北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

基于叶片果实性状关联分析的平欧杂交榛综合评价

滕飞 潘理 仝金金 刘禹含 王秀伟

Comprehensive evaluation of *Corylus heterophylla* × *C. avellana* hybrids based on leaf-fruit trait association analysis

Teng Fei, Pan Li, Tong Jinjin, Liu Yuhan, Wang Xiuwei

引用本文:
滕飞, 潘理, 仝金金, 刘禹含, 王秀伟. 基于叶片果实性状关联分析的平欧杂交榛综合评价[J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(4):138–147. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250379
Teng Fei, Pan Li, Tong Jinjin, Liu Yuhan, Wang Xiuwei. Comprehensive evaluation of *Corylus heterophylla* × *C. avellana* hybrids based on leaf–fruit trait association analysis[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(4):138–147. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250379

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250379

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

覆草施肥模式对板栗叶片功能性状与果实产量品质的影响
Effects of grass mulching–fertilization mode on leaf functional characters and fruit yield as well as quality of *Castanea mollissima*
北京林业大学学报, 2022, 44(4): 36–46. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200315

末次间冰期以来平榛物种复合体生态分化及历史分布变迁
Ecological differentiation and changes in historical distribution of *Corylus heterophylla* species complex since the last interglacial
北京林业大学学报, 2023, 45(4): 11–23. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210350

滇藏杜英天然种质资源果实性状变异和综合评价
Variation and comprehensive evaluation of fruit traits in natural germplasm resources of *Elaeocarpus braceanus*
北京林业大学学报, 2025, 47(5): 37–47. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240350

北京百花山落叶阔叶林群落内木本植物的叶片功能性状变异特征
Variation characteristics in leaf functional traits of woody plants in deciduous broadleaved forest community in Baihua Mountain of Beijing
北京林业大学学报, 2024, 46(4): 40–51. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220462

北京松山油松叶功能性状沿海拔梯度的变化及其环境解释
Variations in leaf functional traits along the altitude gradient of *Pinus tabuliformis* and its environmental explanations in Beijing Songshan Mountain
北京林业大学学报, 2021, 43(4): 47–55. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200292

不同混交模式对杉木人工林叶功能性状的影响
Effects of different mixed patterns on the functional traits of leaves in *Cunninghumia lanceolata* plantation
北京林业大学学报, 2025, 47(12): 97–108. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250189

DOI:10.12171/j.1000−1522.20250379

基于叶片−果实性状关联分析的平欧杂交榛综合评价

滕 飞[1] 潘 理[1] 仝金金[1] 刘禹含[1] 王秀伟[1,2,3]

（1. 东北林业大学林学院，黑龙江 哈尔滨 150040；2. 森林生态系统可持续经营教育部重点实验室，东北林业大学，黑龙江 哈尔滨 150040；
3. 凉水森林生态系统国家野外观测站，黑龙江 哈尔滨 150040）

摘要:【目的】评估不同平欧杂交榛品种果实品质与叶片功能性状的综合表现，揭示二者间的协同关系，为榛树优良品种的早期选育提供理论依据。**【方法】**以东北地区 6 个平欧杂交榛品种（‘达维’‘辽榛 3 号’‘辽榛 7 号’‘辽榛 8 号’‘玉坠’‘B21’）为研究材料，测定其果实经济性状、营养品质及叶片功能性状。采用单因素方差分析比较品种间的性状差异，利用熵权−TOPSIS 法综合评价不同品种的果实品质，并借助冗余分析和相关性网络解析叶片功能性状与果实性状的关系。**【结果】**(1)不同品种间果实品质与经济性状呈现显著的协同分化。‘玉坠’在脂肪、可溶性糖及出仁率等指标上表现最优，综合评分居首，‘辽榛 8 号’次之；而‘B21’虽单果质量较大，但因果壳投入过高导致经济转化效率与综合评分最低。(2)冗余分析与相关性网络表明，叶绿素、磷含量及比叶面积均与果实品质显著正相关，反映了叶片端较高的光合获取潜力可以有效促进营养沉积；而非结构性碳水化合物含量与果实品质显著负相关，是关联网络中的核心指标，其在叶片端的高积累导致了碳动员效率低下及同化物转运受限。(3)综合表现优异的品种（‘玉坠’‘辽榛 8 号’）具有“高叶绿素含量−大比叶面积−低非结构性碳水化合物含量”的功能组合特征，具备较强的资源获取与碳输出能力；而低评分品种则倾向于高非结构性碳水化合物积累与结构性生长投入，这种策略导致果实营养沉积受限。**【结论】**平欧杂交榛果实品质的分化主要受叶片碳分配策略影响，低非结构性碳水化合物含量、高叶绿素含量及较高的比叶面积可作为表征植物高效碳动员能力的可靠生理指标，这为未来平欧杂交榛优良种质的早期鉴定及选育提供了重要依据。综合果实性状与叶片生理功能，‘玉坠’和‘辽榛 8 号’具备“高光合获取−高碳输出”的优良协同特性，综合品质表现最佳，可在下一步高品质榛园的生产实践与推广中作为指导性品种重点应用。

关键词：平欧杂交榛；果实品质；叶片功能性状；熵权 TOPSIS；源−库关系；良种选育

中图分类号：S664.4 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2026)04−0138−10

引文格式：滕飞，潘理，仝金金，等. 基于叶片−果实性状关联分析的平欧杂交榛综合评价［J］. 北京林业大学学报，2026，48(4)：138−147. Teng Fei, Pan Li, Tong Jinjin, et al. Comprehensive evaluation of *Corylus heterophylla* × *C. avellana* hybrids based on leaf-fruit trait association analysis［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(4): 138−147.

Comprehensive evaluation of *Corylus heterophylla* × *C. avellana* hybrids based on leaf-fruit trait association analysis

Teng Fei[1] Pan Li[1] Tong Jinjin[1] Liu Yuhan[1] Wang Xiuwei[1,2,3]

(1. School of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China;
2. Key Laboratory of Sustainable Forest Ecosystem Management of Ministry of Education, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China;
3. Liangshui Forest Ecosystem National Observation and Research Station, Harbin 150040, Heilongjiang, China)

Abstract: [**Objective**] To evaluate the comprehensive performance of fruit quality and leaf functional traits among different *Corylus heterophylla* × *C. avellana* cultivars, reveal the synergistic relationship between them, and provide a theoretical basis for the early selection of high-quality cultivars. [**Method**] Six hybrid

收稿日期: 2025−09−28 **修回日期:** 2025−10−14

基金项目: 国家自然科学基金项目（32471710）。

第一作者: 滕飞。主要研究方向：森林植物资源学。Email: 13214615323@163.com 地址：150040 黑龙江省哈尔滨市香坊区和兴路 26 号东北林业大学林学院。

