

望漠板栗种仁矿质元素、活性物质含量特征及综合评价

朱周俊¹, 许斌¹, 赵君茹¹, 班启明², 吴键枫¹, 王银星², 高超³

(¹铜仁学院农林工程与规划学院·贵州省梵净山地区生物多样性保护与利用重点实验室, 贵州铜仁 554300;

²贵州省望漠县林业局, 贵州望漠 552300; ³贵州大学贵州省森林资源与环境研究中心, 贵阳 550025)

摘要:【目的】明确望漠板栗种仁矿质元素与活性物质含量特征, 筛选优质资源。【方法】以望漠县20个板栗优株为材料, 测定了9种矿质元素与4种活性物质的含量并进行相关性分析, 综合运用主成分分析法、熵值法及熵权TOPSIS法对资源进行综合评价。【结果】不同望漠板栗优株种仁P、K、Ca、Mg、Fe、Mn、Zn、Cu和B等9种矿质元素及总酚、维生素C、单宁和总黄酮等4种活性物质含量差异显著, 变异系数分别为9.32%~80.19%与4.84%~52.49%; 相关性分析表明, 活性成分含量与矿质元素含量显著相关。其中, P含量与Mg、B和维生素C含量呈极显著正相关($P < 0.01$), 与K和总酚含量呈显著正相关($P < 0.05$), 与Fe含量呈显著负相关($P < 0.05$); 熵权TOPSIS法相较于主成分分析法和熵值法在兼顾指标重要性和品质均衡性方面表现更优, 筛选出WM35、WM31、WM3、WM23、WM40等5个优株。【结论】明确了望漠板栗优株种仁矿质元素与活性物质的含量差异特征, 验证了熵权TOPSIS法在板栗优株综合评价中的适用性, 并筛选获得5个优株, 为望漠板栗营养品质改良与资源高效利用奠定了坚实的基础。

关键词: 板栗; 矿质元素; 活性成分; 主成分分析; 熵值法; 熵权TOPSIS法; 综合评价

中图分类号: S664.2

文献标志码: A

文章编号: 1009-9980(2026)05-1157-16

Content profiles of mineral elements and bioactive substances and comprehensive evaluation of Wangmo chestnut (*Castanea mollissima*) kernels

ZHU Zhoujun¹, XU Bin¹, ZHAO Junru¹, BAN Qiming², WU Jianfeng¹, WANG Yinxing², GAO Chao³

(¹College of Agroforestry Engineering and Planning, Tongren University/Guizhou Provincial Key Laboratory for Biodiversity Conservation and Utilization in the Fanjing Mountain Region, Tongren 554300, Guizhou, China; ²Forestry Bureau of Wangmo County, Wangmo 552300, Guizhou, China; ³Institute for Forest Resources & Environment of Guizhou, Guizhou University, Guiyang 550025, Guizhou, China)

Abstract: 【Objective】 This study aimed to clarify the content characteristics of mineral elements and bioactive substances in the kernels of Wangmo chestnuts (*Castanea mollissima* Blume) and screen Wangmo chestnut resources with high nutritional value for subsequent breeding applications. 【Methods】 The 20 superior Wangmo chestnut accessions were selected as test materials, and 13 key nutritional indices in their mature fruits were determined. These indices included 9 mineral elements (P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Cu, and B) as well as 4 bioactive and functional components (total phenolics, vitamin C, tannin, and flavonoids). Correlation analysis was first applied to explore the intrinsic associations between the 13 indices. Then, four complementary evaluation methods—Principal Component Analysis (PCA), weighted summation, entropy evaluation method, and entropy-weighting TOPSIS—were integrated to conduct multi-dimensional analysis and comparative quality assessment of the accessions. Additionally, Kendall's coefficient of concordance test was employed to quantify the consistency of evaluation results across the three methods, ensuring the reliability of the screening outcomes. 【Results】 The results indicated that kernel quality varied significantly among the 20 superior accessions, with substantial variations observed in both mineral elements and bioactive components. The coefficient of variation

收稿日期: 2025-10-20

接受日期: 2025-11-22

基金项目: 铜仁学院博士科研启动基金(trxyDH2324)

作者简介: 朱周俊, 男, 讲师, 研究方向为经济林育种与栽培。E-mail: trxyngyzj@163.com

(CV) for mineral elements ranged from 9.32% to 80.19%, while that for bioactive components spanned 4.84% to 52.49%. Specifically, the CVs of Ca, Fe, Mn, Zn, Cu, B, total phenols, vitamin C, and tannin all exceeded 20%, reflecting high variability in these indices across accessions. In contrast, the CVs of P, K, Mg, and total flavonoids were below 20%, indicating relatively stable contents of these components. Regarding mineral elements, WM20 exhibited the highest P content ($1\ 546.315\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), which was significantly higher than that of all other accessions ($P < 0.05$); its Ca content ($467.952\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) showed no significant difference from WM28 ($459.937\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) but was significantly higher than that of the remaining accessions ($P < 0.05$); WM35 had the highest K content ($8031.320\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), which was 44.68% higher than the lowest value (WM2, $5\ 550.941\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), and also maintained high levels of other macro elements (P, Ca, Mg); WM35 also recorded the highest Zn content ($27.759\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), whereas WM4 had the lowest ($5.927\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); WM31 possessed the highest Cu content ($8.765\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), significantly exceeding that of other accessions ($P < 0.05$); and WM23 had the highest B content ($10.682\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), followed by WM35 ($9.371\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). For bioactive components: WM7 had significantly higher contents of total phenols ($2.630\ \text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$) and tannin ($363.727\ \text{nmol} \cdot \text{g}^{-1}$) than all other accessions ($P < 0.05$); in contrast, WM5 had a notably lower total phenol content ($0.857\ \text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$), which was 67.4% lower than that of WM7, and WM31 had a lower tannin content ($156.263\ \text{nmol} \cdot \text{g}^{-1}$), 57.1% lower than WM7. The vitamin C content across accessions ranged from 0.068 to $0.449\ \text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$, with WM28 having the lowest ($0.068\ \text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$), WM40 the highest ($0.449\ \text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$), and WM35 the second highest ($0.417\ \text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$). Correlation analysis revealed that vitamin C was highly significantly positively correlated with P and K ($P < 0.01$) and significantly positively correlated with Mg ($P < 0.05$); tannin was extremely significantly positively correlated with Fe and total phenols ($P < 0.01$) but significantly negatively correlated with Cu ($P < 0.05$); notably, total flavonoids showed no significant correlation with the other 12 nutritional indices. PCA extracted 5 principal components based on eigenvalue > 1 , with a cumulative contribution rate of 74.089%, indicating these components explained most of the variability in the original indices. Among them, vitamin C, P, B, Mn, Ca, and Fe were identified as key nutritional indices, as the cumulative variance contribution rate of the first three principal components reached 56.480%. Comprehensive evaluation via PCA highlighted WM35, WM23, WM36, WM20, and WM28 as accessions with superior overall quality. The entropy evaluation method, which quantifies index importance objectively, calculated the weight coefficients of the 13 indices in the order: $\text{Cu} > \text{total phenols} > \text{Zn} > \text{B} > \text{vitamin C} > \text{Mg} > \text{Mn} > \text{total flavonoids} > \text{Ca} > \text{K} > \text{Fe} > \text{P} > \text{tannin}$ (tannin was treated as a negative index, while the other 12 were positive indices). This method screened 5 core superior accessions: WM35, WM31, WM3, WM23, and WM40. The entropy-weighted TOPSIS method, which integrates entropy-derived weights to avoid subjective bias, constructed a weighted matrix, calculated the distance to the positive ideal solution (T^+), distance to the negative ideal solution (T^-), and relative closeness (C); its top 5 superior accessions were consistent with those identified by the entropy evaluation method. Kendall's coefficient of concordance test showed an extremely strong consistency between the entropy evaluation method and entropy-weighting TOPSIS (concordance coefficient = 0.81, $P < 0.05$), while PCA exhibited slightly weaker consistency with the two methods (concordance coefficient = 0.57, $P < 0.05$). For instance, WM6 ranked 8th in PCA but 10th in the entropy evaluation method and 9th in the entropy-weighted TOPSIS method. Notably, the entropy-weighting TOPSIS effectively balanced the importance of different indices and the quality uniformity of individual accessions, demonstrating higher adaptability in comprehensive quality evaluation. The 5 accessions screened by this method all had consistently high contents of mineral elements and bioactive substances. 【Conclu-

sion】 This study clarified the content variation characteristics of mineral elements and bioactive substances in the kernels of superior *C. mollissima* ‘Wangmo’ kernels, verified the applicability of the entropy-weighting TOPSIS method for the comprehensive evaluation of superior chestnut kernels, and screened out 5 core superior germplasm resources. These findings provide a solid foundation for the nutritional quality enhancement and efficient utilization of Wangmo chestnut germplasm resources.

Key words: *Castanea mollissima*; Mineral elements; Bioactive substances; Principal component analysis (PCA); Entropy evaluation method; Entropy-weighting TOPSIS; Comprehensive evaluation

板栗(*Castanea mollissima*)属于壳斗科(Fagaceae)栗属(*Castanea*)植物,是中国重要的木本粮食树种^[1]。板栗的种仁香甜软糯、营养价值高,深受消费者喜爱^[2]。望谟县作为“板栗名县”,区域气候温和,土壤肥力适宜,为板栗生长提供了优越的自然条件,目前种植面积达1.81万hm²,挂果面积1.11万hm²,年产量约1.33万t,年产值达0.798亿元。虽然望谟板栗种质资源丰富但良种匮乏,很多属于实生苗造林,果实的营养品质参差不齐,极大地限制了产业发展。

当前,消费者对食品营养成分含量及生理功效的关注度日益提升。矿质元素作为人体无法自主合成的基础性营养物质,对先天免疫系统、适应性免疫防御体系的构建与维持至关重要^[3]。若机体过量缺乏矿质元素,不仅会导致免疫力显著下降,还可能引发身体与智力发育迟缓^[3],因此矿质元素成为衡量食物营养品质的核心指标之一^[4]。板栗果实富含钾、镁、磷、钙、锌、铁等矿质元素,可为人体生理代谢提供重要支撑^[5]。此外,板栗中还含有黄酮类化合物、总酚等具有显著生物活性的天然抗氧化成分,这些成分在清除自由基和延缓氧化应激损伤等方面具有重要作用。El-Akad等^[6]发现板栗所含酚类成分中的鞣花酸甲氧基化衍生物具有抗菌、抗癌等多种生物活性。目前,板栗资源营养品质评价研究多采用统计学方法分析表型多样性或初步测定营养指标,而对矿质元素及抗氧化活性成分的综合评价相对不足。

