

单宁在红葡萄酒色泽与风味调控中的作用与应用策略

郑海武¹ 赵雪平¹ 李正英¹ 雷 蕾¹ 张美枝¹ 忻胜兵²

(1. 内蒙古农业大学, 内蒙古 呼和浩特 010018; 2. 内蒙古伊利实业集团有限公司, 内蒙古 呼和浩特 010018)

摘要: 单宁是红葡萄酒中最为重要的多酚类物质之一, 对葡萄酒的色泽稳定性、风味复杂性和陈年潜力方面发挥着核心作用。文章系统梳理了红葡萄酒中单宁的分类、结构特性及分布与转化机制, 重点讨论了软单宁、硬单宁和聚合单宁对葡萄酒色泽形成与维持的差异化影响, 以及其在涩味、苦味、香气协调和风味持久性上的作用机制。同时, 总结了单宁在发酵、陈酿及调配环节的应用技术, 揭示了其在促进花色苷稳定、提升酒体结构、延缓氧化及改善口感方面的核心价值。

关键词: 单宁; 红葡萄酒; 色泽; 风味

Effects and application strategies of tannins in the regulation of red wine color and flavor

ZHENG Haiwu¹ ZHAO Xueping¹ LI Zhengying¹ LEI Lei¹ ZHANG Meizhi¹ XIN Shengbing²

(1. Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China; 2. Inner Mongolia Yili Industrial Group Co., Ltd., Hohhot, Inner Mongolia 010018, China)

Abstract: Tannins are among the most important polyphenolic compounds in red wine and play a central role in determining color stability, flavor complexity, and aging potential. This review systematically summarizes the classification, structural characteristics, and the distribution and transformation mechanisms of tannins in red wine. It focuses on the differential effects of soft tannins, hard tannins, and polymerized tannins on the formation and maintenance of wine color, as well as their roles in astringency, bitterness, aroma coordination, and flavor persistence. Furthermore, the applications of tannins in fermentation, aging, and blending are summarized, revealing their important roles in promoting anthocyanin stability, enhancing wine body structure, delaying oxidation, and improving mouthfeel.

Keywords: tannin; wine; color; flavor

葡萄酒中富含多种酚类化合物, 这些物质不仅决定了酒体的色泽和风味特征, 还对品质稳定性发挥关键作用^[1]。其中, 单宁作为葡萄酒重要的酚类成分之一, 对葡萄酒的感官属性和陈年潜力具有显著影响^[2-3]。现有综述多集中于单宁的总体特征及健康功能方面, 例如其抗氧化活性及与花色苷的相互作用机制等。然而, 这类研究往往忽略了不同类型单宁在葡萄酒色泽与风味形成中的差异性作用, 难以为葡萄酒酿造工艺优化提供精细化的理论支持^[4]。为弥补这一不足, 文章系统梳理单宁的分类与结构特征, 对

比较软单宁、硬单宁与聚合单宁在红葡萄酒色泽稳定性、风味复杂性及陈年潜力方面的作用差异, 整合并评述国内外相关研究成果。旨在揭示单宁在葡萄酒品质调控中的多维作用, 为酿造工艺优化提供更系统的理论依据。

1 单宁概述

单宁(又称鞣质)是一类广泛存在于葡萄籽、果皮及橡木中的多酚化合物, 在红葡萄酒品质形成中扮演核心角色, 不同类型单宁在结构、来源及作用上存在显著差异。红葡萄酒中, 根据分子结构分类, 单宁主要以缩合单

基金项目: 内蒙古自然科学基金(编号: 2025QN03197, 2021MS03044); 内蒙古自治区教育厅项目(编号: NJZY23118, NJZY21509)

通信作者: 张美枝(1972—), 女, 内蒙古农业大学副教授, 硕士。E-mail: jiuyue2020jiuyue@126.com

收稿日期: 2025-09-01 **改回日期:** 2026-03-10

引用格式: 郑海武, 赵雪平, 李正英, 等. 单宁在红葡萄酒色泽与风味调控中的作用与应用策略[J]. 食品与机械, 2026, 42(3): 205-211.

