13} - 0.183X_{14} - 0.435X_{15} + 0.130X_{16};$$

$$F_6 = -0.288X_1 - 0.077X_2 + 0.279X_3 + 0.623X_4 +$$

表4 不同品种芦笋品质指标相关性分析
Table 4 Correlation analysis of quality indicators for different asparagus varieties

指标 Indicator	水分 含量 Moisture content	蛋白质 含量 Protein content	氨基酸 含量 Amino acid content	纤维素 含量 Cellulose content	维生素C 含量 Vitamin C content	花色苷 含量 Anthocyanin content	Ca 含量 Ca content	Mg 含量 Mg content	Fe 含量 Fe content	Mn 含量 Mn content	Zn 含量 Zn content	Se 含量 Se content	总糖含量 Total sugars content	总酚含量 Total phenols content	类黄酮 含量 Flavonoids content	总皂苷含量 Total saponins content
水分含量	1.000															
蛋白质含量	-0.005	1.000														
氨基酸含量	-0.231	0.187	1.000													
纤维素含量	0.103	-0.255	-0.087	1.000												
维生素C含量	-0.226	0.223	-0.130	0.006	1.000											
花色苷含量	0.269	0.306	0.185	-0.102	0.507	1.000										
Ca含量	0.164	0.515*	0.335	0.288	-0.225	0.096	1.000									
Mg含量	-0.345	0.175	0.250	0.177	-0.256	-0.167	0.653**	1.000								
Fe含量	0.186	0.279	0.367	-0.092	-0.720**	-0.266	0.708**	0.523*	1.000							
Mn含量	0.297	0.070	0.166	0.353	-0.598*	-0.194	0.749**	0.541*	0.789**	1.000						
Zn含量	-0.108	0.296	0.428	-0.182	-0.293	-0.087	0.495	0.481	0.583*	0.168	1.000					
Se含量	0.567*	0.137	0.157	0.254	-0.345	0.146	0.248	-0.251	0.368	0.319	0.273	1.000				
总糖含量	0.222	0.273	0.075	-0.339	0.415	0.755**	-0.134	-0.477	-0.395	-0.488	-0.111	0.011	1.000			
总酚含量	0.191	-0.101	-0.474	0.430	-0.022	-0.163	-0.160	-0.393	-0.198	-0.006	-0.121	0.514	-0.099	1.000		
类黄酮含量	-0.160	0.045	-0.217	-0.025	0.176	-0.097	-0.373	-0.404	-0.339	-0.223	-0.178	0.175	-0.012	0.670**	1.000	
总皂苷含量	0.205	0.048	-0.621*	-0.049	0.061	-0.137	-0.108	-0.150	-0.073	0.131	-0.341	-0.076	-0.134	0.489	0.359	1.000

注: *和**分别表示在0.05和0.01水平显著相关。

Note: ** and *** represent significant correlation and extremely significant correlation at 0.05 and 0.01 level, respectively.

表5 总解释方差
Table 5 Total variance explained

成分 Component	初始特征值 Initial eigenvalue		
	总计 Total	方差 Variance/%	累计方差 Cumulative variance/%
1	4.513	28.207	28.207
2	2.976	18.599	46.807
3	2.369	14.807	61.613
4	1.482	9.264	70.877
5	1.439	8.993	79.871
6	1.321	8.258	88.129

