

# 不同产地青花椒品质综合评价

赵楷文<sup>1</sup>, 伏晴晴<sup>1</sup>, 梅小飞<sup>2</sup>, 刘美琴<sup>3</sup>, 徐富慧<sup>1</sup>, 饶胜其<sup>1</sup>, 杨振泉<sup>1</sup>, 王智荣<sup>1\*</sup>

(1. 扬州大学食品科学与工程学院, 江苏扬州 225127) (2. 重庆工程职业技术学院, 重庆 402260)

(3. 扬州市中医院, 江苏扬州 225127)

**摘要:** 该研究比较了同一年份、15个产地青花椒的色泽参数、呈色、呈香、呈味物质和活性成分的含量, 并利用主成分分析、偏最小二乘法判别分析和熵权多指标综合评价模型明确了不同产地青花椒的品质差异。结果表明, 不同产地的青花椒存在显著差异 ( $P<0.05$ ), 叶绿素 a、b 和羟基- $\alpha$ -山椒素的含量及褐变值是引起不同产地青花椒品质差异的重要指标, 其变量贡献度分别为 2.11、1.77、1.60 和 1.31。总的来说, 来自云贵川渝地区的青花椒, 呈现出较为怡人的感官色泽和较高水平的叶绿素 a (220.02~543.94  $\mu\text{g/g DW}$ )、b (123.88~276.54  $\mu\text{g/g DW}$ )、挥发油 (2.80~6.25 mL/100 g DW)、花椒麻素 (45.42~81.54 mg/g DW)、总酚 (28.68~43.56 mg GAE/g DW) 和总黄酮 (59.26~114.58 mg RE/g DW) 含量。其中, 汉源青花椒、泸县青花椒和江津青花椒的综合评分最高, 分别高达 242.06、202.46 和 179.23。由此可见, 这三个产地青花椒的品质较好, 是用于菜肴烹饪调味和功能性食品开发的良好材料。

**关键词:** 青花椒; 品质; 挥发油; 花椒麻素; 活性成分

文章编号: 1673-9078(2025)06-171-180

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.6.0593

## Quality Evaluation of *Zanthoxylum schinifolium* Sieb. et Zucc. from Different Regions

ZHAO Kaiwen<sup>1</sup>, FU Qingqing<sup>1</sup>, MEI Xiaofei<sup>2</sup>, LIU Meiqin<sup>3</sup>, XU Fuhui<sup>1</sup>, RAO Shengqi<sup>1</sup>, YANG Zhenquan<sup>1</sup>,  
WANG Zhirong<sup>1\*</sup>

(1. School of Food Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China)

(2. Chongqing Vocational Institute of Engineering, Chongqing 402260, China)

(3. Yangzhou Hospital of Traditional Chinese Medicine, Yangzhou 225127, China)

**Abstract:** *Zanthoxylum schinifolium* Sieb. et Zucc. is a spice and medicinal plant with major regional variations due to differences in environmental conditions. This study aims to assess the overall quality of *Z. schinifolium* harvested from 15 regions within the same year by measuring color, aroma, flavor, and bioactive compounds. Principal component analysis, partial least squares discriminant analysis, and an entropy weight evaluation model were used to assess the variations. Significant quality differences ( $P<0.05$ ) were observed among samples from different regions. These variations are primarily attributed to differences in the contents of chlorophyll a, chlorophyll b, and hydroxy- $\alpha$ -sanshool, as well as the browning

引文格式:

赵楷文, 伏晴晴, 梅小飞, 等. 不同产地青花椒品质综合评价[J]. 现代食品科技, 2025, 41(6): 171-180.

ZHAO Kaiwen, FU Qingqing, MEI Xiaofei, et al. Quality evaluation of *Zanthoxylum schinifolium* Sieb. et Zucc. from different regions [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(6): 171-180.

收稿日期: 2024-04-30

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFD0400303); 重庆工程职业技术学院科研项目 (2022KJB02)

作者简介: 赵楷文 (2004-), 男, 本科生, 研究方向: 食品加工与安全, E-mail: 13665206855@163.com

通讯作者: 王智荣 (1994-), 男, 博士, 讲师, 研究方向: 食品化学与营养学, E-mail: wangzhirongcn@163.com

index and browning degree, with the corresponding degrees of contribution determined to be 2.11, 1.77, 1.60, and 1.31, respectively. Samples from Yunnan, Guizhou, and Sichuan provinces and Chongqing exhibited a more pleasant sensory color and higher concentrations of chlorophyll a (220.02~543.94  $\mu\text{g/g}$  DW), chlorophyll b (123.88~276.54  $\mu\text{g/g}$  DW), volatile oil (2.80~6.25 mL/100 g DW), alkylamides (45.42~81.54 mg/g DW), total phenols (28.68~43.56 mg GAE/g DW), and total flavonoids (59.26~114.58 mg RE/g DW). Samples from Hanyuan, Luxian, and Jiangjin had the highest overall evaluation scores, reaching 242.06, 202.46, and 179.23, respectively. Due to their superior quality, *Z. schinifolium* Sieb. et Zucc. from these three regions may be considered ideal ingredients for cooking, seasoning, and functional food development.

**Key words:** *Zanthoxylum schinifolium* Sieb. et Zucc.; quality; volatile oil; alkylamides; bioactive compounds

花椒 (*Zanthoxylum bungeanum*) 属芸香科 (*Rutaceae*) 花椒属 (*Zanthoxylum* L.) 植物, 其果皮是我国著名的“八大调味品”之一, 素有“调味十三香之首”的美誉<sup>[1-3]</sup>。根据成熟后花椒果皮颜色的不同, 可将花椒主要分为两大类: 青花椒 (*Z. schinifolium* Sieb. et Zucc.) 和红花椒 (*Z. bungeanum* Maxim)。前者因麻味纯正、香气清雅浓郁而更受青睐, 根据花椒网 (<https://www.huajiao.cn/>) 公布的信息, 目前不管是种植面积和年产量, 还是消费者的受众数量和感官偏好, 青花椒都要高于红花椒。随着川渝火锅和麻辣风味风靡全国, 青花椒的需求量、食用量和消费量逐年攀升。

然而, 我国幅员辽阔, 青花椒分布广泛, 不同产地青花椒的品质参差不齐。根据我国标准 GB/T 1284-2020<sup>[4]</sup>, 高品质一级干青花椒应呈青绿或黄绿色, 有光泽, 麻味浓烈、持久、无异味, 香气浓郁、纯正, 闭眼椒和椒籽占比较低。很多研究指出, 麻度和香气是决定青花椒品质最关键的两个要素<sup>[5,6]</sup>。花椒麻素是青花椒中最具特色的成分, 也是花椒呈现出独特麻感的主要原因, 它们是一系列由不饱和脂肪酸链和 N-末端异丁基结构构成的脂肪族烷基酰胺, 摄入后能刺激舌粘膜产生强烈的“针刺感”和“麻木感”<sup>[2,5-7]</sup>。挥发油是青花椒体内分子量较小、可随水蒸气蒸出、具有一定芳香气味的挥发性油状液体物质, 是青花椒香气的主要来源<sup>[4,8,9]</sup>。此外, 外观色泽和活性成分含量也是影响消费者选择和食品开发的重要因素。然而, 目前对青花椒的研究主要集中在某一种青花椒的植物化学成分及其药理活性上, 或不同产地青花椒中某一类成分的组成和生物活性差异上, 对不同产地青花椒的综合品质的差别和评价研究较少。