路超等^[7]通过隶属函数-因子分析结合法与权重赋值法分析了102份板栗种质的农艺性状及淀粉、脂肪和粗蛋白等营养指标,筛选出适用于育种、生产及副产业的种质;杜常健等^[8]采用等级评分-因子分析结合法,筛选出早熟与晚熟优良种质;魏源等^[9]应用模糊评价-隶属函数法和主成分分析法对燕山地区12个板栗品种(系)的果实品质进行综合评价。尽管上述多种评价方法已在相关研究中得到应用,

但普遍存在主观性较强的问题。主成分分析法具有实现信息整合的优点,客观性较强。Long等^[10]通过主成分分析法筛选出10个综合表现较优的望谟板栗单株。熵值法和TOPSIS法也广泛应用于果实品质评价。熵值法权重由数据自身分布特征决定(无需主观判断)^[11],在柿子^[12]和番茄^[13]的果实品质评价中得到应用;TOPSIS法通过计算评价对象与“最优解”“最劣解”的距离确定相对接近度并排序(低权重依赖,强化评价客观性)^[14],在甜瓜^[15]和苹果^[16]的品质评价中成功应用。目前,在望谟板栗营养成分的综合评价与筛选方面,同时采用主成分分析法、熵值法及TOPSIS法开展对比方面的研究尚未见报道,适用于望谟板栗营养品质评价的客观评价方法还未确定。

笔者以20份望谟优株为试材,通过测定果实中矿质元素、总黄酮、总酚、维生素C和单宁等13个营养成分指标的含量,阐明种质间的营养特征差异,运用相关性分析法,结合主成分分析法、熵值法及TOPSIS法进行多维度对比评价,旨在筛选优异种质,为望谟板栗品种选育提供参考依据。

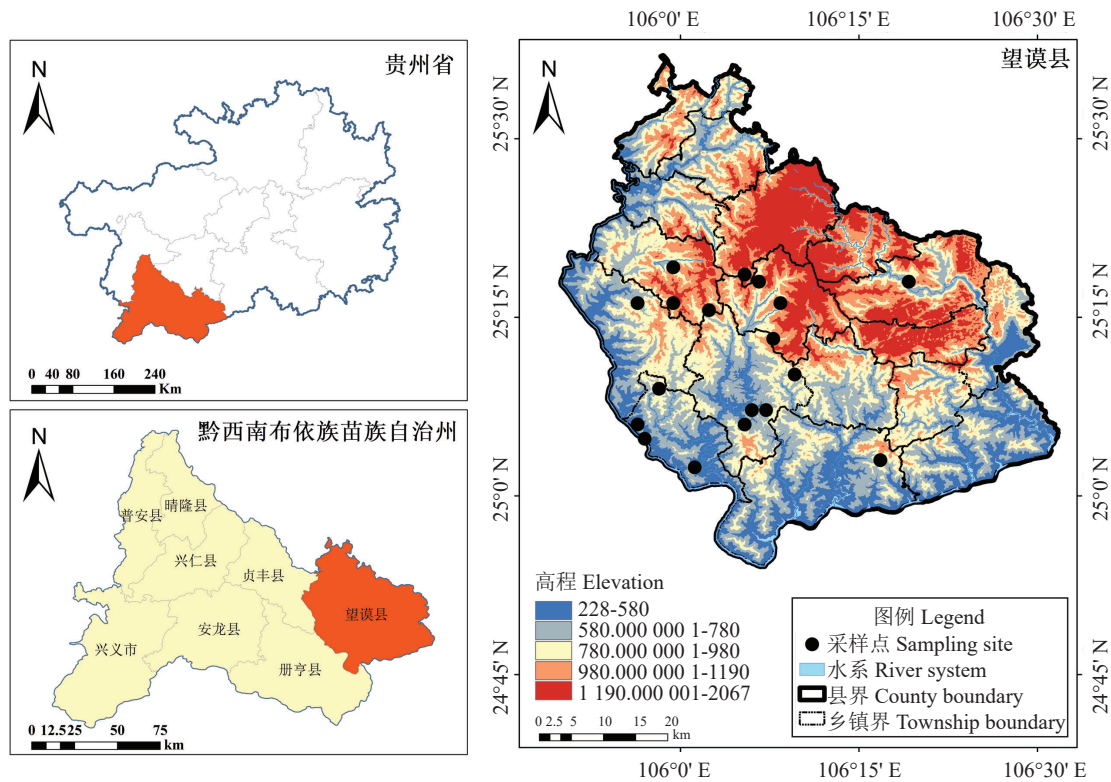
1 材料和方法

1.1 试验地概况

试验地位于望谟县(24°53′~25°37′ N, 105°50′~106°32′ E)(图1),属亚热带温湿季风气候,年平均气温19.5℃,极端最高气温41.8℃,极端最低气温-4.8℃,年均降水量1241.1mm,年相对湿度79.6%,年均日照时间1401.6h,年平均无霜期为341d,光照充足,热量充沛,雨热同季。土壤主要为红壤土、黄壤土、石灰土。

1.2 材料

于2025年8—10月望谟板栗优株果实成熟期间,以树冠开张、分枝角度大、抗逆性强、无明显病虫害、大小年不明显、树冠投影面积产量>0.5kg·m²为选优标准,选取20份望谟板栗优株的果仁为试验



图中黑色的点代表望谟板栗优株采样地。

Black dots in the figure denote the sampling sites of the superior Wangmo *C. mollissima*.

图1 不同望谟板栗优株采样地

Fig. 1 Sampling sites of different superior Wangmo *C. mollissima*

材料(图2)。采样时,于树冠外围中上部采集健康无病虫害、成熟度一致的板栗坚果,每单株每次采集36颗,3次生物学重复。采样完成后,样品立即存放于预冷的便携式冰盒中,并在全程低温条件下迅速

转运至实验室。随后去除刺苞和种壳,将样品随机均分为两部分:一部分用于矿物质元素含量测定,另一部分用于活性成分分析。

1.3 仪器设备

NexION®1000型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS),美国PerkinElmer公司;紫外分光光度计(UV-2204),析谱仪器有限公司;冷冻离心机(5810R),德国Eppendorf AG公司;DHG-9070型恒温鼓风干燥箱,上海予英仪器有限公司;DFT-100手提式高速万能粉碎机,浙江省温岭市林大机械有限公司;LE204E型万分之一天平,梅特勒-托利多集团;植物总酚(TP)含量检测试剂盒(货号:UPLC-W-A507,规格:100T/48S)、维生素C含量测定试剂盒(货号:UPLC-W-A300,规格:100T/96S)、单宁含量检测试剂盒(货号:UPLC-W-A516,规格:100T/96S)、总黄酮含量检测试剂盒(货号:UPLC-W-A506,规格:100T/48S),南京瑞源生物技术有限公司;P、K、Ca、Mg、Fe、Mn、Zn、Cu和B(质量浓度1000 mg·mL⁻¹,规格100 mL),国家标准物质研究中

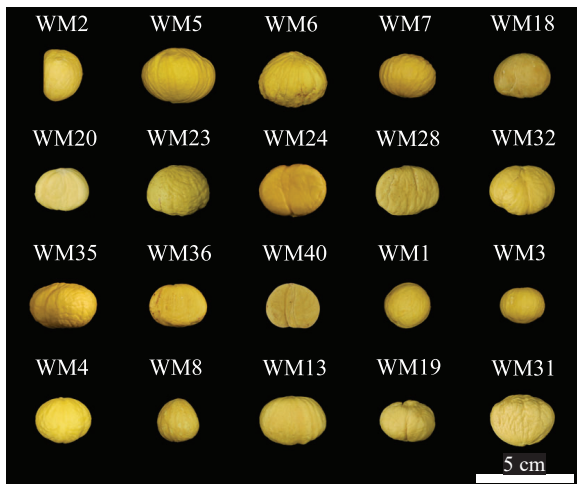


图2 不同望谟板栗优株种仁

Fig. 2 Fruits of different superior Wangmo *C. mollissima* kernels

心;浓HNO₃和1% HNO₃(超纯水稀释配置),国药集团化学试剂有限公司。

1.4 方法

1.4.1 种仁矿质元素含量测定 采用矿质元素压力罐消解法测定矿质元素含量,参照GB 5009.268—2016《食品安全国家标准》和《食品中多元素的测定》^[17]。称取干样0.1 g于聚四氟乙烯消解内罐,加硝酸5 mL浸泡过夜。盖好内盖,旋紧不锈钢外套,放入恒温干燥箱,80 °C保持2 h,120 °C保持2 h,再升至160 °C保持4 h,在箱内自然冷却至室温,打开后加热赶酸至近干,将消化液洗入25 mL容量瓶中,用少量硝酸溶液(1%)洗涤内罐和内盖3次,洗液合并至容量瓶中并用1%硝酸定容至刻度,混匀备用,同时做试剂空白试验。公式为:

$$w(\text{元素})/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}) = \frac{C \times V_{\text{提取}}}{M} \times D。$$

式中: C 为溶液中元素的浓度(ρ ,后同)($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$); V 为提取体积(mL); D 为稀释倍数; M 为样品质量(g)。

1.4.2 总酚含量测定 采用福林-酚比色法测定总酚含量。样本经烘干至恒质量后,粉碎并过40目筛;准确称取0.2 g筛后样品,加入2.5 mL提取液,采用超声提取法处理:超声功率300 W,工作5 s、间歇8 s,提取温度60 °C,提取时间30 min。提取后于12 000 r min⁻¹、25 °C条件下离心10 min,取上清液,用提取液定容至2.5 mL待测。标准品制备:将1 mg·mL⁻¹单宁酸标准溶液进行二倍系列稀释,得到浓度为0.625、0.312 5、0.156 2、0.078 1、0.039 1、0.019 5、0.009 8、0.004 9、0.002 4、0.001 2 mg·mL⁻¹的标准工作液,待测。测定方法:紫外分光光度计提前预热30 min以上,调节波长至760 nm,以蒸馏水调零;将反应体系充分混匀后,室温静置10 min,取适量溶液置于微量玻璃比色皿或96孔板中,测定760 nm处吸光度。标准曲线绘制:以单宁酸浓度为横坐标(x)、 $\Delta A'$ ($A_{\text{标准}} - A_{\text{空白}}$)为纵坐标(y)绘制标准曲线,其回归方程为 $y=0.476x-0.006 8$ ($R^2=0.997 8$)。按样本鲜质量计算总酚含量,公式为:

$$w(\text{总酚})/(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}) = \frac{X \times V_{\text{提取}}}{W}。$$