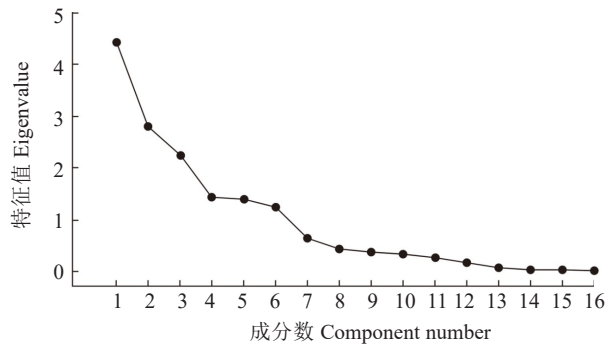


图2 主成分分析碎石图
Fig. 2 Scree plot of principal component analysis

表6 成分矩阵和成分系数矩阵
Table 6 Component matrix and component coefficient matrix

指标 Indicator	成分矩阵 Component matrix						成分系数矩阵 Component coefficient matrix					
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
水分含量 Moisture content	0.059	0.323	0.696	-0.335	0.305	-0.331	0.028	0.187	0.452	-0.275	0.254	-0.288
蛋白质含量 Protein content	0.227	-0.338	0.457	0.661	-0.147	-0.088	0.107	-0.196	0.297	0.543	-0.123	-0.077
氨基酸含量 Amino acid content	0.477	-0.539	0.086	-0.221	-0.289	0.321	0.225	-0.312	0.056	-0.182	-0.241	0.279
纤维素含量 Cellulose content	0.139	0.466	0.016	-0.059	0.469	0.716	0.065	0.270	0.010	-0.048	0.391	0.623
维生素C含量 Vitamin C content	-0.629	-0.410	0.080	0.405	0.236	0.299	-0.296	-0.238	0.052	0.333	0.197	0.260
花色苷含量 Anthocyanin content	-0.236	-0.524	0.652	0.049	0.287	0.105	-0.111	-0.304	0.424	0.040	0.239	0.091
Ca含量 Ca content	0.817	-0.067	0.306	0.334	0.251	0.130	0.385	-0.039	0.199	0.274	0.209	0.113
Mg含量 Mg content	0.744	-0.157	-0.374	0.337	0.210	0.120	0.350	-0.091	-0.243	0.277	0.175	0.104
Fe含量 Fe content	0.920	0.117	0.123	0.006	-0.162	-0.269	0.433	0.068	0.080	0.005	-0.135	-0.234
Mn含量 Mn content	0.798	0.395	0.113	0.061	0.278	-0.053	0.376	0.229	0.073	0.050	0.232	-0.046
Zn含量 Zn content	0.629	-0.229	0.103	0.099	-0.495	0.085	0.296	-0.133	0.067	0.081	-0.413	0.074
Se含量 Se content	0.260	0.398	0.725	-0.253	-0.285	0.213	0.122	0.231	0.471	-0.208	-0.238	0.185
总糖含量 Total sugars content	-0.452	-0.540	0.584	-0.058	0.034	-0.107	-0.213	-0.313	0.379	-0.048	0.028	-0.093
总酚含量 Total phenols content	-0.307	0.778	0.296	0.180	-0.219	0.284	-0.145	0.451	0.192	0.148	-0.183	0.247
类黄酮含量 Flavonoids content	-0.470	0.415	0.094	0.342	-0.522	0.201	-0.221	0.241	0.061	0.281	-0.435	0.175
总皂苷含量 Total saponins content	-0.268	0.573	0.048	0.510	0.156	-0.442	-0.126	0.332	0.031	0.419	0.130	-0.385

$$0.260X_5 + 0.091X_6 + 0.113X_7 + 0.104X_8 - 0.234X_9 - 0.046X_{10} + 0.074X_{11} + 0.185X_{12} - 0.093X_{13} + 0.247X_{14} + 0.175X_{15} - 0.385X_{16}$$

结合各主成分分析结果进行综合评价函数的构建,即 $F=0.282F_1 + 0.186F_2 + 0.148F_3 + 0.093F_4 + 0.090F_5 + 0.083F_6$ 。对15个芦笋品种营养品质利用主成分综合得分模型计算综合得分并排序。由表7可知,12号品种的综合得分最高(9.312),表明其在综合考虑所有主成分后表现最佳;其次是13号和8号,综合得分分别为4.217和2.425;4号品种的综合得分最低(-4.815),综合品质表现最差。

2.3.2 聚类分析 由图3可知,在欧氏距离为12时,可将15个芦笋品种聚类划分为3个类群:WB-231、WB-212、H2-12、UC157、WB-211、Apollo这6个品种为第一类群,Atlas、Grande、金冠、