责任作者: 王秀伟，教授，博士生导师。主要研究方向：植物生理生态学。Email: wxgreat@nefu.edu.cn 地址：同上。

本刊网址: https://j.bjfu.edu.cn；https://journal.bjfu.edu.cn

hazelnut cultivars (‘Dawei’ ‘Liaozhen 3’ ‘Liaozhen 7’ ‘Liaozhen 8’ ‘Yuzhui’ and ‘B21’) in Northeast China were used as materials to determine their fruit economic traits, nutritional quality, and leaf functional traits. One-way analysis of variance was used to compare trait differences among cultivars, and the entropy-weight TOPSIS method was applied to comprehensively evaluate the fruit quality of different cultivars. Furthermore, redundancy analysis and correlation networks were employed to elucidate the relationships between leaf functional traits and fruit traits. [**Result**] (1) Significant synergistic differentiation was observed in fruit quality and economic traits among cultivars. ‘Yuzhui’ performed best in core indicators such as fat, soluble sugar, and kernel ratio, ranking first in comprehensive score, followed by ‘Liaozhen 8’; whereas ‘B21’ had the lowest economic conversion efficiency and overall score due to excessive investment in shell structure. (2) RDA and network analysis revealed that Chl, SLA, and P contents were significantly positively correlated with fruit quality, indicating that higher photosynthetic potential at the leaf level effectively promotes nutrient deposition. Conversely, NSC content was significantly negatively correlated with quality and served as a core indicator in the network; its high accumulation in leaves suggested low carbon mobilization efficiency and restricted assimilate transport. (3) High-quality cultivars exhibited a functional combination of “high Chl-large SLA-low NSC”, reflecting strong resource acquisition and carbon export capacities. In contrast, low-scoring cultivars tended toward higher NSC accumulation and structural investment. This strategy limited nutrient deposition in the fruit edible parts. [**Conclusion**] The differentiation of fruit quality in *C. heterophylla* × *C. avellana* is primarily influenced by leaf carbon allocation strategies. Low NSC, high chlorophyll, and large specific leaf area can serve as reliable physiological indicators characterizing the highly efficient carbon mobilization capacity of the plants, providing an important basis for the early identification of elite germplasms and the selection of high-quality hybrid hazelnut cultivars in the future. Integrating fruit traits and leaf physiological functions, ‘Yuzhui’ and ‘Liaozhen 8’ possess the excellent synergistic characteristics of “high photosynthetic acquisition-high carbon output” and exhibit the best comprehensive quality performance, which recommended to prioritize these two cultivars as guiding varieties in the future production practices and promotion of high-quality hazelnut orchards.

Key words: *Corylus heterophylla* × *C. avellana*; fruit quality; leaf functional traits; entropy-weighted TOPSIS; source-sink relationship; elite cultivar selection

随着功能性坚果需求的不断增长，榛属（*Corylus*）植物果实品质成为育种与栽培研究的重要方向。平欧杂交榛（*Corylus heterophylla* × *C. avellana*）作为由东北平榛（*C. heterophylla*）与欧洲榛（*C. avellana*）杂交而成的优良种质，兼具东北平榛的强抗寒、耐瘠薄与欧洲榛的高产优质特性，在我国北方榛子主产区得到广泛推广与应用[1]。其果仁富含不饱和脂肪酸、维生素 E 及抗氧化酚类等活性成分，在食品加工、保健领域具有重要的开发价值[2]。尽管当前榛属研究已在遗传资源挖掘[3]、果实性状评价[4]等方面取得一定进展，但多集中于果实表型特征或区域性资源调查，针对平欧杂交榛的多维品质综合评价及品质形成机制的系统解析仍较缺乏。

从生理机制来看，光合作用是植物干物质积累的基础，而叶片作为光合作用的“源”器官，是决定果实这一“库”器官发育与物质积累的关键环节[5]。叶片通过碳固定与物质运输直接调控果实的生长及营养储备，而这种“源–库关系”可通过叶经济学谱（LES）理论进一步解析[6]。LES 理论通过揭示叶片从“低投入—快回报”到“高投入—慢回报”的性状权衡策略，解析植物资源分配与功能适配的基本规律，其中多个关键指标与“源”器官的供给能力密切相关。叶绿素作为核心光合色素，其含量决定光能捕获效率与光反应初级产物积累量，可在一定程度上反映植物的光合强度。比叶面积（specific leaf area，SLA）则从结构层面体现植物在叶片构建投资与光合作用光捕获效率之间的权衡[7]。已有研究[8]发现，在施肥条件下，SLA 的增加与 15% 的产量增长显著相关，这凸显出 SLA 在潜在产量形成中的重要作用。非结构性碳水化合物（non-structural carbohydrate，NSC）是植物光合作用的主要有机产物，是衡量叶片碳供给能力的重要指标且参与关键生理过程；对于多年生植物而言，NSC 储备还可满足光合产物不足或缺失时期的资源需求[9–10]。NSC 储备积累曾经被视为碳水化合物过剩，但现有证据表明，这是一个与生长和繁殖竞争的“汇”过程，并非被动积累，且 NSC

储量可反映光合产物的积累程度，并可以指示碳流能否顺利输出至果实等“库”器官[11−12]。上述指标共同构成了叶片功能的基础，深刻影响着光合产物的生成、储存及其向果实的运输效率。

在经济林木研究中，LES 理论的应用已得到初步验证。在胡桃楸（*Juglans mandshurica*）[13]、葡萄（*Vitis vinifera*）[14]的研究中发现，叶片结构性状、光合能力与果实营养成分间存在显著协同变异，证实了叶片功能对果实品质的调控作用。国内外研究逐步明确，LES 性状可通过“源−库关系调控”“养分分配介导”“形态功能协同”三大路径影响果实品质，并在多种植物中获得实证支撑[15−16]。在冬枣（*Zizyphus jujuba* ‘Dongzao’）研究中，彭玲等[17]通过典型相关性分析发现，结果枝叶氮含量与单果质量呈显著正相关，磷含量与可滴定酸含量密切相关，证实了叶片矿质元素对果实产量与风味的调控作用。彭程等[18]对黄金柰李（*Prunus salicina* var. *cordata*）的研究发现，叶片磷、钙、硼元素含量与果实平均单果质量、纵横径、硬度和可溶性固形物含量呈负相关，而与总糖和总酸含量呈正相关，这揭示了叶片营养元素对果实品质的间接调控路径。李荣飞等[19]在龙安柚（*Citrus grandis* var. *longanyou*）中发现，叶片光合特性与营养元素含量更优时，果实的可溶性固形物、维生素 C 含量及糖酸比均显著提升，这进一步体现了叶片生长状态对果实品质的间接调控作用。Rowland 等[6]对番茄（*Solanum lycopersicum*）的研究表明，相对于光合速率，叶片形态对于果实品质的影响更大。Rossouw 等[20]在对芒果（*Mangifera indica*）的研究中指出，NSC 的分配竞争直接影响果实产量与品质稳定性，高产条件下营养生长与淀粉储备消耗会导致年际品质波动。上述研究为 LES 理论在果实品质调控中的应用搭建了基础框架，但仍存在明显的拓展空间：现有案例多集中于仁果类、浆果类或热带果树，针对北方寒地杂交坚果树种—平欧杂交榛的研究仍属空白，其叶片性状与果实品质之间的耦合规律，目前尚未被探索。

因此，本研究以我国北方地区 6 个典型平欧杂交榛品种为研究对象，从果实经济性状与营养品质特征两个维度来系统评估其果实综合品质，并测定其叶片碳、氮、磷、叶绿素、非结构性碳水化合物含量及比叶面积等关键指标，拟通过单因素方差分析、相关性分析和冗余分析探讨叶片生理特征与果实性状的内在关联，明确叶片功能性状对果实品质的调控机制，进而筛选综合性状优良的品种。研究结果不仅有助于深化对平欧杂交榛“源−库”调控机制的理论认识，丰富 LES 理论在北方寒地杂交坚果树种中的应用场景，也可为平欧杂交榛的高品质品种选育、精准栽培管理以及资源高效利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究材料

试验地设置在黑龙江省佳木斯市桦南县孟家岗林场榛子园（46°20′～46°30′N，130°32′～130°52′E），地处完达山西麓余脉，坡度总体相对平缓，土壤类型以暗棕壤为主。以榛子园中 6 个品种的平欧杂交榛为研究对象，包括‘达维’（‘DW’）、‘辽榛 3 号’（‘LZ3’）、‘辽榛 7 号’（‘LZ7’）、‘辽榛 8 号’（‘LZ8’）、‘玉坠’（‘YZ’）和‘B-21’（‘B21’）。6 种杂交榛树树龄均为 9 年生，立地条件相同且均未经过施肥管理。