因此, 本研究比较了 15 种来自我国主要产区青花椒的色泽参数、叶绿素、挥发油、花椒麻素

和酚类物质含量, 并利用主成分分析 (Principal Component Analysis, PCA)、偏最小二乘法判别分析 (Partial Least Squares Discriminant Analysis, PLS-DA) 和熵权法多指标模型系统分析明确了不同产地青花椒的品质差异, 以期对花椒的品质控制和精深加工提供一定的理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

从青花椒主要产区购买了 15 种青花椒, 产地分别为重庆市江津区 (JJ)、四川省凉山州金阳县 (JY)、四川省巴中市平昌县 (PC)、四川省泸州市泸县 (LX)、四川省眉山市洪雅县 (HYT)、四川省雅安市汉源县 (HYQ)、云南省邵通市鲁甸县 (LD)、贵州省黔西南贞丰县 (DT)、贵州省安顺市 (BG)、湖南省怀化市 (HN)、广西省玉林市 (GX)、山东省枣庄市 (SDZ)、湖北省恩施市 (HB)、甘肃省陇南市 (GS) 和江苏省徐州市 (JS)。这些花椒都是 6~7 月采摘后, 经自然晾晒或低温烘干制得。对照标准 GB/T 30391-2013<sup>[10]</sup> 和 GB/T 1284-2020<sup>[4]</sup>, 对样品进行逐粒检查, 剔除杂质、种籽、闭口椒、霉变椒和虫害椒。每种青花椒随机留取一些整粒花椒用于测定颜色参数, 其余花椒用中药粉碎机粉碎, 过 40 目筛, 收集粉末, 装入无菌样品袋中, 保存于 -20 °C 冰箱, 备用。

甲醇为色谱纯, 上海麦克林生化科技有限公司; 没食子酸、芦丁均为分析标准品, 北京索莱宝科技有限公司; 羟基- $\alpha$ -山椒素 (Hydroxy- $\alpha$ -sanshool, H $\alpha$ SS)、羟基- $\beta$ -山椒素 (Hydroxy- $\beta$ -sanshool, H $\beta$ SS)、羟基- $\epsilon$ -山椒素 (Hydroxy- $\epsilon$ -sanshool, H $\epsilon$ SS)、羟基- $\gamma$ -山椒素 (Hydroxy- $\gamma$ -sanshool, H $\gamma$ SS)、羟基- $\gamma$ -异山椒素 (Hydroxy- $\gamma$ -isosanshool, H $\gamma$ ISS) 均为分析标准

品,成都麦德生科技有限公司;其余试剂均为国产分析纯。

1260 高效液相色谱 (High Performance Liquid Chromatography, HPLC) 系统 (配有紫外检测器), 美国安捷伦公司; WR-18 色差仪, 深圳浪潮光电科技有限公司; TU-1810 紫外可见分光光度计, 北京普析通用仪器有限责任公司。

## 1.2 实验方法

### 1.2.1 不同产地青花椒的品质指标分析

#### 1.2.1.1 色泽、叶绿素含量和褐变程度分析

使用色差仪测量青花椒的颜色参数, 用黑白板校正色差仪, 随机挑选 30 粒花椒, 依次测定它们的  $L^*$ 、 $a^*$  和  $b^*$  值, 并按以下公式分别计算色调角  $H$ 、色度  $C$  和饱和度  $S$ <sup>[11]</sup>。

$$H = \arctan \frac{b^*}{a^*} \quad (1)$$

$$C = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2} \quad (2)$$

$$S = \frac{C}{L^*} \quad (3)$$

式中:

$a^*$ ——红绿度;

$b^*$ ——黄蓝度;

$L^*$ ——亮度;

$H$ ——色调角;

$C$ ——色度;

$S$ ——饱和度。

参照 Wang 等<sup>[12]</sup>的方法提取青花椒中的叶绿素。将 150 mg 样品与 5 mL 丙酮充分混匀, 放入 4 °C 冰箱中, 静置 12 h; 而后在 6 000 r/min 条件下离心 10 min, 移取上清液, 用分光光度计分别测定上清液在 663 和 647 nm 处的吸光度, 以干重 (Dry Weight, DW) 计, 按下式分别计算叶绿素 a 和 b 的含量<sup>[13]</sup>。

$$C_a = \frac{(12.25 \times A_{663}) - (2.55 \times A_{647})}{m} \times V \quad (4)$$

$$C_b = \frac{(12.31 \times A_{647}) - (4.91 \times A_{663})}{m} \times V \quad (5)$$

式中:

$C_a$ ——叶绿素 a 的含量,  $\mu\text{g/g DW}$ ;

$C_b$ ——叶绿素 b 的含量,  $\mu\text{g/g DW}$ ;

$A_{663}$ ——提取液在 663 nm 处的吸光度;

$A_{647}$ ——提取液在 647 nm 处的吸光度;

$V$ ——提取液的体积, mL;

$m$ ——花椒样品的质量, g。

根据 Chutintrasri 等<sup>[14]</sup>的方法并作适当修改评估青花椒的褐变程度。将 250 mg 样品与 25 mL 蒸馏水混匀, 室温下避光静置 30 min; 而后在 6 000 r/min 条件下离心 10 min, 移取上清液, 用分光光度计测量上清液在 420 nm 处的吸光值。褐变程度以  $A_{420}$  数值的 100 倍表示。

#### 1.2.1.2 挥发油含量分析

参照之前建立的方法<sup>[13]</sup>, 用水蒸气回流法提取青花椒中的挥发油, 结果以 mL/100 g DW 表示。

#### 1.2.1.3 花椒麻素含量分析

参照 Chen 等<sup>[15]</sup>的程序提取样品中花椒麻素的含量。准确称取 100 mg 青花椒粉, 加入 50 mL 甲醇, 充分混匀, 50 °C 超声提取 40 min; 而后在 6 000 r/min 条件下离心 10 min, 收集上清液。在沉淀物中倒入 30 mL 甲醇, 重复以上提取步骤。将所有上清液转入 100 mL 容量瓶中, 定容, 过 0.22  $\mu\text{m}$  滤膜后, 即得花椒麻素溶液, 备用。

利用 HPLC 测定花椒麻素的含量<sup>[15]</sup>。色谱柱为 Agilent ZORBAX Eclipse XDB-C18 柱 (250 mm×4.6 mm, 5  $\mu\text{m}$ ), 流动相为乙腈 (A 相) 和水 (B 相), 按 55:45 的比例等度洗脱; 柱温为 40 °C, 检测波长为 254 nm, 流速为 0.8 mL/min, 进样量为 20  $\mu\text{L}$ 。采用外标法定量, 结果以 mg/g DW 表示。