WB-234、WB-260、Purple Passion这6个品种为第二类群,华淼、Walker Pioneer、佳芦2号这3个品种为第三类群。

3 讨论与结论

针对15个芦笋品种进行16项营养品质指标比较分析,发现各品种鲜笋水分含量达到92.89%~95.41%,占其鲜质量的绝大部分,这与Truong等^[39]和许会会等^[40]的研究结果一致。各芦笋品种间营养品质指标差异程度不一,变异系数在7.56%~31.58%。其中,维生素C含量变异系数幅度最明显,锌(Zn)和硒(Se)的含量变异系数也较大,这与陈河龙等^[41]的研究结果较为一致。有研究表明,如果作物品种间的品质指标变异系数较大,说明该指标的筛选空间较大,可借助多样化育种手段培育高

表 7 不同品种芦笋综合得分及排名
Table 7 Comprehensive scores and rank of different asparagus varieties

品种编号 Variety No.	主成分得分 Principal component score						总得分 Total score	排序 Rank
	1	2	3	4	5	6		
1	-1.323	1.481	1.484	0.766	-1.273	-0.390	0.745	6
2	-1.466	1.804	0.877	-0.262	-0.126	-0.600	0.227	7
3	-1.652	-0.583	-1.419	-0.510	-0.852	0.574	-4.442	14
4	-3.789	-1.529	-1.602	0.331	0.941	0.833	-4.815	15
5	-2.332	-1.712	-0.415	1.846	0.982	-0.296	-1.927	11
6	2.032	-0.345	-0.901	-0.307	-0.399	-0.844	-0.764	9
7	1.120	-4.294	0.936	-0.578	-1.731	0.767	-3.780	13
8	1.045	0.971	-0.220	-2.254	1.476	1.407	2.425	3
9	0.503	0.251	1.471	-1.769	0.867	-0.092	1.231	5
10	-1.967	-0.207	3.284	-0.474	1.668	-1.034	1.270	4
11	1.630	1.055	-0.397	-0.149	-2.441	-0.059	-0.361	8
12	4.285	-0.272	1.515	2.426	0.344	1.014	9.312	1
13	-0.865	3.061	-0.774	1.010	-0.118	1.903	4.217	2
14	1.836	-0.146	-2.206	-0.546	0.463	-0.443	-1.042	10
15	0.943	0.464	-1.634	0.471	0.199	-2.740	-2.297	12

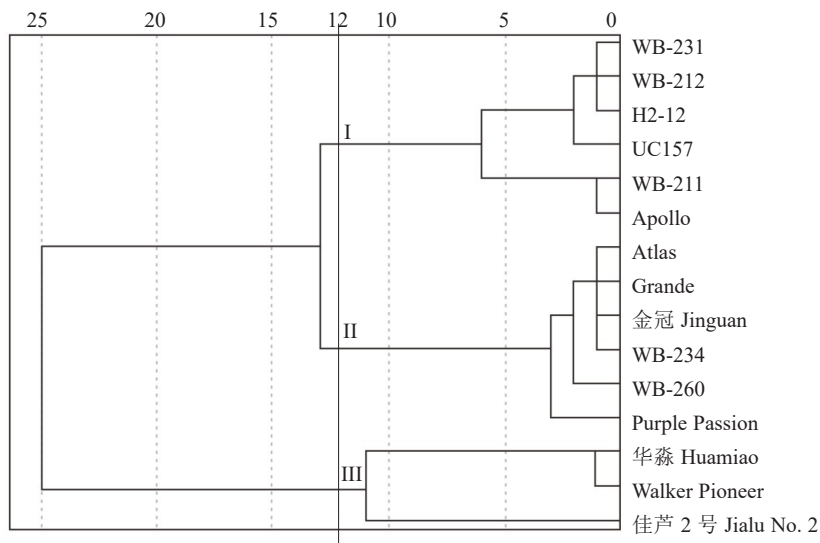


图 3 芦笋各品种聚类分析谱系
Fig. 3 Dendrogram of cluster analysis for different asparagus varieties