1.2 研究方法

1.2.1 叶片取样及其功能性状测定

为分析不同品种平欧杂交榛叶片功能性状的差异，并为后续揭示叶片功能性状与果实性状之间的关系提供解释变量，于 2023 年 8 月 20 日在榛子园中按品种随机选取地径相近的植株各 6 株，共 36 株作为生物学重复个体。于晴天上午 9：00—11：00 采集枝条中部向阳面的成熟叶片，每株采集 15 片完全展开叶片，混合后作为 1 个重复样本。于采样当天按照舒展等[21]的方法对采集的叶片样品测定叶绿素含量，碳、氮、磷、非结构性碳水化合物等指标则在采集后立即转入−80 ℃ 冰箱保存的叶片样品中测定。其中，碳含量采用碳氮分析仪（Multi N/C 2100s，Analytik Jena，Germany）测定，磷含量采用 $HClO_4$-H_2SO_4 消化−磷钼蓝比色法测定，氮含量采用硫酸−高氯酸消煮法测定[22]。将新鲜叶片展平，利用扫描仪（ScanMaker i850）获取叶面积图像，并通过 ImageJ 软件计算叶面积（A，cm^2）；随后将叶片烘干至质量恒定，测定叶片干质量（W_d，g），叶面积与叶片干质量比值即为比叶面积（SLA，cm^2/g）。可溶性糖和淀粉含量采用蒽酮比色法[23]测定，二者之和为非结构性碳水化合物含量。

1.2.2 果实取样及其经济性状、营养品质测定

为确保叶片与果实指标的匹配性分析，果实取样于与叶片取样相同的 36 株植株。于 2023 年 9 月初各品种果实充分成熟后（果皮变褐、果壳硬化）采样。每株随机采集 30 个成熟果实，混合后作为 1 个重复样本。果实采集后立即去掉坚果外层的黄绿色果苞，放入 60 ℃ 烘箱中烘干至质量恒定。参照张宇和[24]的方法，用游标卡尺测量 6 个品种榛子的坚果纵径、横径、侧径等表型性状，精确到 0.01 mm，用千分之一天平测量榛子单果干质量、果壳干质量、果仁

干质量。计算其出仁率、几何平均直径、坚果体积、体积仁质量[25−27]。

为分析不同品种果实营养品质差异，以去壳后的果仁为材料，通过蒽酮比色法[23]测定可溶性糖和淀粉含量，采用考马斯亮蓝 G-250 法[28]测定可溶性蛋白含量，采用索氏提取法[29]测定脂肪含量，利用钼蓝比色法[30]测定维生素 C 含量。

1.2.3　不同品种间叶片和果实性状的差异分析及综合评价

为比较不同品种平欧杂交榛在果实营养品质、经济性状和叶片功能性状上的差异，以品种为分组因素，对上述测定各性状指标进行单因素方差分析（one-way ANOVA），检验不同品种间差异显著性，为后文品种间性状分化特征分析提供统计依据。

为进一步全面客观评价不同品种果实的综合品质，采用熵权−TOPSIS 法对果实的各项营养品质与经济性状指标进行量化分析。首先，对各项正向指标（即数值越大越优的指标）进行极值化标准处理，以消除不同量纲的影响。之后利用信息熵原理计算各指标的客观权重，避免主观赋值偏差。最后，结合 TOPSIS 法构建加权决策矩阵，分别计算各品种与正、负理想解的欧氏距离，并据此得出各品种的相对贴近度。相对贴近度取值范围为 0 ~ 1，其数值越大，表明该品种的综合果实性状表现越接近理想状态。

1.2.4　叶片功能性状与果实性状的关联分析

为揭示叶片功能性状与果实经济性状、果实营养品质之间的耦合关系，以叶片功能性状指标（叶绿素、碳、氮、磷、非结构性碳水化合物含量和比叶面积）为解释变量，分别以果实经济性状指标和果实营养品质指标为响应变量，构建冗余分析（redundancy analysis，RDA）模型，识别对果实性状变异贡献较大的关键叶片功能性状。在此分析框架下，首先利用 RDA 从整体层面刻画叶片功能性状组合对果实变异的综合解释能力；进而通过按项方差分解剥离并量化各叶片指标对果实变异的独特贡献率，以识别驱动品质分化的关键生理因子。RDA 分析及按项方差分解在 R4.4.0 中通过 vegan 包完成：首先构建 RDA 模型，然后采用置换检验（999 次，按项检验）评估各解释变量的边际贡献和显著性；同时利用 car 包计算方差膨胀因子（VIF），并以 VIF < 10 作为解释变量保留标准，以消除多重共线性影响。为进一步识别叶片功能性状与果实性状之间的关键联系指标，采用 Spearman 相关分析构建相关性网络。利用 Hmisc 包计算相关系数，使用 igraph 包构建网络模型，并设置筛选阈值为 $P < 0.05$ 且 $r > 0.3$，该分析用于从网络拓扑关系上识别在叶片−果实性状耦合关系中处于核心位置的功能性状指标。

1.3　数据统计

将试验所得数据利用 Microsoft Excel 进行处理，利用 Origin2024、R4.4.0 软件作图。

2　结果与分析

2.1　不同品种平欧杂交榛果实营养品质差异分析及综合评价

结果（表 1）表明，各营养品质指标在不同品种间存在显著差异（$P < 0.05$）。总体来看，‘YZ’在可溶性糖、脂肪和维生素 C 等关键指标上均处于较高水平，均显著高于其他品种，表现出较强的营养物质积累能力。‘LZ8’淀粉含量显著高于其他品种，同时其脂肪和可溶性糖含量也处于较高水平，表明其果实营养品质基础较好。相比之下，‘B21’可溶性糖和维生素 C 含量均显著低于其他品种，‘LZ7’淀粉和可溶性蛋白含量显著偏低。

基于熵权−TOPSIS 法的综合评价结果（图 1）进一步验证了上述差异特征。‘YZ’综合得分最高，表明其在多个营养品质指标上具有一致性优势；‘B21’综合得分最低，说明其营养品质整体较低。差异分析和综合评价联合表明：6 个品种在果实营养品质方面存在显著差异，且这些差异主要体现在多种营养成分的协同积累能力上。因此，对平欧杂交榛果实营养品质的评价应以综合表现为依据，而不能仅依赖单一指标进行判断。

表 1　不同品种果实营养成分含量

Tab. 1　Nutritional composition contents of different varieties of fruits

品种	可溶性糖/(mg·g^{-1})	脂肪/(mg·g^{-1})	淀粉/(mg· g^{-1})	可溶性蛋白/(mg· g^{-1})	维生素C/(mg·g^{-1})
‘达维’(‘DW’)	77.86 ± 2.20^{d}	489.95 ± 32.79^{e}	35.34 ± 1.29^{d}	148.13 ± 0.52^{a}	0.40 ± 0.06^{b}
‘辽榛3号’(‘LZ3’)	82.88 ± 0.75^{c}	474.89 ± 17.41^{f}	40.75 ± 3.22^{c}	148.06 ± 1.55^{a}	0.26 ± 0.05^{e}
‘辽榛7号’(‘LZ7’)	83.42 ± 2.10^{c}	529.67 ± 10.59^{c}	25.46 ± 2.32^{f}	139.82 ± 24.81^{b}	0.30 ± 0.02^{d}
‘辽榛8号’(‘LZ8’)	88.45 ± 0.80^{b}	575.45 ± 7.21^{b}	59.72 ± 1.20^{a}	149.07 ± 0.87^{a}	0.36 ± 0.09^{c}
‘玉坠’(‘YZ’)	101.48 ± 3.08^{a}	653.29 ± 13.46^{a}	57.43 ± 1.03^{b}	150.40 ± 1.52^{a}	0.44 ± 0.08^{a}
‘B-21’(‘B21’)	24.53 ± 8.54^{e}	508.38 ± 42.61^{d}	33.26 ± 1.87^{e}	149.58 ± 5.54^{a}	0.25 ± 0.06^{e}