#### 1.2.1.4 总酚和总黄酮含量分析

参照之前建立的方法<sup>[13]</sup>提取酚类和类黄酮物质。准确称取 500 mg 青花椒粉, 加 4.0 mL 提取液, 充分混匀。室温下超声提取 30 min, 而后在 8 000 r/min 条件下离心 10 min, 收集上清液; 将残渣用少许提取液清洗 2 次, 离心, 合并所有上清液, 移入 25 mL 容量瓶中, 定容, 即得可溶性酚 (Soluble Phenols, SPs)。向沉淀物中加入 160 g/L 的 NaOH 溶液 10 mL, 避光静置 4 h; 碱解完成后, 再用 500 mL/L 的 HCl 调节其 pH 值至 1~2, 而后在 8 000 r/min 条件下离心 15 min, 收集上清液, 即得不可溶性酚 (Insoluble Bound Phenols, IBPs)。采用基于没食子酸当量 (Gallic Acid Equivalent, GAE) 的福林酚法测定总酚含量 (Total Phenol Content, TPC), 结果以 mg GAE/g DW 表示; 采用基于芦丁当量 (Rutin Equivalent, RE) 的  $\text{AlCl}_3$  显色法测定总黄酮含量 (Total Flavonoid

Content, TFC), 结果以 mg RE/g DW 表示<sup>[13]</sup>。

1.2.2 主成分分析和偏最小二乘法判别分析

以不同样品的褐变值、叶绿素 a、b、挥发油和  
各种花椒麻素的含量及 TPC 和 TFC, 构建各个指标  
的数据矩阵, 利用 OmicShare 云工具 (<http://www.omicshare.com/tools>) 对各个产地的花椒进行 PCA  
和 PLS-DA。

1.2.3 综合评价

参照代建武等<sup>[16]</sup>的方法, 采用熵权法对不  
同产地的青花椒进行综合评价, 计算综合评分  
(Composite Score, CS)。CS 数值越大, 表示该花椒  
的品质越好, 可表示为:

$$CS=W_1X_1+W_2X_2+W_3X_3+W_4X_4+W_5X_5+W_6X_6$$

式中:

CS——综合评分分数;

$X_1$ ——褐变值, 负向指标;

$X_2$ ——叶绿素 a 和 b 总含量的数值;

$X_3$ ——挥发油含量数值;

$X_4$ ——花椒麻素总含量数值;

$X_5$ ——总酚含量数值;

$X_6$ ——总黄酮含量数值;

$W_1\sim W_6$ ——上述各个评价指标对应的权重系数。

1.3 数据处理

实验数据以平均值  $\pm$  标准差 ( $\bar{X}\pm SD$ ) 表  
示; 用 SPSS 和 Excel 软件对测得的数据进行分析,  
用 Duncan 多重比较的方法分析差异显著性, 若  
 $P<0.05$ , 则说明差异显著。

2 结果与分析

2.1 不同产地青花椒的色泽参数和叶绿素含量

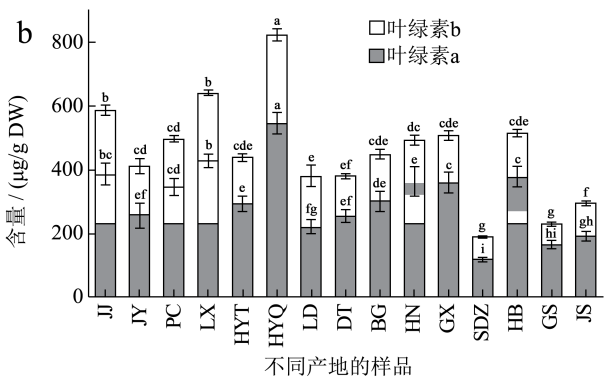
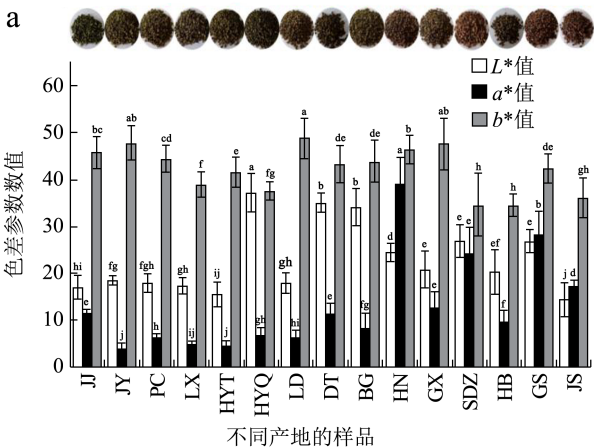


图 1 不同产地青花椒的色泽参数 (a) 和叶绿素 a、b 的含量 (b)

Fig.1 Color parameters (a) and the contents of chlorophyll a and b (b) in *Zanthoxylum schinifolium* Sieb.et Zucc from different regions

注: 图中不同字母表示不同处理之间差异显著, 下同。

$L^*a^*b^*$  色空间是当前最通用的测量物体颜  
色的方法之一,  $L^*$  表示亮度, 正值为白, 负值  
为黑;  $a^*$  包括的颜色是从深绿色 (负值) 到灰  
色 (0) 再到亮粉红色 (正值);  $b^*$  是从亮蓝色  
(负值) 到灰色 (0 值) 再到黄色 (正值)<sup>[17]</sup>。如  
图 1a 所示, 不同产地青花椒的色泽存在显著差  
异 ( $P<0.05$ ),  $L^*$  值较高的青花椒依次为 HYQ、  
DT、BG、SDZ 和 GS, 分别为 37.00、34.70、  
33.84、26.82 和 26.59;  $a^*$  值从小到大的青花椒依  
次是 JY、HYT、LX、LD 和 HYQ, 分别为 3.86、  
4.20、4.54、6.09 和 6.15;  $b^*$  值由大到小的青花椒  
依次是 LD、JY、GX、HN 和 JJ, 分别为 48.73、  
47.52、47.50、46.38 和 45.65。JJ、JY、PC、LX  
和 HYT 的  $L^*$  (15.24~18.35)、 $a^*$  (3.86~11.38) 和  
 $b^*$  值 (38.78~47.52) 总体上差异较小, 说明它们  
的感官色泽更为接近; 而 HN、GS 和 SDZ 的  $a^*$  值  
(24.08~39.04) 较大, 表明它们的色泽偏红, 这也  
和实物图大体一致 (图 1)。根据黄山<sup>[18]</sup>的研究结  
果, 不同生长期的江津九叶青花椒经冷冻干燥后,  
其  $L^*$ 、 $a^*$  和  $b^*$  值分别在 51.26~75.72、-7.54~-0.88  
和 20.64~30.44 之间; 从视觉感官上, 7 月中旬的青  
花椒样品呈现出最为鲜艳、明亮和怡人的色泽, 此  
时的青花椒具有较高的  $L^*$  (53.40) 和  $b^*$  值 (25.63)  
及较低的  $a^*$  值 (-4.34)。汪洋等<sup>[19]</sup>的研究表明, 在  
鲜青花椒干燥过程中, 随着时间的延长, 青花椒的  
 $L^*$  和  $b^*$  值逐渐下降, 而  $a^*$  值则呈现逐渐上升的趋  
势。总的来说, 不同产地的青花椒中, HYQ、DT  
和 BG 的  $L^*$  (33.84~37.00) 和  $b^*$  值 (37.10~43.56)