品质新品种^[42-43]。由于维生素 C、Zn 和 Se 含量在品种间的变异系数较大,因此可利用多种育种方法来改良芦笋品种以上的品质指标,特别是芦笋嫩茎富含硒元素,还有药用价值显著的皂苷、酚类物质、黄酮类化合物,这些为芦笋高药用成分育种研究打下坚实的理论基础。

单项或多项品质指标含量高的种质资源是改良营养品质指标的亲本材料来源^[44-45]。本研究结果表明,Fe、Mn 和蛋白质含量突出的品种是佳芦 2 号;Zn 含量高的品种是 H2-12;Se 含量高的品种是 Grande;维生素 C 含量高的品种是 WB-234;总糖和

花色苷含量突出的品种是 Purple Passion;氨基酸含量高的是 WB-211;总酚和类黄酮含量突出的是 Walker Pioneer;以上品种可作为改良品质的优良亲本材料或功能性加工品种。由于“三高”人群的日益增多,以及人们对健康饮食的重视,含有显著功能性成分的芦笋品种将会受到高度重视,需要进一步研究基因型与品质表型之间的关系,为芦笋的品种育种奠定理论基础。

经相关性分析,笔者进一步确定了芦笋内部多种营养成分间存在显著的关联性,除了纤维素与其他品质指标不存在显著相关性外,其他 15 个指标

均至少与1个指标存在显著或极显著相关性。其中, Ca、Fe、Mn、Mg、Zn 元素含量之间至少有1对存在显著或极显著正相关, 这表明这些矿物质元素在植物体内的吸收和代谢过程可能存在较为密切的协同作用。总酚和类黄酮含量存在极显著的正相关关系, 这与 Gao 等^[46]的研究结果一致。水分与 Se 含量存在显著正相关, 氨基酸与总皂苷含量存在显著负相关, 与费丹等^[47]的研究结果基本相符。维生素 C 与 Mn 含量呈显著负相关, 相关互作机制可进一步探究。

费丹等^[47]采用主成分分析从16个品质指标性状中提取出2个主成分, 累计方差贡献率为87.687%。本研究将16个品质指标降维划分为6个主成分, 累计方差贡献率达88.129%, 能够较全面地代表样品原始信息。主成分综合得分结果显示, 得分排名前三的芦笋品种分别为佳芦2号(12号)、Walker Pioneer(13号)、华淼(8号), 说明这3个芦笋品种的综合营养品质要优于其他品种。

Gao 等^[46]通过聚类分析将30个芦笋品种分为三大类, 本研究可将15个芦笋品种划分为3个类群, 其中 WB-231、WB-212、H2-12、UC157、WB-211、Apollo 这6个品种为第一类群, Atlas、Grande、金冠、WB-234、WB-260、Purple Passion 为第二类群, 其余归类为第三类群, 包含佳芦2号、Walker Pioneer 以及华淼。在主成分分析中, 众多芦笋品种排名相近个体在聚类分析结果中被归并为一组, 这说明主成分分析和聚类分析方法联用可较全面评估芦笋品种营养品质。

笔者综合应用主成分分析和聚类分析建立了芦笋品质指标的优选模型, 运用降维策略使评价体系精简、高效、客观, 从而为芦笋综合品质评估开辟出一条新的技术路径, 可为芦笋品种的遗传改良和高营养、高药用价值芦笋品种的选育提供科学参考。