注：同列不同小写字母表示同一指标不同品种间存在显著差异（$P < 0.05$）。下同。

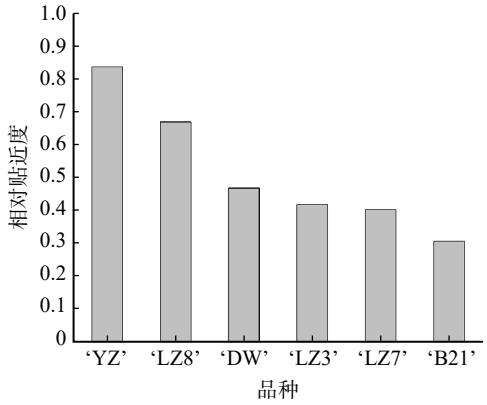


图 1 基于熵权–TOPSIS 法的果实营养品质综合评分

Fig. 1 Comprehensive evaluation of fruit nutritional quality based on entropy weight-TOPSIS method

2.2 不同品种平欧杂交榛果实经济性状差异分析

不同品种平欧杂交榛在果实经济性状方面同样存在显著差异($P < 0.05$，表 2)。其中，‘B21’的单果干质量和果壳干质量均显著高于其他品种，表明其在果实结构投入方面较强。‘LZ3’在果仁干质量、几何平均直径和果实体积等指标上具有优势，表现出较大的果实体型和较高的果仁质量。‘YZ’虽然单果干质量和果实体积相对较小，但其出仁率和体积仁质量均显著高于其他品种，说明其可食部比例和单位体积经济利用效率更优。相比之下，‘LZ7’的果仁干质量、出仁率和体积仁质量整体偏低，经济性状相对较差。上述结果表明，不同供试品种的果实经济性状大致沿两条方向发生了分化：一类偏向较大的果实体型和较高的结构投入，如‘B21’和‘LZ3’；另一类则偏向较高的可食部比例和经济转化效率，如‘YZ’。

综合评价结果(图 2)显示，‘YZ’果实经济性状综合得分最高，‘LZ8’和‘LZ3’次之，‘LZ7’最低。结合表 2 可知，‘YZ’综合得分较高的关键并非果实体型最大，而在于其出仁率和体积仁质量等直接反映经济利用价值的指标更优。‘B21’虽然单果干质量较大，但由于果壳比例较高、出仁率偏低，综合表现并不占优。上述结果表明，平欧杂交榛果实经济性状的优劣不应单纯取决于果实体型或单果质量，而更应考虑结构投入与可食部形成效率之间的协调关系，这为后续优良品种的经济性状筛选提供了更合理的评价依据。

2.3 不同品种平欧杂交榛叶片功能性状差异分析

结果(表 3)表明，6 个品种在叶片功能性状上存在不同程度的分化，其中差异显著的指标主要为叶绿素和非结构性碳水化合物含量，而比叶面积和氮含量在品种间差异不显著。总体来看，‘LZ8’和‘YZ’表现为较高的叶绿素、磷含量和较低的非结构性碳水化合物含量。‘LZ7’则表现出相反特征，其磷含量最低，非结构性碳水化合物含量最高。‘DW’的碳含量最高，但叶绿素含量最低，表现出与其他品种不同的叶片资源配置特征。总体而言，不同品种间的差异不仅体现在果实端，也体现在叶片端的资源获取、养分状态和碳分配方式方面，而这种差异可能进一步影响了果实经济性状和果实营养品质的形成。

2.4 叶片功能性状–果实经济性状关联分析

RDA 结果(图 3a)表明，叶片功能性状与果实经济性状之间存在明显的对应关系。总体上，碳含量和非结构性碳水化合物含量沿 RDA1 负方向投射，与单果干质量、果仁干质量和果壳干质量等结构性指标方向较为一致，而体积仁质量则与磷含量、叶绿素含量、比叶面积和氮含量方向一致。这表明，叶片端较高的非结构性碳水化合物和碳含量的积累更倾向于对应较强的果实结构投入，而较高的叶绿素含量、磷含量和比叶面积则更倾向于对应较高的可食部比例和经济利用效率。方差分解结果(图 3b)显示，非结构性碳水化合物含量对果实经济性状变异的解释度最高，其次为磷和氮含量，说明碳同化产物积累状态及养分条件是影响果实经济性状分化的重要叶片指标。

网络相关性分析进一步揭示了叶片功能性状与果实经济性状之间的关键联系。结果(图 4)表明，非结构性碳水化合物含量在网络中连接数最多，处于核心位置，并与单果干质量、果壳干质量、几何平均直径和体积仁质量等指标存在显著联系，磷含量和叶绿素含量也均与单果干质量、果壳干质量等果实经济性状具有较高连接度。该结果与 RDA 分析相

表 2 不同品种果实经济性状的测定结果

Tab. 2 Results of economic trait measurements of different varieties of fruits

品种	单果干质量/g	果仁干质量/g	果壳干质量/g	几何平均直径/mm	体积/cm^3	出仁率/%	体积仁质量/($g \cdot cm^{-3}$)
‘DW’	2.65 ± 0.29^{b}	0.77 ± 0.22^{bc}	1.88 ± 0.38^{b}	20.81 ± 0.81^{c}	4.74 ± 0.54^{c}	29.5 ± 9.1^{c}	0.064 ± 0.022^{c}
‘LZ3’	2.54 ± 0.36^{bc}	0.90 ± 0.19^{a}	1.64 ± 0.26^{c}	22.56 ± 0.45^{a}	6.02 ± 0.36^{a}	35.4 ± 3.2^{b}	0.059 ± 0.009^{cd}
‘LZ7’	2.47 ± 0.43^{cd}	0.62 ± 0.20^{d}	1.85 ± 0.31^{b}	20.96 ± 0.62^{bc}	4.84 ± 0.44^{bc}	24.7 ± 5.3^{d}	0.052 ± 0.012^{d}
‘LZ8’	2.34 ± 0.27^{d}	0.81 ± 0.10^{b}	1.53 ± 0.23^{c}	21.02 ± 1.05^{bc}	4.90 ± 0.74^{bc}	34.8 ± 2.1^{b}	0.073 ± 0.013^{b}
‘YZ’	1.84 ± 0.11^{e}	0.71 ± 0.08^{c}	1.13 ± 0.09^{d}	18.42 ± 0.46^{d}	3.28 ± 0.25^{d}	38.4 ± 3.4^{a}	0.118 ± 0.014^{a}
‘B21’	3.22 ± 0.25^{a}	0.82 ± 0.16^{ab}	2.40 ± 0.27^{a}	21.24 ± 0.93^{c}	5.04 ± 0.65^{b}	25.5 ± 4.9^{d}	0.051 ± 0.012^{d}

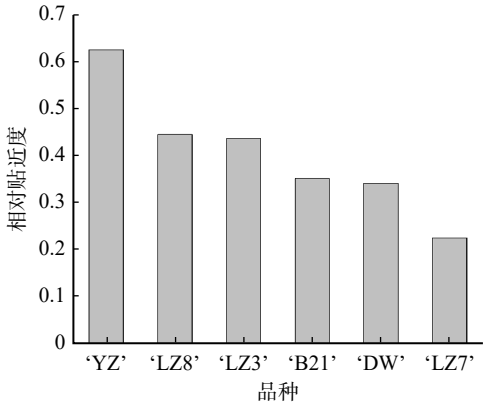


图 2　基于熵权−TOPSIS 法的果实经济性状综合评分

Fig. 2　Comprehensive evaluation of fruit economic traits based on the entropy weight-TOPSIS method

