

# 基于主成分及聚类分析的不同产地芦笋 品质综合评价

谭艳<sup>1</sup>, 王国庆<sup>2</sup>, 陈赣<sup>2</sup>, 吴锦铸<sup>1</sup>, 周爱梅<sup>1\*</sup>

(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. 吉安井冈山农业生物科技有限公司, 江西吉安 343016)

**摘要:** 该研究选取了不同产地(山东菏泽 S1、河南许昌 S2、云南弥勒 S3、贵州贵阳 S4 及江西吉安 S5) 芦笋对其基本营养及功能性成分进行测定, 利用相关性分析、主成分分析和聚类分析等方法, 对芦笋品质进行综合评价。结果表明: 32 项指标简化为 4 个主成分, 累积方差贡献率为 100%, 结合相关性分析, 从 32 项品质指标中筛选出 13 项核心品质指标, 即确定钾、木质素、总酚酸、锌、水仙苷、烟花苷、果胶、总皂苷、咖啡酸、可溶性蛋白、叶绿素、根皮苷和山奈酚。聚类分析结果显示五个产地芦笋可划分为 3 类, 各产地综合品质优劣排名依次为 S1、S2、S5、S4、S3, 其中排序较相近的产地被聚为一类, 表明两种分析方法得出的结果较为一致。该研究为不同产地芦笋品质评价和核心品质指标的确定提供了理论依据。

**关键词:** 芦笋; 主成分分析; 聚类分析; 品质评价

文章编号: 1673-9078(2022)07-316-326

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2022.7.1288

## Comprehensive Quality Evaluation of Asparagus from Different Production Areas by Principal Component Analysis and Cluster Analysis

TAN Yan<sup>1</sup>, WANG Guoqing<sup>2</sup>, CHEN GAN<sup>2</sup>, WU Jinzhu<sup>1</sup>, ZHOU Aimei<sup>1\*</sup>

(1.College of Food Science, South China Agricultural University, Guangdong Provincial Key Laboratory of Nutraceuticals and Functional Foods, Guangzhou 510642, China)

(2.Ji'an Jinggang Agricultural Biotechnology Co. Ltd., Ji'an 343016, China)

**Abstract:** The basic nutritional and functional components of asparagus from selected production areas were determined in this study. The locations included: Heze, Shandong (S1); Xuchang, Henan (S2); Mile, Yunnan (S3); Guiyang, Guizhou (S4); and Ji'an, Jiangxi (S5). A comprehensive evaluation was conducted for asparagus quality using correlation analysis, principal component analysis, and cluster analysis. The results showed that the 32 quality indicators were simplified into four principal components, and that the cumulative variance contribution rate was 100%. In conjunction with correlation analysis, 13 quality indicators were selected from the 32 indicators, namely potassium, lignin, total phenolic acid, zinc, narcissin, nicotiflorin, pectin, total saponins, caffeic acid, soluble protein, chlorophyll, phlorizin and kaempferol. Cluster analysis results showed that the five asparagus production areas could be divided into three categories, with overall quality ranked from best to worst as S1, S2, S5, S4, and S3. The production areas with similar rankings were placed in the same category, indicating that the results obtained by the two analysis methods were relatively consistent. This study provides a theoretical basis for the quality evaluation of asparagus from different production areas as well as the selection of core quality indicators.

**Key words:** asparagus; principal component analysis; cluster analysis; quality evaluation

引文格式:

谭艳,王国庆,陈赣,等.基于主成分及聚类分析的不同产地芦笋品质综合评价[J].现代食品科技,2022,38(7):316-326

TAN Yan, WANG Guoqing, CHEN GAN, et al. Comprehensive quality evaluation of asparagus from different production areas by principal component analysis and cluster analysis [J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(7): 316-326

收稿日期: 2021-11-16

基金项目: 吉安市科技专项 (H20278)

作者简介: 谭艳 (1996-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品科学, E-mail: 1563185332@qq.com

通讯作者: 周爱梅 (1971-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 食品化学与营养, 食品功能成分分离提取与功能食品研发, E-mail: zhouam@scau.edu.cn

芦笋别名龙须菜、石刁柏,是世界十大名菜之一。芦笋不仅质地鲜嫩,风味鲜美,还富含多种氨基酸、蛋白质、矿物质以及多糖、黄酮、多酚等多种活性物质,享有“蔬菜之王”和“第一抗癌果蔬”的美誉<sup>[1]</sup>。研究证明,芦笋提取物具有控制癌细胞生长、提高免疫力、抗疲劳、降血脂等多种功效<sup>[2-4]</sup>,因此深受消费者喜爱。近年来,我国芦笋产业发展迅猛,种植面积和产量都已位居世界第一,目前芦笋种植遍及山东、河南、江西、贵阳、云南等全国多地<sup>[5]</sup>。但由于降水、温度、气候和土壤等自然环境条件的差异,造成了不同产地芦笋间的营养品质存在差异。目前对芦笋营养成分的研究分析大多集中于不同品种或不同采收期间的差异比较<sup>[6-8]</sup>,而关于不同产地芦笋的营养品质指标的地域差异研究鲜有报道。因此,研究不同产地芦笋营养品质的差异,对芦笋的高价值开发利用具有十分重要的意义。

主成分分析是一种通过降维思想将多指标线性组合为较少的综合指标,进而实现综合评价的统计分析方法<sup>[9-11]</sup>。聚类分析是根据样品测定的多个评价指标找出一些能够度量样品或指标间相似程度的统计量,并以此为依据将相似度较高的样品聚为一类<sup>[12]</sup>。主成分分析和聚类分析评价法目前在猕猴桃<sup>[13]</sup>、冬枣<sup>[14]</sup>、龙眼<sup>[15]</sup>、菜心<sup>[16]</sup>等果蔬的品质评价方面均有应用,但未见应用于芦笋的综合品质评价,且目前关于芦笋综合品质评价的研究鲜见报道。

基于此,本文以五个不同产地(山东菏泽、河南许昌、云南弥勒、贵州贵阳、江西吉安)的芦笋样品为研究对象,测定其基本营养品质指标和功能性成分品质指标,通过相关性分析、主成分分析以及聚类分析评价五个不同产地芦笋品质的差异性,并对影响芦笋品质的特征指标进行筛选,建立评价模型,为芦笋品质评价提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

芦笋,市售,产地分别为山东省菏泽市(S1)、河南省许昌市(S2)、云南省弥勒市(S3)、贵州省贵阳市(S4)、江西省吉安市(S5)。标准对照品:芦丁、橙皮苷、柚皮苷、槲皮素、山奈酚、异鼠李素、水仙苷、烟花苷、没食子酸、绿原酸、咖啡酸、阿魏酸,上海源叶生物科技有限公司;其余试剂均为分析纯。

火焰原子吸收光谱仪 novAA350,德国耶拿分析仪器股份公司;UFLC-XR 高效液相色谱仪 LC-10A,日本岛津;多功能酶标仪 Enspire2003,美国 pE 公司。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 样品前处理

将鲜芦笋烘干后粉碎,过 80 目筛,用于果胶、纤维素、半纤维素、木质素、功能性成分含量的测定,其他基本营养成分含量采用鲜样测定。

#### 1.2.2 基本营养成分的测定

水分含量测定参照《GB 5009.3-2016 食品安全国家标准食品中水分的测定》<sup>[17]</sup>;叶绿素含量测定参照《NY/T 3082-2017 水果、蔬菜及其制品中叶绿素含量的测定分光光度法》;类胡萝卜素含量测定参照王文杰等<sup>[18]</sup>;维生素 C 含量测定采用邻菲罗啉比色法<sup>[7]</sup>;可溶性蛋白含量测定采用考马斯亮蓝 G-250 法<sup>[19]</sup>;游离氨基酸总量测定参照《GB/T 8314-2013 茶游离氨基酸总量的测定》<sup>[20]</sup>;果胶含量参照《NY/T 2016-2011 水果及其制品中果胶含量的测定分光光度法》<sup>[21]</sup>;纤维素、半纤维素、木质素测定参照 Van Soest 等<sup>[22]</sup>。

#### 1.2.3 矿物质元素的测定

称取 2 g 芦笋置于消化管中,加入 5 mL H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>,静置过夜,加入 2 mL H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>,放入微波消解仪中消化,待消化液冷却后,用蒸馏水定容至 50 mL,备用。采用火焰原子吸收光谱仪测定样品中钙、铁、钾、钠、镁、锌的含量,结果以 mg/100 g 表示。