参考文献

- [1] 李丹, 孙芳, 刘晓霞, 等. 特色蔬菜芦笋产业发展现状与趋势研究[J]. 安徽农业科学, 2024, 52(11): 225-228.
- [2] 贺超兴. 中国芦笋产业发展现状与前景展望[J]. 蔬菜, 2022(5): 33-39.
- [3] 汪李平. 长江流域塑料大棚芦笋栽培技术(下)[J]. 长江蔬菜, 2021(4): 19-23.
- [4] 毛丽萍, 罗超, 赵婧. 山西省高产抗病芦笋新品种筛选[J]. 河北农业科学, 2025, 29(3): 57-63.
- [5] 庄红梅, 赵家芬, 刘长, 等. 不同品种芦笋营养品质比较[J]. 农村科技, 2023(5): 41-43.
- [6] 叶友菊, 文爽爽, 林琳, 等. 国内外芦笋育种研究进展[J]. 农业科技通讯, 2023(11): 157-160.
- [7] 刘奇顺, 瞿华香, 余格辉, 等. 芦笋种质资源与育种技术研究进展[J]. 中国农学通报, 2021, 37(1): 55-60.
- [8] 张冰冰, 叶艳英, 洪霖, 等. 芦笋对烟粉虱的抗性品种筛选及抗性机制研究[J]. 植物保护, 2024, 50(1): 183-194.
- [9] 张冰冰, 叶艳英, 尹玉玲, 等. 43份芦笋种质资源遗传多样性评价[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(13): 39-46.
- [10] 王培, 漆慧娟, 张旭娟, 等. 芦笋种质资源农艺性状分析[J]. 长江蔬菜, 2015(10): 7-9.
- [11] 冯伟民, 卢显宇, 管安琴, 等. 江苏地区大棚芦笋栽培品种初步比较[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(8): 141-143.
- [12] FUENTES-ALVENTOSA J M, JARAMILLO-CARMONA S, RODRIGUEZ-GUTIERREZ G, et al. Effect of the extraction method on phytochemical composition and antioxidant activity of high dietary fibre powders obtained from asparagus by-products[J]. Food Chemistry, 2009, 116(2): 484-490.
- [13] 幸胜平, 肖华志, 冯健雄, 等. 浅论我国芦笋加工利用现状及发展趋势[J]. 江西农业学报, 2008, 20(12): 89-92.
- [14] 孙春艳, 赵伯涛, 郁志芳, 等. 芦笋的化学成分及药理作用研究进展[J]. 中国野生植物资源, 2004, 23(5): 1-5.
- [15] ROMANI A, CASCIANO F, STEVANIN C, et al. Anticancer activity of aqueous extracts from *Asparagus officinalis* L. by product on breast cancer cells[J]. Molecules, 2021, 26(21): 6369.
- [16] XU G X, KONG W M, FANG Z W, et al. *Asparagus officinalis* exhibits anti-tumorigenic and anti-metastatic effects in ovarian cancer[J]. Frontiers in Oncology, 2021, 11: 688461.
- [17] 窦传浩, 张秋红, 张会敏. 芦笋活性成分、药理作用研究进展及质量标志物的预测[J]. 世界中医药, 2024, 19(20): 3181-3190.
- [18] JIMÉNEZ-SÁNCHEZ C, PEDREGOSA F, BORRÁS-LINARES I, et al. Identification of bioactive compounds of *Asparagus officinalis* L.: Permutation test allows differentiation among "Triguero" and hybrid green varieties[J]. Molecules, 2021, 26(6): 1640.
- [19] 王楠艺, 付文婷, 周鹏, 等. 基于主成分分析的30个辣椒品种果实品质综合评价[J]. 中国瓜菜, 2024, 37(4): 46-55.
- [20] 李俊芳, 马永昆, 张荣, 等. 不同果桑品种成熟桑椹的游离氨基酸主成分分析和综合评价[J]. 食品科学, 2016, 37(14): 132-137.
- [21] GAO B Y, LU Y J, SHENG Y, et al. Differentiating organic and conventional sage by chromatographic and mass spectrometry flow injection fingerprints combined with principal component analysis[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2013, 61(12): 2957-2963.
- [22] 田艳花, 张立伟, 田叶, 等. 11种红枣氨基酸组成及主成分分析[J]. 分子植物育种, 2018, 16(4): 1300-1306.
- [23] 王建芳, 高山, 牟德华. 基于主成分分析和聚类分析的不同品种燕麦品质评价[J]. 食品工业科技, 2020, 41(13): 85-91.
- [24] 史卫东, 罗海玲, 康红卫, 等. 基于主成分分析与聚类分析的菜心品种评价[J]. 安徽农业科学, 2020, 48(24): 46-49.
- [25] 武琳霞, 李玲, 张国光, 等. 基于主成分及聚类分析的不同产地冬枣品质特性分析[J]. 食品科学, 2022, 43(8): 334-338.