式中: X 为总酚的含量(mg); $V_{\text{提取}}$ 为加入提取液体积,2.5 mL; W 为样本质量(g)。

1.4.3 维生素C含量测定 采用邻二氮菲-Fe²⁺比色法测定维生素C含量。称取0.2 g组织,按组织质量

(g):提取液体积(mL)=1:(5~10)的比例,在冰浴条件下匀浆处理;随后以8000g、4 °C条件离心20 min,取上清液置于冰上,待后续测定。按细胞数量(10⁴个):提取液体积(mL)=(500~1000):1的比例在冰浴条件下采用超声波破碎细胞(参数:功率300 W,超声3 s、间隔7 s,总处理时间3 min);再以8000g、4 °C条件离心20 min,取上清液置于冰上并混匀,待后续测定。将紫外分光光度计预热30 min以上,调节测定波长至534 nm,使用提取液进行调零操作。测定前,将所有试剂分别置于对应温度下水浴5 min以上;充分混匀后,在室温下静置15 min,取200 μL 反应液加入96孔板或微量比色皿中。在534 nm波长下测定各孔/各管吸光值,其回归方程为: $y=809.21x+6.798 8$ ($R^2=0.995 7$)。根据标准曲线,将样品的吸光差值(ΔA)代入公式作为 x 值,计算得到样品浓度 y (单位: $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)。按样本鲜质量计算维生素C含量,公式为:

$$w(\text{维生素C})/(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}) = \frac{y \times V_{\text{样}}}{W}。$$

式中: y 为样品浓度($\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$); $V_{\text{样}}$ 加入反应体系中上清液体积(mL); W 为样本质量(g)。

1.4.4 单宁含量测定 采用紫外分光光度法测定单宁含量。样本经烘干至恒质量后,粉碎并过40目筛;准确称取约0.1 g筛后样品,加入1 mL提取液,用封口膜密封以防止液体溅出,于70 °C水浴中提取30 min,其间可多次摇晃混匀。提取后于12 000 r min⁻¹、25 °C条件下离心10 min,取上清液,用提取液定容至1 mL,待测。标准品制备:将5000 nmol·mL⁻¹标准液用提取液稀释,得到浓度为6.25、3.125、1.562 5、0.781 25、0.4、0.2 nmol·mL⁻¹的标准工作液。测定方法:紫外分光光度计提前预热30 min,调节波长至275 nm,以蒸馏水调零。将反应体系充分混匀后,振荡5 min,于13 000g条件下离心20 min,取上清液200 μL 测定275 nm处吸光度,分别记录为 $A_{\text{测定管}}$ 、 $A_{\text{对照管}}$ 、 $A_{\text{标准管}}$ 、 $A_{\text{空白管}}$ 。计算方法:分别计算 $\Delta A_{\text{测定}}$ ($A_{\text{对照管}} - A_{\text{测定管}}$)和 $\Delta A_{\text{标准}}$ ($A_{\text{标准管}} - A_{\text{空白管}}$);以标准溶液浓度为横坐标(x)、 $\Delta A_{\text{标准}}$ 为纵坐标(y)绘制标准曲线,得回归方程 $y=43.651x+0.141 2$ ($R^2=0.993 4$)。按样本鲜质量计算单宁含量,公式为:

$$b(\text{单宁})/(\text{nmol}\cdot\text{g}^{-1}) = \frac{X \times V_{\text{提取}}}{W}。$$

式中: X 为单宁的含量(mg); $V_{\text{提取}}$ 为加入提取液体积,1 mL; W 为样本质量(g)。

1.4.5 总黄酮含量测定 采用亚硝酸钠-硝酸铝-氢氧化钠比色法测定总黄酮含量。样本经烘干至恒质量后,粉碎并过40目筛;准确称取约0.1 g筛后样品,加入1 mL提取液,采用超声提取法处理:超声功率300 W,工作5 s、间歇8 s,提取温度60 °C,提取时间30 min。提取后于12 000 r min⁻¹、25 °C条件下离心10 min,取上清液,用提取液定容至1 mL,待测。标准品制备:将10 mg·mL⁻¹芦丁标准溶液进行二倍系列稀释,得到浓度为1.25、0.625、0.312 5、0.156 2、0.078 1、0.039 1、0.019 5 mg·mL⁻¹的标准工作液。测定方法:紫外分光光度计提前预热30 min以上,调节波长至510 nm,以蒸馏水调零;将反应体系充分混匀后,置于37 °C水浴中孵育45 min,随后10 000g离心10 min,取上清液200 μL,置于微量玻璃比色皿或96孔板中,测定510 nm处吸光度(A₅₁₀)。计算方法:分别计算ΔA(A_{测定}-A_{对照})和ΔA'(A_{标准}-A_{空白});以芦丁浓度为横坐标(x)、ΔA'为纵坐标(y)绘制标准曲线,其回归方程为y=3.412 9x+0.012 5(R²=0.999 4)。按样本鲜质量计算总黄酮含量,公式为:

$$w(\text{总黄酮})/(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}) = \frac{X \times V_{\text{提取}}}{W}$$

式中:X为总黄酮的含量(mg);V_{提取}为提取液总体积(mL);W为样本质量(g)。

1.5 板栗品质的综合评价方法

1.5.1 主成分分析 通过公式(1)对各评价指标进行Z分数标准化处理,得到第i个样本在第j项指标(x_{ij})上的标准值x_{ij}^{*}。利用SPSS 22.0软件进行主成分分析,计算获得特征值、单位特征向量,以及各主成分的方差贡献率和累计方差贡献率;选取特征值大于1的主成分,计算其得分后,以各主成分的方差贡献率为权重,求解综合分值(Y_i)。最后依据综合分值高低,对不同板栗优株进行排序并开展综合分析(式2)。

$$x_{ij}^* = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{S_j} \quad (1)$$

式中: \bar{x}_j 为第j项指标的平均值,S_j为第j项指标的标准差。

$$Y_i = \sum X_n B_n \quad (2)$$

式中:Y_i为第i个评价对象的综合得分;X_n为第n个主成分的方差贡献率;B_n为第i个评价对象在第n个主成分上的得分。

1.5.2 熵值法 熵值法是一种基于信息熵的客观赋

权方法,在多指标综合评价中广泛应用。设供试样本数和评价指标数构建原始数据矩阵X[式(3)],形成评价基础。评价指标(D_{ij})分为正向指标和负向指标,采用式(4)、(5)对评价指标的正向和负向性指标分别进行正向化处理,因为各评价指标量纲不同,对D_{ij}用式(6)进行无量纲化处理得到归一化值d_{ij}。由式(7)、(8)计算第j项评价指标的信息熵值E_j和信息效用值g_j,并根据式(9)确定第j项评价指标的权重系数W_j,最后通过式(10)归一化值加权求和得到各样本的综合评价得分Y_i。

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix}; \quad (3)$$

$$D_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_{ij})}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})}; \quad (4)$$

$$D_{ij} = \frac{\max(x_{ij}) - x_{ij}}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})}; \quad (5)$$

$$d_{ij} = \frac{D_{ij}}{\sum_{i=1}^m D_{ij}} \quad (6)$$

式中:d_{ij}为第j个指标下第i个被评价对象所占的比重。

$$E_j = -\frac{1}{\ln(m)} \sum_{i=1}^m (d_{ij} \cdot \ln d_{ij}); \quad (7)$$

$$g_j = 1 - E_j; \quad (8)$$

$$W_j = \frac{g_j}{\sum_{j=1}^n g_j} \quad (9)$$

式中:0 ≤ W_j ≤ 1且∑_{j=1}ⁿW_j = 1。

$$Y_i = \sum_{j=1}^n W_j \cdot d_{ij} \quad (10)$$

1.5.3 熵权TOPSIS法 将式(3)构建的原始数据矩阵经过标准化处理后的数据代入式(11)中得到加权数据矩阵Q_{ij},如式(12)所示,进一步通过式(13)、(14)找出各项指标的最优数值(P_j⁺)和最劣数值(P_j⁻),并通过式(15)、(16)计算各个评价指标与最优数值和最劣方案数值的欧式距离(T_i⁺, T_i⁻),最后用式(17)计算各个评价对象与最优值的相对接近度(C_i),根据C_i的大小进行排序,C_i越大,表明评价对象越好,C_i越小,表明评价对象越差。

$$V_{ij} = \frac{d_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m d_{ij}^2}}; \quad (11)$$

$$Q_{ij} = V_{ij} \times W_j. \quad (12)$$

最优数值 P_j^* 和最劣方案数值 P_j^- :

$$P_j^* = \max_i Q_{ij}; \quad (13)$$

$$P_j^- = \min_i Q_{ij}. \quad (14)$$

欧式距离 T_i^+, T_i^- :

$$T_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (P_j^* - Q_{ij})^2}; \quad (15)$$

$$T_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (P_j^- - Q_{ij})^2}; \quad (16)$$

$$C_i = \frac{T_i^-}{T_i^+ + T_i^-}. \quad (17)$$

1.6 肯德尔和谐系数一致性检验

肯德尔和谐系数通常被称为 Kendall's w 系数,用来确定数据检验的相关性。根据 Tchokponhoué 等^[18]方法计算卡方值 (X^2),并对统计量的显著关系进行检验,判断 P 值是否呈现出显著性 ($P < 0.05$)。若呈显著性,拒绝原假设,则说明数据呈现一致性;反之则说明数据不呈现一致性。

1.7 数据处理

采用 Microsoft Excel 2014 初步统计试验数据;采用 Arcmap 10.8 绘制望谟县地图;采用 SPSS 23.0 进行主成分分析并进行单因素方差分析 (one-way ANOVA),结合 Duncan 多重比较法分别评价矿质元素和活性物质含量的差异 ($P < 0.05$ 表示差异显著);利用 Origin 2024 绘制相关性热图。

2 结果与分析

2.1 不同望谟优株矿质元素含量分析

不同望谟板栗优株种仁 P、K、Ca、Mg、Fe、Mn、Zn、Cu 和 B 等 9 种矿质元素含量存在显著差异 ($P < 0.05$) (表 1)。K 含量 (w , 后同) 变化范围为 5 550.941~8 031.320 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; Cu 含量最低,变化范围为 0.920~8.765 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。在大量元素中,WM20 的 P 含量显著高于其他单株 ($P < 0.05$),为 1 546.315 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,而 WM20 的 Ca 含量与 WM28 不存在显著差异,分别为 467.952 和 459.937 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,但显著高于其他单株 ($P < 0.05$); WM35 的 K 含量最高,为 8 031.320 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,较最低的 WM2 (5 550.941 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 显著提高 44.68%,且其他大量元素均处于较高水平。Mg 含量最高的为 WM3 (1 374.478 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),最低的为 WM8 (849.449 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。在微量元素中,WM6 的 Fe 含量和 WM19 的 Mn 含量均显著高于其他单株 ($P < 0.05$); Zn 含量最高是 WM35 (27.759 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),