互印证，表明叶片功能性状对果实经济性状的影响存在明显的指标分化特征。其中，非结构性碳水化合物含量在决定叶片端碳分配状态与果实经济利用特征方面作用最为突出，叶绿素和磷含量也发挥了重要作用。总体来看，非结构性碳水化合物、磷和叶绿素含量是关联叶片功能性状与果实经济性状的重要指标，可为平欧杂交榛经济性状的指标筛选和早期评价提供参考依据。

2.5　叶片功能性状−果实营养品质关联分析

冗余分析结果（图 5a）表明，叶片功能性状与果实营养品质之间存在明显的关联。具体来说，磷含量、氮含量、叶绿素含量和比叶面积沿 RDA1 正方向投射，与脂肪、淀粉、可溶性糖、维生素 C 和可溶性蛋白含量等果实营养品质指标呈正向关联。非结构性碳水化合物含量沿 RDA1 负方向延伸，与多数果实营养品质指标呈负相关关系。这表明较高的叶绿素含量、较好的养分状态以及较大的比叶面积，更有利于果实营养物质的积累。相反，叶片端非结构性碳水化合物的较高积累往往对应较低的果实营养品质。方差分解结果（图 5b）表明，非结构性碳水化合物、磷和叶绿素含量对果实营养品质变异的解释度较高，其中磷和叶绿素含量的影响更为显著（$P<0.01$）。

网络相关性分析（图 6）进一步表明，非结构性碳水化合物含量在叶片功能性状−果实营养品质网络中处于核心位置，并与脂肪、可溶性蛋白、淀粉和维生素 C、多糖含量等多个品质指标形成显著连接，叶绿素含量同样表现出较高连接度。该结果与 RDA 分析结果一致，说明叶片功能性状对果实营养品质的影响主要集中在资源获取特征和碳分配状态

表 3　不同品种叶片功能性状指标

Tab. 3　Physiological characteristics of leaves from different varieties

品种	碳含量/（mg·g^{-1}）	叶绿素含量/（mg·g^{-1}）	非结构碳水化合物含量/（mg·g^{-1}）	磷含量/（mg·g^{-1}）	比叶面积/（cm^2·g^{-1}）	氮含量/（mg·g^{-1}）
‘DW’	431.28 ± 8.78^{a}	5.88 ± 0.35^{c}	141.65 ± 58.08^{a}	0.20 ± 0.03^{b}	167.82 ± 23.86^{ns}	16.30 ± 6.04^{ns}
‘LZ3’	421.92 ± 8.87^{abc}	7.67 ± 0.72^{b}	160.51 ± 13.17^{a}	0.22 ± 0.03^{ab}	183.72 ± 44.25^{ns}	13.58 ± 6.22^{ns}
‘LZ7’	424.60 ± 7.40^{ab}	7.66 ± 0.58^{b}	161.40 ± 11.86^{a}	0.17 ± 0.03^{c}	167.82 ± 35.47^{ns}	19.19 ± 5.91^{ns}
‘LZ8’	422.28 ± 6.96^{abc}	10.11 ± 2.53^{a}	96.27 ± 35.47^{b}	0.24 ± 0.01^{a}	159.94 ± 13.66^{ns}	15.03 ± 3.96^{ns}
‘YZ’	413.12 ± 10.23^{c}	9.06 ± 1.44^{ab}	94.63 ± 17.46^{b}	0.22 ± 0.02^{ab}	185.52 ± 30.42^{ns}	16.82 ± 4.11^{ns}
‘B21’	418.08 ± 8.70^{bc}	7.85 ± 1.15^{b}	126.87 ± 18.07^{ab}	0.20 ± 0.02^{bc}	147.73 ± 17.81^{ns}	12.58 ± 5.07^{ns}

注：ns 表示差异不显著（$P \geqslant 0.05$）。

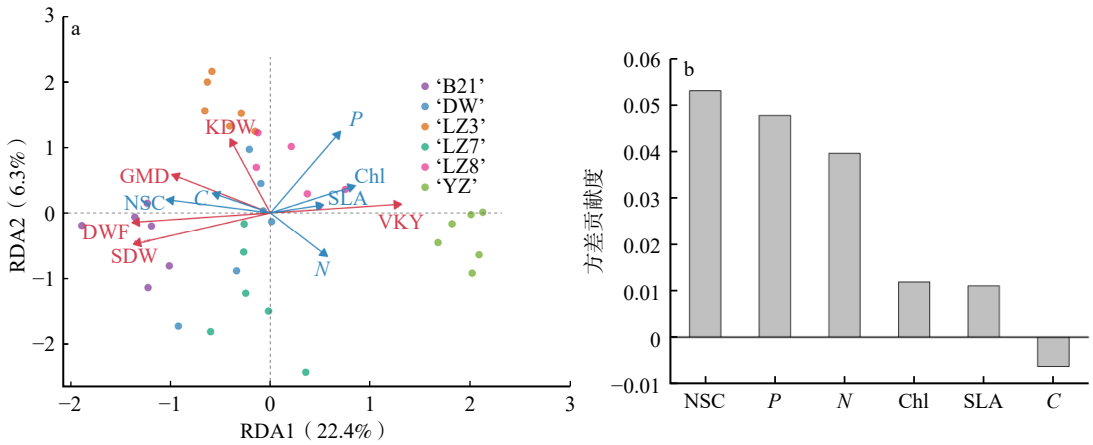


图 a 中蓝色箭头代表叶片功能性状（响应变量），红色箭头代表果实经济性状（解释变量）。NSC. 非结构性碳水化合物含量；*P*. 磷含量；*N*. 氮含量；Chl. 叶绿素含量；SLA. 比叶面积；*C*. 碳含量；GMD. 几何平均直径；VKY. 体积仁质量；KDW. 果仁干质量；DWF. 单果干质量；SDW. 果壳干质量。下同。

图 3　叶片功能性状与果实经济性状的冗余分析（a）及方差分解（b）

Fig. 3　Redundancy analysis (a) and variance partitioning (b) of leaf functional traits and fruit economic traits

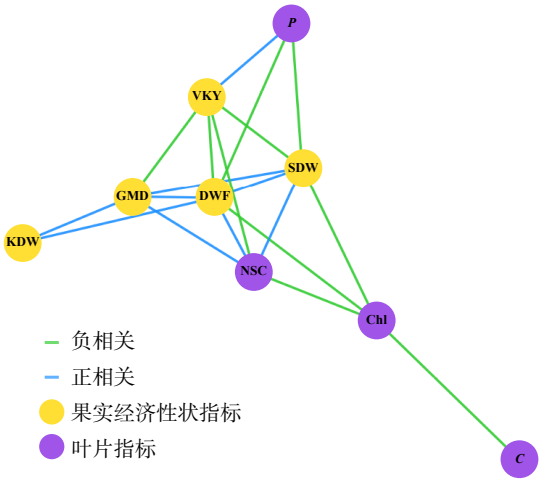


图 4 叶片功能性状与果实经济性状之间的网络相关性

Fig. 4 Network correlations between leaf physiological traits and fruit economic traits