- [26] 王丹,梁锦,黄天姿,等.基于主成分和聚类分析的不同品种猕猴桃鲜食品质评价[J].食品工业科技,2021,42(7):1-8.
- [27] 刘佳梦,林丽静,刘义军,等.基于主成分分析的不同品种龙眼干品质综合评价[J].保鲜与加工,2021,21(5):127-133.
- [28] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会.食品安全国家标准 食品中水分的测定:GB/T 5009.3-2016[S].北京:中国标准出版社,2016.
- [29] WALKER J M. The Bicinchoninic acid (BCA) assay for protein quantitation[J]. Methods in Molecular Biology, 1994, 32: 5-8.
- [30] 陈超,唐洁,姜涛,等.不同类型玉米氨基酸组成及含量的比较分析[J].粮食储藏,2020,49(4):38-41.
- [31] SOEST V. Use of detergents in the analysis of fibrous feeds. II. A rapid method for the determination of fiber and lignin[J]. Journal of AOAC International, 1963, 46: 829-835.
- [32] 刘冬英,方少瑛,王林静.果蔬中维生素C含量的测定方法探讨[J].食品工业科技,2004(3):134-135.
- [33] 王艺菲,辛秀兰,陈亮,等.pH示差法测定不同种类蓝果忍冬总花色苷含量[J].食品研究与开发,2014,35(7):75-78.
- [34] 杨柳,王海树,李文强,等.互花米草茎叶矿质元素提取潜力分析[J].当代化工研究,2023(3):49-51.
- [35] 王俊刚,张树珍,杨本鹏,等.3,5-二硝基水杨酸(DNS)法测定甘蔗茎节总糖和还原糖含量[J].甘蔗糖业,2008(5):45-49.
- [36] 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.
- [37] 韩志萍,曹艳萍.甜荞麦不同部位总黄酮含量测定[J].食品研究与开发,2005(3):147-149.
- [38] YOO K M, LEE C H, LEE H, et al. Relative antioxidant and cytoprotective activities of common herbs[J]. Food Chemistry, 2008, 106(3):929-936.
- [39] TRUONG T Q, NGUYEN T T, CHO J, et al. Effect of processing treatments on the phytochemical composition of asparagus (*Asparagus officinalis* L.) juice[J]. LWT Food Science and Technology, 2022, 169:113948.
- [40] 许会会,陈光,王春夏,等.不同品种绿芦笋品质比较试验[J].现代农业科技,2019(6):46-47.
- [41] 陈河龙,马振川,杨克军,等.芦笋种质资源营养品质分析及评价[J].热带作物学报,2018,39(6):1061-1066.
- [42] 白磊,肖继坪,郭华春.130个马铃薯品种(系)的块茎营养品质评价[J].中国食物与营养,2017,23(2):70-74.
- [43] 王晓茜,段雨琳,杨景爱,等.结球生菜营养品质品种比较[J].北京农学院学报,2017,32(1):28-32.
- [44] 杨焱,杨朴丽,徐荣,等.不同诺丽种质外观性状与营养成分的分析及评价[J].热带作物学报,2017,38(1):53-58.
- [45] 庄红梅,王浩,贝丽克孜·阿西木,等.干旱区芨芨种质资源营养品质特性评价[J].新疆农业科学,2017,54(7):1269-1277.
- [46] GAO R, LI G H, LIU P X, et al. The quality evaluation of 30 *Asparagus officinalis* L. varieties[J]. Food Science and Nutrition, 2024, 12(4):2908-2916.
- [47] 费丹,谢敏,徐俊,等.基于主成分分析和隶属函数法对不同品种芦笋品质的综合评价[J].江西农业学报,2024,36(4):33-39.