Citation: ZHENG Haiwu, ZHAO Xueping, LI Zhengying, et al. Effects and application strategies of tannins in the regulation of red wine color and flavor[J]. Food & Machinery, 2026, 42(3): 205-211.

宁、水解单宁和复合单宁的形式存在^[5-6]。水解单宁由酯键结合的多元酚构成,易水解生成小分子物质,主要来源于橡木、葡萄皮、葡萄梗等,其水溶性较好,抗氧化性相对较弱,但能与金属离子结合^[5,7];缩合单宁是黄烷-3-醇聚合物,难以水解,主要来自葡萄籽、葡萄皮和葡萄梗,是葡萄酒涩味和结构感的主要来源,且抗氧化活性较强^[6,8];复合单宁则兼具水解单宁与缩合单宁的结构特征,来源于橡木桶陈酿过程水解单宁和缩合单宁的凝聚,其性质复杂,对风味的贡献具有多样性,目前相关研究仍较为有限^[9]。不同类型单宁在葡萄酒品质形成过程中,既存在协同作用,又具有差异化功能^[10-11]。例如,水解单宁易在陈酿过程中降解,并与花色苷形成稳定复合物,显著影响酒体色泽与风味;缩合单宁凭借其强抗氧化性,能长期维持葡萄酒品质稳定;复合单宁虽研究较少,但已显现出在风味调控方面的独特潜力,未来需进一步深入探究其作用机制与应用价值。

根据分子特性分类,单宁可分为软单宁、硬单宁、聚合单宁;根据功能进行分类,单宁可分为色素单宁和鞣花单宁。软单宁多属于低聚缩合单宁(聚合度通常<10),部分与轻度加工的水解单宁(如轻度烘烤橡木桶释放的鞣花单宁)相关,核心特征为分子柔性高、聚合度低。其主要来源于特定葡萄品种的果皮(如黑皮诺)、轻度烘烤橡木桶及葡萄籽的轻度提取;硬单宁几乎全为高聚缩合单宁(聚合度通常>20),核心特征为分子刚性强、聚合度高^[12]。其主要来源于葡萄籽(尤其是未完全成熟的葡萄)、葡萄皮的重度提取(如长时间浸皮)及未烘烤的橡木片;聚合单宁是由小分子单宁(如黄烷-3-醇单体、低聚缩合单宁)通过氧化、交联反应进一步聚合形成的大分子单宁,可由缩合单宁在发酵、陈酿中自然聚合生成,也可通过外源添加(如商业聚合单宁制剂);色素单宁并非独立结构的单宁,而是单宁与花青素(葡萄酒主要色素)通过共价键结合形成的“单宁-色素复合物”,是单宁在陈酿期的主要功能形态^[13]。鞣花单宁是水解单宁的核心亚类,因分子中含鞣花酸结构得名,是橡木桶向葡萄酒释放的主要单宁类型(占橡木单宁总量的80%以上)。

其在红葡萄酒陈酿过程中会缓慢水解为鞣花酸,与花青素的结合能力显著强于其他单宁,能有效提升色泽稳定性^[14]。

2 不同单宁对红葡萄酒色泽的影响

2.1 软单宁对红葡萄酒色泽的影响

普遍认为,软单宁可通过与花青素发生非共价作用形成稳定复合物,从而抑制花青素在贮藏期的降解与过度聚合,提高其在酒液中的溶解性与表观稳定性,使酒体在陈年早期即可表现出更鲜净的红色与更高的色泽纯度^[15]。如表1所示,与硬单宁相比,软单宁因分子柔性更高,在氧化聚合过程中更倾向于形成小分子有序复合,使色泽能由初期紫红平滑过渡至宝石红并在后期保持相对稳定^[16]。同时,高温烘烤橡木桶通常伴随鞣花单宁比例下降而缩合单宁与色素单宁比例上升,这一“桶效应”与软单宁的稳色特性具有潜在协同,常被报道为可进一步增强色泽层次与稳定性^[17]。不过,软单宁的“稳定、增艳”优势易受溶解氧、pH与游离SO₂等工艺参数的影响:若氧管理不足或酒液酸度偏高,软单宁对花青素的保护效应会明显削弱。此外,文献对“软单宁”的界定在来源与结构特征上并不完全一致,跨研究的可比性有限。整体判断:在以“保持宝石红、降低早期褪色”为目标的工艺路径中,软单宁具备更高性价比,但应与溶解氧、总酸及游离SO₂的动态控制配套验证^[18]。

