

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. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024020255

YU Yanqi, YANG Mingyuan, LÜ Chunmao, et al. Comprehensive Evaluation of Chestnut Quality Based on Principal Component and Cluster Analysis[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(2): 280–291. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024020255

· 分析检测 ·

基于主成分及聚类分析的板栗品质综合评价

于艳奇, 杨明源, 吕春茂*, 白绍赐, 张群芳, 邹晨阳, 姜 晗

(沈阳农业大学食品学院, 辽宁沈阳 110866)

摘 要: 为建立一种适宜的板栗资源果实品质评价方法, 本研究以 25 个板栗品种为研究对象, 选取 21 项品质指标进行测定, 通过主成分分析结合相关性分析、描述性统计分析的方法筛选影响板栗品质的核心评价指标, 基于熵权法对核心指标赋予权重, 并建立灰色关联度评价模型。结果表明, 不同品种板栗多项指标存在显著差异 ($P<0.05$), 且多个指标间存在显著相关性, 主成分分析确立了水分、直链淀粉与支链淀粉含量的比值 (Ratio of amylose to amylopectin, AA)、总黄酮、好果率、果形指数、硬度、可溶性糖和还原糖为核心指标, 熵权法计算核心指标的权重分别为 14.08%、14.64%、15.64%、7.74%、9.41%、9.11%、18.90%、10.48%。灰色关联度分析结果表明, 丹栗 1 号、丹东 9113 和 qX-005 综合品质列前三位。经聚类分析将 25 个品种板栗分为 4 类, 第一类板栗适宜开发功能性饮品; 第二类板栗适合取仁加工, 制作罐头、果脯等产品, 或加工成板栗粉用于面包、饼干等产品的制作; 第三类板栗可作为优质的食品原料; 第四类板栗适宜炒食, 也适宜作为直售坚果。本研究结果为板栗优质资源筛选及品种的选育提供参考, 也为各品种的综合利用提供了理论依据。

关键词: 板栗, 主成分分析, 熵权法, 灰色关联度分析, 聚类分析

中图分类号: S664.2

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2025)02-0280-12

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024020255

本文网刊:



Comprehensive Evaluation of Chestnut Quality Based on Principal Component and Cluster Analysis

YU Yanqi, YANG Mingyuan, LÜ Chunmao*, BAI Shaoci, ZHANG Qunfang, ZOU Chenyang, JIANG Han

(College of Food Science, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

Abstract: To develop an appropriate method for evaluating the quality of chestnut resources. The 21 quality indicators of 25 chestnut varieties were detected and analyzed. The key indicators of affecting the quality of chestnut were selected through principal component analysis (PCA) coupled with correlation analysis and descriptive statistical analysis. The weights of these key indicators were calculated based on the entropy weight method to construct the gray correlation evaluation model. Our findings revealed notable differences ($P<0.05$) in various quality indicators among the different chestnut varieties and observed significant correlations among several of these indicators. The key indicators identified by PCA included moisture, the ratio of amylose to amylopectin (AA), total flavonoids, good fruiting rate, fruit shape index, hardness, soluble sugar, and reducing sugar. The weights of these key indicators obtained by entropy weighting methods were 14.08%, 14.64%, 15.64%, 7.74%, 9.41%, 9.11%, 18.90%, and 10.48%, respectively. The gray correlation analysis indicated that the overall qualities of the varieties Danli No.1, Dandong 9113, and qX-005 ranked among the top three. The 25 chestnut varieties were categorized into four groups by cluster analysis. The first group was ideal for developing functional beverages, the second was suited for kernel processing into canned food, preserved fruit, or chestnut powder for baked goods. The third group served as a high-quality food ingredient and the fourth group was best for frying and as a direct-sale nut. This study provides valuable insights for selecting superior resources and breeding high-quality chestnut

收稿日期: 2024-02-28

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2023YFD2100400)。

作者简介: 于艳奇 (1997-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 果蔬加工, E-mail: 1547984971@qq.com。

* 通信作者: 吕春茂 (1970-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 果蔬加工, E-mail: Syaulcm70@syau.edu.cn。

varieties, while also laying a theoretical foundation for the comprehensive utilization of each type of chestnut.

Key words: chestnut; principal component analysis; entropy weight method; grey relational degree analysis; cluster analysis

板栗(*Castanea mollissima* Bl.), 又名栗、栗子、风腊, 属壳斗科, 板栗属, 广泛分布在亚洲、欧洲和北美, 其主要成分因品种和地区而异。板栗原产于中国, 在中国栽培已有三千年左右的历史, 全国共 20 多个省份及自治区和直辖市都有栽培板栗的历史^[1], 板栗在我国有“铁杆庄稼、木本粮食、干果之王”的美称, 在国外又被誉为“健康食品”^[2]。我国板栗产量约占世界总产量的 70%^[3], 且品种十分丰富, 多达 300 种以上, 目前中国的板栗栽培面积和产量均居世界第一位^[4]。板栗营养丰富, 淀粉含量较高, 还含有蛋白质、脂肪、多种维生素及矿物质等重要营养素, 具有养胃健脾、活血化瘀、补中益气等功效, 是营养价值和药用价值都很高的坚果。

近年来, 随着人们生活水平的提高, 保健、营养、健康的果品越来越受消费者的关注, 关于果实品质的研究也越来越被重视。武琳霞等^[5]基于多重比较、相关性分析、主成分分析、聚类分析等对我国 5 个主产地的冬枣品质进行了评价, 发现冬枣的优势产区为山东沾化和新疆和田。姜璐等^[6]以 18 个品种蓝靛果为研究对象, 通过相关性分析、主成分分析, 建立一套综合评价蓝靛果品质的方法, 评价发现“谢列娜”“蓓蕾”和“别列里”为品质最好的品种。邵国莉等^[7]以 12 种马铃薯为原料, 结合因子分析和聚类分析对其营养品质进行了综合评价, 筛选出了 5 个适宜南疆地区的优良品种。杜常健等^[8]结合等级评分和因子分析, 对燕山北部的 63 个板栗单株进行了品质评价, 筛选出代号 QX42 单株为最优种质。而多种评价方法的求同存异是食品品质评价方式发展的趋势。主成分分析和灰色关联度分析虽已大量应用于植物品种的评价, 但大都是单独使用, 而主成分分析、熵权法和灰色关联度分析相结合使用在板栗品

种综合评价中却未见报道。通过主成分分析筛选核心指标, 可将大量数据简化, 再通过科学的赋权方法赋予权重, 同时结合灰色关联度分析可提高评价结果的准确性。我国是板栗生产大国, 不同生态区域生长的板栗的成分差异尚未得到充分的研究, 目前对板栗综合品质性状的评价信息也很少, 科学的品质评价方法对种质资源的选育及利用具有重要意义。

本研究对中国北方 3 个板栗主产区的 25 个板栗品种的 21 项指标进行了测定, 结合灰色关联度分析, 将主成分分析理论和熵权法相结合。提出了一种新的板栗品质综合评价方法, 并将其应用于板栗品种的加工适宜性评价。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

25 个品种板栗 基本信息如表 1 所示, 2022 年 10 月板栗成熟期间, 从中国华北地区和东北地区的三个著名板栗主产地收集, 其中河北省的板栗品种由迁西林业局和河北省农林科学院昌黎果树研究所提供; 石油醚、无水碳酸钠、硝酸铝、亚硝酸钠、蒽酮、浓硫酸、葡萄糖、3, 5-二硝基水杨酸、无水亚硫酸钠、酒石酸钾钠 国药集团化学试剂有限公司; 牛血清蛋白(标准品)、考马斯亮蓝 G-250、磷酸 北京索莱宝科技有限公司; 芦丁(98%)、福林酚(生化试剂) 上海源叶生物科技有限公司; 没食子酸、氢氧化钠、苯酚 麦克林国药集团化学试剂有限公司; 淀粉含量检测试剂盒 YX-W-C400 上海优选生物科技有限公司; 直链淀粉含量检测试剂盒 YX-W-ZDF 北农雨禾科技发展有限公司; 除牛血清蛋白、芦丁、福林酚外, 其余试剂均为分析纯。

YP5102 电子天平 上海光正医疗仪器有限公司; 3nh 色差仪 深圳三恩时科技有限公司; CT3-

表 1 供试板栗品种及编号
Table 1 Varieties and numbers of chestnut tested

样品编号	产地	板栗品种	样品编号	产地	板栗品种
1	辽宁丹东	当地	14	河北迁西	qD-002
2	辽宁丹东	金华	15	河北迁西	qD-006
3	辽宁丹东	9113	16	河北昌黎	C-23
4	辽宁丹东	利平	17	河北昌黎	C-65
5	辽宁丹东	丹栗1号	18	河北昌黎	Q-XS
6	河北迁西	qC-001	19	河北昌黎	H7-3
7	河北迁西	qC-002	20	河北昌黎	燕晶
8	河北迁西	qC-003	21	河北昌黎	燕兴
9	河北迁西	qX-001	22	河北昌黎	燕2号
10	河北迁西	qX-002	23	河北昌黎	燕栗1号
11	河北迁西	qX-003	24	河北昌黎	燕山早丰
12	河北迁西	qX-004	25	河北昌黎	昌黎105
13	河北迁西	qX-005			

10K 质构仪 美国 BROOKFIELD 公司; MNT-150T 游标卡尺 上海美耐特实业有限公司; AFD-14L 马弗炉 河南奥菲达仪器设备有限公司; XMTD-8222 电热恒温水浴锅 常州国华电器有限公司; ENO 酶标仪 美国伯腾仪器有限公司; 5804R 高速冷冻离心机 美国 Thermo Fisher Scientific 公司; 101-1S 电热恒温鼓风干燥箱 上海力辰仪器科技有限公司; FD-1A-50 冷冻干燥机 北京博医康实验仪器有限公司; PAL-1 数显糖度计 日本 ATAGO 公司; DW-86L490 超低温立式冰箱 青岛海尔特种电器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 原料预处理 各品种均收集 2500 g 以上, 收获的板栗鲜果于阴凉处放置 3 d, 再放入 2~4 °C 冷柜中预冷 1 d。每个板栗品种各取 500 g, 去除坚果外壳和种皮后将果仁切成小块, 放入 -80 °C 的冰箱中冷冻 24 h, 然后将冷冻后的样品放入真空冷冻干燥机中干燥 24 h 以除去水分, 将干燥后的样品磨成粉, 过 80 目筛, 2~4 °C 密封保存备用。另一部分鲜果用于色度、硬度、水分等指标的测定。