两个层面，其中非结构性碳水化合物、叶绿素和磷含量是联系叶片功能性状与果实营养品质的关键指标。

3 讨 论

平欧杂交榛作为兼具营养价值和经济价值的重要坚果树种，其品种评价不仅关系到优良材料筛选，也直接影响后续的栽培利用和产业开发。已有研究多从果实外观、单果质量、出仁率或单一营养成分等角度评价榛子品种，但这种单一指标对比难以全面揭示其综合利用价值。且不同品种间在果实营养品质和果实经济性状上的分化可能更为复杂。所以仅在果实方面比较，虽然能够识别表型差异，却不能进一步解释差异形成的原因。叶片作为植物资源获取和同化产物供给的主要器官，其功能性状在一定程度上能够反映植物的资源获取能力、养分状态和碳分配特征。因此，将叶片功能性状与果实营养品质和果实经济性状相关联，不仅能够拓展平欧杂交榛品种评价的研究维度，也有助于为果实性状分化提供生理生态学解释。基于此，本研究将果实营养品质、果实经济性状和叶片功能性状纳入同一分析框架，试图从叶片–果实协同关系角度识别不同品种间综合性状差异及其关键关联指标，从而为平欧杂交榛优良品种筛选提供理论依据。

本研究结果表明，不同平欧杂交榛品种在果实营养品质和果实经济性状上存在显著差异，而且这种差异并不是单一指标的波动，而是多个性状协同分化的结果。‘YZ’在可溶性糖、脂肪、维生素 C 含量，体积仁质量和出仁率等指标上均表现突出，综合评分最高，说明该品种不仅具有较强的营养积累能力，同时在可食部形成和经济利用效率方面也具有明显优势。‘LZ8’综合表现次之，其营养品质和经济性状相对均衡，表现出较好的综合潜力。而‘B21’虽具有较高的单果干质量和果仁干质量，但果壳比例较高、出仁率偏低，表明其果实结构投入较多，而经济转化效率相对不足。这一结果说明，平欧杂交榛品种间的差异不能简单地归结为果实大或某一营养成分高，而更应理解为营养沉积、结构投入与可食部形成效率之间协调程度的差异。类似多维品质分化现象在华东野核桃（*Juglans cathayensis* var. *formosana*）、枸杞（*Lycium chinense*）、柑橘（*Citrus reticulata* ）等经济林果研究中[31–33]已有报道，这些研究同样表明，果实综合价值往往依赖多个性状的协同表现，而不是某一个单项指标的优势。因此，本研究中‘YZ’和‘LZ8’之所以综合表现较优，关键并不在于单一性状突出，而在于其果实营养品质与经济转化效率之间呈现出更好的协同性。

进一步分析发现，不同品种在叶片功能性状上也表现出明显分化，其差异主要集中在叶绿素、磷和

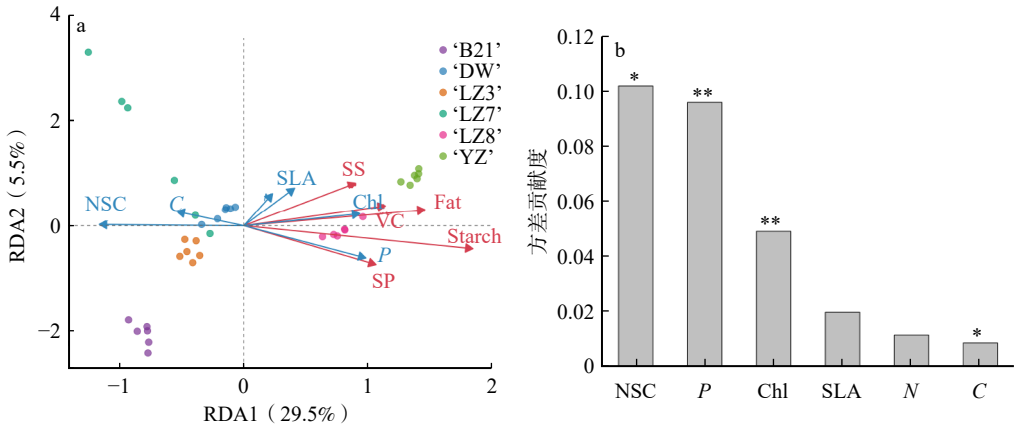


图 a 中蓝色箭头代表叶片功能性状（响应变量），红色箭头代表果实营养品质（解释变量）。图 b 中，*表示影响显著（$P < 0.05$），**表示影响极显著（$P < 0.01$）。SP. 可溶性蛋白质含量；VC. 维生素 C 含量；SS. 可溶性糖含量；Fat. 脂肪含量；Starch. 淀粉含量。下同。

图 5 叶片功能性状与果实营养品质的冗余分析(a)及方差分解(b)

Fig. 5 Redundancy analysis (a) and variation partitioning (b) of leaf functional traits and fruit nutritional quality

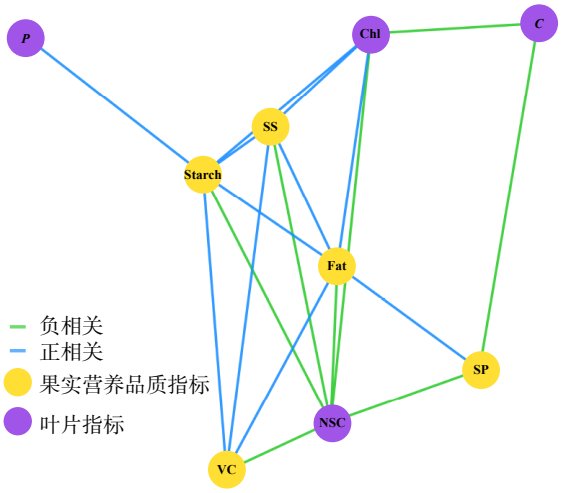


图 6　叶片功能性状与果实营养品质之间的网络相关性

Fig. 6　Network correlations between leaf physiological traits and fruit nutritional quality

非结构性碳水化合物含量等指标上。‘YZ’和‘LZ8’表现出较高的叶绿素含量、较高的磷含量或较大的比叶面积，同时具有较低的非结构性碳水化合物含量。相反，‘LZ7’则表现为较低的磷含量和较高的非结构性碳水化合物含量。已有研究[33−35]表明，较高的叶绿素含量通常与较强的光能获取能力相关，较大的比叶面积往往反映较高的资源获取效率，而磷则与能量代谢和同化作用密切相关。这可能就是本研究中叶片功能状态较优的品种往往在果实营养品质和果实经济性状上也表现较好的原因。Takahashi 等[36]在草莓（*Fragaria* × *ananassa*）的研究中也得出类似的结论，即资源获取能力较强的品种通常能够为果实品质形成提供更好的物质基础。通过进一步结合 RDA 和网络相关性分析结果发现，叶片功能性状与果实营养品质、果实经济性状之间存在较明显的关联，其中非结构性碳水化合物、叶绿素和磷含量是关键指标。在果实经济性状方面，非结构性碳水化合物与单果干质量、果壳干质量等结构性指标显著正相关，而磷、叶绿素含量则与出仁率、体积仁质量等反映经济产出价值的指标显著正相关。在果实营养品质方面，磷、叶绿素含量和比叶面积与脂肪、淀粉、可溶性糖和维生素 C 含量等指标呈显著正相关，而非结构性碳水化合物含量则表现出相反趋势，并在网络中处于核心位置。作为光合碳同化产物的重要组成，非结构性碳水化合物含量既能反映叶片端碳积累状态，也与植物生长发育过程中的物质分配密切相关[37−38]。然而，本研究中非结构性碳水化合物含量与多项果实营养品质呈显著负相关，这可能提示非结构性碳水化合物的高积累是叶片源端的同化物滞留的表现，这种滞留导致碳同化产物未能高效转运至果实。因此，高品质品种可能并非依赖叶片端非结构性碳水化合物的高储量，而是通过更高的碳同化产物输出与转运效率，将当期同化物快速输送至果实，减少在叶片端的滞留与积累。相比之下，非结构性碳水化合物含量偏高的品种可能表现出资源配置的保守性，其非结构性碳水化合物更多被储存或滞留在结构组织中，从而限制果实营养积累与品质提升。这可能是本研究中综合表现较差的品种‘DW’和‘B21’其果壳等结构性指标显著优于其他品种的原因。在 Pan 等[39]在水稻（*Oryza sativa*）中的研究中也得出类似结论，即产量与非结构性碳水化合物向籽粒的转运总量密切相关，而非静态的存量。而 Zwieniecki 等[40]在扁桃（*Prunus dulcis*）、胡桃（*Juglans regia*）和黄连木（*Pistacia vera*）中的研究也发现，休眠期较高的非结构性碳水化合物含量有利于来季产出，但繁殖生长阶段较高的非结构性碳水化合物含量常伴随着较低的产量，这些研究结果都从侧面支持了本研究的发现。