2.2 硬单宁对红葡萄酒色泽的影响

硬单宁具有更高的分子刚性与聚合度,硬单宁在葡萄酒发酵早期即可通过对花青素与相关色素的强亲和与协同作用(见表1),协助色素提取,显著提升色密度与“视觉厚重感”,使酒体呈深紫红乃至紫黑色调^[19]。这一“快速显色、筑骨架”的优势为强调结构与陈年潜力的风格奠定基础,但随陈酿推进,硬单宁持续氧化—交联形成更大分子的聚合体,易通过吸附、共沉作用带来清亮度的改善与色泽稳定。在感官维度,高收敛性与深色外观往往“同频共振”,如高品质赤霞珠干红,呈现色泽浓郁、结构紧实与优良陈年潜力^[20],但当葡萄成熟度不够,或浸提过度,或外源添加硬单宁过量等原因导致硬单宁剂量控制不当

表1 不同单宁对红葡萄酒色泽的影响

Table 1 Effects of different tannins on the color of red wine

单宁类型	典型色泽表现	主要机制	关键优势	潜在风险	工艺要点(可验证指标)
软单宁	紫红或宝石红,鲜亮度高、纯度佳	与花青素非共价复合,抑制降解与过聚	稳色且不过度增加粗糙度;适合“保鲜亮、褪紫红”的风格 ^[15-18]	受溶氧/pH/SO ₂ 强影响;“软单宁”定义不一、可比性有限	控氧<0.5 mg/L、pH 3.3~3.6、游离SO ₂ 动态维持;跟踪总酸、色素单宁比例
硬单宁	深紫红或紫黑,色密度与“厚重感”强	强亲和与强提取,后期聚合、沉降	快速“显色+筑骨架”,利于长陈年(如赤霞珠) ^[19-21]	超量致沉降/浑浊与收敛过强,清亮度与果香显露受限	设色密度上限与聚合动力学监测;必要时冷稳/蛋白澄清;跟踪浊度与沉降指数
聚合单宁	深宝石红、砖红或石榴红,层次丰富	多点结合稳色,结构重排驱动转色	“提色—稳色—定型”贯通,香气复杂性协同 ^[21-24]	剂量窗口窄;与基酒反应性错配时鲜艳度可能下降	以相对分子质量分布与加料时点为核心参数;跟踪色调T及澄清易损性等关键指标

导致聚合动力过快,则可能出现过度沉降、浑浊或澄清困难,反致外观品质受损^[21]。综合来看,硬单宁适合“结构优先”的酿造目标,但需要以目标色密度上限、聚合/沉降风险指标与澄清策略共同约束,使“强而不滞、深而不闷”。