1.2.2 感官品质指标的测定

1.2.2.1 色度的测定 使用色差仪对板栗鲜果的果仁颜色进行测量, 每个品种取 10 颗板栗, 每颗栗子选择 3 个点测量, 结果以 L^* 、 a^* 、 b^* 数值表示。取平行试验的均值作为最终报告结果。

1.2.2.2 硬度的测定 使用质构仪测定栗仁硬度, 参考胡嘉琪^[9]的方法稍作改动。测定在 TPA 模式下进行, 使用直径为 5 mm 的圆柱形探头, 参数设置如下: 预留高度 40 mm, 测前速度 1.0 mm/s, 测试速度 1.0 mm/s, 测试深度 10 mm, 停留时间 2 s, 循环两次, 根据两次压缩所得出的特征曲线得出相应的硬度值。每个品种选择 10 颗板栗, 每颗板栗取 4 个点进行测定, 去除最大值和最小值后取平均值。

1.2.2.3 果形指数 每个品种随机选取 10 颗板栗, 使用游标卡尺测量板栗坚果的横径和纵径^[10], 果形指数为纵径与横径之比。试验重复 3 次。

1.2.3 营养品质指标的测定

1.2.3.1 灰分含量的测定 采用灼烧法, 参照 GB/T 5009.4-2016《食品中灰分的测定》进行。

1.2.3.2 脂肪含量的测定 采用索氏抽提法, 参照 GB/T 5009.6-2016《食品中脂肪的测定》进行。

1.2.3.3 总淀粉、支链淀粉、直链淀粉 分别用试剂盒测定总淀粉和直链淀粉的含量。支链淀粉含量通过计算总淀粉与直链淀粉含量之差得到。直链淀粉与支链淀粉含量之比记为 AA。

1.2.3.4 还原糖含量的测定 采用 3,5-二硝基水杨酸(DNS)比色法。标准曲线的制作参考段振军^[11]的方法, 并稍加改动, 以吸光值为横坐标(X), 葡萄糖含量为纵坐标(Y), 绘制还原糖标准曲线, 得到回归方

程为 $Y=0.1814x+0.0065$ ($R^2=0.9992$)。称取 1 g 板栗粉样品, 置于锥形瓶中, 加入 50 mL 蒸馏水, 于 50 °C 水浴锅中浸提 30 min, 取出后冷却至室温, 过滤后收集提取液。取 0.2 mL 提取液, 放入 EP 管中, 加入 0.15 mL DNS, 漩涡混匀, 将其置于沸水浴中加热 5 min, 取出后立即放入冷水流中冷却, 随后用蒸馏水定容至 1 mL。以 0.2 mL 蒸馏水加 0.15 mL DNS 组为空白对照, 于 540 nm 波长下测吸光度, 重复测定 3 次, 代入标准曲线计算得到还原糖含量。

1.2.3.5 可溶性糖含量的测定 采用蒽酮硫酸比色法, 参照马琴国等^[12]和徐美蓉等^[13]的方法进行。

1.2.3.6 可溶性蛋白含量的测定 采用考马斯亮蓝比色法。以牛血清蛋白为标准品, 参考张午燕^[14]的方法绘制标准曲线, 得到回归方程为 $Y=0.0043x+0.0112$ ($R^2=0.999$)。取 0.5 g 板栗粉样品, 加 20 mL 蒸馏水, 置于 37 °C 水浴锅中保温 50 min, 随后离心取上清液, 将上清液稀释 10 倍作为待测液, 取 1 mL 待测液加入 5 mL 考马斯亮蓝溶液, 静置 5 min 后于 595 nm 波长下测量吸光度, 重复测定 3 次, 以对照组作为空白调零, 将吸光度带入标准曲线计算板栗样品中的可溶性蛋白含量。

1.2.3.7 可溶性固形物含量的测定 将板栗果仁切块捣碎后直接挤汁, 然后用 PAL-1 型数显糖度计进行测定。

1.2.3.8 总酚含量的测定 总酚的提取及测定参考阚黎娜^[15]的方法进行。以没食子酸为标准品制作标准曲线, 得到回归方程为 $Y=0.0098x+0.0006$ ($R^2=0.999$)。将数值带入标准曲线计算各品种板栗样品的总酚含量。

1.2.3.9 总黄酮含量的测定 总黄酮的提取方法同 1.2.3.8。参考黄雪薇等^[16]和阚黎娜^[15]的方法。以芦丁为标准品绘制标准曲线, 得到回归方程为 $Y=0.0021x+0.0012$ ($R^2=0.9998$)。将数值带入标准曲线计算各品种板栗样品的总黄酮含量。

1.2.4 加工品质指标的测定

1.2.4.1 水分含量的测定 采用直接干燥法, 参照 GB/T 5009.3-2016《食品中水分的测定》进行。

1.2.4.2 好果率 每个品种随机取 100 颗板栗, 除去霉变、褐变、虫蛀等栗果后, 计算百分比。测定重复三次取平均值。

1.2.4.3 单果重、出仁率 各品种随机取 30 颗板栗鲜果, 使用电子天平测量总坚果重量, 计算得出单粒重。经过人工去壳去皮后, 再次称量总果仁重量, 测量精度为 0.01 g。根据公式(1)计算出仁率。测定重复三次取平均值。

$$\text{出仁率}(\%) = \frac{\text{去壳去皮后板栗仁重量}}{\text{板栗总重量}} \times 100 \quad \text{式(1)}$$

1.2.5 评价指标的筛选 采用主成分分析法, 结合主

成分载荷矩阵和相关性分析及描述性统计分析的结果,筛选出影响板栗品质的核心评价指标。选择核心评价指标应该遵循以下原则^[17]:第一,用少量指标来代表所有指标的绝大部分信息;第二,核心指标要具有相对的独立性;第三,各指标要具有一定的变异系数。

1.2.6 熵权法确定权重 假设给定了 n 个样本, m 个指标。构造原始数据矩阵 $A = (a_{ij})_{n \times m}$, 其中, a_{ij} 表示第 i 个样品的第 j 个指标值。

在适宜的范围内, 指标值越大果实的评价越好的指标为正向指标; 指标值越小评价越好的指标为负向指标^[18], 针对不同的指标需要采用不同的算法进行标准化处理。对于中间型指标, 需要先进行转化再进行标准化处理。根据公式(2)将中间型指标转化为正向指标。

$$x^{\wedge} = \text{Max} - |x_i - x_{\text{best}}| \quad \text{式 (2)}$$

式中: $x^{\wedge}$ 为正向化处理后的数据; x_i 为原始数据; x_{best} 为指标的中位数。

标准化处理见公式(3)和公式(4)。

若为正向指标:

$$Y_{ij} = \frac{X_{ij} - \min X_{ij}}{\max X_{ij} - \min X_{ij}} \quad \text{式 (3)}$$

若为负向指标:

$$Y_{ij} = \frac{\min X_{ij} - X_{ij}}{\max X_{ij} - \min X_{ij}} \quad \text{式 (4)}$$

式中: Y_{ij} 为标准化处理后数据; X_{ij} 为原始数据, 第 i 个样品第 j 个指标值; $\max X_{ij}$ 为指标的最大值; $\min X_{ij}$ 为指标的最小值。

求各评价对象在各指标下的比值, 即第 i 个评价对象关于第 j 个指标值的比重(P_{ij})。

$$P_{ij} = \frac{Y_{ij}}{\sum_{i=1}^n Y_{ij}} \quad (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m) \quad \text{式 (5)}$$

求各指标的熵值(E_j)。

$$E_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n \ln P_{ij} \quad (j = 1, 2, \dots, m) \quad \text{式 (6)}$$

其中, $E_j \geq 0$ 。

定义信息效用值(d_j)。

$$d_j = 1 - E_j \quad (j = 1, \dots, m) \quad \text{式 (7)}$$

此时效用值越大, 权重越大, 将信息效用值进行归一化, 得到熵权(W_j)。

$$W_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^m d_j} \quad (j = 1, \dots, m) \quad \text{式 (8)}$$

1.2.7 灰色关联度计算 设有 m 个评价对象, 每个评价对象有 n 个评价指标, 第 i 个评价对象的第 j 个指标为 x_{ij} ($i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$)。

首先设置参考序列 $x_0(j)$ (母序列), 板栗样品及评价指标组成的序列为子序列 $x_i(j)$, 构造原始矩阵 X 。参考序列由理想参考值组成, 正向指标选择最大

值作为理想值 x_0 , 逆向指标选择最小值作为理想值 x_0 , 中间型指标选择中位数作为理想值 x_0 。

正向指标数据标准化处理按公式(9)计算, 逆向指标采用公式(10)计算, 中间型指标采用公式(11)计算。

$$R_i(j) = \frac{X_i(j)}{X_0(j)} \quad \text{式 (9)}$$

$$R_i(j) = \frac{X_0(j)}{X_i(j)} \quad \text{式 (10)}$$

$$R_i(j) = \frac{X_0(j)}{X_0(j) + |X_0(j) - X_i(j)|} \quad \text{式 (11)}$$

式中: $X_0(j)$ 是参试样品的理想值; $X_i(j)$ 是板栗各指标的原始数据; 其中字母 i 代表第 i 个参试样品, j 表示板栗样品的第 j 个评价指标。

以最优指标集为参考序列, 各评价对象的指标为比较序列, 根据公式(12)计算灰色关联系数。

$$r_{ij} = \frac{\min_i \min_j |x_{0j} - x_{ij}| + \rho \max_i \max_j |x_{0j} - x_{ij}|}{|x_{0j} - x_{ij}| + \rho \max_i \max_j |x_{0j} - x_{ij}|} \quad (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n) \quad \text{式 (12)}$$

式中: r_{ij} 为 x_i 对 x_0 关于 j 指标的关联系数; $|x_{0j} - x_{ij}|$ 为绝对差值; $\min_i \min_j |x_{0j} - x_{ij}|$ 为两级最小差 (x_i 与 x_0 的最小绝对值差); $\max_i \max_j |x_{0j} - x_{ij}|$ 为两级最大差 (x_i 与 x_0 的最大绝对值差); ρ 为分辨系数 (0.5)。

加权关联度(a_i)按公式(13)计算。

$$a_i = \sum_{j=1}^n w_j \times r_{ij} \quad (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n) \quad \text{式 (13)}$$

1.3 数据处理

每个样品测定 3 个平行, 所有实验均为 3 个重复, 实验数据用平均数±标准差 (Mean±SD) 表示。利用 Excel 2021 汇总数据。采用 SPSS 26.0 进行方差分析和主成分分析。采用 Duncan 多重比较法检验方差分析的显著性 ($P < 0.05$)。采用 Origin 2021 软件制作相关性分析和聚类分析热图。