最低为 WM4 (5.927 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); WM31 的 Cu 含量为 8.765 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,显著高于其他单株 ($P < 0.05$),而 B 含量最高的为 WM23 (10.682 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),其次是 WM35 (9.371 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。望谟板栗优株果实矿质元素含量的变异系数为 9.32%~80.19%,按从低到高排序为 K 含量 (9.32%) < Mg 含量 (11.95%) < P 含量 (14.62%) < Fe 含量 (24.63%) < B 含量 (29.09%) < Ca 含量 (31.19%) < Zn 含量 (43.64%) < Mn 含量 (48.00%) < Cu 含量 (80.19%)。

2.2 不同望谟优株抗氧化活性成分含量分析

不同望谟优株种仁抗氧化活性成分含量存在显著差异 ($P < 0.05$) (表 2)。WM7 的总酚和单宁含量均显著高于其他单株 ($P < 0.05$),分别为 2.630 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 363.727 $\text{nmol} \cdot \text{g}^{-1}$; 而 WM5 的总酚含量 (0.857 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$) 和 WM31 的单宁含量 (156.263 $\text{nmol} \cdot \text{g}^{-1}$) 均较低,分别较 WM7 显著降低了 67.41% 和 57.04%。维生素 C 含量变化范围为 0.068~0.449 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$,以 WM40 的含量最高,WM35 次之 (0.417 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$),WM28 的含量最低 (0.068 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)。总黄酮含量变化程度相对较小 (0.595~0.672 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$),其中 WM8 的总黄酮含量最高,较含量最低的 WM24 显著提高 12.94%。望谟板栗优株果实抗氧化活性成分含量的变异系数范围为 4.84%~52.49%,按从低到高排序为总黄酮含量 (4.84%) < 单宁含量 (20.28%) < 总酚含量 (31.64%) < 维生素 C 含量 (52.49%)。

2.3 不同望谟板栗优株果实营养成分相关性分析

望谟板栗优株果实矿质元素与抗氧化活性成分含量之间存在复杂的相关性 (图 3)。结果表明, P 含量与 Mg、B 和维生素 C 含量呈极显著正相关 ($P < 0.01$),与 K 和总酚含量呈显著正相关 ($P < 0.05$),与 Fe 含量呈显著负相关 ($P < 0.05$); K、B、P 含量与维生素 C 含量呈极显著正相关 ($P < 0.01$), K 含量与 Mg 和 Zn 含量呈显著正相关 ($P < 0.05$); Ca 含量与 Fe 含量呈极显著正相关 ($P < 0.01$),与 Mn 含量呈极显著负相关 ($P < 0.01$); 维生素 C 含量与 Mg 含量呈显著正相关 ($P < 0.05$),说明 K、B、P 和 Mg 对板栗维生素 C 积累具有一定的促进作用; 单宁含量与 Fe 和总酚含量呈极显著正相关 ($P < 0.01$),与 Cu 含量呈显著负相关 ($P < 0.05$),表明 Cu 对单宁的积累有一定的拮抗作用; 总黄酮含量与其他指标均无显著相关性,推测望谟板栗果实中总黄酮的合成与积累过程中的代谢网络可能相对独立。

表 1 不同板栗优株种仁矿物质元素成分含量比较
Table 1 Comparison of mineral component content in fruits among different superior *Wangmo C. mollissima* kernels

材料 Material	w(P)/(mg·kg ⁻¹)	w(K)/(mg·kg ⁻¹)	w(Ca)/(mg·kg ⁻¹)	w(Mg)/(mg·kg ⁻¹)	w(Fe)/(mg·kg ⁻¹)	w(Mn)/(mg·kg ⁻¹)	w(Zn)/(mg·kg ⁻¹)	w(Cu)/(mg·kg ⁻¹)	w(B)/(mg·kg ⁻¹)
WM1	1 195.769±16.482 cde	6 801.033±400.400 bc	352.492±17.828 c	1 129.736±10.052 b	42.521±0.639 e	23.821±2.907 j	10.146±0.428 i	4.206±0.163 b	4.808±0.327 gh
WM2	1 035.447±57.127 h	5 550.941±235.169 f	229.948±26.687 f	912.321±22.049 j	37.066±0.846 f	24.734±1.108 j	13.323±0.659 def	1.865±0.183 f	4.031±0.117 h
WM3	1 171.562±54.426 cdef	6 592.467±303.784 bcd	176.592±17.141 gh	1 374.478±11.259 a	28.245±0.760 h	79.327±1.838 e	7.143±0.322 jk	3.739±0.423 c	7.785±0.423 c
WM4	961.591±29.331 i	6 805.202±277.903 bc	289.407±15.538 e	876.759±2.348 k	33.036±1.037 g	31.067±1.989 i	5.927±0.326 k	1.024±0.042 hi	4.094±0.363 h
WM5	935.852±33.695 i	6 423.190±248.653 bcde	291.603±46.165 e	971.860±4.003 h	58.272±1.906 b	75.163±1.966 f	12.308±0.757 fg	2.645±0.205 d	5.096±0.062 fg
WM6	1 054.212±30.873 gh	6 406.910±257.994 bcde	406.312±42.779 b	1 022.366±23.453 fg	64.937±1.573 a	89.718±2.755 d	8.166±0.592 j	0.920±0.048 i	6.789±0.430 d
WM7	1 237.423±22.070 c	5 849.752±556.201 ef	348.131±29.116 c	1 059.758±14.729 def	42.773±1.981 e	38.884±2.291 h	10.134±0.564 i	1.831±0.052 f	5.624±0.600 ef
WM8	1 141.946±38.418 def	5 584.102±307.580 f	169.754±8.268 h	849.449±31.297 k	31.080±0.226 g	69.764±3.049 g	6.915±0.392 jk	0.955±0.057 i	4.031±0.360 h
WM13	1 202.003±20.643 cd	6 900.250±347.936 b	317.318±25.693 cde	1 129.080±29.594 b	42.416±0.836 e	35.383±2.189 h	7.010±0.355 jk	1.928±0.120 f	5.725±0.403 ef
WM18	1 125.613±11.560 defg	6 219.693±391.142 cde	313.718±13.668 cde	1 034.045±9.264 efg	46.440±1.663 d	29.172±2.624 i	12.447±0.881 efg	1.156±0.046 hi	7.523±0.314 c
WM19	1 234.454±35.774 c	6 656.885±370.934 bcd	188.050±14.364 fgh	1 033.514±30.075 efg	36.065±0.890 f	130.440±0.538 a	13.693±0.427 de	2.390±0.066 e	6.104±0.463 de
WM20	1 546.315±132.046 a	6 266.485±349.183 bcde	467.952±14.622 a	1 102.317±18.248 bc	49.633±1.045 c	18.169±3.206 k	12.884±0.422 defg	1.068±0.020 hi	7.860±0.471 c
WM23	1 172.266±30.067 cdef	6 868.223±274.301 bc	216.385±22.593 fg	852.231±22.785 k	41.106±2.081 e	89.509±2.654 d	10.849±0.408 hi	2.688±0.083 d	10.682±0.687 a
WM24	948.988±24.264 i	5 954.478±358.394 ef	295.982±36.021 de	925.585±59.469 ij	46.845±0.544 d	104.435±2.603 c	22.363±1.399 b	1.250±0.065 gh	4.714±0.319 gh
WM28	791.970±26.430 j	6 132.093±129.240 def	459.937±25.195 a	1 015.118±21.523 g	59.438±1.553 b	67.169±2.752 g	16.062±0.668 c	0.923±0.022 i	6.013±0.467 de
WM31	1 115.844±64.376 efg	6 595.917±315.664 bcd	314.102±20.374 cde	914.856±3.457 j	23.399±1.016 i	92.342±3.165 d	10.496±0.475 i	8.765±0.374 a	6.655±0.513 d
WM32	1 197.775±28.291 cde	6 318.060±499.227 bcde	146.472±10.079 h	1 069.386±24.999 cde	36.188±1.294 f	66.956±1.033 g	6.946±0.564 jk	1.136±0.020 hi	6.268±0.493 de
WM35	1 418.853±23.410 b	8 031.320±344.625 a	344.958±29.791 c	1 126.879±24.771 b	32.051±1.051 g	66.865±3.356 g	27.759±1.788 a	2.089±0.072 f	9.371±0.589 b
WM36	1 090.306±7.499 fgh	6 840.338±137.290 bc	340.474±16.347 cd	955.547±8.458 hi	51.575±0.935 c	74.493±2.621 f	11.890±0.369 gh	1.812±0.064 f	9.344±0.376 b
WM40	1 145.787±25.766 def	6 746.503±225.862 bcd	220.107±17.578 fg	1 086.108±17.023 cd	37.531±1.081 f	113.421±2.142 b	13.871±0.244 d	1.480±0.047 g	5.622±0.507 ef
变异系数 CV/%	14.62	9.32	31.19	11.95	24.63	48.00	43.64	80.19	29.09

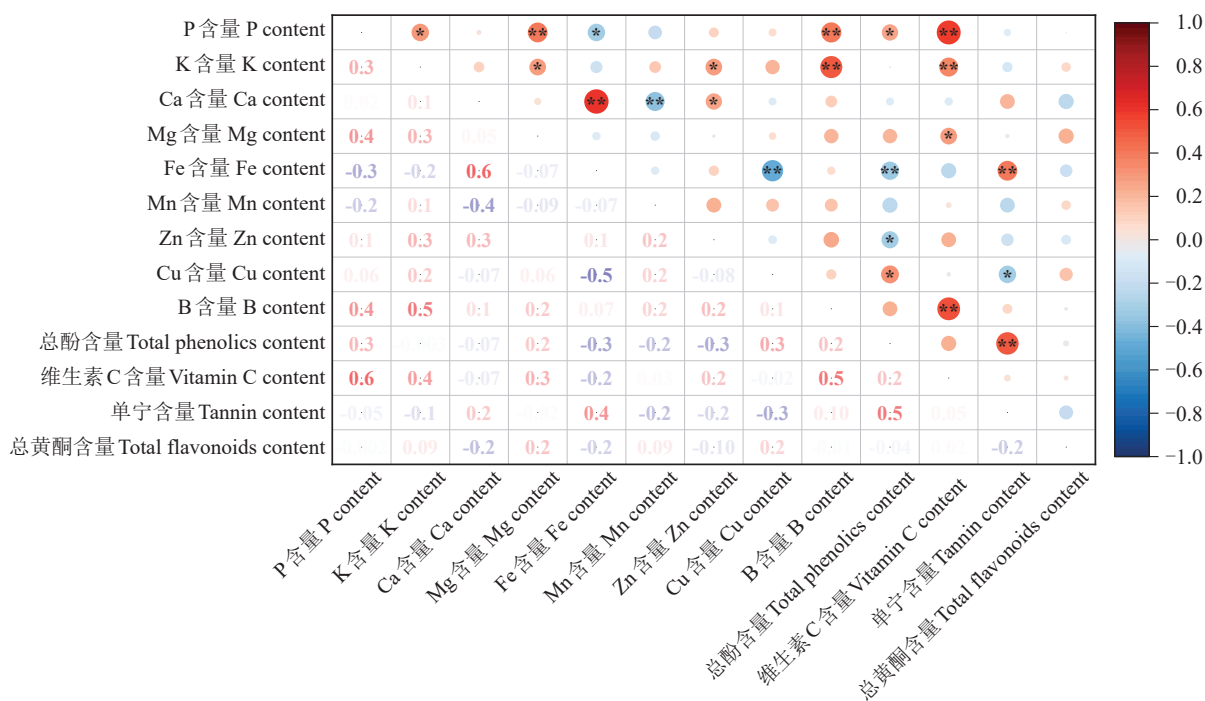
注: 同列不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。下同。