#### 1.2.4 功能性成分的测定

##### 1.2.4.1 总多糖含量测定

将 1 g 芦笋干样以 1:20 比例加水混匀,90 °C 水浴 120 min,过滤,重复操作 3 次,将滤液合并定容到 100 mL 得到芦笋粗多糖提取液,采用苯酚-硫酸法<sup>[23]</sup>测定总多糖含量。

##### 1.2.4.2 总黄酮、总酚酸含量测定

称取 1 g 芦笋干样,加入 30 mL 甲醇,60 °C 超声 30 min,以 10000 r/min 转速离心 10 min,重复操作 2 次,将上清液合并定容到 50 mL,备用。总黄酮、总酚酸含量的测定分别采用亚硝酸钠-硝酸铝-氢氧化钠显色法<sup>[24]</sup>和 Folin-酚法<sup>[25]</sup>测定。

##### 1.2.4.3 总皂苷含量测定

将 1 g 芦笋干样以 1:35 比例加入 60%乙醇混匀,50 °C 超声 50 min,离心,取上清液定容到 50 mL,采用香草醛-高氯酸法<sup>[24]</sup>测定总皂苷含量。

##### 1.2.4.4 其他功能性组分的高效液相色谱(HPLC)分析

将 1.2.4.2 中样品提取溶液过 0.45 μm 滤膜,4 °C 保存备用。

###### (1) 酚酸类物质测定

色谱条件:色谱柱 Eclipse Plus C<sub>18</sub> (250×4.6 mm, 5 μm, Agilent); 1%乙酸水溶液(A),甲醇(B);洗

脱条件: 0~10 min, 5% (B); 10~42 min, 5%~40% (B); 42~50 min, 40%~65% (B); 50~60 min, 65% (B); 60~70 min, 65%~5% (B); 进样量: 10  $\mu$ L; 流速: 1 mL/min; 柱温: 30  $^{\circ}$ C; 检测波长: 320 nm。检测结束后绘制标准曲线, 计算干样中各单体酚的质量分数 ( $\mu$ g/g)。

### (2) 黄酮类物质测定

色谱条件: 色谱柱 Eclipse Plus C<sub>18</sub> (250 $\times$ 4.6 mm, 5  $\mu$ m, Agilent); 1%乙酸水溶液 (A), 甲醇 (B); 洗脱条件: 0~15 min, 5% (B); 15~55 min, 5%~50% (B); 55~75 min, 50%~70% (B); 75~80 min, 70%~80% (B); 80~85 min, 80% (B); 85~95 min, 80%~5% (B); 进样量: 10  $\mu$ L; 流速: 1 mL/min; 柱温: 30  $^{\circ}$ C; 检测波长: 280 nm。检测结束后绘制标准曲线, 计算干样中各单体黄酮的质量分数 ( $\mu$ g/g)。

## 1.3 数据处理

采用 Origin 2019 进行作图分析, SPSS 26.0、TB tools 软件对数据进行相关性分析、主成分分析和聚类分析, 结果采用平均值 $\pm$ 标准差形式表示, 所有实验均进行三次重复, 显著性水平为  $p < 0.05$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同产地芦笋品质分析

#### 2.1.1 不同产地芦笋基本营养成分品质分析

五个产地芦笋的基本营养成分含量如表 1 所示。由表 1 可知, 鲜笋水分达到 92.98%~95.40%, 占其含量的绝大部分, 这与许会会等人<sup>[6]</sup>研究结果一致, 其中 S1 和 S2 的水分含量明显低于其他三个产区 ( $p < 0.05$ ), 这可能是产区位置均偏北方, 降水量较少所致。

五个产地芦笋样品中的叶绿素和类胡萝卜素含量间的变异系数相对较大, 分别为 17.66%和 17.88%, 说明不同产地间芦笋样品中叶绿素和类胡萝卜素含量差异较大, 其中以 S3 中的叶绿素和类胡萝卜素含量最高。各产地芦笋中 Vc 含量变异系数为 8.27%, 差异较小, 其中 S2 中的 Vc 含量最高, 而 S1 中含量最低。S2 中的可溶性蛋白含量最高, 而游离总氨基酸含量以 S2 和 S1 中最高, 显著高于其他产地 ( $p < 0.05$ )。

由表 1 可知, S3 中果胶含量最高, 其次为 S5, 而 S1 中含量最低。纤维素含量在各产地芦笋中无显著性差异 ( $p > 0.05$ ), 含量为 11%~15%, 半纤维素含量以 S4 中最高, 显著高于其他各产地 ( $p < 0.05$ ), 而木质素含量最高的为 S2。

表 1 不同产地芦笋基本营养成分分析

Table 1 The basic nutrient content of asparagus from different producing areas

营养成分指标	S1	S2	S3	S4	S5	平均值	变异系数/%
水分/%	93.76 $\pm$ 0.14 <sup>b</sup>	92.98 $\pm$ 0.72 <sup>c</sup>	94.93 $\pm$ 0.11 <sup>a</sup>	95.40 $\pm$ 0.20 <sup>a</sup>	94.75 $\pm$ 0.14 <sup>a</sup>	94.36	1.04
叶绿素/(mg/100 g)	6.07 $\pm$ 0.24 <sup>c</sup>	8.05 $\pm$ 1.13 <sup>ab</sup>	8.35 $\pm$ 0.11 <sup>a</sup>	5.53 $\pm$ 1.09 <sup>c</sup>	6.72 $\pm$ 0.74 <sup>bc</sup>	6.94	17.66
类胡萝卜素/(mg/100 g)	0.78 $\pm$ 0.01 <sup>ab</sup>	0.83 $\pm$ 0.07 <sup>ab</sup>	0.90 $\pm$ 0.10 <sup>a</sup>	0.70 $\pm$ 0.07 <sup>bc</sup>	0.55 $\pm$ 0.09 <sup>c</sup>	0.75	17.88
Vc/(mg/100 g)	10.56 $\pm$ 0.91 <sup>b</sup>	13.33 $\pm$ 1.10 <sup>a</sup>	11.86 $\pm$ 1.08 <sup>ab</sup>	11.80 $\pm$ 1.49 <sup>ab</sup>	11.82 $\pm$ 1.25 <sup>ab</sup>	11.87	8.27
可溶性蛋白/(mg/g)	4.29 $\pm$ 0.64 <sup>b</sup>	5.21 $\pm$ 0.48 <sup>a</sup>	4.28 $\pm$ 0.23 <sup>b</sup>	2.97 $\pm$ 0.09 <sup>c</sup>	3.55 $\pm$ 0.11 <sup>bc</sup>	4.06	20.87
游离总氨基酸/(mg/g)	5.57 $\pm$ 0.21 <sup>a</sup>	5.64 $\pm$ 0.13 <sup>a</sup>	4.10 $\pm$ 0.42 <sup>c</sup>	3.89 $\pm$ 0.30 <sup>c</sup>	4.79 $\pm$ 0.33 <sup>b</sup>	4.80	16.86
Zn/(mg/100 g)	0.91 $\pm$ 0.16 <sup>a</sup>	0.64 $\pm$ 0.15 <sup>b</sup>	0.64 $\pm$ 0.03 <sup>b</sup>	0.73 $\pm$ 0.07 <sup>b</sup>	0.89 $\pm$ 0.09 <sup>ab</sup>	0.76	17.25
Fe/(mg/100 g)	0.68 $\pm$ 0.06 <sup>a</sup>	0.78 $\pm$ 0.04 <sup>a</sup>	0.43 $\pm$ 0.10 <sup>b</sup>	0.73 $\pm$ 0.06 <sup>a</sup>	0.70 $\pm$ 0.08 <sup>a</sup>	0.66	20.50
Ca/(mg/100 g)	5.28 $\pm$ 0.03 <sup>c</sup>	8.42 $\pm$ 0.03 <sup>a</sup>	3.04 $\pm$ 1.03 <sup>e</sup>	7.52 $\pm$ 0.03 <sup>b</sup>	4.47 $\pm$ 0.03 <sup>d</sup>	5.75	38.39
Mg/(mg/100 g)	0.53 $\pm$ 0.10 <sup>a</sup>	0.55 $\pm$ 0.03 <sup>a</sup>	0.45 $\pm$ 0.10 <sup>a</sup>	0.50 $\pm$ 0.06 <sup>a</sup>	0.47 $\pm$ 0.08 <sup>a</sup>	0.50	8.25
Na/(mg/100 g)	4.58 $\pm$ 0.03 <sup>c</sup>	5.44 $\pm$ 0.03 <sup>d</sup>	7.13 $\pm$ 1.03 <sup>c</sup>	7.52 $\pm$ 0.03 <sup>b</sup>	9.22 $\pm$ 0.03 <sup>a</sup>	6.78	26.86
K/(mg/100 g)	194.33 $\pm$ 0.05 <sup>b</sup>	231.42 $\pm$ 0.03 <sup>a</sup>	120.28 $\pm$ 0.13 <sup>e</sup>	153.49 $\pm$ 0.07 <sup>c</sup>	134.06 $\pm$ 0.04 <sup>d</sup>	166.72	27.40
果胶/%	2.55 $\pm$ 0.62 <sup>c</sup>	3.71 $\pm$ 0.06 <sup>ab</sup>	4.12 $\pm$ 0.14 <sup>a</sup>	3.02 $\pm$ 0.33 <sup>bc</sup>	3.59 $\pm$ 0.29 <sup>ab</sup>	3.40	18.13
纤维素/%	13.17 $\pm$ 3.83 <sup>a</sup>	11.32 $\pm$ 0.78 <sup>a</sup>	12.14 $\pm$ 3.63 <sup>a</sup>	15.38 $\pm$ 3.18 <sup>a</sup>	11.93 $\pm$ 4.52 <sup>a</sup>	6.20	41.10
半纤维素/%	5.73 $\pm$ 0.97 <sup>b</sup>	7.12 $\pm$ 1.01 <sup>b</sup>	6.67 $\pm$ 2.41 <sup>b</sup>	9.23 $\pm$ 0.10 <sup>a</sup>	2.26 $\pm$ 1.52 <sup>c</sup>	12.79	12.47
木质素/%	4.68 $\pm$ 0.95 <sup>ab</sup>	7.26 $\pm$ 2.95 <sup>a</sup>	4.75 $\pm$ 0.19 <sup>ab</sup>	6.81 $\pm$ 1.08 <sup>ab</sup>	3.89 $\pm$ 0.38 <sup>b</sup>	5.48	26.83