较高，而  $a^*$  值（4.20~11.10）较低，说明这三种青花椒可能与鲜果的固有色泽较为接近，呈现出较为翠绿、明亮的感官色泽（图 1）。从图 1b 可以看出，与  $L^*$ 、 $a^*$  和  $b^*$  值相对应，HYQ 的叶绿素 a 和 b 的含量都显著高于（ $P<0.05$ ）其他青花椒的，分别高达 543.94 和 275.54  $\mu\text{g/g DW}$ ；其次为 LX 和 JJ，其叶绿素 a 和 b 的含量分别为 385.50~426.49  $\mu\text{g/g DW}$  和 199.97~212.76  $\mu\text{g/g DW}$ ，因此这 3 种青花椒中的叶绿素总含量远远高于（ $P<0.05$ ）其他青花椒中的。与之相反，JS、GS 和 SDZ 则同时显示出最低的叶绿素 a 和 b 含量，仅分别为 117.91~192.48  $\mu\text{g/g DW}$  和 65.40~102.51  $\mu\text{g/g DW}$ 。除此之外，其他产地青花椒中的叶绿素 a 和 b 的含量分别在 220.02~360.77  $\mu\text{g/g DW}$  和 123.88~157.70  $\mu\text{g/g DW}$  之间，总体差异较小。

由  $L^*$ 、 $a^*$  和  $b^*$  值计算得到色调角  $H$ 、色度  $C$  和色饱和度  $S$ 。色调角  $H$  表示色彩的总体倾向，在  $0\sim360^\circ$  之间连续变化，依次为紫红、红、橙红、橙、黄、黄绿、绿和蓝绿， $0^\circ$  或  $360^\circ$  指红色， $90^\circ$  是黄色， $180^\circ$  为绿色， $270^\circ$  指蓝色；色饱和度  $S$  是指色彩的鲜艳程度，色度  $C$  表示含色的多少，其数值在  $0\sim60^\circ$  间变化。 $C$  和  $S$  数值越大，表示颜色的纯度越高，颜色越鲜艳，反之，数值越小，色彩

的纯度越低，颜色越暗沉<sup>[17]</sup>。从表 1 可以看出，不同产地青花椒的色调角  $H$ 、色度  $C$  和色饱和度  $S$  值之间也存在很大差异（ $P<0.05$ ），其数值分别在  $170.21\sim205.30$ 、 $35.61\sim60.83$  和  $1.03\sim2.88$  之间。 $H$  由  $90^\circ\rightarrow180^\circ\rightarrow270^\circ$  表示黄绿  $\rightarrow$  绿  $\rightarrow$  蓝绿，这些青花椒的色调角  $H$  接近  $180^\circ$ ，说明它们呈现的颜色和绿色十分接近，这也与实际情况相符（图 1）。

总的来说，JJ、JY、PC、HYT、LD 和 GX 同时呈现较高的色调角  $H$ 、色度  $C$  和色饱和度  $S$  值，表明这几种花椒可能显示出艳丽明目的鲜绿色；HYQ 和 HB 都是具有较高的色调角  $H$  和较低的色强度  $C$  及色饱和度  $S$  值，暗示这两种花椒的色泽可能较为暗沉。HN 的色调角  $H$  较低而色强度  $C$  和色饱和度  $S$  值较高，表明 HN 可能具有明亮的黄绿色的感官色泽；而 SDZ 的色调角  $H$ 、色度  $C$  和色饱和度  $S$  值均较低，呈现偏淡黄的感官色彩，这也导致 SDZ 的褐度值远远高于（ $P<0.05$ ）其他品种的。褐度值比较高的花椒还有 JJ 和 JY，都达到了 70 左右。除 SDZ、JJ 和 JY 之外，其余 12 种青花椒的褐度值在  $42.70\sim63.07$  之间，差别相对较小（表 1）。

表 1 不同产地青花椒的色泽参数与褐度值

Table 1 Color parameters and browniness values of *Zanthoxylum schinifolium* Sieb.et Zucc from different regions

| 样品  | 色调角 $H$                | 色强度 $C$               | 色饱和度 $S$              | 褐度                     |
|-----|------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|
| JJ  | $195.97 \pm 1.04^b$    | $47.06 \pm 3.42^d$    | $2.88 \pm 0.50^a$     | $71.03 \pm 4.75^b$     |
| JY  | $205.30 \pm 1.71^a$    | $47.69 \pm 3.81^{cd}$ | $2.61 \pm 0.26^{bcd}$ | $69.00 \pm 4.62^b$     |
| PC  | $202.03 \pm 1.42^{ab}$ | $44.59 \pm 3.06^e$    | $2.50 \pm 0.27^d$     | $53.10 \pm 0.95^c$     |
| LX  | $203.28 \pm 1.60^{ab}$ | $39.06 \pm 2.74^{gh}$ | $2.28 \pm 0.26^e$     | $44.27 \pm 1.10^g$     |
| HYT | $204.16 \pm 2.28^{ab}$ | $42.08 \pm 2.99^f$    | $2.84 \pm 0.52^a$     | $59.13 \pm 2.59^{cd}$  |
| HYQ | $199.83 \pm 2.44^{bc}$ | $37.44 \pm 2.37^{hi}$ | $1.03 \pm 0.19^g$     | $56.40 \pm 3.48^{de}$  |
| LD  | $202.82 \pm 2.17^{ab}$ | $49.18 \pm 4.19^{bc}$ | $2.78 \pm 0.41^{ab}$  | $60.70 \pm 1.48^{cd}$  |
| DT  | $195.29 \pm 3.53^{cd}$ | $44.16 \pm 4.60^{ef}$ | $1.13 \pm 0.30^g$     | $59.93 \pm 1.22^{cd}$  |
| BG  | $199.22 \pm 4.80^d$    | $44.58 \pm 5.08^e$    | $1.15 \pm 0.16^g$     | $52.23 \pm 3.36^{ef}$  |
| HN  | $170.21 \pm 3.40^g$    | $60.83 \pm 5.32^a$    | $2.53 \pm 0.37^{cd}$  | $42.53 \pm 0.91^g$     |
| GX  | $194.83 \pm 5.68^{cd}$ | $49.70 \pm 4.89^{bc}$ | $2.60 \pm 0.51^{bcd}$ | $47.07 \pm 3.89^{fg}$  |
| SDZ | $175.52 \pm 6.16^{fg}$ | $44.25 \pm 5.74^{ef}$ | $1.73 \pm 0.33^f$     | $114.20 \pm 5.67^a$    |
| HB  | $194.58 \pm 4.31^{cd}$ | $35.61 \pm 2.67^i$    | $1.91 \pm 0.43^f$     | $42.70 \pm 1.01^g$     |
| GS  | $176.73 \pm 4.35^f$    | $50.91 \pm 4.27^b$    | $1.90 \pm 0.28^f$     | $57.77 \pm 3.77^{cde}$ |
| JS  | $184.15 \pm 4.26^e$    | $39.69 \pm 3.85^g$    | $2.72 \pm 0.35^{abc}$ | $63.07 \pm 6.67^c$     |