2.3 聚合单宁对红葡萄酒色泽的影响

聚合单宁因相对分子质量较大与多活性位点,倾向经疏水与氢键多点结合与花青素形成复合体,从发酵初期便增强色素萃取与稳定,使酒体呈现更深的紫红/紫黑并提升色密度与饱和度,同时与缩合单宁共同增进风味复杂性^[22]。以新疆石河子产区赤霞珠为例,发酵前添加200 mg/L缩合单宁可使色度较对照提升27.25%(至21.52),并在6个月陈酿后进一步升至24.38;其样品呈深宝石红并兼具更复杂香气(包括甘草风味),提示“适量外源单宁”在色泽稳定与香气层次上具有协同优势^[23]。然而,随陈酿推进,聚合单宁、花青素复合体会发生结构重排,色泽从紫红转向砖红或石榴红,最终接近琥珀色;这既反映花色苷的降解缩合,也体现聚合单宁在“稳色、转色、定色”连续过程中的调控作用^[24]。添加聚合单宁的风险在于酒体的品质受基酒多酚基线与加料时点强烈影响;若品类、纯度与基酒反应性不匹配,葡萄酒可能出现“色密度上升而鲜艳度下降”的表观矛盾。整体判断:聚合单宁适合红葡萄酒“色密度与结构并举”的风格化路径,但需以相对分子质量分布、反应活性位点与澄清易损性为依据精准设定剂量与时点。

3 不同单宁对红葡萄酒风味的影响

3.1 软单宁对红葡萄酒风味的影响

在红葡萄酒中,软单宁因收敛性较弱而赋予酒体更加圆润、丝滑的质感,使得口感更为顺畅细腻,有利于果香与花香的凸显^[25]。其在澄清与下胶处理过程中表现出较强的耐受性,不会显著破坏酒体的整体风味,因此应用范围较广^[26]。在葡萄酒发酵阶段,软单宁可促进花色苷的提取和稳定,间接提升了酒体的柔和感与香气层次^[27];随着陈酿进行,其逐渐发生温和的氧化与聚合,风味谱系由单一果香花香向皮革、香料、蘑菇等复杂陈年香气演

化^[28],这一特性在突出酒体层次与陈年价值方面颇具优势。然而,如表2所示这种“柔化+增香”的作用对溶解氧、pH及游离SO₂等环境变量高度敏感,一旦控氧或酸度管理不当,其顺滑度与清新度的正向贡献会减弱。因此,软单宁更适合于追求早期适饮性与香气纯净度为风格的葡萄酒,但在工艺上必须辅以严格的氧管理和酸度调控。

3.2 硬单宁对红葡萄酒风味的影响

硬单宁以强烈的收敛性和骨架感著称,可显著增强口腔紧缩感与结构支撑,从而赋予红葡萄酒更为强劲厚重的风格^[29]。在分子水平上,硬单宁不仅直接作用于口腔感知,还能通过与葡萄酒挥发性香气分子结合,改变其释放速率与停留时间,进而强化果香的持久性与融合度^[30]。在发酵和陈酿过程中,硬单宁的氧化和交联反应进一步提升酒体的稳定性和风味均衡感,而水解单宁则在其中扮演调节角色,通过化学重排缓和过强的收敛性,使口感趋于柔和^[31]。同时,外源性硬单宁(如葡萄皮缩合单宁)的合理添加已被证实能增加红葡萄酒的风味复杂性和辅色效果^[32]。不过,其“双刃剑”效应同样明显:红葡萄酒中硬单宁剂量过高可能带来口感粗糙、浊度升高甚至香气被掩盖的风险。整体而言,硬单宁在强化结构和陈年潜力上优势突出,但工艺中必须通过剂量控制与聚合监测保持“强而不涩”的平衡。

3.3 聚合单宁对红葡萄酒风味的影响

聚合单宁因相对分子质量大、活性位点多,通常比单体单宁表现出更弱的收敛性,能够显著降低年轻葡萄酒的粗糙与尖锐感,使酒体更显圆润丰满^[33]。它还能通过增强酒体质量和质感来提升整体平衡感^[34]。在风味层面,聚合单宁通过与多种香气分子形成弱相互作用,对果香、花香等易挥发成分具有保护与缓释效应,从而延长香气的持久性^[35]。随着红葡萄酒陈酿的深入,聚合单宁进一步氧化、重排,生成新的风味活性物质,与原有香气互动,显著提升复杂性与层次感。同时,它与酸度、酒精度及甜度协同,帮助构建风格一致的均衡体系,使色、香、味达到协调统一^[36]。不过,聚合单宁的风味优势依赖于合