需要强调的是，本研究主要基于性状间统计关系来识别这种联系，因此目前更适合将非结构性碳水化合物、叶绿素和磷含量视为解释品种差异的关键候选指标，而不是直接将其等同于已经被证实的调控机制。本研究的重要性不只是识别出哪个品种更优，更在于把果实端差异与叶片端功能状态联系起来，从而将原本相对分散的果实营养品质、果实经济性状和叶片功能性状整合为一条较完整的解释链条。结合 LES 理论“获取型−保守型”的连续谱，本研究中‘YZ’和‘LZ8’品种表现出高叶绿素含量、较大比叶面积和低非结构性碳水化合物含量的性状组合，结合其果实高脂肪、高糖分、高蛋白积累及高出仁率的表现，推测这两个品种采取获取型资源分配策略，可能具有较强的碳动员与转运能力，能够快速将光合产物转运至果实中。与之相反，‘B21’和‘LZ7’品种表现为低叶绿素含量、较小比叶面积和较高非结构性碳水化合物含量，推测其资源配置偏向于结构生长而非营养积累，可能将更多资源用于果壳等结构性组织的生长，较少转化为可食部分。

总体来看，本研究从果实营养品质、果实经济性状和叶片功能性状 3 个层面，对平欧杂交榛品种间差异进行了系统分析，并进一步揭示了叶片功能性状与果实性状之间的关联关系。其意义在于：一方面本研究突破了单纯从果实端评价品种的思路，将叶片功能性状纳入榛子品质评价体系，为平欧杂交榛的综合评价提供了新的分析视角；另一方面识别出的非结构性碳水化合物、叶绿素和磷含量等关键指标，为后续从叶片端开展品种早期评价和性状筛选提供了可参考的候选指标。此外，本研究还表明，不

同品种间的综合差异本质上体现为资源获取、碳分配和果实形成效率之间的协同模式差异，这对理解平欧杂交榛品种分化具有一定理论意义。当然，本研究也存在局限：其一，供试品种数量有限，且样品来自同一地区和同一年份，研究结论更适合解释供试材料间的相对差异；其二，本研究主要基于相关分析和冗余分析揭示性状间联系，对于叶片功能性状影响果实性状的具体生理机制仍缺乏直接验证。未来可在扩大种质范围并开展多年份、多地点试验的基础上，结合光合参数、同化物转运、“源−库关系”及分子调控等研究手段，进一步揭示平欧杂交榛叶片功能性状与果实品质之间的调控路径，从而为其优良品种选育和精准栽培管理提供更坚实的理论支撑。

4 结　　论

本研究针对平欧杂交榛品种评价中单一果实指标难以揭示综合利用价值及性状分化成因的局限，利用单因素方差分析、冗余分析、相关性网络及熵权−TOPSIS 等方法进行了果实营养品质、经济性状与叶片功能性状的系统评价与关联研究。研究得到以下结论。

（1）不同平欧杂交榛品种在果实品质和经济性状上存在显著的协同分化。‘YZ’在脂肪、可溶性糖、维生素 C 含量及出仁率等核心指标上表现最优，综合评价最高，‘LZ8’次之，‘B21’虽单果质量较大，但果壳厚，出仁率低，经济转化效率最差。

（2）叶片功能性状与果实品质之间存在紧密的耦合关系。叶绿素含量、比叶面积和磷含量与果实综合品质呈显著正相关，而非结构性碳水化合物含量与果实营养品质呈显著负相关，是“叶片−果实”关联网络中起主导作用的核心关键指标。

（3）品种间的品质差异本质上体现了叶经济学谱（LES）框架下的资源配置策略分化。高品质品种（如‘YZ’‘LZ8’）采取“获取型”策略，具备“高叶绿素含量−大比叶面积−低非结构性碳水化合物含量”的功能特征，光合获取与碳动员效率高；保守型品种（如‘B21’‘LZ7’）的碳同化物则多滞留于营养器官或用于结构生长，导致果实的营养沉积受限。

研究结果将为平欧杂交榛高品质品种的早期预测、田间精准筛选及“源−库”优化管理提供重要的生理学依据与候选指标。未来可在扩大种质资源范围和多点试验的基础上，结合光合参数与分子调控等手段，进一步解析叶片功能性状调控果实品质形成的深层机制。

参 考 文 献

[1] 王贵禧. 中国榛属植物资源培育与利用研究 (III)—— 育种、育苗与栽培 [J]. 林业科学研究, 2018, 31(1): 122−129.
Wang G X. Studies on cultivation and utilization of *Corylus* germplasm resources in China (III) — breeding, seedling and cultivation [J]. Forest Research, 2018, 31(1): 122−129.

[2] 史晨杉, 高双, 郭晨燕, 等. 榛坚果的油脂含量、脂肪酸组成及榛仁中生物活性成分研究进展 [J]. 林产化学与工业, 2023, 43(5): 133−144.
Shi C S, Gao S, Guo C Y, et al. Research progress on oil content, fatty acid composition and bioactive components of hazelnut [J]. Chemistry and Industry of Forest Products, 2023, 43(5): 133−144.

[3] Yang Z, Ma W, Wang L, et al. Population genomics reveals demographic history and selection signatures of hazelnut (*Corylus*) [J]. Horticulture Research, 2023, 10(5): uhad065.

[4] 贾淑霞, 张萌, 许艳红, 等. 不同品种平欧杂种榛坚果产量、性状和果仁营养物质对比 [J]. 经济林研究, 2024, 42(3): 95−104.
Jia S X, Zhang M, Xu Y H, et al. Yield and traits of nut, and nutrients of kernel under different hazelnut cultivars [J]. Non-wood Forest Research, 2024, 42(3): 95−104.

[5] Zhu X G, Long S P, Ort D R. Improving photosynthetic efficiency for greater yield [J]. Annual Review of Plant Biology, 2010, 61(1): 235−261.

[6] Rowland S D, Zumstein K, Nakayama H, et al. Leaf shape is a predictor of fruit quality and cultivar performance in tomato [J]. New Phytologist, 2020, 226(3): 851−865.

[7] Zhou H, Zhou G, He Q, et al. Environmental explanation of maize specific leaf area under varying water stress regimes [J]. Environmental and Experimental Botany, 2020, 171: 103932.

[8] Asseng S, Turner N C, Botwright T, et al. Evaluating the impact of a trait for increased specific leaf area on wheat yields using a crop simulation model [J]. Agronomy Journal, 2003, 95(1): 10−19.

[9] Gleixner G, Danier H J, Werner R A, et al. Correlations between the 13C content of primary and secondary plant products in different cell compartments and that in decomposing basidiomycetes [J]. Plant Physiology, 1993, 102(4): 1287−1290.

[10] Hartmann H, Trumbore S. Understanding the roles of nonstructural carbohydrates in forest trees: from what we can measure to what we want to know [J]. New Phytologist, 2016, 211(2): 386−403.

[11] Tixier A, Gambetta G A, Godfrey J, et al. Non-structural carbohydrates in dormant woody perennials; the tale of winter survival and spring arrival [J]. Frontiers in Forests and Global Change, 2019, 2: 18.