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

表2 不同板栗优株种仁活性成分含量比较

Table 2 Comparison of bioactive substances content in fruits among different superior Wangmo *C. mollissima* kernels

材料 Material	w(总酚) Total phenolics content/(mg·g ⁻¹)	w(维生素C) Vitamin C content/(mg·g ⁻¹)	b(单宁) Tannin content/(nmol·g ⁻¹)	w(总黄酮) Total flavonoids content/(mg·g ⁻¹)
WM1	1.533±0.124 de	0.119±0.010 ghi	212.027±9.384 e	0.657±0.033 abcde
WM2	1.143±0.074 hi	0.284±0.020 d	205.620±10.279 ef	0.632±0.023 abcdefg
WM3	1.787±0.085 c	0.289±0.007 d	187.240±1.926 g	0.666±0.013 ab
WM4	1.903±0.076 i	0.103±0.007 hij	213.497±9.072 e	0.606±0.012 fg
WM5	0.857±0.042 j	0.081±0.003 jk	231.293±5.842 cd	0.642±0.029 abcdef
WM6	0.903±0.076 j	0.208±0.017 ef	268.283±6.850 b	0.663±0.029 abc
WM7	2.630±0.135 a	0.193±0.017 f	363.727±5.722 a	0.605±0.025 fg
WM8	1.447±0.092 ef	0.123±0.009 ghi	184.350±2.669 g	0.672±0.021 a
WM13	1.927±0.087 bc	0.277±0.014 d	231.707±3.319 cd	0.634±0.016 abcdefg
WM18	1.230±0.060 gh	0.143±0.008 g	214.540±10.624 de	0.662±0.037 abcd
WM19	0.863±0.100 j	0.097±0.006 ijk	165.533±12.096 h	0.631±0.018 abcdefg
WM20	1.203±0.103 ghi	0.363±0.032 c	192.617±14.726 fg	0.599±0.037 fg
WM23	1.967±0.067 b	0.386±0.032 c	275.180±7.031 b	0.617±0.110 cdefg
WM24	0.880±0.070 j	0.133±0.011 gh	192.190±6.111 fg	0.595±0.019 g
WM28	1.327±0.081 fg	0.068±0.003 k	241.830±6.022 c	0.619±0.018 bcdefg
WM31	1.847±0.110 bc	0.184±0.006 f	156.263±7.106 h	0.645±0.015 abcdef
WM32	1.607±0.101 d	0.215±0.007 ef	237.450±15.762 c	0.616±0.033 defg
WM35	1.343±0.101 fg	0.417±0.037 b	207.130±19.299 ef	0.655±0.017 abcde
WM36	1.333±0.071 fg	0.232±0.015 e	217.200±6.494 de	0.612±0.013 efg
WM40	1.227±0.058 ghi	0.449±0.038 a	208.883±15.595 ef	0.654±0.029 abcde
变异系数 CV/%	31.64	52.49	20.28	4.84



*在 0.05 水平表示显著相关,**在 0.01 水平表示极显著相关。

* indicates significant correlation at 0.05 level, ** indicates extremely significant correlation at 0.01 level.

图3 13个种仁营养成分性状指标的相关性

Fig. 3 Correlation of 13 nutritional component trait indicators in kernels

2.4 主成分分析

为避免不同维度对分析结果的影响,对供试20个望谟板栗优株的13项果实营养成分指标Z-标准化处理后进行主成分分析,以特征值大于1为标准,选取了5个主成分进行研究,累计贡献率达到74.089%(表3),表明这5个主成分能够反映20个望谟板栗优株的13项果实营养成分的基本信息。主成分载荷及得分系数矩阵结果表明(表3),第一主成分的特征值最大,为3.041,贡献率达到23.395%,其载荷较高的是维生素C、P和B含量,因子载荷分别为0.846、0.785、0.745;第二主成分特征值为2.345,贡献率为18.041%,该主成分与Mn含量有关,载荷因子为0.709;第三主成分的特征值为1.956,贡献率为15.044%,其载荷较高的是Ca和Fe含量,分别为0.934和0.747;第四主成分方差贡献率为9.339%,主要与总黄酮含量有关,载荷因子为-0.710,这表明总黄酮含量与第四主成分呈负相关,即在该维度上,总黄酮含量高反而会拉低评分;第五主成分与Cu含量有关,载荷因子为0.923,方差贡献率为8.270%。前3个主成分累计方差贡献率为

表3 不同望谟板栗优株种仁营养成分主成分分析

Table 3 Principal component analysis of thirteen nutritional component trait indicators in different superior Wangmo *C. mollissima* kernels

指标 Index	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
P含量 P content	0.785	-0.223	-0.106	-0.174	-0.057
K含量 K content	0.653	0.315	0.157	-0.175	0.310
Ca含量 Ca content	0.063	-0.068	0.934	0.088	0.045
Mg含量 Mg content	0.513	-0.308	0.138	-0.500	-0.018
Fe含量 Fe content	-0.208	0.081	0.747	0.264	-0.361
Mn含量 Mn content	-0.011	0.709	-0.345	0.092	0.181
Zn含量 Zn content	0.322	0.645	0.299	0.023	-0.096
Cu含量 Cu content	0.006	0.015	-0.122	-0.214	0.923
B含量 B content	0.745	0.209	0.147	0.239	0.231
总酚含量 Total phenolics content	0.317	-0.664	-0.196	0.357	0.455
维生素C含量 Vitamin C content	0.846	0.031	-0.198	0.061	-0.112
单宁含量 Tannin content	0.094	-0.48	0.236	0.669	-0.115
总黄酮含量 Total flavonoids content	0.036	-0.048	-0.148	-0.710	0.142
特征值 Eigenvalue	3.041	2.345	1.956	1.214	1.075
贡献率 Contribution rate/%	23.395	18.041	15.044	9.339	8.270
累计贡献率 Cumulative contribution rate/%	23.395	41.437	56.480	65.819	74.089

56.480%,大于50%^[19],因此认为维生素C、P、B、Mn、Ca和Fe含量是板栗营养品质的关键指标。

依据特征值确定主成分贡献率(作为权重),结合标准化数据的主成分得分,通过得分与权重乘积累加,完成综合排名(表4)。各变量对目标指标X的贡献关系可表示为:

表4 不同望谟板栗优株种仁营养成分因子得分、综合得分和综合排名

Table 4 Factor score, comprehensive score, and comprehensive ranking of nutritional components in different superior Wangmo *C. mollissima* kernels

材料 Material	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X	排名 Ranking
WM35	2.548	1.322	0.609	-0.735	0.092	1.168	1
WM23	1.163	0.435	-0.918	2.340	0.752	0.666	2
WM36	0.361	0.739	0.638	0.964	0.256	0.573	3
WM20	1.365	-0.596	1.230	-0.235	-1.190	0.373	4
WM28	-1.136	0.376	1.886	0.596	0.056	0.197	5
WM31	-0.545	0.403	-0.420	-0.317	3.468	0.188	6
WM24	-0.959	1.792	0.062	0.794	-0.647	0.174	7
WM6	-0.330	0.157	1.244	-0.168	-0.581	0.101	8
WM40	0.800	0.791	-1.085	-0.383	-0.798	0.087	9
WM19	-0.242	1.473	-0.951	-0.534	-0.089	0.012	10
WM5	-1.206	0.596	0.811	-0.211	0.026	-0.095	11
WM13	0.496	-1.271	0.209	-0.287	0.057	-0.140	12
WM7	0.217	-2.262	0.159	2.086	0.266	-0.157	13
WM18	-0.164	-0.424	0.608	-0.784	-0.479	-0.184	14
WM1	-0.298	-1.066	0.990	-1.458	0.897	-0.236	15
WM3	0.853	-0.828	-0.991	-1.580	0.580	-0.268	16
WM32	0.144	-0.611	-1.359	0.498	-0.684	-0.393	17
WM4	-1.100	-0.247	-0.242	0.212	-0.254	-0.458	18
WM2	-0.772	-0.335	-0.759	-0.146	-1.004	-0.610	19
WM8	-1.195	-0.443	-1.720	-0.652	-0.725	-0.998	20

$$X=0.316X_1+0.243X_2+0.203X_3+0.126X_4+0.112X_5。$$

X越大则说明该板栗的综合品质越高。根据主成分核心指标进行排序,20个板栗优株的前5名为WM35、WM23、WM36、WM20和WM28。综合得分排名较低的优株为:WM3、WM32、WM4、WM2和WM8。

2.5 熵值法评价

根据标准化数据,对20个望谟板栗优株的13项果实营养成分建立数据矩阵,其中单宁含量为负向指标,其他12项成分均为正向指标,计算出信息熵、信息效用值及权重系数(表5)。信息熵是影响品质指标中离散程度的重要指标,信息熵与权重成反比,即信息熵越大,权重系数越小。营养成分权重系数排

序为Cu含量>总酚含量>Zn含量>B含量>维生素C含量>Mg含量>Mn含量>单宁含量>Ca含量>K含量>Fe含量>P含量>总黄酮含量。将权重值

代入公式9计算综合排名。综合排名前5的优株分别为WM35、WM31、WM3、WM23和WM40,说明这5个板栗优株果实营养成分综合表现较优(表6)。

表5 熵值法计算结果

Table 5 Calculation results of the entropy method

项目 Item	P含量 P content	K含量 K content	Ca含量 Ca content	Mg含量 Mg content	Fe含量 Fe content	Mn含量 Mn content	Zn含量 Zn content	Cu含量 Cu content	B含量 B content	总酚含量 Total phenolics content	维生素C含量 Vitamin C content	单宁含量 Tannin content	总黄酮含量 Total flavonoids content
信息熵值 Information entropy	0.957	0.935	0.929	0.910	0.942	0.913	0.887	0.774	0.890	0.886	0.897	0.927	0.976
信息效用值 Information utility value	0.043	0.065	0.071	0.090	0.058	0.087	0.113	0.226	0.110	0.114	0.103	0.073	0.024
权重系数 Weight coefficient	3.664	5.546	6.069	7.619	4.917	7.376	9.586	19.229	9.301	9.681	8.753	6.228	2.030