表2 不同单宁对红葡萄酒风味的影响

Table 2 Effects of different tannins on the flavor of red wine

单宁类型	口感特点与触觉感知	香气贡献	机制要点	潜在风险	工艺监测要点
软单宁	圆润、丝滑,涩感轻柔,顺畅度高	果香/花香更容易显露;陈年可演化出皮革、香料、蘑菇等次级香 ^[25-28]	与色素、香气的温和协同;对澄清耐受性较好	对溶解氧(DO)、pH、SO ₂ 敏感;控氧不当时风味收益减弱	控氧 DO<0.5 mg/L; pH 3.3~3.6; 动态 SO ₂ ; 监测口感评分、CIELAB与香气强度曲线
硬单宁	强收敛、结构感与厚重感突出;陈年潜力强	可增强香气持久与融合度,但过量易遮蔽新鲜度 ^[29-31]	与挥发物可逆结合调控释放;氧化、交联构建骨架	剂量与聚合速率失衡导致粗糙、苦感上升、浊度风险	设定色密度、收敛上限;跟踪蛋白沉降、聚合指数、浊度;必要时冷稳、蛋白澄清
聚合单宁	柔和、丰满、质感增强,整体均衡提升	保护/缓释果香花香,延长尾韵,提升复杂性 ^[32-36]	多点弱相互作用+缓释;陈酿期继续聚合生成新风味体	剂量窗口与时点敏感;与基酒反应性不匹配时鲜度下降	小剂量多点投加;评估相对分子质量分布、澄清易损性;跟踪香气衰减曲线与感官均衡度

理剂量与时机,一旦投加过量或与基酒多酚谱系匹配度不足,可能出现“丰满度提升但果香鲜度下降”的反效果。因此,其应用应以相对分子质量分布、加料时点和澄清易损性为核心控制点,从而确保风味增益最大化。

4 单宁在红葡萄酒生产中的应用

葡萄酒加工中添加单宁是基于原料特性、工艺需求与市场定位的系统性品质调控手段,核心目标是优化产品综合特性、提升市场竞争力^[37]。单宁在葡萄酒生产不同环节均有应用,如表 3 所示,针对葡萄成熟度不足、氧化损伤等原料缺陷,添加单宁可补充结构物质、保护原有风

味与色泽,避免酒液寡淡或变质。在感官品质调控上,通过搭配软单宁、硬单宁、聚合单宁等类型,既能定向优化色泽(如保鲜亮色泽、促进长期保色),又能平衡口感(中和粗糙涩感、强化骨架感),还可协同提升香气层次与持久度^[38]。同时,单宁的强抗氧化性与天然抑菌作用,能抑制氧化劣变和杂菌污染,减少浑浊、沉淀等问题,延长产品货架期与适饮期^[39]。此外,外源添加单宁还能稳定批次品质一致性,满足不同市场的差异化口味偏好,辅助优化生产工艺、提升效率,实现产品品质与商业价值的双重提升。根据葡萄原料特点和产品目标的差异,可以在葡萄酒生产的不同阶段进行单宁的调整^[40]。

表 3 单宁在葡萄酒生产不同环节的应用
Table 3 Application of tannins in different stages of wine production

应用环节	作用机制与效果	应用优势	风险与控制要点
发酵过程	与花色苷结合促进溶解与稳定;适量抑菌,改善发酵稳定性	提升色泽、增强结构、保障发酵顺畅	过量可能加剧收敛、抑制酵母代谢;需控氧与剂量
陈酿过程	聚合/解聚作用塑造风味;色泽由紫红向砖红过渡	增强圆润度与陈年潜力,提升品质层次	聚合过度易沉降、口感失衡;容器与时间选择关键
调配过程	调节涩感与香气平衡;增强抗氧化性	优化结构与风味协调性,延长货架期与适饮期	不同来源单宁效果差异大;比例控制需精准