注: 各数据为平均值 $\pm$ SD, 不同字母代表存在显著性差异 ( $p < 0.05$ ), 表中 S1-S5 分别代表山东菏泽芦笋、河南许昌芦笋、云南弥勒芦笋、贵州贵阳芦笋和江西吉安芦笋, 下同。

同时,从表1中可以看到,各产地芦笋中K含量平均值为166.72 mg/100 g,远高于一般蔬菜,是所有矿物质元素中含量最高的,这与关静云等<sup>[26]</sup>的研究结果一致,其中以S2中含量最高( $p<0.05$ ),S3最低。Na和Ca是除K元素之外含量最高的两种元素,各产地芦笋中Na和Ca含量均存在显著性差异( $p<0.05$ ),其中S5中的Na含量最高,而S2中Ca含量最高。Zn、Fe、Mg含量相对较低,其中S1中Zn含量最高,S5中Fe含量显著低于其他四个产地( $p<0.05$ ),而Mg含量在各产地中无显著性差异( $p>0.05$ )。

### 2.1.2 不同产地芦笋总多糖、总酚、总黄酮和总皂苷分析

黄酮类化合物和酚酸类化合物具有抗氧化、抗菌、抗炎、抗病毒、抗糖尿病、抗心血管疾病等诸多功效,是近年来国内外研究热点。由图1可见,不同产地芦笋样品中总黄酮含量差异不大( $p>0.05$ ),含量平均为5.67 mg/g,与张旭娟等<sup>[27]</sup>研究结果一致。而总酚酸含量差异较大,其中S3和S5中的总酚酸含量最高,分别为6.69、6.49 mg/g,显著高于其他三个产地的芦笋( $p<0.05$ ),并以S2中含量最低,只有4.26 mg/g。

植物多糖是天然多糖的重要来源,不仅是参与植物生命活动的重要物质,还具有免疫调节、抗肿瘤、降血糖、降血脂等多种生理功能。S1中的总多糖含量为7.50%,显著高于S2、S3和S4( $p<0.05$ ),也略高于S5(6.36%),而S2中含量最低,仅为3.56%。

皂苷是以皂苷元为主体与不同的糖或有机酸连接而成的一种糖苷,皂苷元按照其结构可分为甾体类皂苷元和三萜类皂苷元,芦笋中主要富含的为甾体类皂苷物质,研究证明芦笋皂苷具有很好的抗氧化、抗肿瘤、抑制癌细胞生长等功能活性。四个产地芦笋中的总皂苷含量与田颖刚等<sup>[28]</sup>报道一致,分布在21~43 mg/g之间,且不同产地之间差异显著,其中含量相对较高的为S3,为43.56 mg/g,显著高于S1、S2和S5( $p<0.05$ ),而S2中含量最低,为21.52 mg/g。

综上所述,S3和S5中的四种活性成分含量相对较高,而S2相对较低。

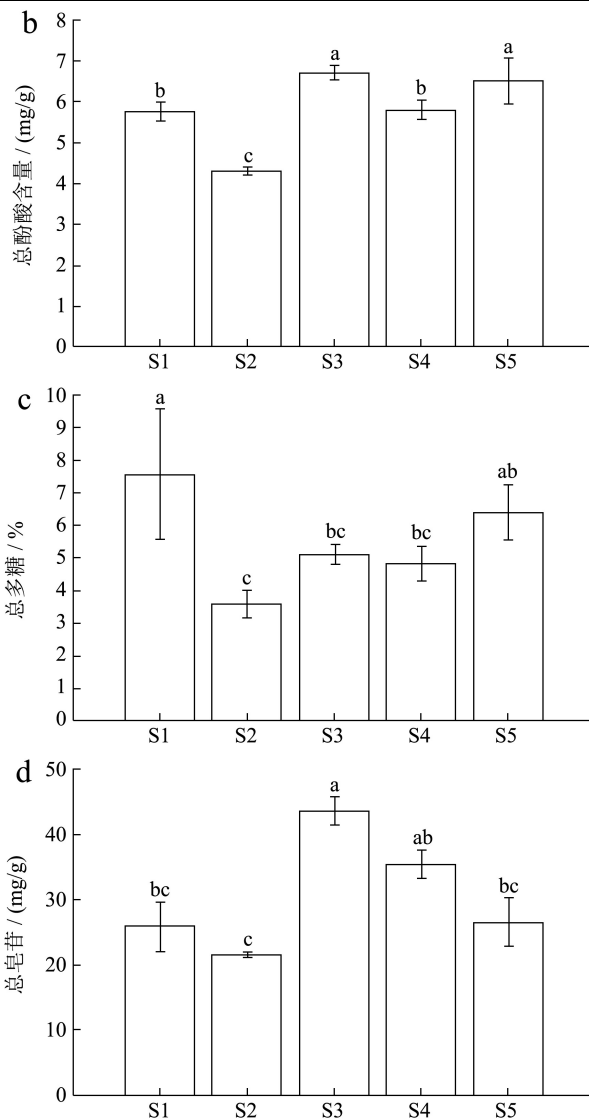
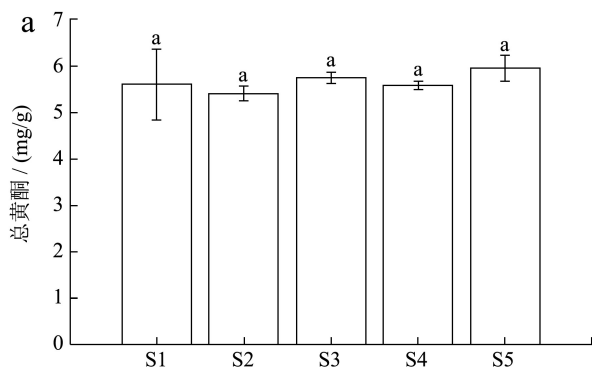


图1 不同产地芦笋总黄酮(a)、总酚酸(b)、总多糖(c)及总皂苷含量(d)

Fig.1 The content of total flavonoids (a), total polyphenols (b), total polysaccharides (c), and total saponins (d) of asparagus from different producing areas