注：表中同一列不同字母表示不同处理之间差异显著，下同。

表 2 不同产地青花椒中主要花椒麻素的含量

Table 2 The contents of main alkylamides in *Zanthoxylum schinifolium* Sieb.et Zucc from different regions

| 样品  | HaSS                      | HβSS                      | HεSS                      | HγSS                      | HγlSS                     |
|-----|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| JJ  | 79.39 ± 1.24 <sup>a</sup> | 0.43 ± 0.04 <sup>gh</sup> | 0.42 ± 0.01 <sup>k</sup>  | 1.23 ± 0.04 <sup>a</sup>  | 0.08 ± 0.01 <sup>ef</sup> |
| JY  | 71.15 ± 1.06 <sup>c</sup> | 3.6 ± 0.07 <sup>gh</sup>  | 1.33 ± 0.02 <sup>f</sup>  | /                         | 0.07 ± 0.01 <sup>ef</sup> |
| PC  | 55.36 ± 1.31 <sup>f</sup> | 6.25 ± 0.12 <sup>d</sup>  | 1.94 ± 0.04 <sup>c</sup>  | 0.46 ± 0.01 <sup>b</sup>  | 0.09 ± 0.02 <sup>d</sup>  |
| LX  | 38.53 ± 0.6 <sup>h</sup>  | 5.37 ± 0.08 <sup>c</sup>  | 1.66 ± 0.02 <sup>d</sup>  | 0.31 ± 0.01 <sup>cd</sup> | 0.06 ± 0.01 <sup>ef</sup> |
| HYT | 42.47 ± 1.19 <sup>g</sup> | 1.73 ± 0.04 <sup>j</sup>  | 0.74 ± 0.02 <sup>j</sup>  | 0.48 ± 0.02 <sup>d</sup>  | /                         |
| HYQ | 73.72 ± 2.04 <sup>b</sup> | 3.1 ± 0.09 <sup>hi</sup>  | 1.17 ± 0.03 <sup>h</sup>  | 0.12 ± 0.01 <sup>e</sup>  | 0.09 ± 0.01 <sup>d</sup>  |
| LD  | 59.96 ± 0.68 <sup>e</sup> | 6.9 ± 0.1 <sup>c</sup>    | 1.94 ± 0.02 <sup>c</sup>  | 0.28 ± 0.01 <sup>d</sup>  | 0.39 ± 0.05 <sup>a</sup>  |
| DT  | 63.36 ± 0.13 <sup>d</sup> | 8.9 ± 6.36 <sup>a</sup>   | 3.15 ± 0.08 <sup>a</sup>  | 0.34 ± 0.01 <sup>c</sup>  | 0.25 ± 0.02 <sup>b</sup>  |
| BG  | 64.61 ± 0.47 <sup>d</sup> | 1.72 ± 0.02 <sup>j</sup>  | 0.74 ± 0.01 <sup>j</sup>  | 0.05 ± 0.01 <sup>f</sup>  | 0.15 ± 0.02 <sup>c</sup>  |
| HN  | 26.52 ± 0.48 <sup>j</sup> | 4.23 ± 0.09 <sup>f</sup>  | 1.27 ± 0.02 <sup>g</sup>  | 0.1 ± 0.02 <sup>e</sup>   | 0.05 ± 0.01 <sup>f</sup>  |
| GX  | 39.15 ± 1.15 <sup>h</sup> | 3.69 ± 0.09 <sup>g</sup>  | 1.32 ± 0.03 <sup>fg</sup> | 0.29 ± 0.02 <sup>d</sup>  | 0.05 ± 0.00 <sup>f</sup>  |
| SDZ | 12.79 ± 0.2 <sup>i</sup>  | 2.86 ± 0.08 <sup>i</sup>  | 0.84 ± 0.02 <sup>i</sup>  | /                         | 0.05 ± 0.00 <sup>f</sup>  |
| HB  | 35.95 ± 0.47 <sup>i</sup> | 7.57 ± 0.11 <sup>b</sup>  | 2.1 ± 0.03 <sup>b</sup>   | 0.3 ± 0.11 <sup>cd</sup>  | 0.06 ± 0.01 <sup>ef</sup> |
| GS  | 16.1 ± 0.88 <sup>k</sup>  | 8.59 ± 0.46 <sup>a</sup>  | 1.37 ± 0.07 <sup>c</sup>  | /                         | 0.11 ± 0.01 <sup>d</sup>  |
| JS  | 5.05 ± 0.31 <sup>m</sup>  | /                         | 0.16 ± 0.02 <sup>l</sup>  | /                         | /                         |

注：/ 表示没有检测到。

2.2 不同产地青花椒的挥发油含量

挥发油含量是鉴定花椒经济价值的重要指标，常被用于评价花椒的香气强度，其主要组分为萜烯类、醇类、酮类和酯类等，这几类成分可占到挥发油总含量的 90% 以上<sup>[8,9,20,21]</sup>。由图 2 可知，不同产地青花椒的挥发油含量之间存在显著差异 ( $P<0.05$ )，含量在 1.09~6.25 mL/100 g DW 之间波动。很多研究也都表明，不同产地花椒的挥发油含量及其成分组成差异很大<sup>[8,22]</sup>，山东某产区引种的来自陕西和山东本地的花椒，其挥发油含量最高的高达 7.77 mL/100 g DW，最低的仅为 3.80 mL/100 g DW<sup>[23]</sup>。JJ、JY、PC、HYT、LD、DT 和 GS 的挥发油含量较高，分别为 5.49、6.25、5.16、5.07、4.98、6.02 和 5.11 mL/100 g DW，都接近或者超过了 5 mL/100 g DW，表明这几种青花椒可能提供更为浓郁怡人的香气感受。除 GS 外，其他 6 种花椒都是来自我国西南的云贵川渝地区，这可能与当地独特的气候水文有关，西南地区年均温较高，空气湿度较大，年降雨量较多，有利于挥发油的合成和积累。梁亚男等<sup>[22]</sup>曾比较分析了来自四川、云南、重庆和湖北产区的 13 种青花椒的挥发油含量，结果表明，四川产区的青花椒，其挥发油含量普遍较高，显著高于其他产区的；李骄阳<sup>[23]</sup>的研究也表明，种植产地会显著影响花椒中的挥发油含量，在山西种

植的早红狮子头花椒，其挥发油含量约是山东产地的 1.15 倍。

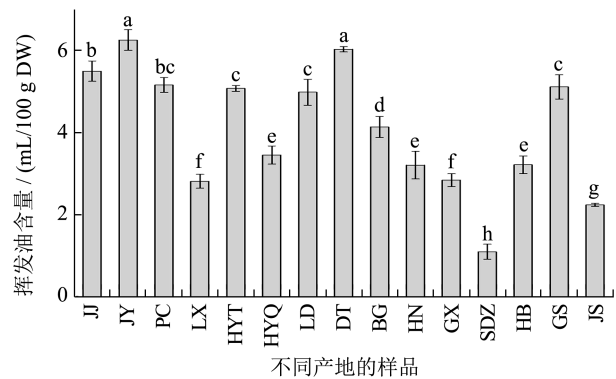


图 2 不同产地青花椒中挥发油的含量

Fig.2 The contents of volatile oils in *Zanthoxylum schinifolium* Sieb.et Zucc from different regions

2.3 不同产地青花椒的花椒麻素含量

花椒麻素（酰胺类物质）是引起花椒麻味的主要原因，HaSS、HβSS、HεSS、HγSS 和 HγlSS 是花椒麻素的主要组分，其中又以 HaSS 的含量占有绝对优势<sup>[2,8,15,24]</sup>。不同产地青花椒中的 5 种主要花椒麻素含量如表 2 所示，和前人研究结果一致，所有产地青花椒的花椒麻素组分中，含量最高都是 HaSS，其丰度远远超过 ( $P<0.05$ ) 其他 4 种花椒麻素。根据 Feng 等<sup>[25]</sup>的研究，花椒摄入后