2 结果与分析

2.1 板栗感官品质指标分析

感官品质指标是对食品进行直观性评价的决定性因素, 包括颜色、形状、质地等。如表 2 所示, 色泽上, 板栗果仁的 L^* 值较高, 颜色偏亮, a^* 值较小, 呈现微红色, b^* 值较大, 整体上颜色偏黄。变异系数可以反应样本之间的差异, 颜色指标中只有 L^* 值的变异系数较小, 品种间差异不显著, 而 a^* 值和 b^* 值的变异系数均大于 10%, 品种间有显著的差异, 其中 a^* 值的变异系数最大, 为 96.8%, 说明其数据离散程度大。 a^* 值最大的品种为 qX-001, 最小的品种为金华, 金华、C-65、燕栗 1 号和燕山早丰的 a^* 值为负数, 这 4 种板栗的 b^* 值也较低, 颜色偏淡。

形状上, 板栗的横径、纵径、果形指数变幅分别

表 2 不同品种板栗感官特性

Table 2 Sensory characteristics of different varieties of chestnut

品种	L^*	a^*	b^*	硬度(N)	纵径(mm)	横径(mm)	果形指数
1	82.53±0.87 ^{cd}	0.62±0.10 ^{efghi}	25.04±0.28 ^{ijk}	26.58±1.18 ^{ab}	26.68±1.17 ^{cdef}	27.09±0.55 ^{hijk}	0.98±0.02 ^{ab}
2	81.67±2.47 ^d	-0.27±0.25 ⁿ	23.94±0.29 ^{ijkl}	18.28±1.42 ^b	38.06±1.11 ^a	42.29±3.25 ^a	0.91±0.06 ^{cdefg}
3	74.87±2.67 ^e	1.08±0.20 ^{cd}	33.11±1.28 ^{cd}	24.47±1.04 ^{abcd}	28.40±2.20 ^c	35.32±1.43 ^{bc}	0.81±0.04 ^{kl}
4	87.22±1.86 ^{ab}	0.33±0.15 ^{ghijk}	23.60±0.56 ^{kl}	23.41±0.69 ^{bcd}	32.71±1.63 ^b	37.22±2.24 ^b	0.88±0.01 ^{defghij}
5	86.22±0.77 ^b	0.20±0.13 ^{ijklm}	29.27±0.92 ^{efg}	23.64±1.54 ^{bcdef}	36.89±1.84 ^a	36.25±3.31 ^{bc}	1.02±0.04 ^a
6	86.22±0.77 ^b	0.78±0.04 ^{cdefg}	33.45±1.83 ^{bcd}	24.40±1.50 ^{abcd}	25.06±0.21 ^{fghij}	26.71±0.62 ^{ijk}	0.94±0.03 ^{bcd}
7	85.59±0.62 ^b	1.35±0.13 ^{ab}	38.48±1.13 ^a	19.54±0.83 ^b	23.98±1.62 ^{hijk}	25.40±1.79 ^{kl}	0.95±0.01 ^{bcd}
8	90.41±6.34 ^a	0.31±0.07 ^{hijkl}	32.49±1.70 ^{cd}	24.25±0.68 ^{abcde}	23.60±0.48 ^{ijk}	27.26±0.68 ^{hijk}	0.87±0.04 ^{efghijk}
9	85.06±0.64 ^{bc}	1.52±0.46 ^a	35.59±0.92 ^b	19.45±1.71 ^b	22.89±0.58 ^{kl}	23.46±2.09 ^{lm}	0.98±0.07 ^{ab}
10	85.98±0.49 ^b	1.09±0.30 ^{bcd}	32.87±1.81 ^{cd}	24.48±1.63 ^{abcd}	26.42±0.74 ^{cdefg}	26.60±0.14 ^{ijk}	0.99±0.03 ^{ab}
11	86.86±1.03 ^b	0.99±0.20 ^{bcd}	33.70±1.86 ^{bc}	20.69±3.93 ^{fgh}	27.31±1.04 ^{cde}	30.85±1.34 ^{ef}	0.88±0.01 ^{cdefghi}
12	86.00±0.75 ^b	1.22±0.78 ^{abc}	25.93±2.40 ^{ij}	24.51±4.00 ^{abcd}	25.81±1.88 ^{defgh}	28.56±0.98 ^{fghij}	0.90±0.04 ^{cdefg}
13	86.07±0.58 ^b	0.72±0.16 ^{defgh}	28.62±2.92 ^{fgh}	23.85±2.78 ^{qab}	21.55±1.05 ^l	22.82±1.34 ^m	0.95±0.08 ^{bc}
14	85.78±1.17 ^b	0.74±0.19 ^{defgh}	31.54±1.01 ^{cde}	24.58±2.11 ^{abcd}	24.84±0.53 ^{fghijk}	28.91±0.77 ^{fghi}	0.86±0.04 ^{efghijk}
15	86.71±0.58 ^b	0.82±0.32 ^{cdef}	29.43±0.96 ^{efg}	20.07±0.27 ^{gh}	23.53±0.57 ^{ijk}	25.80±0.35 ^{kl}	0.91±0.01 ^{cdef}
16	87.28±2.06 ^{ab}	0.13±0.09 ^{klmn}	25.72±1.19 ^{ij}	22.97±0.31 ^{cdefg}	24.39±0.04 ^{fghijk}	32.09±1.23 ^{de}	0.76±0.03 ^l
17	86.75±0.91 ^b	-0.16±0.11 ^{mn}	28.46±1.06 ^{gh}	25.03±2.67 ^{abc}	27.76±0.30 ^{cd}	34.01±0.62 ^{cd}	0.82±0.02 ^{kl}
18	87.71±0.13 ^{ab}	0.08±0.07 ^{klmn}	26.34±1.15 ^{hi}	21.13±1.48 ^{defgh}	25.53±0.92 ^{efghi}	28.01±0.84 ^{ghijk}	0.91±0.02 ^{cdef}
19	87.82±0.64 ^{ab}	0.03±0.10 ^{klmn}	30.04±1.28 ^{efg}	23.01±0.99 ^{cdefg}	25.83±1.05 ^{defgh}	28.34±1.86 ^{fghij}	0.91±0.03 ^{cdef}
20	85.93±0.80 ^b	0.36±0.18 ^{ghijk}	29.91±1.62 ^{efg}	23.09±0.56 ^{bcd}	27.17±0.79 ^{cde}	29.68±0.62 ^{efg}	0.92±0.02 ^{cdef}
21	85.72±0.35 ^b	0.62±0.19 ^{efghi}	31.06±0.67 ^{def}	27.23±1.13 ^a	24.77±0.80 ^{fghijk}	30.19±0.26 ^{efg}	0.82±0.02 ^{ijkl}
22	87.36±0.43 ^{ab}	0.14±0.08 ^{klmn}	25.17±1.53 ^{ij}	20.91±0.79 ^{efgh}	24.90±0.75 ^{fghijk}	30.23±1.31 ^{efg}	0.82±0.02 ^{hijk}
23	86.83±1.19 ^b	-0.07±0.03 ^{klmn}	22.16±0.58 ^l	23.64±1.47 ^{bcd}	27.77±0.83 ^{cd}	31.82±0.76 ^{de}	0.87±0.01 ^{efghij}
24	87.58±0.81 ^{ab}	-0.13±0.06 ^{lmn}	22.63±1.00 ^{kl}	25.80±2.20 ^{abc}	23.05±0.08 ^{kl}	27.30±0.82 ^{hijk}	0.84±0.02 ^{efghijk}
25	87.21±0.60 ^{ab}	0.52±0.09 ^{fghij}	24.42±0.26 ^{ijkl}	20.18±0.60 ^{gh}	26.34±0.38 ^{defg}	29.64±1.33 ^{efgh}	0.89±0.03 ^{cdefgh}
Mean	85.90	0.52	28.92	23.01	26.61	29.83	0.90
Max	90.41	1.52	38.48	27.23	38.06	42.29	1.02
Min	74.87	-0.27	22.16	18.28	21.55	22.82	0.76
SD	2.83	0.50	4.34	2.36	3.97	4.49	0.06
CV(%)	3.30	96.80	15.02	10.26	14.91	15.04	7.10

注: 同列不同字母表示存在显著性差异($P<0.05$), 表3~表5同; CV: 变异系数。

为 22.82~42.29 mm、21.55~38.06 mm、0.76~1.02, 对比不同品种板栗的果形可以发现, 横径和纵径的变异程度均较大, 变异系数分别为 15.04%、14.91%, 但果形指数之间差异较小, 变异系数为 7.10%。整体上辽宁丹东地区的板栗品种体积均较大, 接近圆形, 河北昌黎地区偏低。纵径、横径最大的品种均为金华, 显著高于其他品种, 最小的品种为 qX-005。丹东地区处于栗树栽培区的北缘, 板栗品种以丹东栗和日本栗为主, 金华由日本引入我国辽宁省, 因产量高、抗性强逐渐成为了丹东地区的主栽品种^[19]。而日本多喜欢个大、果肉松柔的板栗品种, 所以与我国受欢迎的燕山板栗具有较大差距。

硬度反映了果肉的整体致密程度和坚实程度, 是食品评价的重要指标, 本研究测得的生板栗果仁的硬度为 18.28~27.23 N, 平均值为 23.01 N, 硬度最小的品种是金华, 该品种体型大质地软, 硬度最大的品种为燕兴, 已有报告称该品种适合炒食^[20], 熟化后栗仁的硬度会有所下降。

2.2 板栗营养品质指标分析

对 25 个板栗品种主要营养成分的测定结果如表 3 所示, 不同板栗品种灰分、粗脂肪、可溶性蛋

白、可溶性糖、还原糖、可溶性固形物、总酚及总黄酮含量差异明显。灰分含量为 1.74%~2.79%, 脂肪含量为 0.20%~13.70%, 淀粉含量 68.78%~85.25%, 支链淀粉含量为 30.13%~48.73%, 可溶性蛋白含量为 2.41%~5.55%, 还原糖含量为 1.35%~2.82%, 可溶性糖含量为 12.80%~39.89%, 可溶性固形物含量为 13.53°Brix~38.80°Brix, 总酚含量为 0.52~1.19 mg/g, 总黄酮含量为 0.76~1.95 mg/g。主要成分变异系数为 5.64%~82.72%, 其中脂肪含量变异系数最大。变异分析表明, 不同品种间果实性状存在一定差异。品种间性状表现的多样性多为遗传差异所致, 但生长条件及栽培管理也有一定的影响^[21]。