注:不同字母代表存在显著性差异( $p<0.05$ )。

### 2.1.3 不同产地芦笋功能性成分分析

芦笋中已发现的黄酮类及酚酸类化合物主要包括芦丁、槲皮素、山奈酚、香草酸、绿原酸、咖啡酸等<sup>[29-31]</sup>。从表2可以看到,五个产地芦笋中共检测到15种黄酮类和酚酸类成分,其中共有成分为12种,分别是柚皮苷、橙皮苷、芦丁、根皮苷、烟花苷、水仙苷、山奈酚、没食子酸、香草酸、绿原酸、咖啡酸和香豆酸。12种共有成分中,烟花苷在五个产地芦笋中含量差异最小,变异系数仅为2.44%,而香豆酸、橙皮苷、芦丁、山奈酚和水仙苷含量差异较大,变异系数分别为86.22%、70.13%、60.30%、57.47%和54.28%。其中S1中的柚皮苷、橙皮苷、水仙苷和没食子酸含量

显著高于其他产地芦笋 ( $p<0.05$ ), S2 中的香豆酸含量最高 ( $p<0.05$ ), S3 中的香草酸和绿原酸含量最高 ( $p<0.05$ ), S4 中的根皮苷含量最高, 而 S5 中的芦丁含量最高 ( $p<0.05$ )。除此之外, 还可以看到, S1 和 S3 中的山奈酚含量相对较高 ( $p<0.05$ ), S2 和 S3 中的烟花苷含量相对较高 ( $p<0.05$ ), 而 S2 和 S5 中的咖啡酸含量较高。由此可见不同产地芦笋中的各黄酮及酚酸类化合物含量各有高低, 而不同的黄酮及酚酸类化合物具有不同的功效活性, 橙皮苷和柚皮苷是柑橘属水果中常见的天然黄酮类化合物, 具有抗炎和抗菌等生物活性, 芦丁对高脂高糖造成的脑损伤具有良好的疗效作用<sup>[32]</sup>, 根皮苷在治疗糖尿病和抗肥胖等方面具有广泛的活性, 烟花苷具有良好的神经保护作用, 山奈酚和咖啡酸具有良好的抗癌作用, 没食子酸和绿原酸分别具有抗肿瘤<sup>[33]</sup>和心血管保护<sup>[34]</sup>等作用, 而香豆酸和香草酸具有抗血小板聚集及神经保护作用等药理作用。因此可以参考不同产地芦笋中各活性成分含量的高低用以研究和开发相对应的活性功能及产品。

综上所述, 各产地芦笋在不同品质指标上各有优劣, 很难通过某个单一的品质指标判别其品质, 因此需要对各个产地芦笋的品质指标进一步分析, 进行综合评价。

## 2.2 相关性分析

由相关性分析结果 (表 3) 可知, 各产地芦笋的 32 个共有品质指标间共有 496 个相关系数, 各项品质指标之间存在不同程度的相关性, 其中在  $p<0.05$  水平上存在显著相关性的有 23 个, 在  $p<0.01$  水平上存在极显著相关性的有 2 个。其中山奈酚和柚皮苷、纤维素和根皮苷、木质素和 Ca、水仙苷和游离总氨基酸、香豆酸和烟花苷、总酚酸和总黄酮均呈显著正相关 ( $p<0.05$ ); Fe 和绿原酸、纤维素和咖啡酸、木质素和总黄酮、水仙苷和总皂苷、香豆酸和芦丁、Zn 和烟花苷均呈显著负相关 ( $p<0.05$ ); 水分含量和可溶性蛋白、游离总氨基酸、K 均呈显著负相关 ( $p<0.05$ ); 总多糖和 Vc、烟花苷、香豆酸均呈显著负相关 ( $p<0.05$ ); Zn 与总多糖、芦丁均呈显著正相关 ( $p<0.05$ ); 总酚酸和 K、Ca、Mg 均呈显著负相关 ( $p<0.05$ ); K 和 Mg 呈极显著正相关 ( $p<0.01$ ); Zn 和香豆酸呈极显著负相关 ( $p<0.01$ )。综上所述, 芦笋各品质指标间均存在不同程度的相关性, 表明各指标间对原始数据反映的信息存在重叠。因此进一步采用主成分分析和聚类分析对 32 项品质指标简化, 提高芦笋品质综合评价的分析效率。

表 2 不同产地芦笋功能性成分分析

Table 2 Analysis of functional components of asparagus from different producing areas ( $\mu\text{g/g}$ )

营养成分指标	S1	S2	S3	S4	S5	平均值	变异系数/%
柚皮苷	205.01±4.04 <sup>a</sup>	108.85±1.42 <sup>c</sup>	158.08±2.23 <sup>b</sup>	81.91±5.51 <sup>d</sup>	74.03±3.06 <sup>d</sup>	125.58	43.99
橙皮苷	423.48±6.97 <sup>a</sup>	249.64±7.14 <sup>b</sup>	179.84±10.22 <sup>c</sup>	30.72±3.38 <sup>e</sup>	148.74±2.19 <sup>d</sup>	206.48	70.13
芦丁	256.47±5.89 <sup>b</sup>	70.87±4.86 <sup>d</sup>	76.60±2.13 <sup>d</sup>	197.46±11.11 <sup>c</sup>	326.64±3.84 <sup>a</sup>	185.61	60.30
根皮苷	103.38±5.98 <sup>a</sup>	76.04±2.26 <sup>b</sup>	81.78±1.52 <sup>b</sup>	108.73±1.04 <sup>a</sup>	69.19±0.79 <sup>b</sup>	87.82	19.74
烟花苷	4560.63±10.69 <sup>c</sup>	4835.46±7.35 <sup>a</sup>	4825.1±5.19 <sup>a</sup>	4718.92±82.58 <sup>b</sup>	4663.62±27.47 <sup>b</sup>	4720.74	2.44
水仙苷	5441.17±31.68 <sup>a</sup>	4689.9±37.58 <sup>b</sup>	768.08±24.24 <sup>e</sup>	2434.88±59.60 <sup>d</sup>	3806.51±5.57 <sup>c</sup>	3428.11	54.28
槲皮素	20.31±0.49 <sup>a</sup>	21.08±0.23 <sup>a</sup>	-	18.07±1.11 <sup>b</sup>	18.03±0.08 <sup>b</sup>	19.37	8.06
山奈酚	71.28±0.20 <sup>a</sup>	28.58±0.34 <sup>b</sup>	65.66±5.37 <sup>a</sup>	30.72±3.36 <sup>b</sup>	16.25±2.39 <sup>c</sup>	42.50	57.47
异鼠李素	27.28±0.81 <sup>b</sup>	19.54±0.45 <sup>c</sup>	-	46.01±2.01 <sup>a</sup>	-	30.94	43.99
没食子酸	6617.23±202.60 <sup>a</sup>	3130.22±91.80 <sup>d</sup>	3968.52±79.81 <sup>c</sup>	1734.66±167.72 <sup>c</sup>	4851.38±64.68 <sup>b</sup>	4060.47	45.16
香草酸	6949.4±26.63 <sup>b</sup>	7120.06±109.43 <sup>b</sup>	13403.75±504.28 <sup>a</sup>	5943.61±90.90 <sup>c</sup>	4124.95±128.08 <sup>d</sup>	7519.35	46.67
绿原酸	815.77±41.48 <sup>c</sup>	818.72±9.35 <sup>c</sup>	1879.22±163.94 <sup>a</sup>	582.86±146.3 <sup>c</sup>	1133.01±122.34 <sup>b</sup>	1045.97	48.30
咖啡酸	33.2±0.36 <sup>bc</sup>	34.77±2.30 <sup>ab</sup>	29.02±2.30 <sup>c</sup>	11.5±1.61 <sup>d</sup>	37.91±0.11 <sup>a</sup>	29.28	35.66
香豆酸	3.92±1.87 <sup>c</sup>	68.25±0.99 <sup>a</sup>	50.98±2.79 <sup>b</sup>	48.2±2.02 <sup>b</sup>	2.14±1.00 <sup>c</sup>	34.70	86.22
阿魏酸	29.56±1.47 <sup>a</sup>	-	10.95±3.3 <sup>b</sup>	-	-	20.25	64.98

注: 各数据为平均值±SD, “-”表示未检测到; 不同字母代表存在显著性差异 ( $p<0.05$ )。

表 3 不同产地芦笋品质指标相关性分析

Table 3 Correlation analysis of quality indexes for asparagus from different producing areas