的麻木感主要由  $H\alpha SS$  和  $H\gamma SS$  提供, 在相同浓度下,  $H\gamma SS$  引起的麻木强度略高于  $H\alpha SS$ , 且导致的麻木感持续时间大约是  $H\alpha SS$  的两倍。在本研究中,  $H\alpha SS$  含量较高的青花椒依次是 JJ、HYQ、JY、DT、LD、BG 和 PC, 分别为 81.54、78.20、76.15、76.00、69.47、67.27 和 64.10 mg/g DW, 远远高于 ( $P<0.05$ ) 其他产地的青花椒, 即使是紧随其后的 HB、LX 和 HYT, 其  $H\alpha SS$  含量也仅为 46 mg/g DW 左右。由于在 5 种花椒麻素中,  $H\alpha SS$  含量占有绝对优势, 至少是其他 4 种花椒麻素含量总和的 10 倍, 上述 7 种青花椒中的花椒麻素总含量也显著高于 ( $P<0.05$ ) 其他产地的青花椒, 表明这些青花椒可能呈现更为强烈、厚重和绵长的麻味。和挥发油类似, 这 7 种青花椒全都是来自云贵川渝地区。很多研究也表明, 川渝地区青花椒中花椒麻素的含量较高, 总体上显著高于其他产区的<sup>[15,22]</sup>。马尧<sup>[6]</sup>认为, 经度、相对湿度和土壤铅含量是影响花椒麻素组成差异的主要环境因素, 总体上经度越高, 相对湿度越大, 土壤铅含量越高, 花椒中的花椒麻素总含量越高。川渝地区多属亚热带(半)湿润气候, 降水丰沛, 空气湿润, 可能利于花椒麻素的生物合成。

$H\gamma SS$  和  $H\gamma ISS$  在 15 种青花椒中的含量普遍偏低, 均低于 1.5 mg/g DW,  $H\gamma SS$  在 SDZ、GS 和 JS 中低于检测限,  $H\gamma ISS$  则在 HYT 和 JS 中没有检出。除  $H\alpha SS$  外,  $H\beta SS$  和  $H\epsilon SS$  有相对较高的丰度, 总体上前者的丰度略高于后者, 它们在 15 种青花椒中的平均含量分别 1.74 和 1.29 mg/g DW, 且在不同产地的青花椒中呈现出相似的分布趋势—— $H\beta SS$  含量较高的青花椒, 其  $H\epsilon SS$  含量也较高。如 DT、HB、GS、LD 和 PC, 其  $H\beta SS$  含量分别为 8.57、7.57、8.59、6.90 和 6.25 mg/g DW, 其  $H\epsilon SS$  含量分别为 3.15、2.10、1.37、1.94 和 1.94 mg/g DW, 都同时含有较高含量的  $H\beta SS$  和  $H\epsilon SS$ 。由于花椒的基因组刚刚破译, 花椒麻素生物合成途径及其通路上关键合成基因功能的研究还处于起步阶段<sup>[23]</sup>, 花椒麻素呈现如此分布的原因还不清楚, 有待进一步的研究。

#### 2.4 不同产地青花椒的总酚和总黄酮含量

相较于挥发油和花椒麻素, 有关青花椒中酚类化合物的研究相对较少。然而, 由于酚类化合物处于植物次生代谢网络的中心位置, 本身可作为防御物质协助植物抵御各种生物胁迫和非生物胁迫, 也是天然的强抗氧化剂, 部分物质还参与了花椒独特色泽、风味及滋味的形成<sup>[8,13,26]</sup>, 兼之近年来大量

的研究揭示了其强烈的多重健康促进作用, 青花椒中酚类化合物的含量、组成及其生物活性也愈发受到关注和重视。酚类化合物在植物中主要以 SPs 和 IBPs 的形式存在<sup>[13,26]</sup>, 目前少数的几篇有关花椒中酚类化合物的报道也基本集中在 FPs 的提取、鉴定和活性分析上<sup>[27,28]</sup>, 鲜有关于 IBPs 的研究。从图 3a 可以看出, 15 种青花椒中的 IBPs-TPC 都显著高于 ( $P<0.05$ ) SPs-TPC, 这可能是由于酚类化合物的存在形式和分布特点导致的, 如水杨酸主要以 SPs 的形式存于青花椒中, 在 IBPs 中检测不到<sup>[18]</sup>; Wang 等<sup>[29,30]</sup>在与花椒同属于芸香科的锦橙果皮中也发现了类似的现象, 很多酚酸在 IBPs 大量分布, 而在 SPs 中则仅有少量存在甚至低于检测限而检测不出。不论是 SPs 还是 IBPs, 不同产地青花椒中的 TPC 存在显著差异 ( $P<0.05$ ), 且 IBPs-TPC (15.46~33.97 mg GAE/g DW) 的差异程度总体上高于 SPs-TPC (8.13~19.33 mg GAE/g DW)。15 种青花椒中, SDZ 同时含有最高水平的 SPs-和 IBPs-TPC, 其含量分别为 19.33 和 33.97 mg GAE/g DW; 而 GX、HN 和 HB 则刚好相反, 同时呈现较低的含量, 其 SPs-TPC 分别为 8.13、9.71 和 9.66 mg GAE/g DW, 其 IBPs-TPC 分别为 15.46、16.33 和 16.49 mg GAE/g DW。其他产地的青花椒, SPs-和 IBPs-TPC 较为波动, 没有什么规律可循, 但总体相互之间相差较小。

由图 3b 可知, 和 TPC 呈现大致相反的趋势, 15 种青花椒中, SPs-TFC (37.28~91.25 mg RE/g DW) 都显著高于 ( $P<0.05$ ) IBPs-TFC (17.23~44.61 mg RE/g DW)。这一现象和黄山<sup>[18]</sup>的研究大体一致, 他们发现很多黄酮单体如山奈酚、槲皮素和异鼠李素等, 只以 SPs 的形式存在, 在 IBPs 根本检测不到; 而一些黄酮类的糖苷, 如番石榴苷、金丝桃苷、槲皮苷和异槲皮苷等, 可在 IBPs 中检出, 但其含量远远低于其在 SPs 中的。15 种青花椒中的 SPs-和 IBPs-TFC 也存在显著差异 ( $P<0.05$ ), 总的来说, 含有较高 SPs-TFC 的青花椒, 其 IBPs-TFC 也较高, 这主要见于 SDZ、GS、BG、PC、LX、HYT、HB 和 JS, 其 SPs-和 IBPs-TFC 分别在 59.23~91.25 mg RE/g DW 和 36.12~44.61 mg RE/g DW 之间; 而 LD 和 HN 则同时呈现较低水平的 SPs-和 IBPs-TFC, 其含量仅分别为 37.28~42.03 mg RE/g DW 和 17.23~19.42 mg RE/g DW; 其余 5 种青花椒中的 SPs-TFC 和 IBPs-TFC 差别较小, 几乎没有显著差异。此外, SDZ、BG 和 PC 同时呈现出较高丰度的 TPC (图 3a) 和 TFC (图 3b), 暗示这几种青花椒可能具有优良的生物活性。