表6 不同板栗优株果实营养成分熵值法综合得分和综合排名

Table 6 Comprehensive score and comprehensive ranking of nutritional components from different superior Wangmo *C. mollissima* kernels based on entropy method

材料 Material	综合得分 Composite score	排名 Ranking	材料 Material	综合得分 Composite score	排名 Ranking
WM35	0.576 4	1	WM7	0.331 9	11
WM31	0.519 4	2	WM19	0.325 0	12
WM3	0.473 4	3	WM18	0.317 5	13
WM23	0.449 7	4	WM28	0.304 2	14
WM40	0.414 2	5	WM5	0.293 0	15
WM36	0.382 4	6	WM24	0.265 3	16
WM1	0.378 5	7	WM32	0.262 5	17
WM20	0.378 1	8	WM2	0.225 1	18
WM13	0.362 9	9	WM8	0.195 9	19
WM6	0.349 8	10	WM4	0.136 3	20

2.6 TOPSIS评价结果

根据熵值法得出的指标权重,分别乘以对应的熵权系数,构建加权矩阵计算正理想解距离(T^+)、负理想解距离(T^-)和相对接近度(C)(表7)。C与 T^+ 的距离越小(1为标准),果实营养成分的综合品质越好。根据C的大小对其进行排序,前5的优株分别为WM35(0.554 4)、WM31(0.514 1)、WM3(0.479 4)、WM23(0.462 1)和WM40(0.436 6)。其中WM35的C最高,在20个优株中综合表现最好,而WM4(0.197 4)表现最差。

2.7 评价结果对比分析

肯德尔和谐系数一致性检验是对总体的相关

性进行分析,和谐系数越接近1则一致性越强。对熵值法与熵权TOPSIS法的排序结果进行肯德尔和谐系数检验,得 $\chi^2=16.2$,和谐系数 $K=0.81(P<0.05)$,表明两者整体一致性较高,且前5名排序完全重合,仅后5名存在细微差异(表8)。对3种方法的联合检验显示, $\chi^2=22.8(P<0.05)$,表明评价结果可靠;和谐系数 $K=0.57$,提示整体一致性中等,结果存在一定差异。其中,主成分分析法(PCA)与后两种方法的前10名重合率70%,仅WM35(第一名)排序一致,其余单株排序均不同。该差异源于3种方法的核心计算原理不同:主成分分析法通过降维整合指标的方差贡献与相关性,且WM35、WM23、WM36、WM20、WM28的优势指标(维生素C、P、B、Mn、Ca和Fe含量)符合PCA对“全局协同信息”的偏好,故排名领先;熵值法以指标离散度分配权重,Cu含量(19.229)、总酚含量(9.681)等高离散度指标主导评价,前5个板栗优株在这些高权重指标上表现突出,因此排名靠前;而熵权TOPSIS法看重样本的“整体均衡性”和“与最优方案的贴进度”,前5个板栗优株并非单一指标极端突出,而是在高权重指标(Cu、总酚含量等)表现优异的同时,中低权重指标(如总黄酮、P含量等)也较均衡,因此与正理想解的距离(T^+)更小、与负理想解的距离(T^-)更大,贴进度更高,排名领先。

3 讨论

果实品质的优劣对板栗产业的可持续发展具有决定性意义,而矿质元素含量则是评价板栗果实品质的关键指标。本研究发发现望谟板栗优株果实中矿质元素

表7 不同望谟板栗优株种仁营养成分 TOPSIS 法计算结果及综合评价

Table 7 Calculation results of the TOPSIS method and comprehensive evaluation of nutritional components from different superior Wangmo *C. mollissima* kernels

材料 Material	T^+	T^-	C	排序 Ranking	材料 Material	T^+	T^-	C	排序 Ranking
WM35	0.527 9	0.657 0	0.554 4	1	WM7	0.720 8	0.428 3	0.372 7	11
WM31	0.568 8	0.601 9	0.514 1	2	WM19	0.723 5	0.416 5	0.365 4	12
WM3	0.591 9	0.545 1	0.479 4	3	WM28	0.752 4	0.417 7	0.357 0	13
WM23	0.620 0	0.532 7	0.462 1	4	WM18	0.721 9	0.395 2	0.353 8	14
WM40	0.655 4	0.507 9	0.436 6	5	WM5	0.741 6	0.368 7	0.332 1	15
WM20	0.705 0	0.503 1	0.416 5	6	WM24	0.788 2	0.389 7	0.330 8	16
WM36	0.656 8	0.443 0	0.402 8	7	WM32	0.759 7	0.319 6	0.296 1	17
WM1	0.657 0	0.434 3	0.398 0	8	WM8	0.851 1	0.340 7	0.285 9	18
WM6	0.721 4	0.469 1	0.394 0	9	WM2	0.797 6	0.293 9	0.269 3	19
WM13	0.670 4	0.418 7	0.384 4	10	WM4	0.879 9	0.216 4	0.197 4	20

表8 3种方法排名前10的望谟板栗优株

Table 8 Top 10 superior Wangmo *C. mollissima* ranked by three methods

排名 Ranking	主成分分析法 Principal component analysis	熵值法 Entropy evaluation method	熵权TOPSIS法 Entropy-weighting TOPSIS
1	WM35	WM35	WM35
2	WM23	WM31	WM31
3	WM36	WM3	WM3
4	WM20	WM23	WM23
5	WM28	WM40	WM40
6	WM31	WM36	WM20
7	WM24	WM1	WM36
8	WM6	WM20	WM1
9	WM40	WM13	WM6
10	WM19	WM6	WM13

含量存在显著差异($P < 0.05$)。在大量元素方面, K和P的含量较高,其变化范围分别为5 550.941~8 031.320和791.970~1 546.315 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,这一趋势与刘璐等^[20]的研究结果一致,但本研究K和P含量变化范围明显高于其报道值(K, 106.15~328.20 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; P, 59.06~96.62 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),推测可能与地域土壤养分状况有关^[21]。值得注意的是,本研究中Mg含量(849.449~1 374.478 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)明显高于王向红等^[22](159.200~281.300 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)的报道,具体原因有待进一步验证。微量元素虽含量较低,但在人体营养中具有重要意义^[23]。本研究中微量元素含量的变异幅度明显大于大量元素,尤其是Cu元素变异系数高达80.19%, Mn、Zn元素变异系数也分别达48.00%、43.64%,表明望谟板栗优株在微量元素积累能力上可能存在极强的遗传分化。具体来看,望

谟板栗果实中Mn和Zn含量变化范围分别为18.169~130.440和5.927~27.795 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,该变化范围均大于刘杨^[24]在迁西县对京东板栗的研究结果(Mn: 23.06~46.43 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Zn: 12.26~14.64 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),推测这与两地土壤类型的差异密切相关,进一步导致了板栗果实中Mn、Zn元素积累的差异。此外, WM31的Cu含量(8.765 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)显著高于其他单株,而Cu是多酚氧化酶、超氧化物歧化酶等抗氧化酶的关键组分,可增强果实抗氧化能力与抗逆性^[24]。此外,本研究发现大部分单株的Cu含量不仅低于欧洲栗^[25-26],且与中国东部(如浙江、江西)及南部(如广东)等地区板栗(Cu含量区间为6~48 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)存在明显差异^[27],但与河北板栗的部分研究结果相近^[28],这一差异的形成可能既受物种遗传背景的显著调控^[29],也可能与生长环境异质性及根系养分吸收偏好的差异密切相关^[30]。从总体来看,本研究测得的矿质元素含量与大部分报道的研究存在差异,这一发现可为板栗的产地溯源提供潜在的理论依据。此外,Zhou等^[31]研究指出,板栗矿质元素含量在不同年份存在明显波动,这可能与环境因子年度差异有关,也在一定程度上解释了本研究结果与其他报道差异的原因。需要指出的是,本研究仅基于2025年单一年份数据,尚未系统分析望谟县不同土壤类型与果实品质的关联性,后续将持续监测,以明确矿质元素含量的年度动态变化规律。

酚类物质作为果实中关键的次生代谢产物与核心抗氧化活性成分,其含量与组成直接影响果实的功能性价值、食用品质及采后贮藏特性^[32]。不同望谟板栗优株果实中总酚、单宁、维生素C及总黄酮等

抗氧化活性成分含量存在显著差异。总酚和单宁作为板栗中核心的抗氧化物质,其含量水平决定优株的功能性潜力与食用适配性。本研究中,总酚含量变化范围为 $0.857\sim 2.630\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,变幅大于 Xu 等^[33]报道的中国不同区域的板栗样品($1.03\sim 2.35\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$),表明望谟板栗在总酚积累上具有更丰富的遗传变异;但与西班牙特内里费岛欧洲栗($2.840\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$)^[34]和土耳其欧洲栗($5.00\sim 32.82\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$)^[35]相比仍存在差距,这可能源于种间遗传差异。值得关注的是,WM7 优株的总酚含量($2.630\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$)与单宁含量($363.727\text{ nmol}\cdot\text{g}^{-1}$)显著高于其他单株。从功能价值来看,较高的酚类物质积累使 WM7 果实可能具备更强的 DPPH、ABTS 自由基清除能力^[36];从贮藏特性来看,高酚类物质可延缓果实采后褐变与病原菌侵染^[37]。需注意的是,WM7 若用于鲜食,因高单宁含量($363.727\text{ nmol}\cdot\text{g}^{-1}$)易导致口腔涩味;而总酚与单宁含量较低的 WM5(总酚 $0.857\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$)、WM31(单宁 $156.263\text{ nmol}\cdot\text{g}^{-1}$),则更适配鲜食市场需求。维生素 C 是板栗的一种重要的营养物质和抗氧化剂,可以消除自由基,减少氧化应激^[38]。本研究中,望谟板栗优株的维生素 C 含量变化范围为 $0.068\sim 0.449\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,变异系数为 52.49%,整体低于马玉敏等^[39]对秦岭山脉居群野生板栗($0.420\sim 1.070\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$),而与北方产区栽培板栗存在一定相似性($0.140\sim 0.403\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$)^[40-42],这可能与野生、栽培种质的遗传背景差异对维生素 C 合成的调控差异相关。与其他功能性成分相比,望谟板栗优株的总黄酮含量变异程度较小(4.84%),最高值(WM8: $0.672\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$)仅较最低值(WM24: $0.595\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$)高出 12.94%;但其相对低于广西油栗、燕平和岱岳早丰等板栗品种(总黄酮含量均 $> 1\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$)^[43],这表明望谟板栗在总黄酮合成相关基因上可能存在较高的遗传一致性,或受当地的生态环境影响,具体原因有待进一步研究。