	水分含量	叶绿素含量	类胡萝卜素	维生素C	可溶性蛋白	游离总氨基酸	Zn	Fe	Ca	Mg	Na	K	果胶	半纤维素	纤维素	木质素	总多糖	总黄酮	总酚酸	总皂苷	柚皮苷	橙皮苷	芦丁	根皮苷	烟花苷	水仙苷	山奈酚	没食子酸	香草酸	绿原酸	咖啡酸	香豆酸	
水分含量	1.000	-0.367	-0.329	-0.346	-0.885*	-0.939*	0.052	-0.414	-0.418	-0.789	0.715	-0.889*	0.071	0.090	0.607	-0.284	0.144	0.585	0.782	0.751	-0.331	-0.724	0.277	0.265	-0.060	-0.735	-0.077	-0.340	0.091	0.242	-0.617	-0.147	
叶绿素含量		1.000	0.590	0.593	0.730	0.141	-0.650	-0.473	-0.246	-0.171	-0.074	0.036	0.858	-0.105	-0.811	0.016	-0.489	-0.077	-0.106	0.156	0.115	0.116	-0.711	-0.712	0.760	-0.305	0.121	-0.031	0.660	0.709	0.498	0.512	
类胡萝卜素			1.000	0.169	0.633	0.075	-0.674	-0.490	-0.033	0.153	-0.660	0.254	0.267	0.559	-0.188	0.330	-0.356	-0.559	-0.250	0.355	0.620	0.338	-0.868	0.139	0.510	-0.264	0.690	-0.057	0.846	0.389	-0.057	0.624	
维生素C				1.000	0.444	0.091	-0.727	0.270	0.517	0.220	0.105	0.342	0.652	0.194	-0.443	0.631	-0.916*	-0.426	-0.583	-0.212	-0.568	-0.362	-0.608	-0.559	0.839	-0.098	-0.585	-0.634	0.032	-0.005	0.090	0.765	
可溶性蛋白					1.000	0.724	-0.367	-0.010	0.146	0.492	-0.652	0.656	0.305	-0.028	-0.764	0.214	-0.297	-0.504	-0.591	-0.386	0.428	0.641	-0.592	-0.419	0.383	0.352	0.265	0.264	0.352	0.192	0.626	0.365	
游离总氨基酸						1.000	0.293	0.484	0.305	0.753	-0.639	0.815	-0.278	-0.320	-0.550	0.041	0.168	-0.372	-0.634	-0.857	0.361	0.816	0.062	-0.224	-0.263	0.892*	0.066	0.570	-0.301	-0.325	0.708	-0.195	
Zn							1.000	0.269	-0.246	0.028	0.088	-0.079	-0.664	-0.627	0.145	-0.638	0.897*	0.503	0.312	-0.399	0.159	0.372	0.943*	0.156	-0.954*	0.561	0.012	0.705	-0.621	-0.309	0.294	-0.969**	
Fe								1.000	0.838	0.753	-0.137	0.674	-0.490	0.034	0.147	0.494	-0.143	-0.429	-0.703	-0.835	-0.433	0.013	0.315	0.106	-0.253	0.739	-0.624	-0.167	-0.867	-0.918*	-0.018	-0.042	
Ca									1.000	0.806	-0.330	0.754	-0.302	0.525	0.238	0.887*	-0.556	-0.799	-0.881*	-0.562	-0.372	-0.119	-0.206	0.251	0.166	0.450	-0.467	-0.527	-0.487	-0.827	-0.315	0.475	
Mg										1.000	-0.745	0.978**	-0.509	0.301	-0.014	0.616	-0.174	-0.816	-0.918*	-0.769	0.161	0.491	-0.130	0.258	-0.136	0.799	-0.050	0.039	-0.394	-0.751	0.085	0.186	
Na											1.000	-0.761	0.421	-0.399	0.062	-0.353	-0.033	0.745	0.606	0.315	-0.743	-0.773	0.384	-0.400	0.113	-0.506	-0.615	-0.314	-0.221	0.264	-0.107	-0.188	
K												1.000	-0.338	0.243	-0.208	0.601	-0.256	-0.821	-0.948*	-0.772	0.185	0.538	-0.253	0.088	0.002	0.769	-0.038	0.061	-0.283	-0.612	0.225	0.265	
果胶													1.000	-0.140	-0.609	-0.028	-0.577	0.205	0.159	0.367	-0.312	-0.377	-0.551	-0.766	0.835	-0.608	-0.210	-0.330	0.528	0.737	0.256	0.502	
半纤维素														1.000	0.578	0.798	-0.548	-0.742	-0.387	0.337	0.059	-0.257	-0.622	0.655	0.383	-0.292	0.210	-0.658	0.318	-0.282	-0.796	0.728	
纤维素															1.000	0.252	0.133	-0.109	0.161	0.331	-0.100	-0.400	0.246	.880*	-0.345	-0.190	0.054	-0.371	-0.207	-0.487	-0.899*	-0.045	
木质素																1.000	-0.796	-0.886*	-0.795	-0.177	-0.287	-0.258	-0.593	0.279	0.509	0.060	-0.269	-0.740	-0.056	-0.533	-0.497	0.809	
总多糖																	1.000	0.564	0.535	-0.069	0.495	0.497	0.767	0.243	-0.907*	0.324	0.415	0.836	-0.215	0.019	0.274	-0.942*	
总黄酮																		1.000	.883*	0.307	-0.154	-0.209	0.618	-0.358	-0.323	-0.309	-0.094	0.364	-0.064	0.503	0.265	-0.673	
总酚酸																			1.000	0.680	0.067	-0.257	0.400	-0.029	-0.251	-0.588	0.236	0.249	0.265	0.614	-0.063	-0.504	
总皂苷																				1.000	0.111	-0.454	-0.314	0.212	0.318	-0.937*	0.403	-0.294	0.723	0.643	-0.513	0.235	
柚皮苷																					1.000	0.822	-0.153	0.335	-0.323	0.185	0.952*	0.680	0.511	0.254	0.235	-0.210	
橙皮苷																						1.000	0.048	0.043	-0.434	0.663	0.609	0.829	0.086	-0.019	0.615	-0.355	
芦丁																							1.000	0.095	-0.854	0.395	-0.250	0.466	-0.726	-0.328	0.146	-0.914*	
根皮苷																								1.000	-0.432	0.036	0.422	-0.098	-0.039	-0.492	-0.739	-0.041	
烟花苷																									1.000	-0.555	-0.202	-0.671	0.534	0.403	-0.101	0.894*	
水仙苷																										1.000	-0.107	0.504	-0.652	-0.658	0.469	-0.398	
山奈酚																											1.000	0.504	0.679	0.385	0.013	-0.096	
没食子酸																												1.000	-0.032	0.185	0.696	-0.768	
香草酸																													1.000	0.783	-0.050	0.455	
绿原酸																														1.000	0.314	0.065	
咖啡酸																															1.000	-0.369	
香豆酸																																	1.000

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

### 2.3 主成分分析及综合评价

表4 总解释方差

Table 4 Total variance explained

成分	初始特征值			提取载荷平方和		
	总计	方差/%	累积/%	总计	方差/%	累积/%
1	10.151	31.722	31.722	10.151	31.722	31.722
2	9.517	29.742	61.464	9.517	29.742	61.464
3	7.110	22.217	83.681	7.110	22.217	83.681
4	5.222	16.319	100	5.222	16.319	100

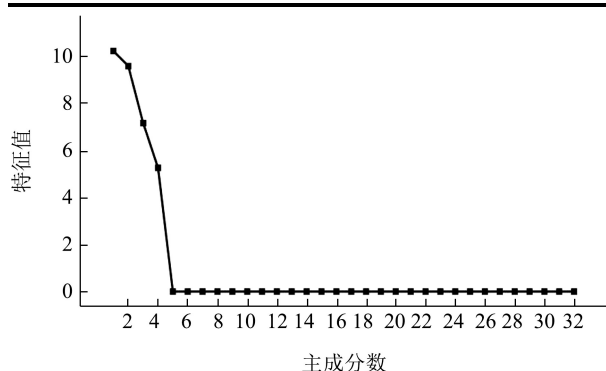


图2 主成分分析碎石图

Fig.2 Scree plot of principal component analysis

对五个产地芦笋共有的 32 个品质指标进行主成分分析, 结果如表 4、表 5 和表 6 所示。由表 4 可知, 特征值大于 1 的主成分共 4 个, 其累积方差贡献率 100%, 该 4 个主成分可以代表芦笋原有品质指标。同时, 从碎石图 (图 2) 也可以看到, 前 4 个点明显高于其他点, 从第 5 个点之后, 特征值点趋于平缓, 即前 4 个主成分对解释原有变量的贡献最大, 所以抽取 4 个因子为佳。