4.1 单宁在发酵过程中的应用

在葡萄酒发酵阶段,单宁的加入与转化对酒体品质的塑造具有基础性意义。已有研究^[41]显示,红葡萄酒在发酵阶段外源添加高质量浓度单宁(400 mg/L)可显著提高缩合单宁含量,从而增强酒体的结构感,使口感更加浓郁、醇厚,并延长回味。这一作用与花色苷协同,通过缓慢氧化和复合反应减弱早期苦涩与粗糙感,带来圆润度和层次提升。与此同时,单宁与葡萄皮花色苷结合能促进色素的溶解与稳定,使酒液色泽更为饱满鲜亮^[42]。例如在赤霞珠发酵中,适量外源单宁的添加可显著提升成品酒的色密度与视觉吸引力。值得注意的是,单宁还具有一定的天然抑菌作用,能抑制细菌、霉菌等有害微生物,保障发酵过程的顺利进行^[43]。然而,这些积极作用往往依赖于剂量和工艺控制,一旦添加过量可能导致过度收敛甚至抑制酵母代谢,从而影响风味平衡。Harbertson 等^[41]将不同浓度的市售单宁产品添加到正在桶中陈酿的梅洛(Merlot)葡萄酒以及压榨后的赤霞珠(Cabernet Sauvignon)葡萄酒中。结果发现,在推荐剂量下,对葡萄酒的涩味有轻微的改善作用,但在高剂量下,葡萄酒的香气会发生变化,感官特性受到负面影响,葡萄酒出现土腥味,颜色也会变成棕色。这表明过量添加单宁会影响葡萄酒的风味平衡,使其失去原有的品质特点。因此,发酵阶段单宁应用的优势在于“提色、筑架、稳发酵”,但需注意“剂量窗口”与“菌群敏感性”的双重约束。

4.2 单宁在陈酿过程中的应用

红葡萄酒进入陈酿阶段,单宁通过聚合、解聚以及其他酚类物质的复杂作用,深刻影响酒体色泽与风味演

化^[44]。适量添加单宁通常能稳定色泽并提升陈年潜力^[45],但若原料葡萄品质欠佳或工艺控制不当,则可能加剧粗糙感或导致色泽不稳^[46]。容器选择对单宁演变尤为关键:陶罐因氧迁移特性可在较短时间增强酒体红色调、提升成熟度,从而缩短陈酿周期^[47];橡木桶则能提供多样的挥发性组分,带来更丰富的风味差异^[48-49]。随着时间推移,红葡萄酒中的单宁分子逐渐聚合成大分子复合物并沉淀,使收敛性减弱、口感趋于圆润;部分单宁同时解聚生成黄烷醇衍生物,早期可强化辅色效应,但后期作用衰减^[50]。这种“聚合、解聚”的双重过程决定了酒体色泽从紫红向砖红的自然过渡^[51-53]。总体来看葡萄酒陈酿期单宁的应用价值在于增强陈年风格与品质稳定性,但其风险在于“过聚—沉降”导致风格失衡,因此陈酿工艺需在容器、时间和单宁来源之间寻找平衡。

4.3 单宁在调配过程中的应用

在红葡萄酒调配环节,单宁既是风格修正工具,也是品质稳定因子。在色泽方面,单宁通过与花色苷结合形成复合物,有效减缓花色苷降解,保持酒体色泽的亮丽和持久性^[54]。在葡萄酒风味协调性上,尽管单宁本身无强烈香气,但其与果香、花香分子发生弱作用可改变挥发速率,从而间接提升香气表现力并增强融合度^[55]。调配过程中,不同单宁水平的基酒组合能有效提升风味层次感。此外,单宁的抗氧化性能够降低酒体氧化速率,延缓品质劣变并延长适饮期^[56-57]。尤其是水解单宁与缩合单宁按质量比 1:1 混合时,对色泽、风味及抗氧化性的综合提升尤为突出^[51]。但在具体实践中,不同来源单宁的效果差异显著:葡萄皮单宁较细腻,而种子单宁则往往带来更强