食物中的灰分主要指矿物质和无机盐等, 25 个品种中灰分含量最高的是金华, 最低品种为 qC-002, 平均值为 2.18%, 与 Yang 等^[22]的研究结果一致, 灰分含量与土耳其板栗相似。品种间的脂肪含量差异较大, 脂肪含量最高的品种为 C-23, 达 13.7%, 其次是燕晶为 12.94%, 而金华仅为 0.2%, 脂肪含量较低的品种还有当地(0.71%)、9113(0.96%)、丹栗 1 号(0.87%), 辽宁丹东地区的板栗品种脂肪含量显著低于其他地区, 多数品种的脂肪含量在 1.5%~

表 3 不同品种板栗营养特性

Table 3 Nutritional characteristics of different varieties of chestnut

品种	灰分(% , DW)	脂肪(% , DW)	还原糖(% , DW)	可溶性糖(% , DW)	可溶性蛋白(% , DW)	可溶性固形物(°Brix)	总酚(mg/g)	总黄酮(mg/g)
1	2.27±0.05 ^{def}	0.71±0.02 ^v	1.35±0.04 ^m	25.13±1.61 ^g	3.21±0.06 ^{kl}	13.53±0.67 ^m	0.84±0.02 ^s	1.23±0.03 ^e
2	2.79±0.04 ^a	0.20±0.02 ^w	1.68±0.04 ^{ijk}	37.37±1.96 ^b	3.18±0.05 ^{kl}	22.73±0.80 ^{ij}	1.00±0.03 ^{cd}	1.46±0.07 ^d
3	2.44±0.46 ^{bcd}	0.96±0.03 ^t	1.62±0.06 ^{kl}	34.20±1.15 ^c	3.42±0.10 ^{ghijk}	28.27±0.25 ^d	0.93±0.03 ^{ef}	1.84±0.06 ^b
4	2.16±0.03 ^{efgh}	2.72±0.04 ^m	1.76±0.02 ^{ghi}	33.07±0.23 ^{cd}	3.63±0.02 ^{efg}	15.93±0.58 ^l	0.97±0.04 ^{de}	1.70±0.10 ^c
5	2.47±0.08 ^{bc}	0.87±0.02 ^u	1.92±0.04 ^c	33.04±2.83 ^{cd}	3.25±0.08 ^{ijk}	22.77±0.12 ^{ij}	1.03±0.02 ^{bc}	1.69±0.02 ^c
6	1.97±0.06 ^{hijk}	4.00±0.04 ^j	1.77±0.03 ^{fgh}	23.28±1.00 ^{gh}	3.47±0.05 ^{ghij}	28.30±0.72 ^d	0.75±0.02 ^b	1.01±0.02 ^{ij}
7	1.81±0.01 ^{kl}	4.35±0.02 ^j	1.75±0.03 ^{hi}	20.39±0.40 ^j	3.62±0.39 ^{fgh}	35.93±1.51 ^b	0.83±0.01 ^s	1.71±0.09 ^c
8	2.18±0.01 ^{efg}	1.88±0.02 ^r	1.85±0.04 ^{cdef}	12.80±0.26 ⁿ	3.50±0.05 ^{ghi}	23.63±0.21 ^{hi}	0.95±0.02 ^e	1.72±0.01 ^c
9	1.94±0.05 ^{ijk}	4.49±0.03 ^b	1.56±0.04 ^l	39.89±0.53 ^a	3.26±0.11 ^{ijk}	38.80±0.10 ^a	0.89±0.05 ^f	1.37±0.13 ^d
10	2.11±0.02 ^{fghi}	4.73±0.03 ^s	1.83±0.01 ^{defg}	13.86±0.67 ^{lmn}	3.43±0.23 ^{ghijk}	29.10±0.17 ^d	0.71±0.01 ^{hi}	1.01±0.01 ^{ij}
11	1.74±0.01 ^l	6.38±0.03 ^f	1.72±0.04 ^{hi}	28.09±0.97 ^f	3.36±0.10 ^{hijk}	34.97±0.35 ^b	0.60±0.03 ^k	0.87±0.06 ^k
12	1.98±0.16 ^{hijk}	4.02±0.03 ^j	2.03±0.10 ^b	15.32±0.37 ^{lm}	3.23±0.14 ^{ijk}	25.93±1.68 ^{efg}	0.81±0.02 ^s	1.08±0.06 ^{fghi}
13	2.62±0.08 ^{ab}	1.56±0.04 ^s	2.82±0.04 ^a	30.09±0.95 ^{ef}	3.58±0.14 ^{fgh}	29.17±1.59 ^d	0.83±0.02 ^s	1.61±0.03 ^c
14	1.86±0.03 ^{kl}	2.95±0.04 ^l	1.86±0.03 ^{cde}	30.24±2.57 ^{ef}	3.24±0.21 ^{ijk}	35.27±1.81 ^b	0.71±0.02 ⁱ	1.05±0.03 ^{hi}
15	1.86±0.05 ^{kl}	3.80±0.07 ^k	2.03±0.02 ^b	21.06±1.25 ^{hij}	2.41±0.12 ^m	32.70±0.30 ^c	0.83±0.01 ^s	1.07±0.10 ^{fghi}
16	2.04±0.07 ^{ghij}	13.70±0.02 ^a	1.63±0.03 ^{kl}	15.89±0.92 ^{kl}	2.97±0.18 ^l	24.40±0.17 ^{gh}	0.52±0.01 ^l	0.76±0.04 ^l
17	2.42±0.03 ^{cd}	2.41±0.02 ^o	1.71±0.06 ^{hij}	13.37±0.16 ^{mn}	3.80±0.12 ^{def}	21.70±0.01 ^{jk}	1.00±0.02 ^{cd}	1.42±0.03 ^d
18	2.35±0.07 ^{cde}	6.48±0.02 ^e	1.60±0.04 ^l	21.41±0.44 ^{hij}	4.06±0.17 ^{bc}	25.70±0.35 ^{efg}	0.64±0.02 ^j	1.18±0.01 ^{efg}
19	2.16±0.03 ^{efgh}	2.62±0.02 ⁿ	1.78±0.03 ^{efgh}	17.55±0.55 ^k	3.67±0.12 ^{efg}	26.73±1.71 ^e	0.96±0.01 ^{de}	1.19±0.03 ^{ef}
20	2.13±0.03 ^{fghi}	12.94±0.04 ^b	2.05±0.04 ^b	20.29±0.37 ^j	3.55±0.18 ^{fgh}	26.53±0.60 ^{ef}	0.99±0.02 ^{cd}	0.90±0.06 ^k
21	2.41±0.03 ^{cd}	2.31±0.02 ^p	1.85±0.02 ^{cdef}	23.26±0.38 ^{gh}	4.00±0.08 ^{bcd}	26.03±0.72 ^{ef}	1.19±0.03 ^a	1.95±0.03 ^a
22	2.02±0.04 ^{ghij}	7.59±0.04 ^d	1.90±0.01 ^{cd}	31.68±2.86 ^{de}	3.99±0.05 ^{bcd}	28.33±0.12 ^d	0.99±0.04 ^{cd}	1.23±0.12 ^e
23	2.29±0.03 ^{cdef}	8.73±0.04 ^c	2.06±0.10 ^b	20.86±1.13 ^{ij}	3.88±0.14 ^{cde}	20.87±0.31 ^k	1.06±0.02 ^b	0.95±0.01 ^{jk}
24	2.31±0.01 ^{cdef}	2.19±0.04 ^q	1.74±0.05 ^{hi}	19.77±1.17 ^j	5.55±0.04 ^a	24.13±0.85 ^{hi}	0.94±0.01 ^e	1.13±0.03 ^{efgh}
25	2.27±0.04 ^{def}	2.63±0.04 ⁿ	1.70±0.02 ^{hij}	23.00±0.73 ^{ghi}	4.17±0.03 ^b	25.03±0.83 ^{fgh}	0.93±0.01 ^e	1.09±0.03 ^{fghi}
Mean	2.18	4.21	1.82	24.20	3.58	26.66	0.88	1.29
Max	2.79	13.70	2.82	39.89	5.55	38.80	1.19	1.95
Min	1.74	0.20	1.35	12.80	2.41	13.53	0.52	0.76
SD	0.26	3.48	0.27	7.76	0.56	5.90	0.16	0.34
CV(%)	11.94	82.72	14.60	32.09	15.67	22.12	17.84	26.07

4.8% 之间。可溶性蛋白含量最高的品种是燕山早丰,最低的是 qD-006,平均值为 3.58%。可溶性糖和可溶性固形物直接影响板栗的口感与风味,通常用来评价果实甜度,板栗各品种间的可溶性糖和可溶性固形物含量具有显著的差异,含量最高的品种均为 qX-001,表明该品种甜度较高,口感较好,可溶性糖平均值为 24.20%,可溶性固形物平均值为 26.66°Brix,与李颖等^[23]的研究结果一致。还原糖含量最高的品种为 qX-005,最低的品种为丹东的当地,平均值为 1.82%。总酚和总黄酮含量最高的品种为燕兴,最低品种为 C-23,平均值分别为 0.88 mg/g 和 1.29 mg/g,与 Xu 等^[24]的研究结果一致。

板栗是以淀粉为主的坚果,淀粉含量是决定板栗食用品质的主要因素,淀粉中直链淀粉与支链淀粉的比例会影响到食品的口感和淀粉的物化特性。如表 4 所示,板栗的平均淀粉含量为 76.03%,变异系数为 5.64%,表明淀粉含量在不同品种间差异较小,性状较为稳定。淀粉含量最高的品种为 9113,该品种的支链淀粉含量也最高;淀粉含量最低的品种为昌黎 105,该品种的支链淀粉含量低于直链淀粉,大部分品种的支链淀粉含量均高于直链淀粉。直链淀粉平均含量为 36.81%,支链淀粉为 39.22%,直链淀粉

与支链淀粉比值越小则板栗的糯性越强^[25-26]。

2.3 板栗加工品质指标分析

选定了 4 个加工品质指标:出仁率、好果率、水分和单果重,这些指标对加工适宜性的选择有重要的影响,所测的 25 个板栗品种加工品质基础数据的差异分析结果见表 5。好果率是品质筛选的第一步,本研究中好果率在 77.67%~97.67% 之间,变异系数为 5.64%,平均值为 91.27%,与郭豪宁^[27]的研究结果接近。出仁率在 77.41%~86.91% 之间,变异系数为 2.66%,离散程度较小。水分在各品种间差异较大,含量在 35.64%~62.58% 之间,平均值为 48.69%,与多项研究的结果一致^[28-29],除了 qX-001、qX-003、qD-002,其余品种含水量均大于 40%,由于板栗的含水量较高,采后贮藏中极易失水,其水分含量变化不仅会影响果实的感官品质,还会导致果实内部质地和营养物质的劣变。单果重的变异系数达 43.53%,最大值与最小值间相差 5 倍,说明本研究所选择的品种具有明显差异,通常单果重越高越有利于加工,单果重较高的品种有金华、9113、利平、丹栗 1 号,单果重较小品种有 qX-005、qD-006、qC-001、qC-002、qX-001,有非常明显的区域特性。