结合表 4 和表 5 可以看到, 第一主成分的方差贡献率为 31.722%, 钾、镁、木质素、钙、总酚酸、总黄酮和水分含量在第一主成分上有较大的载荷, 其中钙、镁、钾和木质素与第一主成分呈正相关, 总酚酸、总黄酮和水分含量与第一主成分呈负相关; 第二主成分的方差贡献率为 29.742%, 锌、水仙苷、芦丁、烟花苷、果胶、香豆酸和总皂苷在第二主成分上有较大的载荷, 其中锌、水仙苷和芦丁与第二主成分呈正相关, 烟花苷、果胶、香豆酸和总皂苷与第二主成分呈负相关; 第三主成分的方差贡献率为 22.217%, 咖啡酸、可溶性蛋白、叶绿素和纤维素在第三主成分上有较大的载荷, 其中叶绿素、可溶性蛋白和咖啡酸与第三主成分呈正相关, 纤维素与第三主成分呈负相关; 第四主成分的方差贡献率为 16.319%, 根皮苷、山奈

酚和柚皮苷在第四主成分上有较大的载荷, 且与其呈正相关。

综合分析 4 个主成分主要代表指标间相关性, 钾与水分含量呈显著正相关, 且与镁呈极显著正相关, 木质素与钙、总酚酸与总黄酮、锌与芦丁、香豆酸与烟花苷、纤维素与根皮苷、山奈酚与柚皮苷均呈显著正相关, 最终确定钾、木质素、总酚酸、锌、水仙苷、烟花苷、果胶、总皂苷、咖啡酸、可溶性蛋白、叶绿素、根皮苷和山奈酚作为不同产地芦笋品质评价的核心指标。利用主成分载荷矩阵 (表 5) 中各指标数据除以主成分相对应的特征值的算术平方根, 便得到 4 个主成分中各指标所对应的系数即特征向量, 设 4 个主成分得分依次为  $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$ 、 $F_4$ , 以特征向量为权重构建 4 个主成分的得分表达式如下所示:

$$F_1 = -0.240X_1 + 0.082X_2 + 0.136X_3 + 0.202X_4 + 0.211X_5 + 0.175X_6 - 0.153X_7 + 0.170X_8 + 0.257X_9 + 0.266X_{10} - 0.201X_{11} + 0.283X_{12} - 0.006X_{13} + 0.151X_{14} - 0.065X_{15} + 0.261X_{16} - 0.200X_{17} - 0.291X_{18} - 0.307X_{19} - 0.167X_{20} - 0.001X_{21} + 0.074X_{22} - 0.184X_{23} + 0.002X_{24} + 0.129X_{25} + 0.137X_{26} - 0.042X_{27} - 0.098X_{28} - 0.020X_{29} - 0.145X_{30} + 0.010X_{31} + 0.204X_{32};$$

$$F_2 = -0.124X_1 - 0.191X_2 - 0.153X_3 - 0.166X_4 - 0.006X_5 + 0.214X_6 + 0.282X_7 + 0.184X_8 + 0.048X_9 + 0.165X_{10} - 0.101X_{11} + 0.136X_{12} - 0.256X_{13} - 0.139X_{14} + 0.017X_{15} - 0.090X_{16} + 0.226X_{17} + 0.014X_{18} - 0.058X_{19} - 0.236X_{20} + 0.083X_{21} + 0.198X_{22} + 0.236X_{23} + 0.070X_{24} - 0.284X_{25} + 0.287X_{26} + 0.005X_{27} + 0.218X_{28} - 0.224X_{29} - 0.191X_{30} + 0.116X_{31} - 0.243X_{32};$$

$$F_3 = -0.187X_1 + 0.266X_2 + 0.193X_3 - 0.021X_4 + 0.276X_5 + 0.117X_6 - 0.015X_7 - 0.198X_8 - 0.207X_9 - 0.030X_{10} - 0.139X_{11} + 0.031X_{12} + 0.135X_{13} - 0.158X_{14} - 0.295X_{15} - 0.173X_{16} + 0.083X_{17} + 0.046X_{18} + 0.034X_{19} - 0.005X_{20} + 0.249X_{21} + 0.262X_{22} - 0.104X_{23} - 0.180X_{24} + 0.038X_{25} + 0.032X_{26} + 0.212X_{27} + 0.250X_{28} + 0.211X_{29} + 0.248X_{30} + 0.290X_{31} - 0.040X_{32};$$

$$F_4 = 0.059X_1 - 0.127X_2 + 0.250X_3 - 0.247X_4 - 0.034X_5 - 0.074X_6 - 0.024X_7 - 0.141X_8 - 0.026X_9 + 0.053X_{10} - 0.261X_{11} + 0.016X_{12} - 0.217X_{13} + 0.279X_{14} + 0.253X_{15} + 0.057X_{16} + 0.105X_{17} - 0.155X_{18} + 0.031X_{19} + 0.189X_{20} + 0.308X_{21} + 0.126X_{22} - 0.098X_{23} + 0.372X_{24} - 0.102X_{25} - 0.060X_{26} + 0.356X_{27} + 0.042X_{28} + 0.196X_{29} - 0.022X_{30} - 0.229X_{31} + 0.034X_{32};$$

以各主成分对应的方差贡献率为权重, 可得到综合评价函数:  $F = 0.317F_1 + 0.297F_2 + 0.222F_3 + 0.163F_4$ 。根据主成分综合得分模型, 计算出五个产地芦笋的综合得分值和排序结果如表 6 所示。不同产地芦笋的品质排序从高到低依次为: S1、S2、S5、S4、S3。

表 5 成分矩阵和成分系数矩阵

Table 5 Component matrix and component coefficient matrix

营养指标	成分矩阵				成分系数矩阵			
	1	2	3	4	1	2	3	4
水分含量	-0.766	-0.383	-0.498	0.134	-0.240	-0.124	-0.187	0.059
叶绿素含量	0.261	-0.588	0.709	-0.290	0.082	-0.191	0.266	-0.127
类胡萝卜素	0.432	-0.473	0.514	0.571	0.136	-0.153	0.193	0.250
维生素 C	0.644	-0.512	-0.056	-0.565	0.202	-0.166	-0.021	-0.247
可溶性蛋白	0.671	-0.018	0.737	-0.077	0.211	-0.006	0.276	-0.034
游离总氨基酸	0.559	0.660	0.472	-0.169	0.175	0.214	0.177	-0.074
Zn	-0.487	0.871	-0.039	-0.055	-0.153	0.282	-0.015	-0.024
Fe	0.543	0.569	-0.528	-0.322	0.170	0.184	-0.198	-0.141
Ca	0.819	0.147	-0.551	-0.060	0.257	0.048	-0.207	-0.026
Mg	0.848	0.510	-0.080	0.122	0.266	0.165	-0.030	0.053
Na	-0.640	-0.312	-0.371	-0.596	-0.201	-0.101	-0.139	-0.261
K	0.903	0.420	0.082	0.036	0.283	0.136	0.031	0.016
果胶	-0.020	-0.789	0.361	-0.497	-0.006	-0.256	0.135	-0.217
半纤维素	0.482	-0.429	-0.420	0.638	0.151	-0.139	-0.158	0.279
纤维素	-0.206	0.053	-0.787	0.579	-0.065	0.017	-0.295	0.253
木质素	0.832	-0.279	-0.461	0.131	0.261	-0.090	-0.173	0.057
总多糖	-0.638	0.698	0.220	0.239	-0.200	0.226	0.083	0.105
总黄酮	-0.926	0.043	0.123	-0.354	-0.291	0.014	0.046	-0.155
总酚酸	-0.977	-0.179	0.091	0.071	-0.307	-0.058	0.034	0.031
总皂苷	-0.532	-0.729	-0.012	0.432	-0.167	-0.236	-0.005	0.189
柚皮苷	-0.003	0.256	0.663	0.704	-0.001	0.083	0.249	0.308
橙皮苷	0.237	0.610	0.699	0.289	0.074	0.198	0.262	0.126
芦丁	-0.585	0.729	-0.276	-0.225	-0.184	0.236	-0.104	-0.098
根皮苷	0.007	0.216	-0.480	0.850	0.002	0.070	-0.180	0.372
烟花苷	0.410	-0.876	0.100	-0.233	0.129	-0.284	0.038	-0.102
水仙苷	0.438	0.884	0.086	-0.137	0.137	0.287	0.032	-0.060
山奈酚	-0.133	0.016	0.566	0.813	-0.042	0.005	0.212	0.356
没食子酸	-0.312	0.671	0.666	0.097	-0.098	0.218	0.250	0.042
香草酸	-0.064	-0.691	0.563	0.449	-0.020	-0.224	0.211	0.196
绿原酸	-0.463	-0.587	0.662	-0.051	-0.145	-0.190	0.248	-0.022
咖啡酸	0.033	0.358	0.773	-0.523	0.010	0.116	0.290	-0.229
香豆酸	0.649	-0.749	-0.106	0.077	0.204	-0.243	-0.040	0.034