的涩感,因此必须合理控制其比例^[58]。若比例不当,可能出现酒体厚重却缺乏优雅的矛盾。已有证据表明,通过优化单宁来源与含量,不仅可改善结构与口感,还能增强长期贮藏后的色泽稳定性,使葡萄酒在多年陈酿后仍保持良好的感官表现^[59]。因此,调配阶段单宁应用的关键在于“精确配比、风味协调、抗氧化延伸”的综合平衡。

5 结语

单宁作为红葡萄酒品质构建的核心因子,不仅决定酒体色泽深度与稳定性,还通过与花色苷、其他酚类及挥发性物质的相互作用,塑造葡萄酒的结构感、涩味强度与香气复杂性。不同来源、不同结构类型的单宁,在发酵、陈酿和调配等生产环节展现出独特功能:软单宁助力提升酒体圆润度与香气纯净度,硬单宁为酒体构建强劲结构与陈年潜力,聚合单宁则在色泽稳定与风味层次丰富方面发挥关键作用。三者合理搭配应用,既能增强葡萄酒的陈年潜力,又能改善口感圆润度与风味平衡性。近年来,国内外研究不断揭示单宁的结构演变规律及其与感官品质的耦合机制,深化了对葡萄酒风味形成本质的理解,也为酿造工艺优化提供了新思路。未来研究可进一步聚焦单宁提取与精准调控技术,结合感官学与分子水平研究手段,探索单宁与其他品质因子的相互作用机制,推动基础理论研究与应用深度衔接,为红葡萄酒品质提升与产业升级提供更有力的技术支撑。