表 4 不同品种板栗淀粉含量特性

Table 4 Starch content characteristics of different varieties of chestnut

品种	淀粉(% DW)	直链淀粉(% DW)	支链淀粉(% DW)	AA(% DW)
1	74.96±5.85 ^{bcdefgh}	38.26±1.38 ^{cdef}	36.70±4.49 ^{defghi}	104.25±0.94 ^{bcde}
2	69.72±1.42 ^{gh}	36.13±1.51 ^{fg}	33.59±2.62 ^{fghi}	107.55±1.31 ^{abcde}
3	85.25±3.57 ^a	36.59±1.37 ^{ef}	48.66±4.20 ^a	75.19±0.81 ^{fgh}
4	80.72±2.93 ^{abcd}	35.16±1.57 ^{fgh}	45.56±1.54 ^{abc}	77.18±0.22 ^{fgh}
5	77.07±3.25 ^{bcdefg}	33.38±0.63 ^{ghi}	43.69±2.73 ^{abcd}	76.40±0.37 ^{fgh}
6	78.38±2.49 ^{abcdef}	32.41±1.63 ^{hij}	45.98±2.21 ^{ab}	70.48±0.55 ^{gh}
7	69.92±1.93 ^{gh}	39.79±2.33 ^{bcd}	30.13±0.94 ⁱ	132.05±1.09 ^a
8	74.17±7.38 ^{cdefgh}	37.99±0.96 ^{cdef}	36.18±8.17 ^{defghi}	104.98±2.56 ^{abcde}
9	79.61±2.48 ^{abcde}	41.41±0.90 ^{ab}	38.20±1.92 ^{cdefgh}	108.42±0.49 ^{abcde}
10	72.70±3.59 ^{defgh}	36.52±1.37 ^{ef}	36.19±4.37 ^{defghi}	100.91±1.48 ^{bcde}
11	77.13±6.73 ^{bcdefg}	30.22±1.53 ^j	46.90±5.48 ^{ab}	64.43±0.53 ^h
12	70.81±3.70 ^{fgh}	35.97±0.56 ^{fg}	34.85±3.48 ^{efghi}	103.21±1.03 ^{bcde}
13	76.22±4.16 ^{bcdefgh}	42.96±1.89 ^a	33.26±4.13 ^{ghi}	129.18±1.95 ^a
14	75.05±4.68 ^{bcdefgh}	40.20±0.75 ^{abc}	34.85±5.36 ^{efghi}	115.36±2.19 ^{abcd}
15	75.67±1.87 ^{bcdefgh}	37.66±1.76 ^{cdef}	38.01±3.63 ^{cdefgh}	99.07±1.50 ^{cdef}
16	82.75±3.55 ^{ab}	37.74±3.03 ^{cdef}	45.01±5.88 ^{abc}	83.86±1.62 ^{efgh}
17	76.15±0.76 ^{bcdefgh}	31.11±1.46 ^{ij}	45.04±0.84 ^{abc}	69.07±0.44 ^{gh}
18	72.42±4.32 ^{efgh}	39.41±1.60 ^{bcd}	33.00±3.85 ^{ghi}	119.43±1.39 ^{abc}
19	77.19±1.62 ^{bcdefg}	37.37±1.06 ^{cdef}	39.82±2.65 ^{bcdefg}	93.84±0.88 ^{defg}
20	75.01±3.15 ^{bcdefgh}	35.16±1.51 ^{fgh}	39.84±4.59 ^{bcdefg}	88.26±1.33 ^{efgh}
21	71.09±7.59 ^{fgh}	39.36±2.24 ^{bcd}	31.73±5.51 ^{hi}	124.06±1.75 ^{ab}
22	79.74±4.13 ^{abcde}	37.11±2.83 ^{cdef}	42.62±1.67 ^{abcde}	87.08±0.51 ^{efgh}
23	82.03±4.57 ^{abc}	33.30±0.52 ^{ghi}	48.73±4.10 ^a	68.35±0.47 ^h
24	78.17±1.56 ^{abcdef}	36.99±2.08 ^{def}	41.19±2.18 ^{abcdef}	89.80±0.94 ^{efgh}
25	68.78±4.28 ^h	38.06±1.14 ^{cdef}	30.72±4.77 ^{hi}	123.91±2.17 ^{ab}
Mean	76.03	36.81	39.22	96.65
Max	85.25	42.96	48.73	132.05
Min	68.78	30.22	30.13	64.43
SD	4.28	3.07	5.81	20.45
CV(%)	5.64	8.33	14.82	21.16

表 5 不同品种板栗加工特性

Table 5 Processing characteristics of different varieties of chestnut

品种	好果率(%)	出仁率(%)	水分(%)	单果重(g)
1	77.67±1.53 ^l	78.98±0.34 ^{mo}	56.56±1.38 ^b	8.14±0.28 ^{hi}
2	93.33±1.23 ^{def}	83.09±0.93 ^{cde}	62.01±3.94 ^a	23.63±0.85 ^a
3	94.67±2.52 ^{bcd}	84.71±1.17 ^{bc}	56.76±1.22 ^b	13.18±0.55 ^d
4	90.00±1.45 ^h	82.02±0.40 ^{efghi}	62.58±2.19 ^a	14.89±1.16 ^c
5	89.33±1.53 ^{hi}	81.90±1.29 ^{ghijk}	50.11±0.91 ^{ef}	15.73±0.17 ^b
6	93.00±1.00 ^{defg}	80.17±1.30 ^{hijklm}	46.18±0.72 ^{ij}	5.81±0.67 ^{jk}
7	90.67±1.15 ^{fgh}	81.07±0.37 ^{ghijkl}	42.60±0.55 ^k	5.38±0.17 ^{kl}
8	94.77±1.78 ^{cde}	81.81±0.49 ^{fghijk}	54.13±2.06 ^c	6.32±0.12 ^j
9	84.33±2.08 ^k	80.87±0.58 ^{hijklm}	35.64±1.88 ^g	5.29±0.15 ^{kl}
10	97.67±1.65 ^a	79.89±1.00 ^{lmn}	42.70±0.70 ^k	7.32±0.25 ⁱ
11	95.33±1.00 ^{abcd}	77.41±0.24 ^o	39.74±1.70 ^l	7.54±0.43 ^{hi}
12	91.67±1.33 ^{efgh}	79.99±1.79 ^{hlmn}	45.31±0.75 ^j	8.32±0.44 ^h
13	78.33±1.53 ^l	84.14±0.60 ^{bcd}	51.55±0.47 ^{def}	4.52±0.17 ^l
14	95.00±1.00 ^{abcd}	81.14±0.98 ^{ghijk}	36.35±0.60 ^m	8.27±0.11 ^{hi}
15	93.67±1.68 ^{de}	79.10±0.44 ^{mmo}	40.85±0.84 ^{kl}	5.20±0.36 ^{kl}
16	87.33±1.53 ^{ij}	86.91±0.55 ^a	50.77±1.00 ^{ef}	11.14±0.75 ^e
17	97.00±1.00 ^{ab}	80.19±0.33 ^{ijklm}	53.44±1.27 ^{cd}	12.93±0.79 ^d
18	93.67±1.15 ^{de}	83.06±0.38 ^{cdef}	45.02±0.84 ^j	10.51±0.75 ^{ef}
19	86.67±1.53 ^{jk}	82.52±0.44 ^{efgh}	50.40±0.26 ^{efg}	8.00±0.6 ^{lhi}
20	94.67±1.04 ^{bcd}	80.73±0.20 ^{ijklm}	46.78±0.20 ^{ij}	9.95±0.40 ^{fg}
21	94.67±1.53 ^{bcd}	81.79±0.16 ^{fghij}	47.77±0.06 ^{hi}	9.27±0.52 ^g
22	90.67±2.08 ^{fgh}	81.13±0.72 ^{hijklm}	48.28±0.98 ^{ghi}	10.14±0.46 ^{efg}

续表 5

品种	好果率(%)	出仁率(%)	水分(%)	单果重(g)
23	90.33±1.88 ^{gh}	82.84±0.29 ^{defg}	52.42±0.80 ^{cde}	12.78±0.7 ^{ld}
24	96.67±1.34 ^{abc}	83.71±0.12 ^{cde}	49.21±0.24 ^{fgh}	7.72±0.18 ^{hi}
25	91.67±1.03 ^{efgh}	85.69±0.49 ^{ab}	50.17±1.58 ^{efgh}	10.88±0.44 ^{ef}
Mean	91.27	81.79	48.69	9.71
Max	97.67	86.91	62.58	23.63
Min	77.67	77.41	35.64	4.52
SD	5.15	2.18	6.94	4.23
CV(%)	5.64	2.66	14.26	43.53

2.4 聚类分析

以测定的 21 个指标为依据,对 25 个品种板栗采用离差平方和法(Ward 法)进行系统聚类分析^[30],结果如图 1 所示,图中越接近蓝色代表该指标数值越小,越接近橙色代表该指标数值越大。当欧氏距离为 10 时将 25 个板栗品种分为 4 类。

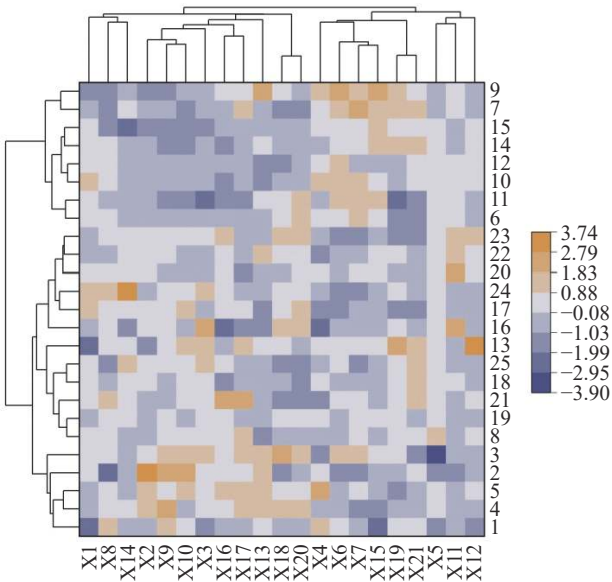


图 1 不同品种板栗聚类分析热图

Fig.1 Cluster analysis heat maps of different varieties of chestnut

注: X1: 好果率; X2: 单果重; X3: 出仁率; X4: 果形指数; X5: L^* 值; X6: a^* 值; X7: b^* 值; X8: 硬度; X9: 水分; X10: 灰分; X11: 脂肪; X12: 还原糖; X13: 可溶性糖; X14: 可溶性蛋白质; X15: 可溶性固形物; X16: 总酚; X17: 总黄酮; X18: 淀粉; X19: 直链淀粉; X20: 支链淀粉; X21: AA; 图 2 同。