表 6 不同产地芦笋综合得分

Table 6 Comprehensive scores of asparagus from different producing areas of the principal components

产地	主成分得分				总得分	排序
	1	2	3	4		
S1	-0.167	5.984	1.482	2.346	2.439	1
S2	5.251	-0.756	0.726	-1.410	1.372	2
S3	-1.931	-5.898	2.450	1.037	-1.653	5
S4	-0.109	-1.492	-4.434	1.292	-1.253	4
S5	-3.045	2.163	-0.225	-3.264	-0.905	3

### 2.4 不同产地芦笋的聚类分析

根据芦笋 32 项品质指标数据标准化处理结果,采用系统聚类和聚类热图分析,对 5 个产地芦笋进行聚类分析,得到聚类树状图,结果如图 3、图 4 所示。如图所示,组间联接和平方 Euclidean 距离进行的系统聚类结果显示在样本点间距离小于 5 处可以将五个产地芦笋聚为 3 类: S1 和 S5 为第一类, S4 和 S3 为第二类, S2 为第三类,而各产地芦笋的热图聚类分类结果与系统聚类一致。结合图 4 中各成分含量分析可得,



S1 和 S5 中总多糖、Zn、芦丁、没食子酸和咖啡酸含量相对较高；S2 中的 Vc、可溶性蛋白和香豆酸含量较高；而 S3 和 S4 中的水分含量、半纤维素和总皂苷含量相对较高。结合表 6 可以看到，主成分分析得分排序为 1 和 3 的被聚为一类，排序为 2 的聚为一类，而排序为 4 和 5 的被聚为一类，排序相近的产地被聚为一类。主成分分析与聚类分析相结合用于不同产地果蔬品质评价的方法目前已有不少研究，例如李跃红等<sup>[35]</sup>采用两种方法对不同产地猕猴桃品质分析结果中表明聚类分析结果将主成分分析结果中排序相近的产地归为一类，这与本实验结果存在一定的相似性，一定程度上表明聚类分析和主成分分析可用来分析不同产地芦笋的品质。

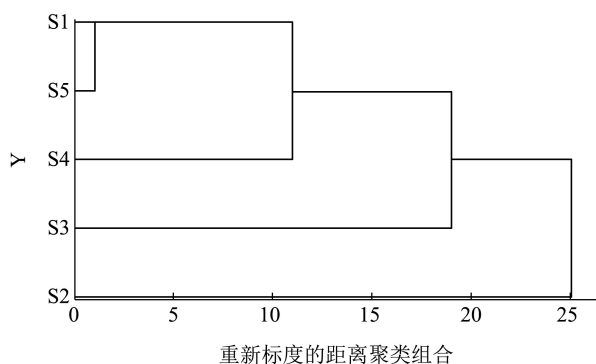


图 3 不同产地芦笋聚类分析

Fig.3 Cluster analysis of asparagus from different producing areas

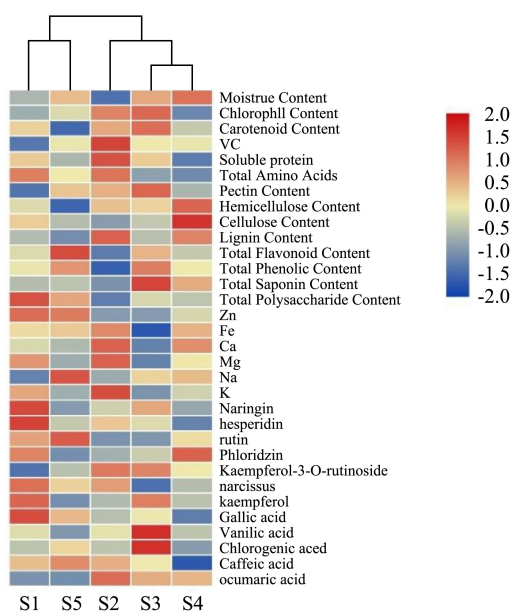


图 4 不同产地芦笋聚类分析热图

Fig.4 Cluster analysis heat map of asparagus from different producing areas

注：不同颜色表示不同产地芦笋中某一种成分含量的差异，但不能反映同一产地芦笋中各成分含量的高低。

### 3 结论

3.1 通过对五个不同产地芦笋的基本营养成分及功能性成分含量进行分析比较，并结合主成分分析和聚类分析，对其品质进行综合评价。主成分分析提取了4个特征值大于1的成分，其累计方差贡献率达100%，能够较全面代表样品原始信息。结合相关性分析对提取出的4个主成分中代表性指标进行筛选，确立了钾、木质素、总酚酸、锌、水仙苷、烟花苷、果胶、总皂苷、咖啡酸、可溶性蛋白、叶绿素、根皮苷和山奈酚13项指标作为评价不同产地芦笋品质的核心品质指标。主成分综合得分结果显示，山东菏泽芦笋（S1）得分最高，品质最好，其次依次为河南许昌芦笋（S2）、江西吉安芦笋（S5）、贵州贵阳芦笋（S4）和云南弥勒芦笋（S3）。聚类分析结果将五个产地芦笋划分为三类，其中S1和S5为第一类，其总多糖、Zn、芦丁、没食子酸和咖啡酸含量相对较高；S2为一类，其Vc、可溶性蛋白和香豆酸含量相对较高；S4和S3为一类，其水分含量、半纤维素和总皂苷含量相对较高，主成分分析中排序相近的产地在聚类分析结果中被聚为一类，表明两种分析方法相结合可用来分析不同产地芦笋的品质。

3.2 基于主成分分析和聚类分析筛选芦笋品质综合评价指标的方法，可以简化分析指标，具有快速、简便、科学的优势，能够为芦笋品质综合评价提供一定参考意义，同时对芦笋栽培、种植、加工过程中选择优良品质的芦笋、提升产业效益具有一定促进作用，对于我国芦笋产业的发展具有重要意义。

### 参考文献

[1] 尹培培,杨灵光,王桂宏,等.两种芦笋不同部位酚类物质及抗氧化活性研究[J].食品研究与开发,2018,39(21):21-27  
YIN Peipei, YANG Lingguang, WANG Guihong, et al. Study of phenolic compounds and antioxidant activities in different part of two asparagus [J]. Food Research and Development, 2018, 39(21): 21-27

[2] Qingbin G, Nifei W, Huanhuan L, et al. The bioactive compounds and biological functions of *Asparagus officinalis* L. - a review [J]. Journal of Functional Foods, 2020, 65(C): 103727

[3] Ku Y G, Kang D H, Lee C K, et al. Influence of different cultivation systems on bioactivity of asparagus [J]. Food Chemistry, 2018, 244: 349-358

[4] Hamdi A, Jaramillo-carmona S, Beji R S, et al. The phytochemical and bioactivity profiles of wild *Asparagus*