[12] Dietze M C, Sala A, Carbone M S, et al. Nonstructural carbon in woody plants [J]. Annual Review of Plant Biology, 2014, 65: 667−687.

[13] Zhang Q, Peng D, Pei X, et al. Unveiling high-light-use efficiency in *Juglans mandshurica*: adaptive insights from leaf morphology and physiology [J]. Forest Ecology and Management, 2025, 586: 122705.

[14] Macklin S C, Mariani R O, Young E N, et al. Intraspecific leaf trait variation across and within five common wine grape varieties [J]. Plants, 2022, 11(20): 2792.

[15] Wright I J, Reich P B, Westoby M, et al. The worldwide leaf economics spectrum [J]. Nature, 2004, 428: 821−827.

[16] Ramirez J A, Craven D, Herrera D, et al. Non-structural carbohydrate concentrations in tree organs vary across biomes and

leaf habits, but are independent of the fast-slow plant economic spectrum [J]. Frontiers in Plant Science, 2024, 15: 1375958.

[17] 彭玲, 宋爱云, 董林水, 等. 冬枣园主要矿质元素含量变化及其与果实品质的关系 [J]. 云南农业大学学报 (自然科学), 2022, 37(3): 515−522.
Peng L, Song A Y, Dong L S, et al. Changes of major mineral element contents and its relationshipwith fruit quality in *Zizyphus jujuba* 'dongzao' orchard [J]. Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science), 2022, 37(3): 515−522.

[18] 彭程, 邓林萍, 谭禾俊, 等. 黄金柰李果实品质与土壤和叶片养分的关系 [J]. 中南林业科技大学学报, 2022, 42(11): 27−35, 52.
Peng C, Deng L P, Tan H J, et al. Relationship between fruit quality and nutrients in soil and leaves of *Prunus salicina* var. *cordata* [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2022, 42(11): 27−35, 52.

[19] 李荣飞, 张抗萍, 何桥, 等树形对龙安柚叶片生理状况及果实品质的影响 [J]. 西南大学学报 (自然科学版), 2017, 39(7): 36−43.
Li R F, Zhang K P, He Q, et al. Impact of tree training systems on the physiological characteristics of leaves on different branches of *Citrus grandis* var. Long'anyou and on its fruit quality [J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2017, 39(7): 36−43.

[20] Rossouw G C, Orr R, Bennett D, et al. The roles of non-structural carbohydrates in fruiting: a review focusing on mango (*Mangifera indica*) [J]. Functional Plant Biology, 2024, 51(4): FP23195.

[21] 舒展, 张晓素, 陈娟, 等. 叶绿素含量测定的简化 [J]. 植物生理学通讯, 2010, 46(4): 399−402.
Shu Z, Zhang X S, Chen J, et al. The simplification of chlorophyll content measurement [J]. Plant Physiology Journal, 2010, 46(4): 399−402.

[22] 张韫. 土壤·水·植物理化分析教程 [M]. 北京: 中国林业出版社. 2011: 222−232.
Zhang Y. Tutorial of physical and chemical analysis for soil, water and plant[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2011: 222−232.

[23] CocK J H, Yoshida S. Accumulation of 14C-labelled carbohydrate before flowering and its subsequent redistribution and respiration in the rice plant [J]. Japanese Journal of Crop Science, 1972, 41(2): 226−234.

[24] 张宇和, 柳鎏, 梁维坚. 中国果树志: 板栗榛子卷 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2005: 1−17.
Zhang Y H, Liu L, Liang W J. China fruit monograph: chestnut and hazelnut volume[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2005: 1−17.

[25] Milošević T, Milošević N. Determination of size and shape features of hazelnuts using multivariate analysis[J]. Acta Scientiarum Polonorum Hortorum Cultus, 2017, 16(5): 49–61-49–61.

[26] Fıratlıgil-Durmuş E, Šárka E, Bubník Z, et al. Size properties of legume seeds of different varieties using image analysis [J]. Journal of Food Engineering, 2010, 99(4): 445−451.

[27] Aydin C. PH-postharvest technology: physical properties of hazel nuts [J]. Biosystems Engineering, 2002, 82(3): 297−303.

[28] 邹琦. 植物生理学实验指导 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 129−174.
Zou Q. Laboratory guide for plant physiology[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 129−174.

[29] 王华顺, 张玲芳, 刘华银, 等. 串联索氏提取法快速测定烟草种子中油脂质量分数 [J]. 云南民族大学学报 (自然科学版), 2025, 34(1): 46−50.
Wang H S, Zhang L F, Liu H Y, et al. Rapid determination of oil content in tobacco seeds by serial Soxhlet extraction [J]. Journal of Yunnan Minzu University (Natural Sciences Edition), 2025, 34(1): 46−50.

[30] Liu Q, Liu J, Huang G, et al. Study on determination of content of reduction-type vitamin C in special vegetable with molybdenum: blue colorimetry [J]. Farm Prod Process, 2019, 4: 56−59.

[31] 翟大才, 吴锦菲, 柏晓辉, 等. 安徽地区华东野核桃果实特征和坚果品质的初步评价 [J]. 林业科学研究, 2019, 32(4): 129−136.
Zhai D C, Wu J F, Bai X H, et al. Preliminary evaluation of fruit characteristics and nut quality of *Juglans cathayensis* Dode var. *formosana* (Hayata) from Anhui Province [J]. Forest Research, 2019, 32(4): 129−136.

[32] 李金强, 罗怿, 李文云, 等. 贵州乌江沿岸柑橘早中晚熟品种果实品质特征分析 [J]. 湖南农业科学, 2021(11): 17−19.
Li J Q, Luo Y, Li W Y, et al. Analysis of fruit quality characteristics of early, middle and late ripening citrus varieties along Wujiang River in Guizhou [J]. Hunan Agricultural Sciences, 2021(11): 17−19.

[33] 龙启辰, 肖子菲, 张忠存, 等. 基于模糊综合评价的柴达木地区不同枸杞品系比较 [J]. 经济林研究, 2025, 43(3): 194−206.
Long Q C, Xiao Z F, Zhang Z C, et al. Comparison of different wolfberry strains in the Qaidam area based on fuzzy comprehensive evaluation [J]. Non-Wood Forest Research, 2025, 43(3): 194−206.

[34] Hussain S, Ulhassan Z, Brestic M, et al. Photosynthesis research under climate change [J]. Photosynthesis Research, 2021, 150(1): 5−19.

[35] Raines C A. Increasing photosynthetic carbon assimilation in C3 plants to improve crop yield: current and future strategies [J]. Plant Physiology, 2011, 155(1): 36−42.

[36] Takahashi A, Yasutake D, Hidaka K, et al. Yield and photosynthesis related to growth forms of two strawberry cultivars in a plant factory with artificial lighting [J]. HortScience, 2024, 59(3): 394−399.

[37] Zhang P, Ding J, Wang Q, et al. Contrasting coordination of non-structural carbohydrates with leaf and root economic strategies of alpine coniferous forests [J]. New Phytologist, 2024, 243(2): 580−590.

[38] Won P L P, Kanno N, Banayo N P M, et al. Source-sink relationships in short-duration and hybrid rice cultivars in tropical Asia [J]. Field Crops Research, 2022, 282: 108485.

[39] Pan J, Cui K, Wei D, et al. Relationships of non-structural carbohydrates accumulation and translocation with yield formation in rice recombinant inbred lines under two nitrogen levels [J]. Physiologia Plantarum, 2011, 141(4): 321−331.

[40] Zwieniecki M A, Davidson A M, Orozco J, et al. The impact of non-structural carbohydrates (NSC) concentration on yield in *Prunus dulcis*, *Pistacia vera*, and *Juglans regia* [J]. Scientific Reports, 2022, 12(1): 4360.

（责任编辑　赵田芸
责任编委　马履一）