第一类共有 5 个品种,包括 1 号、4 号、5 号、2 号和 3 号,均来自辽宁丹东,主要特点是单果重、水分、总酚、总黄酮及可溶性糖含量较高,脂肪含量较低,该类品种的板栗果大多汁,抗氧化能力较其他类板栗强,适宜开发功能性饮品^[22]。

第二类共有 6 个品种,其中 2 个来自河北迁西,4 个来自河北昌黎,包括 8 号、19 号、21 号、18 号、25 号、13 号。此类品种的板栗出仁率、直链淀粉含量高,淀粉及支链淀粉含量低,建议取仁加工,制作罐头、果脯等产品,或加工成板栗粉用于面包、饼干等产品的制作^[31-32]。

第三类有 6 个品种,包括 16 号、17 号、24 号、

20 号、22 号和 23 号,全部来自河北昌黎。主要特点是好果率、脂肪、蛋白、淀粉、支链淀粉含量高,可溶性糖、直链淀粉含量低,此类板栗营养丰富,糯性强,是优质的食品原料。

第四类共有 8 个品种,包括 6 号、11 号、10 号、12 号、14 号、15 号、7 号和 9 号,均来自河北迁西。主要特点是果形指数、可溶性固形物含量高,单果重、硬度和水分含量低。此类板栗果小圆润,口感好且易贮藏,适宜炒食^[33],也适宜作为直售坚果。

聚类分析将同一地区的品种聚为一类,表明不同地区种植的果实存在显著差异,与刘亚斌^[34]的研究结果相似,地理上相近的群体聚为一类。李彤彤等^[35]选择多地栽培的 3 个板栗品种进行试验,探究环境对表型的影响,结果表明板栗具有较高的遗传稳定性,指标在区域间差异不显著,故板栗的品质受遗传基因的影响较大。

2.5 相关性分析

综合考虑营养品质、感官品质及加工品质 3 个方面,板栗样品共选取 21 项品质指标,由于指标众多,难免存在着共线性的问题,本研究采用相关性分析探索各指标间的关系,为下一步指标的分类和筛选提供理论依据。图 2 为相关性分析热图,相关性分析结果分析如下。

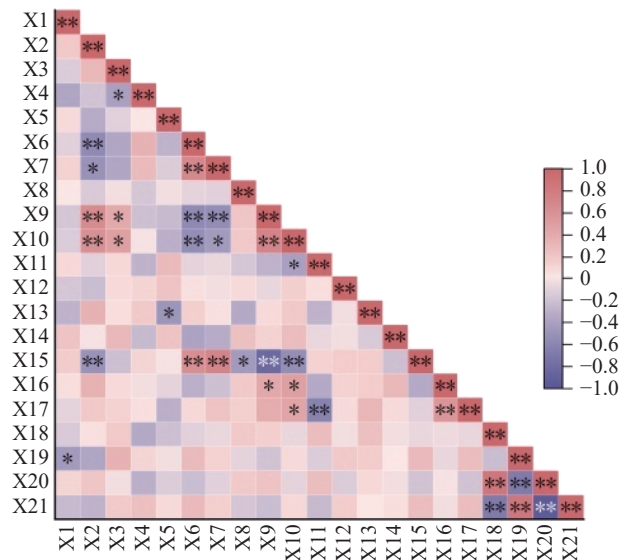


图 2 相关性分析热图

Fig.2 Heat map of correlation analysis

注: *表示 $P<0.05$, **表示 $P<0.01$ 。

21 个指标 231 个相关系数中, 指标在 $\alpha=0.05$ 水平上有 12 个显著相关性, 在 $\alpha=0.01$ 水平上有 19 个极显著相关性。

感官指标中单果重与 a^* 值、可溶性固形物呈显著负相关, 相关系数为 -0.577 、 -0.512 ($P<0.01$), 与水分和灰分呈显著正相关, 相关系数为 0.650 、 0.610 ($P<0.01$)。 b^* 值与单果重、灰分呈显著负相关, 相关系数为 -0.501 、 -0.446 ($P<0.05$), 与 a^* 值、可溶性固形物呈显著正相关, 相关系数为 0.696 、 0.719 ($P<0.01$)。

加工指标中水分与 b^* 值、 a^* 值、可溶性固形物呈显著负相关, 相关系数为 -0.556 、 -0.573 、 -0.830 ($P<0.01$), 与单果重和灰分呈显著正相关, 相关系数为 0.650 、 0.702 ($P<0.01$), 与出仁率和总酚含量呈显著正相关, 相关系数为 0.407 、 0.431 ($P<0.05$)。

营养指标中总黄酮与灰分和总酚呈显著正相关, 相关系数依次为 0.457 ($P<0.05$)、 0.562 ($P<0.01$), 与脂肪呈负相关, 相关系数为 -0.629 ($P<0.01$)。可溶性糖与 L^* 值呈显著负相关, 相关系数为 -0.489 ($P<0.05$)。直链淀粉与好果率、支链淀粉呈显著负相关, 相关系数依次为 -0.443 ($P<0.05$)、 0.696 ($P<0.01$), 与 AA 呈显著正相关, 相关系数为 0.851 ($P<0.01$)。

各指标相关性分析显示, 测定的指标在某种程度上存在着信息重叠的现象, 因此, 有必要对 21 项指标进行分类和简化, 以提高板栗质量评价的效率和准确性。

2.6 主成分分析

为减少指标间的重叠信息, 采用主成分分析对 25 个品种的 21 个主要性状进行评价筛选, 目的在于用少量核心评价指标代表绝大部分的原始数据信息^[36]。主成分分析可以提取出一些相互独立的指标, 减少冗余变量^[37-38]。根据特征值大于 1 的原则, 共提取 7 个主成分, 前 7 个主成分的累积方差贡献率达 83.416%, 可以代表大部分原始评价指标。方差贡献率反映了各指标性状在主成分中的分散程度。方差贡献率越大, 说明该主成分在样本数据分析中的作用越重要。

为了更好地解释原始评价指标与主成分之间的关系, 采用正交旋转法构建主成分载荷矩阵, 主成分的载荷矩阵经过旋转之后, 载荷系数趋近于 0 或者 1, 使得到的主成分能够更好的命名和解释变量。

由表 6 和表 7 可知, 第一主成分的特征值为 5.13, 占总方差的 24.427%, 主要代表了单果重、 a^* 值、 b^* 值、可溶性固形物和水分。由相关性分析的结果可知, 可溶性固形物与 a^* 值、 b^* 值呈正相关, 与水分、单果重呈负相关, 单果重与 a^* 值、 b^* 值呈显著负相关, 与水分呈显著正相关, 可用一个指标代替其他指标, 综合考虑指标的相关性、重要性和变异系数, 选择水分代表第一主成分。坚果的水分含量影响其贮藏时间长短, 把水分含量纳入品质评价中具有重

表 6 各主成分的特征值与方差贡献率

Table 6 Eigenvalues and variance contribution rates of each principal component

成分	初始特征值			提取平方和载入		
	特征值	方差贡献率(%)	累积方差贡献率(%)	特征值	方差贡献率(%)	累积方差贡献率(%)
1	5.13	24.427	24.427	5.13	24.427	24.427
2	3.786	18.027	42.454	3.786	18.027	42.454
3	2.557	12.175	54.629	2.557	12.175	54.629
4	1.834	8.731	63.36	1.834	8.731	63.36
5	1.594	7.59	70.95	1.594	7.59	70.95
6	1.487	7.079	78.029	1.487	7.079	78.029
7	1.131	5.386	83.416	1.131	5.386	83.416
8	0.841	4.004	87.42			
9	0.635	3.023	90.442			
10	0.502	2.392	92.834			
11	0.446	2.124	94.958			
12	0.309	1.47	96.428			
13	0.237	1.13	97.558			
14	0.205	0.976	98.534			
15	0.144	0.687	99.22			
16	0.081	0.385	99.605			
17	0.051	0.243	99.848			
18	0.026	0.122	99.97			
19	0.005	0.025	99.995			
20	0.001	0.005	100			
21	0.000	0.000	100			

表 7 主成分因子载荷矩阵

Table 7 Loading matrix of principal components

指标	主成分						
	1	2	3	4	5	6	7
好果率	0.118	0.087	-0.026	-0.911	0.074	-0.012	-0.137
单果重	-0.715	0.167	0.242	-0.211	0.042	0.453	-0.276
出仁率	-0.368	-0.117	0.038	0.18	0.797	0.127	0.011
果形指数	0.12	-0.271	0.124	0.33	-0.716	0.144	0.129
L^*	-0.079	-0.204	-0.508	-0.238	-0.115	-0.25	0.564
a^*	0.825	-0.118	0.091	0.259	-0.21	0.023	-0.177
b^*	0.847	-0.031	0.19	-0.06	-0.187	0.036	-0.101
硬度	-0.096	0.209	0.25	0.069	0.063	-0.853	-0.002
水分	-0.791	0.171	0.381	0.133	0.116	-0.073	-0.147
灰分	-0.676	-0.113	0.548	0.084	0.183	0.058	0.059
脂肪	0.064	0.245	-0.753	-0.048	0.235	0.1	0.136
还原糖	0.062	-0.033	0.087	0.187	0.015	0.016	0.835
可溶性糖	0.055	0.173	0.439	0.31	0.028	0.678	-0.062
可溶性蛋白	-0.227	-0.107	0.132	-0.393	0.434	-0.313	0.237
可溶性固形物	0.871	-0.123	-0.115	-0.113	0.077	0.373	0.134
总酚	-0.337	0.043	0.675	-0.238	-0.002	-0.014	0.32
总黄酮	0.013	-0.136	0.888	0.047	0.093	-0.008	0.013
淀粉	0.051	0.862	-0.026	0.287	0.346	-0.003	0.009
直链淀粉	0.257	-0.655	0.123	0.49	0.407	0.035	0.103
支链淀粉	-0.098	0.981	-0.084	-0.047	0.04	-0.021	-0.048
AA	0.182	-0.931	0.129	0.205	0.148	0.041	0.075