- albus* L. plant [J]. Food Research International, 2017, 99: 720-729
- [5] 彭柳林,余艳锋,周开洪.中国芦笋出口市场分析[J].中国蔬菜, 2015,7:6-10  
PENG Liulin, YU Yanfeng, ZHOU Kaihong. Analysis of China's asparagus export market [J]. China Vegetables, 2015, 7: 6-10
- [6] 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  
XU Huihui, CHEN Guang, WANG Chunxia, et al. Quality comparison test of green asparagus of different varieties [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2019, 6: 46-47
- [7] 陈学红,濮杨,周秋阳.不同采收期绿芦笋品质的综合评价[J].食品与发酵工业,2017,43(1):225-230  
CHEN Xuehong, PU Yang, ZHOU Qiuyang. Comprehensive evaluation on quality of green asparagus (*Asparagus officinalis* L.) from different harvest periods analysis of China's asparagus export market [J]. Food and Fermentation Industries, 2017, 43(1): 225-230
- [8] Chen X H, Ma L H, Dong Y W, et al. Evaluation of the differences in phenolic compounds and antioxidant activities of five green asparagus (*Asparagus officinalis* L.) cultivars [J]. Quality Assurance and Safety of Crops & Foods, 2017, 9(4): 479
- [9] Zhang G, Bai J, Xi M, et al. Soil quality assessment of coastal wetlands in the Yellow River Delta of China based on the minimum data set [J]. Ecological Indicators: Integrating, Monitoring, Assessment and Management, 2016, 66: 458-466
- [10] Hossain M B, Patras A, Barry-ryan C, et al. Application of principal component and hierarchical cluster analysis to classify different spices based on in vitro antioxidant activity and individual polyphenolic antioxidant compounds [J]. Journal of Functional Foods, 2011, 3(3): 179-189
- [11] Lipin C, Fanqianhui Y, Shuhong S, et al. Evaluation indicators of *Ruditapes philippinarum* nutritional quality [J]. Journal of Food Science and Technology, 2021, 58(8): 2943-2951
- [12] 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  
WANG Jianfang, GAO Shan, MOU Dehua. Quality evaluation of different varieties of oat based on principal components analysis and cluster analysis [J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(13): 85-91
- [13] 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  
WANG Dan, LIANG Jin, HUANG Tianzi, et al. Fresh food quality evaluation of kiwifruit based on principal component analysis and cluster analysis [J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(7): 1-8
- [14] 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  
WU Linxia, LI Ling, ZHANG Guoguang, et al. Analysis on quality characteristics of winter jujube from different regions based on principal component analysis and cluster analysis [J]. Food Science, 2022, 43(8): 334-338
- [15] 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  
LIU Jiameng, LIN Lijing, LIU Yijun, et al. Comprehensive evaluation of dried longan quality of different varieties based on principal component analysis [J]. Storage and Process, 2021, 21(5): 127-133
- [16] 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  
SHI Weidong, LUO Hailing, KANG Hongwei, et al. Evaluation of Chinese flowering cabbage variety by principal component analysis and cluster analysis [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2020, 48(24): 46-49
- [17] GB 5009.3-2016,食品安全国家标准食品中水分的测定[S]  
GB 5009.3-2016, National Food Safety Standard Determination of Moisture in Food [S]
- [18] 王文杰,贺海升,关宇,等.丙酮和二甲基亚砷法测定植物叶绿素和类胡萝卜素的方法学比较[J].植物研究,2009,29(2):224-229  
WANG WenJie, HE Haisheng, GUAN Yu, et al. Methodological comparison of chlorophyll and carotenoids contents of plant species measured by D MSO and acetone-extraction methods [J]. Bulletin of Botanical Research, 2009, 29(2): 224-229
- [19] 董欢欢.豆甾醇对绿芦笋保鲜效果和生理生化影响的研究[D].杭州:浙江工商大学,2017  
DONG Huanhuan. Study on effects of stigmasterol on preservation and physiology and biochemistry of postharvest green asparagus [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Commerce and Industry, 2017
- [20] GB/T 8314-2013,茶游离氨基酸总量的测定[S]  
GB/T 8314-2013, Determination of Total Free Amino Acids in Tea [S]
- [21] NY/T 2016-2011,水果及其制品中果胶含量的测定分光光度法[S]  
NY/T 2016-2011, Determination of Pectin Content in Fruits and Their Products. Spectrophotometric Method [S]

- [22] Van S P J. Use of detergents in the analysis fibrous feeds, 2. A rapid method for the determination of fiber and lignin [J]. J Aoac, 1963, 4: 4
- [23] 季瑞雪,鹿保鑫,王新茹,等.野生亚侧耳多糖的提取和对巨噬细胞Raw264.7的免疫调节作用研究[J].食品工业科技,2020,41(4):271-276  
JI Ruixue, LU Baoxin, WANG Xinru, et al. Extraction of Polysaccharides from wild *Hohenbuehelia serotina* and its immunomodulatory function in Raw264.7 cells [J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(4): 271-276
- [24] 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
- [25] GB/T 8313-2018,茶叶中茶多酚和儿茶素类含量的检测方法[S]  
GB/T 8313-2018, Detectionation of Total Polyphenols and Catechins in Tea [S]
- [26] 关云静,周林燕,毕金峰,等.绿芦笋不同部位营养成分及活性评价研究[J].食品工业科技,2015,36(5):343-347  
GUAN Yunjing, ZHOU Linyan, BI Jinfeng, et al. Evaluation of nutritive composition and antioxidant activity in different parts of green asparagus [J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(5): 343-347
- [27] 张旭娟,熊晖,俞可欣,等.16个芦笋品种农艺性状及营养物质的研究[J].浙江农业科学,2018,59(11):2078-2081  
ZHANG Xujuan, XIONG Hui, YU Kexin, et al. Study on agronomic traits and nutrients of 16 varietie [J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2018, 59(11): 2078-2081
- [28] 田颖刚,牛俊卿,张盼,等.芦笋植株欠开发部位营养、功能成分分析及比较[J].天然产物研究与开发,2014,26(9):1434-1439  
TIAN Yinggang, NIU Junqing, ZHANG Pan, et al. Analysis and comparison of nutritional and functional ingredients of different parts of *Asparagus officinalis* [J]. Natural Product Research and Development, 2014, 26(9): 1434-1439
- [29] 潘少香,郑晓冬,孟晓萌,等.高效液相色谱法同时检测芦笋及其废弃物中11种黄酮类物质[J].食品科技,2019,44(5):313-317  
PAN Shaoxiang, ZHENG Xiaodong, MENG Xiaomeng, et al. HPLC simultaneous determination of eleven flavonoids from asparagus and its waste [J]. Food Science and Technology, 2019, 44(5): 313-317
- [30] 张雨林,詹济华,谭洋,等.HPLC测定沅江产芦笋中3种酚酸和6种黄酮类成分含量[J].中国现代应用药学,2018,35(9):1317-1321  
ZHANG Yulin, ZHAN Jihua, TAN Yang, et al. Quantitative determination of three phenolic acids and six flavonoids of *Phragmites communis* (Cav.) Trin. ex *steud* from Yuanjiang by HPLC [J]. Chinese Journal of Modern Applied Pharmacy, 2018, 35(9): 1317-1321
- [31] 姜云云,叶光明,范国荣,等.HPLC法同时测定芦笋黄酮中5个黄酮苷的含量[J].药物分析杂志,2012,4:623-626  
JIANG Yunyun, YE Guangming, FAN Guorong, et al. HPLC simultaneous determination of five flavonoid glycosides in *Asparagus officinalis* L [J]. Chinese Journal of Pharmaceutical Analysis, 2012, 32(4): 623-626
- [32] 周勇兵,马新壮,余丽丽,等.芦丁对高脂高糖饮食造成的小鼠脑损伤的保护作用[J].山西医科大学学报,2021,52(5):619-624  
ZHOU Yongbing, MA Xinzhuang, YU Lili, et al. Protective effect of rutin against brain damage in mice caused by high fat or high sugar diet [J]. Journal of Shanxi Medical University, 2021, 52(5): 619-624
- [33] 梁爽.没食子酸抗肿瘤作用研究进展[J].广西医学,2017,39(7):1068-1072  
LIANG Shuang. Research progress of anti-tumor effect of gallic acid [J]. Guangxi Medical Journal, 2017, 39(7): 1068-1072
- [34] 汪洪涛.绿原酸应用开发研究进展[J].江苏调味副食品,2020,2:1-3  
WANG Hongtao. Research and development of chlorogenic acid [J]. Jiangsu Condiment and Subsidiary Food, 2020, 2: 1-3
- [35] 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  
LI Yuehong, RAN Maoqian, XU Menghuai, et al. Principal component and cluster analysis of quality of red-centred kiwifruit from different habitats [J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(10): 222-228