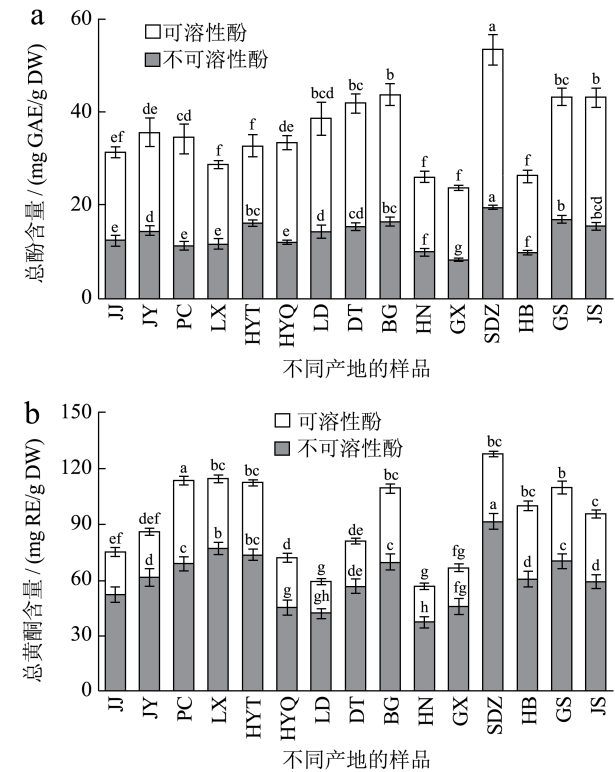


图 3 不同产地青花椒中的总酚含量 (a) 和总黄酮 (b) 含量

Fig.3 Total phenol content (a) and total flavonoid content (b) of *Zanthoxylum schinifolium* Sieb.et Zucc from different regions

2.5 主成分分析和偏最小二乘法判别分析

构建品质指标的数据矩阵，对不同产地的青花椒进行 PCA 和 PLS-DA，结果如图 4 所示。PCA 是一种简化数据集的技术，能利用线性变换把数据变换到一个新的坐标系统中，使得任何数据投影的第一大方差在第一个坐标（称为第一主成分）上，第二大方差在第二个坐标（称为第二主成分）上，依次类推，由此把多指标转化为少数几个综合指标<sup>[31]</sup>。在 PCA 得分图（图 4a）上，离得越近的样本之间的相似性越高<sup>[27]</sup>。代表同一产地的 3 个点彼此靠近甚至重合在一起，说明试验的数据重复性较好；代表 JJ、HYQ、GX 和 HN 的点聚集在一起，其置信椭圆也多有重叠，说明这 4 种青花椒的相似性较高；与该现象类似的还有 HN 与 HB、JY 与 PC。从整张图上来看，HYT、JS、SDZ、GS、LD 和 DT，代表这些样品的点分散在图上，彼此离得较远，说明这些青花椒之间差别较大。此外，从图中可以看出，PC1 的贡献率为 35.2%，PC2 的贡献率为 21.7%，两者之和为 56.9%，说明 PC1 和 PC2 能反应样品中的大部分信息。根据 PCA 的载荷数值，PC1 主要与叶绿素 a、叶绿素 b 和 H $\alpha$ SS 的含量正

相关，与 SPs-TPC、IBPs-TPC、SPs-TFC 和褐变值负相关；而 PC2 则主要受 H $\gamma$ ISS、H $\beta$ SS 和 H $\epsilon$ SS 含量的影响。

PLS-DA 是一种有监督的判别分析方法，能按照预先定义的分类最大化组间的差异，获得比 PCA 更好的分离效果，特别适合多变量的统计分析<sup>[32]</sup>。变量贡献度（Variable Importance in Projection, VIP）是 PLS-DA 模型变量的变量权重值，来衡量各代谢物的表达模式对各组样本分类判别的影响强度和解释能力，一般以 VIP>1 为标准，其值越高表示对变量的影响越大<sup>[26]</sup>。由图 4b 可知，VIP>1 的变量依次是叶绿素 a（VIP=2.11）、H $\alpha$ SS（VIP=1.77）和叶绿素 b（VIP=1.60）的含量及褐变值（VIP=1.31），说明这 4 个指标的数值，对不同青花椒之间的品质差异贡献较大。

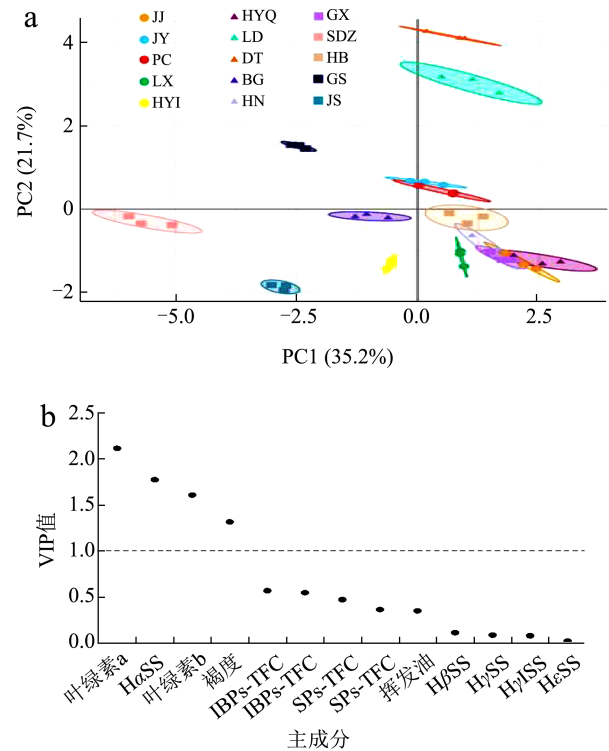


图 4 不同产地青花椒的主成分分析模型 (a) 及主要成分的变量贡献度 (b)

Fig.4 The principal component analysis model (a) and variable important in projection (VIP) scores of main components (b) of *Zanthoxylum schinifolium* Sieb.et Zucc from different regions

2.6 不同产地青花椒的综合评价得分

熵权法是根据各指标的变异程度，利用信息熵计算出各指标的熵权的一种客观赋权方法<sup>[16]</sup>。利用熵权法，对各个品质指标重复三次的平均值进行标

准化处理, 获得  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 、 $X_4$ 、 $X_5$  和  $X_6$  的权重依次为  $-0.273\ 8$ 、 $0.257\ 0$ 、 $0.247\ 4$ 、 $0.209\ 1$ 、 $0.281\ 7$  和  $0.278\ 4$ , 即 CS 可表示为:

$$CS = -0.273\ 8X_1 + 0.257\ 0X_2 + 0.247\ 4X_3 + 0.209\ 1X_4 + 0.281\ 7X_5 + 0.278\ 4X_6 \quad (7)$$

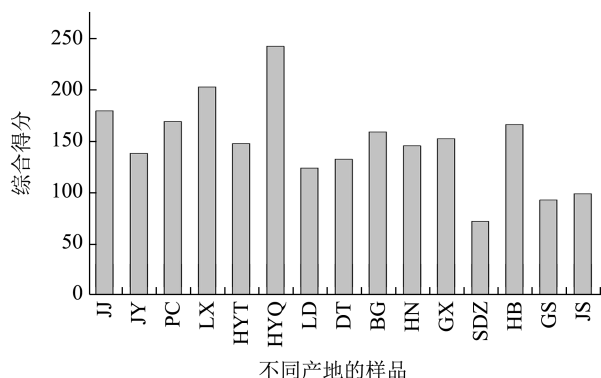


图 5 不同产地青花椒的综合评分

Fig.5 The composite score of *Zanthoxylum schinifolium* Sieb.et Zucc from different regions