要的意义。

第二主成分的特征值为 3.786, 占总方差的 18.027%, 主要综合了淀粉、直链淀粉、支链淀粉和 AA, AA 与淀粉和支链淀粉呈显著负相关, 与直链淀粉呈显著正相关, 同时, AA 含有直链淀粉和支链淀

粉的信息, 因此选择 AA 作为第二主成分的代表指标。

第三主成分主要综合了总黄酮、总酚和脂肪的信息, 特征值为 2.557, 方差贡献率为 12.175%。总黄酮具有较高的载荷值, 并且总黄酮与总酚呈显著正相关, 与脂肪呈显著负相关, 所以第三主成分的代表指标为总黄酮。

好果率为第四主成分的代表信息。

第五主成分包括出仁率和果形指数, 出仁率与果形指数呈显著负相关, 综合考虑指标的变异系数及独立相关性, 选择果形指数为第五主成分的代表指标。

第六主成分主要综合了硬度和可溶性糖的信息, 硬度与可溶性固形物呈显著负相关, 可溶性糖与 L^* 值呈显著负相关, 板栗果实中的可溶性糖含量对甜度和风味有重大影响, 同时筛选的指标要尽可能的全面覆盖, 所以第六主成分的代表指标为硬度和可溶性糖。

第七主成分主要代表了还原糖。

综上所述, 选取水分、AA、总黄酮、好果率、果形指数、硬度、可溶性糖、还原糖这 8 个指标作为板栗品质评价的核心评价指标。

2.7 熵权法赋予权重

不同指标对评价结果的影响程度不同。为了实现有效的区分, 需要为每个指标赋予合适的权重。由于板栗的所有理化指标都能在一定程度上评价板栗的品质, 而现有研究缺乏各指标对板栗品质影响程度的具体描述和有效定义, 因此有必要采取措施为各指标分配适当的权重。传统的主观加权方法, 如层次分析(AHP)、优序图(PC)和德尔菲(Delphi)等, 存在较大的局限性, 难以保证结果的科学有效性。为了避免这一问题, 本研究采用客观赋值方法熵权法, 根据各指标提供的信息量和可变性程度确定各指标的权重。熵值越小, 信息量越大, 权重越大, 反之, 熵值越

大, 权重越小^[39-40]。

如表 8 所示, 水分、AA、总黄酮、好果率、果形指数、硬度、可溶性糖、还原糖的权重系数分别为 14.08%、14.64%、15.64%、7.74%、9.41%、9.11%、18.90%、10.48%。

表 8 权重分析计算结果

Table 8 Results of weight analysis and calculation

指标	信息熵值	信息效用值	权重系数(%)
AA	0.943	0.057	14.64
总黄酮	0.939	0.061	15.64
可溶性糖	0.9263	0.0737	18.90
还原糖	0.9592	0.0408	10.48
水分	0.9451	0.0549	14.08
硬度	0.9645	0.0355	9.11
果形指数	0.9633	0.0367	9.41
好果率	0.9698	0.0302	7.74

2.8 灰色关联度分析

灰色系统理论是一种用于处理信息不确定或部分缺失数据的方法, 它可以通过少量的数据信息研究评价对象的特征和发展趋势, 并做出合理的判断和预测。灰色关联分析是典型的方法之一, 近年来被广泛应用于桃^[41]、稻谷^[42]、苹果^[43]等品种的综合评价。

板栗的 8 项核心指标中, 好果率、果形指数、还原糖、可溶性糖、总黄酮为正向指标, 数值越大, 果实的评价越好, 水分和硬度为中间型指标。板栗淀粉中以支链淀粉为主, 支链淀粉含量越高其品质越好, 所以 AA 是负向指标, 数值越小, 果实的评价越好。根据前面 1.2.7 中的理论设置板栗关键品质指标的理想值。

对不同板栗品种进行灰色关联度分析, 由公式 (12) 计算得到关联系数, 结合权重系数, 计算加权关联度, 由表 9 结果可知, 排在前 3 名的样品依次为 5 号、3 号和 13 号, 关联度均在 0.7 以上, 综合品质较好。

表 9 不同板栗品种的灰色关联度分析

Table 9 Grey correlation degree analysis of different chestnut varieties

品种	灰色关联系数								加权关联度	排序
	好果率	果形指数	硬度	水分	还原糖	可溶性糖	总黄酮	AA		
1	0.62	0.90	0.75	0.72	0.39	0.48	0.48	0.47	0.579	25
2	0.88	0.76	0.65	0.62	0.46	0.84	0.57	0.46	0.651	11
3	0.92	0.62	0.91	0.72	0.44	0.70	0.86	0.70	0.730	2
4	0.81	0.71	0.97	0.61	0.47	0.67	0.73	0.67	0.692	4
5	0.80	1.00	1.00	0.95	0.52	0.66	0.72	0.68	0.773	1
6	0.88	0.81	0.92	0.85	0.48	0.45	0.41	0.80	0.664	7
7	0.83	0.83	0.70	0.74	0.47	0.41	0.73	0.40	0.610	17
8	0.90	0.70	0.93	0.79	0.50	0.33	0.74	0.47	0.631	13
9	0.71	0.90	0.69	0.61	0.43	1.00	0.53	0.46	0.673	6
10	1.00	0.92	0.91	0.74	0.49	0.34	0.41	0.48	0.603	18
11	0.93	0.71	0.75	0.68	0.47	0.53	0.38	1.00	0.658	9
12	0.85	0.74	0.90	0.82	0.55	0.36	0.43	0.47	0.595	20
13	0.63	0.83	0.97	0.88	1.00	0.58	0.66	0.40	0.717	3
14	0.93	0.68	0.90	0.62	0.50	0.58	0.42	0.43	0.598	19
15	0.89	0.76	0.72	0.70	0.55	0.42	0.43	0.49	0.581	24

续表 9

品种	灰色关联系数								加权关联度	排序
	好果率	果形指数	硬度	水分	还原糖	可溶性糖	总黄酮	AA		
16	0.76	0.57	0.93	0.92	0.45	0.36	0.36	0.59	0.584	23
17	0.98	0.63	0.86	0.81	0.46	0.34	0.56	0.83	0.650	12
18	0.89	0.76	0.78	0.81	0.44	0.42	0.46	0.42	0.586	22
19	0.75	0.76	0.93	0.93	0.48	0.38	0.47	0.52	0.616	16
20	0.92	0.78	0.94	0.88	0.55	0.41	0.39	0.56	0.630	14
21	0.92	0.63	0.72	0.92	0.50	0.45	1.00	0.41	0.680	5
22	0.83	0.63	0.77	0.95	0.51	0.62	0.48	0.57	0.656	10
23	0.82	0.70	1.00	0.85	0.56	0.42	0.40	0.86	0.664	8
24	0.97	0.66	0.80	1.00	0.47	0.40	0.45	0.55	0.626	15
25	0.85	0.73	0.73	0.95	0.46	0.45	0.44	0.41	0.595	21

3 结论

本研究对中国北方 25 个板栗品种进行了品质特性分析,结果表明不同板栗品种间存在显著差异。聚类分析结果表明不同区域间也存在明显差异。通过主成分分析结合相关性分析、描述性统计分析的方法筛选出了影响板栗品质的核心评价指标,分别为水分、AA、总黄酮、好果率、果形指数、硬度、可溶性糖和还原糖。采用熵权法计算核心指标的权重,最后通过灰色关联度法建立了板栗综合品质评价模型,综合评价结果表明,5 号、3 号和 13 号综合品质列前三位,关联度均在 0.7 以上。

聚类分析将 25 个品种板栗分为 4 类,第一类板栗适宜开发功能性饮品,此类板栗平均关联度为 0.658,高于其他三类,综合品质较好;第二类板栗适合取仁加工,制作罐头、果脯等产品,或加工成板栗粉用于面包、饼干等产品的制作;第三类板栗可作为优质的食品原料;第四类板栗适宜炒食,也适宜作为直售坚果。本研究为板栗的品种选育和品质评价提供参考,也为板栗的综合利用提供了理论依据。

© The Author(s) 2025. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

参考文献

- [1] YANG B, JIANG G X, GU C Q, et al. Structural changes in polysaccharides isolated from chestnut (*Castanea mollissima* Bl.) fruit at different degrees of hardening[J]. *Food Chemistry*, 2010, 119(3): 1211-1215.
- [2] 刘伟帆,郑文雄,李素芬,等.板栗香精的制备及理化性质研究[J]. *中国调味品*, 2022, 47(2): 186-190. [LIU Y F, ZHENG W X, LI S F, et al. Study on preparation and physicochemical properties of chestnut essence[J]. *Chinese Condiments*, 2022, 47(2): 186-190.]
- [3] 李妍馥,梅小龙,骆安琪,等.板栗及其加工副产物的活性物质研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2021, 12(24): 9490-9498. [LI Y F, MEI X L, LUO A Q, et al. Research progress on active substances of chestnut and its processing by-products[J]. *Journal of Food Safety and Quality Inspection*, 2021, 12(24): 9490-9498.]
- [4] MASSANTINI R, MOSCETTI R, FRANGIPANE M T. Evaluating progress of chestnut quality: A review of recent developments[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 113(1):

245-254.