相关性分析多用于研究两个或多个变量之间的关联程度和方向。本研究发现,K、B 和 P 含量与维生素 C 含量呈极显著正相关,推测该三者可能作为协同调控因子参与了维生素 C 的生物合成调控。进一步分析发现,单宁含量与 Cu 含量呈显著负相关($P < 0.05$),田甜等^[44]在厚鳞柯果实中发现 Cu 含量与单宁含量呈负相关($r = -0.514$)。然而 Karamac^[45]提出坚果中单宁组分对 Cu^{2+} 具有较强的螯合能力,与本研究结论存在差异,可能源于植物为规避形成

无活性的稳定络合物,进化出了精细的区隔化调控机制^[46],导致两者在组织中的分布与积累呈现相互制约的态势,具体原因还有待进一步研究。值得注意的是,总黄酮含量与其他指标均未表现出显著相关性,而武妍妍等^[47]对河北省和山东省的板栗种质研究发现,总黄酮含量与总酚含量呈极显著正相关($P < 0.01$),这可能意味着受板栗品种自身的遗传背景或环境调控机制控制,体现出望谟板栗总黄酮积累的品种特异性或环境响应特殊性。

目前,板栗果实品质评价方法众多,传统评价体系普遍受主观意识干扰,难以实现对种质综合品质的精准量化。本研究中,通过主成分分析法进行降维将指标浓缩为 5 个主成分(累计贡献率 74.089%),明确维生素 C、P、B、Mn、Ca、Fe 含量为关键指标,但其“降维浓缩”不可避免损失 25.911%的信息,推测可能包含一些对特定育种目标(如抗逆性、特定风味物质)至关重要的“稀有特性”。熵值法的分析逻辑基于各品质指标的数据离散程度^[48],可有效规避传统方法的主观性与标准单一性缺陷。本研究中 Cu 含量(0.226)和总酚含量(0.114)的信息效用值较大,信息熵较小,故权重赋值较大,分别为 19.229 和 9.681;总黄酮含量(0.024)和 P 含量(0.043)的信息效用值较小,信息熵较大,故权重赋值较小,分别为 2.030 和 3.664。基于该权重计算的综合品质排名中,WM35、WM31、WM3 等 5 个单株靠前。但熵值法仅关注指标离散度,易忽略与核心品质强相关但离散度低的指标。一般认为,总黄酮含量与板栗甜度这一核心品质相关性较强^[47],但本研究中总黄酮含量指标离散程度小,仅通过熵值法计算综合得分削弱了该指标的作用,从而使结果可能出现偏差。为弥补主成分分析法的信息损失与熵值法的指标筛选局限,本研究进一步采用熵权-TOPSIS 法开展综合评价,前 5 名与熵值法前 5 名完全一致,但具体排序存在差异,这源于熵权-TOPSIS 法引入了“相对优劣”的比较逻辑,可更精准地区分单株间的细微品质差异,体现出该方法的优越性^[49]。值得注意的是,熵值法和熵权-TOPSIS 法更适用于排序和筛选,而非绝对意义上的重要性评估,在构建种质资源数据库时,可能会低估表现优异且稳定(离散度小)的优良性状的价值。为量化不同方法评价结果的一致性,本研究采用 Kendall 和谐系数检验进行验证,熵值法与熵权-TOPSIS 法的 Kendall 和谐系数为 0.81($P <$

0.05),表明二者排序一致性极强;而主成分分析法与上述两种方法的和谐系数为0.57($P < 0.05$),一致性稍弱,如WM6在主成分分析法中排名第8,在熵值法、熵权-TOPSIS法中分别排第10、第9。综上,3种客观赋权方法在望谟板栗品质评价中各有侧重,其中熵权-TOPSIS法综合优势更突出。

4 结 论

望谟板栗不同优株果实品质存在显著差异:大量元素变异系数较低(9.32%~31.19%),微量元素变异系数较高(24.63%~80.19%);抗氧化成分中,总酚、单宁和维生素C含量变异丰富($> 10\%$),而总黄酮含量较为稳定(4.84%)。其中,WM7优株种仁酚类物质含量突出,具有深加工潜力;WM5和WM31等优株种仁则更适宜鲜食。在3种品质评价方法中,熵值法与熵权TOPSIS法的结果一致性较高,而主成分分析法与熵权TOPSIS法差异明显。熵权TOPSIS法更适用于板栗多指标综合评价,据此筛选出WM35、WM31、WM3、WM23、WM40等5个优异单株。本研究结果为望谟板栗的品种筛选提供了科学的评价方法,为后续板栗品质改良及产业高质量发展提供了参考依据。

参考文献 References:

- [1] LI R, SHARMA A K, ZHU J C, ZHENG B, XIAO G S, CHEN L. Nutritional biology of chestnuts: A perspective review[J]. Food Chemistry, 2022, 395: 133575.
- [2] WEYH C, KRÜGER K, PEELING P, CASTELL L. The role of minerals in the optimal functioning of the immune system[J]. Nutrients, 2022, 14(3): 644.
- [3] ISLAM M R, AKASH S, JONY M H, ALAM M N, NOWRIN F T, RAHMAN M M, RAUF A, THIRUVENGADAM M. Exploring the potential function of trace elements in human health: A therapeutic perspective[J]. Molecular and Cellular Biochemistry, 2023, 478(10): 2141-2171.
- [4] UTHMAN A, GARBA Y. Citrus mineral nutrition and health benefits: A review[M]//GONZATTO M P, SANTOS J S. Citrus Research-Horticultural and Human Health Aspects. London: Intechopen, 2023.
- [5] 朱周俊, 袁德义, 邹锋, 杨华, 范晓明, 肖诗鑫, 邹昕芸, 李欣, 李果. 不同锥栗农家种仁中9种矿质元素含量的因子分析与聚类分析[J]. 食品科学, 2019, 40(2): 165-170.
ZHU Zhoujun, YUAN Deyi, ZOU Feng, YANG Hua, FAN Xiaoming, XIAO Shixin, ZOU Xinyun, LI Xin, LI Guo. Factor analysis and cluster analysis of contents of 9 mineral elements in seed kernels of *Castanea henryi* from different varieties[J]. Food Science, 2019, 40(2): 165-170.
- [6] EL-AKAD R H, EL SOUDA S S M, ABDELSALAM E, IBRAHIM F M, MOHAMMED R S. UPLC/HR-MS/MS and GC/MS metabolome profiling of *Castanea mollissima* Blume fruit extracts and its anti-inflammatory potentials[J]. Egyptian Journal of Chemistry, 2025, 68(2): 625-635.
- [7] 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 Chao. Evaluation analysis and selection of different Chinese chestnut germplasm resources[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2017.
- [8] 杜常健, 孙佳成, 武妍妍, 张国庆, 樊清波, 陈卫东, 任菲, 严冬辉, 江泽平, 史胜青. 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 Changjian, SUN Jiacheng, WU Yanyan, ZHANG Guoqing, FAN Qingbo, CHEN Weidong, REN Fei, YAN Donghui, JIANG Zeping, SHI Shengqing. Collection and quality evaluation of elite chestnut germplasm resources in Northern Yanshan Mountains[J]. Forest Research, 2020, 33(3): 1-11.
- [9] 魏源, 吕梦炆, 马亚特, 刘静, 王旋, 王东升. 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 Yuan, LÜ Mengyang, MA Yate, LIU Jing, WANG Xuan, WANG Dongsheng. Comprehensive evaluation of the nutritional quality of chestnut based on three methods[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2023, 52(6): 111-119.
- [10] LONG L, LÜ L L, QIU J, SUN D C, WEI S F, WAN X Q, GAO C. Comprehensive evaluation of fruit quality for premium Wangmo *Castanea mollissima* plants[J]. PLoS One, 2023, 18(12): e0295691.
- [11] TEIXEIRA S J, FERREIRA J J, WANKE P, MOREIRA ANTUNES J J. Evaluation model of competitive and innovative tourism practices based on information entropy and alternative criteria weight[J]. Tourism Economics, 2021, 27(1): 23-44.
- [12] 程文强, 徐阳, 吴开云, 赵献民, 龚榜初. 3种综合评价方法在柿果品质评价中的应用[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2023, 47(4): 61-72.
CHENG Wenqiang, XU Yang, WU Kaiyun, ZHAO Xianmin, GONG Bangchu. Comparison of three comprehensive evaluation methods to evaluate the quality of persimmon fruit[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2023, 47(4): 61-72.
- [13] 黄媛, 李瑜玲, 康艺凡, 杜亚茹, 张燕, 杨英茹. 北方秋冬茬设施番茄补光方案的模糊Borda组合评价[J]. 中国瓜菜, 2022, 35(4): 39-44.
HUANG Yuan, LI Yuling, KANG Yifan, DU Yaru, ZHANG Yan, YANG Yingru. Fuzzy Borda combination evaluation of lighting scheme for tomato production in greenhouse during autumn and winter in northern China[J]. China Cucurbits and Vege-