由此计算出不同产地青花椒的 CS 值, 如图 5 所示, JS (98.75)、GS (92.60) 和 SDZ (71.76) 的 CS 较低, 都没有超过 100, 相对品质较差; 而 HYQ 的 CS 最高, 高达 242.06, 次为 LX (202.46) 和 JJ (179.23), 说明这 3 种青花椒的综合品质较好。

### 3 结论

本文对比分析了我国主要产区的 15 种青花椒的色泽参数、呈色、呈味物质和活性成分的含量, 并基于多元数据统计分析对其品质进行了综合评价, 结果表明: 不同产地对青花椒的品质具有显著影响 ( $P < 0.05$ ), 其色泽指标、叶绿素、挥发油和花椒麻素含量及 TPC 和 TFC 存在很大差异, 其中叶绿素 a、H $\alpha$ SS 和叶绿素 b 的含量及褐变值是引起这些差异的重要品质指标。总的来说, 来自云贵川渝地区的青花椒, 呈现出较为怡人的感官色泽和较高含量的呈色、呈味物质和活性成分; 其中又以汉源青花椒、泸县青花椒和江津青花椒的综合评分最高, 表明它们的品质较好。本文系统分析和评估了我国主要产区不同青花椒的品质差异, 可为优质青花椒的选择和健康产品的研发提供参考, 后续还将根据产业发展需求进一步深入研究。

### 参考文献

[1] 袁乙平,何雨婕,肖含磊,等.青花椒酱的开发及其货架期

预测[J].食品科学技术学报,2021,39(1):162-170.

- [2] 阚建全,陈科伟,任廷远,等.花椒麻味物质的生理作用研究进展[J].食品科学技术学报,2018,36(1):11-17,44.
- [3] 李翔,张文韬,伍一有,等.青花椒香菇酱夹心香肠的制备及品质研究[J].美食研究,2023,40(4):64-71.
- [4] 中华全国供销合作总社.GH/T 1284-2020 青花椒[S].北京:中国标准出版社,2020.
- [5] ZHANG D, SUN X X, BATTINO M, et al. A comparative overview on chili pepper (*Capsicum* genus) and sichuan pepper (*Zanthoxylum* genus): From pungent spices to pharma-foods [J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 117: 148-162.
- [6] 马尧.不同种质资源花椒主要品质性状差异及其影响因素研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2022.
- [7] 陆敏涛,罗婧,任廷远.花椒麻素改善2型糖尿病小鼠糖脂代谢紊乱的作用[J].现代食品科技,2021,37(3):37-45.
- [8] 梅小飞.红花椒果皮苦味形成的关键苦味物质研究[D].重庆:西南大学,2020.
- [9] 王立艳,陈吉江,安骏,等.混合原料制取花椒油工艺优化及挥发成分分析[J].食品与生物技术学报,2019,38(8):18-23.
- [10] GB/T 30391-2013 花椒[S].
- [11] MAZEWSKI C, LIANG K, DE M E. Comparison of the effect of chemical composition of anthocyanin-rich plant extracts on colon cancer cell proliferation and their potential mechanism of action using *in vitro*, *in silico*, and biochemical assays [J]. Food Chemistry, 2018, 242: 378-388.
- [12] WANG Z R, CHEN X H, ZHONG T, et al. Bioeffector *Pseudomonas fluorescens* ZX elicits biosynthesis and accumulation of functional ingredients in citrus fruit peel: a promising strategy for a more sustainable crop [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2021, 69: 13810-13820.
- [13] 王智荣.锦橙果皮主要活性成分响应采前喷施荧光假单胞菌(*Pseudomonas fluorescens*)ZX的动态变化及其机制研究[D].重庆:西南大学,2022.
- [14] CHUTINTRASRI B, NOOMHORM A. Color degradation kinetics of pineapple puree during thermal processing [J]. LWT-Food Science and Technology, 2007, 40: 300-306.
- [15] CHEN Q L, WANG Z R, YANG B, et al. Determination of main alkylamides responsible for *Zanthoxylum bungeanum* pungency through quantitative analysis of multi-components by a single marker [J]. Food Chemistry, 2022, 396, 133645.
- [16] 代建武,付琪其,黄欢,等.青花椒真空脉动干燥特性及干燥品质工艺优化[J].农业工程学报,2021,37(8):279-287.
- [17] 汪琳,应铁进.番茄果实采后贮藏过程中的颜色动力学模型及其应用[J].农业工程学报,2001,3:118-121.
- [18] 黄山.不同生长期青花椒果皮苦味形成的研究[D].重庆:

- 西南大学,2023.
- [19] 汪洋,阚建全.光照对鲜青花椒干燥过程中叶绿素降解的影响[J].食品科学,2014,35(3):10-15.
- [20] 杨静,赵镭,史波林,等.青花椒香气快速气相电子鼻响应特征及GC-MS物质基础分析[J].食品科学,2015,36(22):69-74.
- [21] 刘琳琪,赵晨曦,李佩娟,等.花椒挥发油超临界CO<sub>2</sub>萃取的工艺优化及GC-MS分析[J].现代食品科技,2020,36(5):73-80.
- [22] 梁亚男,唐毅,赵欠,等.我国不同产地青、红花椒关键质量对比分析[J].江西农业学报,2022,34(3):33-39.
- [23] 李骄阳.不同花椒种质资源麻香品质分析及麻味素合成关键基因筛选[D].泰安:山东农业大学,2023.
- [24] 严雅丽,刘福权,赵志峰,等.花椒羟基- $\alpha$ -山椒素在紫外照射下的降解动力学及其转化机理研究[J].食品与机械,2017,33(9):26-29.
- [25] FENG X Y, HUANG P M, DUAN P, et al. Dynamic *Zanthoxylum* pungency characteristics and their correlation with sanshool composition and chemical structure [J]. Food Chemistry, 2023, 407, 135138.
- [26] WANG Z, LI S, GE S, et al. Review of distribution, extraction methods, and health benefits of bound phenolics in food plants [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2020, 68: 3330-3343.
- [27] 杨成峻,陈明舜,刘成梅,等.花椒果皮多酚类成分鉴定及降血糖活性[J].食品科学,2023,44(2):271-278.
- [28] 刘旭昊.花椒多酚与烷基酰胺相互作用对体外抑制 $\alpha$ -葡萄糖苷酶的影响机制[D].镇江:江苏大学,2022.
- [29] WANG Z R, CHEN X H, GUO Z H, et al. Distribution and natural variation of free, esterified, glycosylated, and insoluble-bound phenolic compounds in brocade orange (*Citrus sinensis* L. Osbeck) peel [J]. Food Research International, 2022, 153, 110958.
- [30] WANG Z R, ZHONG T, MEI X F, et al. Comparison of different drying technologies for brocade orange (*Citrus sinensis*) peels: Changes in color, phytochemical profile, volatile, and biological availability and activity of bioactive compounds [J]. Food Chemistry, 2023, 425, 136539.
- [31] IDLE J, GONZALEZ F. Metabolomics [J]. Cell Metabolism, 2007, 6(5): 348-356.
- [32] ROHART F, GAUTIER B, SINGH A, et al. mixOmics: An R package for omics feature selection and multiple data integration [J]. Plos Computational Biology, 2017, 13, e1005752.