- [5] 武琳霞,李玲,张国光,等.基于主成分分析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 L X, LI L, ZHANG G G, et al. Analysis of quality characteristics of winter jujube from different regions based on principal component analysis and cluster analysis[J]. *Food Science*, 2022, 43(8): 334-338.]
- [6] 姜璐,包怡红,贾雨彤,等.18 个品种蓝靛果营养成分分析及综合品质评价[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(7): 326-335. [JIANG L, BAO Y H, JIA Y T, et al. Analysis of nutritional composition and comprehensive quality evaluation of 18 varieties of indigo fruit[J]. *Transactions of Agricultural Engineering*, 2022, 38(7): 326-335.]
- [7] 邵国莉,谭占明,程云霞,等.12 种马铃薯营养品质测定及综合评价[J]. *食品与机械*, 2023, 39(10): 146-149,174. [SHAO G L, TAN Z M, CHENG Y X, et al. Determination and comprehensive evaluation of nutritional quality of 12 kinds of potato[J]. *Food and Machinery*, 2023, 39(10): 146-149,174.]
- [8] 杜常健,孙佳成,武妍妍,等.燕山北部山区板栗优良种质资源收集及其品质评价[J]. *林业科学研究*, 2020, 33(3): 1-11. [DU C J, SUN J C, WU Y Y, et al. Collection and quality evaluation of fine germplasm resources of chestnut in the northern mountain area of Yanshan[J]. *Research in Forestry Sciences*, 2020, 33(3): 1-11.]
- [9] 胡嘉琪.近红外漫反射法快速测定板栗的品质[D].北京:北京林业大学,2019. [HU J Q. Rapid determination of chestnut quality by near infrared diffuse reflection method[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2019.]
- [10] 樊晓芸,郭素娟,李艳华.不同生态区域板栗品质差异性分析及气候适应性评价[J]. *北京林业大学学报*, 2022, 44(11): 20-30. [FAN X Y, GUO S J, LI Y H. Analysis of quality difference of chestnut in different ecological regions and evaluation of climate adaptability[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2022, 44(11): 20-30.]
- [11] 段振军.失水梯度对板栗贮藏过程中生理生化变化规律的影响[D].杨凌:西北农林科技大学,2008. [DUAN Z J. Effects of water loss gradient on physiological and biochemical changes of chestnut during storage[D]. Yangling: Northwest Agriculture & Forestry University, 2008.]
- [12] 马琴国,王引权,赵勇.蒽酮—硫酸比色法测定党参中可溶性糖含量的研究[J]. *甘肃中医学院学报*, 2009, 26(6): 46-48. [MA Q G, WANG Y Q, ZHAO Y. Study on the determination of soluble sugar content in codonopsis pilosula by anthrone-sulfuric acid colorimetric method[J]. *Journal of Gansu College of Traditional Chinese Medicine*, 2009, 26(6): 46-48.]
- [13] 徐美蓉,李晓蓉,李婷.响应面分析优化蒽酮硫酸法测定葡萄叶片中可溶性糖的含量[J]. *甘肃农业科技*, 2017(11): 25-29. [XU M R, LI X R, LI T. Determination of soluble sugar in grape leaves by anthrone sulfuric acid method optimized by response surface analysis[J]. *Gansu Agricultural Science and Technology*, 2017(11): 25-29.]

- [14] 张午燕. 生长周期苦荞叶功能性成分动态变化及其叶茶的工艺优化[D]. 晋中: 山西农业大学, 2014. [ZHANG W Y. Dynamic change of functional components of tartary buckwheat leaves during growth cycle and optimization of leaf tea technology[D]. Jinzhong: Shanxi Agricultural University, 2014.]
- [15] 阙黎娜. 我国六个产地板栗质量差别及热加工对其品质的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2018. [KAN L N. Quality difference of Chinese chestnut from six producing areas and influence of hot processing on its quality[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2018.]
- [16] 黄雪薇, 雷嗣超, 涂芬, 等. 板栗壳黄酮结构分析及其对胰脂肪酶活力的抑制作用[J]. 食品科学, 2021, 42(21): 111-118. [HUANG X W, LEI S C, TU F, et al. Structure analysis of chestnut shell flavonoid and its inhibitory effect on pancreatic lipase activity[J]. Food Science, 2021, 42(21): 111-118.]
- [17] MA C, ZHANG Y, YUE R X, et al. Establishment of a quality evaluation system of sweet potato starch using multivariate statistics[J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 1025061.
- [18] 刘璐, 吕春茂, 孟宪军, 等. 不同解冻方式对树莓汁加工特性的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(7): 127-134. [LIU L, LÜ C M, MENG X J, et al. Effects of different defrosting methods on processing characteristics of raspberry juice[J]. Food Science, 2019, 40(7): 127-134.]
- [19] 隋炎佐. 丹东地区板栗主栽品种及品种选择标准[J]. 特种经济动植物, 2020, 23(5): 41-42, 44. [SUI Y Z. Main cultivars and selection criteria of chestnut in Dandong area[J]. Special Economic Animal and Plant, 2020, 23(5): 41-42, 44.]
- [20] 王广鹏, 孔德军, 张树航, 等. 抗寒板栗新品种‘燕兴’[J]. 园艺学报, 2012, 39(10): 2085-2086. [WANG G P, KONG D J, ZHANG S H, et al. A new variety of cold resistant chestnut 'Yanxing'[J]. Journal of Horticulture, 2012, 39(10): 2085-2086.]
- [21] SANTOS M J, PINTO T, VILELA A. Sweet chestnut (*Castanea sativa* Mill.) nutritional and phenolic composition interactions with chestnut flavor physiology[J]. Foods, 2022, 11(24): 4052.
- [22] YANG F, LIU Q, PAN S Y, et al. Chemical composition and quality traits of Chinese chestnuts (*Castanea mollissima*) produced in different ecological regions[J]. Food Bioscience, 2015, 11: 33-42.
- [23] 李颖, 张树航, 郭燕, 等. 京津冀主栽板栗品种果实甜度差异分析及评价[J]. 中国农业大学学报, 2023, 28(10): 98-110. [LI Y, ZHANG S H, GUO Y, et al. Analysis and evaluation of fruit sweetness difference of main cultivars of Chinese chestnut in Beijing, Tianjin and Hebei[J]. Journal of China Agricultural University, 2023, 28(10): 98-110.]
- [24] XU Z Y, MEENU M, CHEN P Y, et al. Comparative study on phytochemical profiles and antioxidant capacities of chestnuts produced in different geographic area in China[J]. Antioxidants, 2020, 9(3): 190.
- [25] 杜丽娟, 周葵, 张雅媛, 等. 基于生熟角度探讨 15 种板栗果实性状及营养品质的差异性[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(14): 4641-4649. [DU L J, ZHOU K, ZHANG Y Y, et al. Study on the differences of fruit traits and nutritional quality of 15 Chinese chestnut from the perspective of raw and ripe[J]. Journal of Food Safety and Quality Inspection, 2022, 13(14): 4641-4649.]
- [26] 路超. 不同板栗种质资源的评价分析与筛选[D]. 北京: 北京林业大学, 2017. [LU C. Evaluation, analysis and screening of different germplasm resources of chestnut[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2017.]
- [27] 郭豪宁. 板栗峰甘加工适宜性与货架期预测研究[D]. 秦皇岛: 河北科技师范学院, 2017. [GUO H N. Research on processing suitability and shelf life prediction of chestnut peak[D]. Qinhuangdao: Hebei Normal University of Science and Technology, 2017.]
- [28] 魏源, 吕梦煊, 马亚特, 等. 基于 3 种分析方法的板栗果实营养品质综合评价[J]. 河南农业科学, 2023, 52(6): 111-119. [WEI Y, LÜ M Y, MA Y T, et al. Comprehensive evaluation of nutritional quality of chestnut fruit based on three analytical methods[J]. Henan Agricultural Science, 2023, 52(6): 111-119.]
- [29] KAN L N, LI Q, XIE S S, et al. Effect of thermal processing on the physicochemical properties of chestnut starch and textural profile of chestnut kernel[J]. Carbohydrate Polymers, 2016, 151: 614-623.
- [30] 杨炳南, 张小燕, 赵凤敏, 等. 常见马铃薯品种特性分析及加工适宜性分类[J]. 食品科学技术学报, 2016, 34(1): 28-36. [YANG B N, ZHANG X Y, ZHAO F M, et al. Characteristics analysis and processing suitability classification of common potato varieties[J]. Journal of Food Science and Technology, 2016, 34(1): 28-36.]
- [31] 林云, 晏绍良, 方洪元, 等. 板栗综合利用研究进展[J]. 湖北林业科技, 2023, 52(1): 54-58, 62. [LIN Y, YAN S L, FANG H Y, et al. Research progress on comprehensive utilization of chestnut[J]. Hubei Forestry Science and Technology, 2023, 52(1): 54-58, 62.]
- [32] ZHU F. Properties and food uses of chestnut flour and starch[J]. Food and Bioprocess Technology, 2017, 10(7): 1173-1191.
- [33] 郭萌. 燕山板栗炒食品质评价指标体系研究与应用[D]. 秦皇岛: 河北科技师范学院, 2015. [GUO M. Research and application of Yanshan chestnut stir-fried food quality evaluation index system[D]. Qinhuangdao: Hebei Normal University of Science and Technology, 2015.]
- [34] 刘亚斌. 不同板栗种质在迁西地区表型多样性和耐贮藏性研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2020. [LIU Y B. Study on phenotypic diversity and storability of different chestnut germplasm in Qianxi region[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020.]
- [35] 李彤彤, 郭素娟, 江锡兵. 不同板栗品种坚果表型差异分析及稳定性指标筛选[J]. 林业科学研究, 2023, 36(4): 99-108. [LI T T, GUO S J, JIANG X B. Analysis of phenotypic difference of nuts of different chestnut varieties and screening of stability indexes[J]. Research in Forestry Sciences, 2023, 36(4): 99-108.]
- [36] ZHAO Y Q, ZENG Y Y, LI X S, et al. Modeling and application of sensory evaluation of blueberry wine based on principal component analysis[J]. Current Research in Food Science, 2023, 6: 100403.
- [37] ZHENG P F, ZHANG M, WANG Z X, et al. Comprehensive evaluation of the fruit quality of the main cultivars of pear (*Pyrus* spp.) in north China[J]. Erwerbs-Obstbau, 2022, 64(2): 219-227.
- [38] SHI S J, WANG E T, LI C X, et al. Comprehensive evaluation of 17 qualities of 84 types of rice based on principal component analysis[J]. Foods, 2021, 10(11): 2883.
- [39] DENG M L, ZHANG B W, CHEN S. A grey comprehensive evaluation model for wheat quality incorporating PCA-EWM[J]. Food Science and Technology, 2023, 43: e98722.
- [40] HU Y R, LIU H J, TANG W Y, et al. Quality evaluation of three kinds of hickories based on grey relational analysis and entropy-weight theory[J]. Journal of Food Quality, 2022, 2022: 6676280.
- [41] 郑霄, 闫新煊, 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, 52. [ZHENG X, YAN X H, ZHENG X D, et al. Comprehensive quality evaluation of fresh peach fruit based on grey correlation degree analysis[J]. Chinese Fruit and Vegetable, 2023, 43(10): 36-41, 52.]
- [42] ZHANG N, WU W F, LI S Y, et al. Comprehensive evaluation of paddy quality by different drying methods, based on gray relational analysis[J]. Agriculture, 2022, 12(11): 1857.
- [43] 沈海军, 徐子昂, 王文琪, 等. 基于熵权法、灰色关联度法和低场核磁共振检测的苹果品质评价[J]. 食品工业科技, 2024, 45(1): 231-238. [SHEN H J, XU Z A, WANG W Q, et al. Apple quality evaluation based on entropy weight method, grey correlation degree method and low field nuclear magnetic resonance detection[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(1): 231-238.]