- tables, 2022, 35(4): 39-44.
- [14] SHARAF I M. A new approach for spherical fuzzy TOPSIS and spherical fuzzy VIKOR applied to the evaluation of hydrogen storage systems[J]. *Soft Computing*, 2023, 27(8): 4403-4423.
- [15] XUE Q M, LI H, DU T S. Mild water deficit during maturity reduces cracking rate of greenhouse muskmelon while improving fruit quality[J]. *Agricultural Water Management*, 2025, 313: 109465.
- [16] HAO K, FEI L J, LIU L H, JIE F L, PENG Y L, LIU X G, KHAN S A, WANG D, WANG X K. Comprehensive evaluation on the yield, quality, and water-nitrogen use efficiency of mountain apple under surge-root irrigation in the Loess Plateau based on the improved TOPSIS method[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 853546.
- [17] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中多元素的测定: GB 5009.268—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China, National Medical Products Administration. National Food Safety Standard Determination of Multi-elements in Foods: GB 5009.268—2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.
- [18] TCHOKPONHOUE D A, ACHIGAN-DAKO E G, N' DANIKOU S, NYADANU D, KAHANE R, ODINDO A O, SIBIYA J. Comparative analysis of management practices and end-users' desired breeding traits in the miracle plant [*Synsepalum dulcificum* (Schumach & Thonn.) Daniell] across ecological zones and sociolinguistic groups in West Africa[J]. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, 2021, 17(1): 41.
- [19] USTAOĞLU F, TAŞ B, TEPE Y, TOPALDEMİR H. Comprehensive assessment of water quality and associated health risk by using physicochemical quality indices and multivariate analysis in Terme River, Turkey[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28(44): 62736-62754.
- [20] 刘璐, 杨祎, 曹庆芹, 秦岭, 王建立. 用电感耦合等离子体发射光谱法检测北方主栽板栗品种(系)矿质元素含量[J]. *北京农学院学报*, 2015, 30(1): 4-9.
- LIU Lu, YANG Yi, CAO Qingqin, QIN Ling, WANG Jianli. Analysis and evaluation of mineral elements of chestnut (*Castanea mollissima*) mainly cultivated in north region[J]. *Journal of Beijing University of Agriculture*, 2015, 30(1): 4-9.
- [21] 周江龙, 胡凤铎, 周琮, 周王易, 王志坚, 黎冬华, 张艳欣, 王林海, 游均. 芝麻种质资源矿质元素含量和品质性状分析与综合评价[J]. *中国油料作物学报*, 2025, 47(2): 370-379.
- ZHOU Jianglong, HU Fengduo, ZHOU Rong, ZHOU Wangyi, WANG Zhijian, LI Donghua, ZHANG Yanxin, WANG Linhai, YOU Jun. Evaluation of mineral content and quality traits of sesame germplasm resources[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2025, 47(2): 370-379.
- [22] 王向红, 桑建新, 张子德, 蔺娜, 史焱雷. 不同品种板栗的营养价值和品质分析[J]. *食品科技*, 2004, 29(3): 95-97.
- WANG Xianghong, SANG Jianxin, ZHANG Zide, LIN Na, SHI Yanlei. Quality analysis of different chestnut[J]. *Food Science and Technology*, 2004, 29(3): 95-97.
- [23] PRASHANTH L, KATTAPAGARI K K, CHITTURI R T, BAD-DAM V R R, PRASAD L K. A review on role of essential trace elements in health and disease[J]. *Journal of Dr NTR University of Health Sciences*, 2015, 4(2): 75-85.
- [24] 刘杨. 京东板栗主产区主要矿质元素的农业地球化学特征研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2010.
- LIU Yang. Agro-geochemical characteristics of the main mineral elements in main production area of Jingdong chestnut[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2010.
- [25] CIUCURE C T, GEANA E I, SANDRU C, TITA O, BOTU M. Phytochemical and nutritional profile composition in fruits of different sweet chestnut (*Castanea sativa* Mill.) cultivars grown in Romania[J]. *Separations*, 2022, 9(3): 66.
- [26] DE VASCONCELOS M D C B, NUNES F, VIGUERA C G, BENNETT R N, ROSA E A S, FERREIRA-CARDOSO J V. Industrial processing effects on chestnut fruits (*Castanea sativa* Mill.) 3. Minerals, free sugars, carotenoids and antioxidant vitamins[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2010, 45(3): 496-505.
- [27] YANG F, LIU Q, PAN S Y, XU C, XIONG Y L. Chemical composition and quality traits of Chinese chestnuts (*Castanea mollissima*) produced in different ecological regions[J]. *Food Bioscience*, 2015, 11: 33-42.
- [28] 张树航, 郭燕, 李颖, 张馨方, 王广鹏, 潘国栋. 河北板栗主产区果园土壤主要矿质元素的差异分析[J]. *华北农学报*, 2023, 38(增刊 1): 314-320.
- ZHANG Shuhang, GUO Yan, LI Ying, ZHANG Xinfang, WANG Guangpeng, PAN Guodong. Correlation analysis of main mineral elements in orchard soil in main chestnut producing areas of Hebei province[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2023, 38(Suppl. 1): 314-320.
- [29] ZHOU Y, NIE K Q, GENG L L, WANG Y X, LI L L, CHENG H. Selenium's role in plant secondary metabolism: regulation and mechanistic insights[J]. *Agronomy*, 2025, 15(1): 54.
- [30] LIU F, ZHANG W, LI S Q. Effects of freeze - thaw cycles on uptake preferences of plants for nutrient: A review[J]. *Plants*, 2025, 14(7): 1122.
- [31] ZHOU P F, ZHANG P, GUO M L, LI M S, WANG L Q, ADEEL M, SHAKOOR N, RUI Y K. Effects of age on mineral elements, amino acids and fatty acids in Chinese chestnut fruits[J]. *European Food Research and Technology*, 2021, 247(8): 2079-2086.
- [32] XU L L, WANG X P. A comprehensive review of phenolic compounds in horticultural plants[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2025, 26(12): 5767.
- [33] XU Z Y, MEENU M, CHEN P Y, XU B J. Comparative study on phytochemical profiles and antioxidant capacities of chest-

- nuts produced in different geographic area in China[J]. *Antioxidants*, 2020, 9(3):190.
- [34] SUÁREZ M H, GALDÓN B R, MESA D R, ROMERO C D, RODRÍGUEZ E R. Sugars, organic acids and total phenols in varieties of chestnut fruits from Tenerife (Spain)[J]. *Food and Nutrition Sciences*, 2012, 3(6):705-715.
- [35] OTLES S, SELEK I. Phenolic compounds and antioxidant activities of chestnut (*Castanea sativa* Mill.) fruits[J]. *Quality Assurance and Safety of Crops & Foods*, 2012, 4(4):199-205.
- [36] WU S T, SHEN D Y, WANG R H, LI Q Y, MO R H, ZHENG Y W, ZHOU Y, LIU Y H. Phenolic profiles and antioxidant activities of free, esterified and bound phenolic compounds in walnut kernel[J]. *Food Chemistry*, 2021, 350:129217.
- [37] SU J Y, LUO Y L, CAO Z X, WANG X Y, GE X M. Advances in loquat post-harvest preservation and the application of nanotechnology for its active packaging[J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2024, 47(1):e14507.
- [38] WANG Z C, CHEN Y X, FANG H J, JIA Y X, YUN Z L, WANG L W, WANG X H. Comparative evaluation of physical and chemical properties, nutritional components and volatile substances of 24 chestnut varieties in Yanshan area[J]. *Food Chemistry*, 2025, 477:143624.
- [39] 马玉敏, 陈学森, 何天明, 吴传金, 王娜. 中国板栗 3 个野生居群部分表型性状的遗传多样性[J]. *园艺学报*, 2008, 35(12):1717-1726.
- MA Yumin, CHEN Xuesen, HE Tianming, WU Chuanjin, WANG Na. Genetic diversity of morphological traits in wild populations of *Castanea mollissima* Blume[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2008, 35(12):1717-1726.
- [40] 张京政, 齐永顺, 王同坤, 杨济民, 杨瑞忠. 板栗新品种‘燕丽’[J]. *园艺学报*, 2016, 43(11):2283-2284.
- ZHANG Jingzheng, QI Yongshun, WANG Tongkun, YANG Jimin, YANG Ruizhong. A new chestnut cultivar ‘Yanli’[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2016, 43(11):2283-2284.
- [41] 张树航, 王浩, 李颖, 刘雨婷, 郭燕, 张馨方, 王广鹏. 板栗早熟新品种白露香的选育[J]. *果树学报*, 2023, 40(9):2010-2015.
- ZHANG Shuhang, WANG Hao, LI Ying, LIU Yuting, GUO Yan, ZHANG Xinfang, WANG Guangpeng. A new early-maturing chestnut cultivar Bailuxiang[J]. *Journal of Fruit Science*, 2023, 40(9):2010-2015.
- [42] 郑丽锦, 武红霞, 汪希, 陈彦军, 刘金哲. 早熟优质丰产板栗新品种‘太行明栗’[J]. *园艺学报*, 2024, 51(增刊 2):47-48.
- ZHENG Lijin, WU Hongxia, WANG Xi, CHEN Yanjun, LIU Jinzhe. A new chestnut cultivar ‘Taihang Mingli’ with early maturity, high quality and yield[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2024, 51(Suppl. 2):47-48.
- [43] 李小艳, 段鹏慧, 张兴亮, 兰彦平. 板栗果实酚类物质及其抗氧化活性研究[J]. *食品与发酵工业*, 2023, 49(4):138-144.
- LI Xiaoyan, DUAN Penghui, ZHANG Xingliang, LAN Yanping. Analysis of phenols and antioxidant activities in different parts of chestnut fruits of different varieties[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2023, 49(4):138-144.
- [44] 田甜, 黄清泉, 蒋明艳, 黄月明, 谢培德, 黄婕. 不同产地厚鳞柯果实品质差异分析[J]. *热带农业科学*, 2022, 42(5):46-52.
- TIAN Tian, HUANG Qingquan, JIANG Mingyan, HUANG Yueming, XIE Peide, HUANG Jie. Analysis on the fruit quality differences of *Lithocarpus pachylepis* from different producing areas[J]. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 2022, 42(5):46-52.
- [45] KARAMAC M. Chelation of Cu(II), Zn(II), and Fe(II) by tannin constituents of selected edible nuts[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2009, 10(12):5485-5497.
- [46] 关智晶, 孙超. 植物次生代谢的区室化研究进展[J]. *生物技术通报*, 2024, 40(1):1-11.
- GUAN Zhijing, SUN Chao. Research progress in the compartmentalization of plant specialized metabolism[J]. *Biotechnology Bulletin*, 2024, 40(1):1-11.
- [47] 武妍妍, 史文石, 石新如, 陈荣荣, 赵悦, 赵佳冰, 江泽平, 王志伟, 史胜青. 板栗坚果营养物质和抗氧化成分综合评价[J]. *林业科学研究*, 2022, 35(6):12-22.
- WU Yanyan, SHI Wenshi, SHI Xinru, CHEN Rongrong, ZHAO Yue, ZHAO Jiabing, JIANG Zeping, WANG Zhiwei, SHI Shengqing. Comprehensive evaluation of nutrients and antioxidant components in nuts of chestnut[J]. *Forest Research*, 2022, 35(6):12-22.
- [48] 张恒, 申春晖, 陈锐帆, 袁汕, 傅志强, 奚如春. 基于 3 种数学方法的粤北油茶果实性状综合评价[J]. *中南林业科技大学学报*, 2022, 42(11):71-79.
- ZHANG Heng, SHEN Chunhui, CHEN Ruifan, YUAN Shan, FU Zhiqiang, XI Ruchun. Comprehensive evaluation of the fruit traits of *Camellia oleifera* in northern Guangdong based on three mathematical methods[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2022, 42(11):71-79.
- [49] GUO C H, ZHU Y. Comparative analysis of phytochemicals and antioxidant activities in seeds and sprouts of different varieties of radish (*Raphanus sativus* L.): TOPSIS- entropy weight method[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2025, 16:1531570.