参考文献

- [1] ELRAYESS Y, NEHME N, AZZI-ACHKOUTY S, et al. Wine phenolic compounds: chemistry, functionality and health benefits[J]. *Antioxidants*, 2024, 13(11): 1 312.
- [2] BRANCO Z, BAPTISTA F, PAIE-RIBEIRO J, et al. Impact of winemaking techniques on the phenolic composition and antioxidant properties of *Touriga nacional* wines[J]. *Molecules*, 2025, 30(7): 1 601.
- [3] PICARIELLO L, GAMBUTI A, PETRACCA F, et al. Enological tannins affect acetaldehyde evolution, colour stability and tannin reactivity during forced oxidation of red wine[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2018, 53(1): 228-236.
- [4] SUN Y, GUO J J, LIU F B, et al. Identification of indigenous yeast flora isolated from the five winegrape varieties harvested in Xiangning, China[J]. *Antonie Van Leeuwenhoek*, 2014, 105(3): 533-540.
- [5] COSME F, AIRES A, PINTO T, et al. A comprehensive review of bioactive tannins in foods and beverages: functional properties, health benefits, and sensory qualities[J]. *Molecules*, 2025, 30(4): 800.
- [6] 陈光龙, 张娜, 郭海红. 榆林市葡萄高效栽培技术研究[J]. *种子科技*, 2025, 43(6): 114-116.
CHEN G L, ZHANG N, GUO H H. Study on high-efficiency cultivation techniques of grapes in Yulin[J]. *Seed Science & Technology*, 2025, 43(6): 114-116.
- [7] BEN AZIZ M, MOUTAOIKIL M, ZENG L M, et al. Review on oenological tannins: conventional and emergent extraction techniques, and characterization[J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2024, 18(6): 4 528-4 544.
- [8] 段文婧, 闫更轩, 刘春燕, 等. 单宁的微生物降解及单宁酶在食品工业中的应用研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2025, 16(3): 115-122.
DUAN W J, YAN G X, LIU C Y, et al. Research progress on microbial degradation of tannins and application of tannase in food industry[J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2025, 16(3): 115-122.
- [9] 陈永, 刘芸齐, 张振文. 摘叶处理对贺兰山东麓酿酒葡萄品丽珠果实酚类物质的影响[J]. *中国酿造*, 2024, 43(12): 64-70.
CHEN Y, LIU Y Q, ZHANG Z W. Effects of leaf removal on phenolic compounds in wine grape *Cabernet franc* from Eastern foothills of Helan Mountains[J]. *China Brewing*, 2024, 43(12): 64-70.
- [10] KANMANI B J, MUTHU A S P. Estimation of total flavonoids, phenols, alkaloids, tannins and in vitro antioxidant activity of *Costus pictus* D. Don. ex. Lindl. and *Dodonaea viscosa* (L.) Jacq. leaf extracts[J]. *Chemical Papers*, 2025, 79(1): 545-559.
- [11] YAO K, TIHO T, NAHOULÉ S, et al. Total polyphenols, total flavonoids, condensed tannins, and antioxidant activity of *Borassus aethiopum* (Arecaceae) ripe fruits' peels, and peel-pulps, dried at different temperatures[J]. *Asian Journal of Chemical Sciences*, 2023, 13(2): 20-33.
- [12] LANG T, HUSSAIN M D, LI M D, et al. Unlocking the structure-activity relationship of mangrove condensed and hydrolysable tannins: unveiling their potential ecological significance in antioxidant and antibacterial functions[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2025, 307: 141918.
- [13] 郭俊凌, 石碧. 植物多酚高值转化与跨领域应用研究进展[J]. *中国科学: 化学*, 2024, 54(11): 1 807-1 820.
GUO J L, SHI B. Research progress on high-value transformation and cross-field application of plant polyphenols[J]. *Science China: Chemistry*, 2024, 54(11): 1 807-1 820.
- [14] 陈勇, 易勇波, 肖利民, 等. 橡木中的鞣花单宁对葡萄酒质量的影响[J]. *酿酒科技*, 2005(3): 71-74.
CHEN Y, YI Y B, XIAO L M, et al. Effects of ellagitannin in oak on grape wine quality[J]. *Liquor-Making Science & Technology*, 2005(3): 71-74.
- [15] 杨洋. 不同昼夜温度对赤霞珠葡萄浆品质的影响[D]. 银川: 宁夏大学, 2020: 45-52.
YANG Y. Effects of day-night temperature differences on the quality of *Cabernet sauvignon* grape berries[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2020: 45-52.
- [16] 孙佳莹, 郭伟, 李超. 外源性单宁对赤霞珠葡萄酒品质的影响[J]. *中国酒*, 2024(9): 36-37.
SUN J Y, GUO W, LI C. Effects of exogenous tannins on the quality of *Cabernet sauvignon* wine[J]. *China Wine*, 2024(9): 36-37.
- [17] 张舒凡. 烟台地区特色酿酒红葡萄品种酿酒特性及陈酿潜力研究[D]. 烟台: 烟台大学, 2023: 15-28.

- ZHANG S F. Study on brewing characteristics and aging potential of characteristic red grape varieties in Yantai area[D]. Yantai: Yantai University, 2023: 15-28.
- [18] 李雨宇. 干红葡萄酒中花色苷和单宁结构组分与其感官质量关系的研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2021: 32-45.
- LI Y Y. Study on the relationship between the structural components of anthocyanins and tannins with sensory quality in dry red wines[D]. Xianyang: Northwest A & F University, 2021: 32-45.
- [19] 刘学军. 对于干红葡萄酒改性与增香的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2007: 25-38.
- LIU X J. Study on modification and increases the fragrance of claret by pulsed electric field technology[D]. Changchun: Jilin University, 2007: 25-38.
- [20] 王克清. 红色酿酒葡萄中香草酰单宁组分及其在葡萄酒中演变的研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2022: 18-35.
- WANG K Q. Composition of tannins vanillate in red wine grapes and their evolution during winemaking[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2022: 18-35.
- [21] 王张钰, 黄勇策, 杨伟明, 等. 贺兰山东麓不同风土条件下红葡萄酒酚类及感官特征分析[J]. 中国酿造, 2024, 43(6): 32-42.
- WANG Z Y, HUANG Y C, YANG W M, et al. Analysis of phenolic and sensory characteristics of red wines under different terroir conditions in the eastern foothills of Helan Mountains[J]. China Brewing, 2024, 43(6): 32-42.
- [22] 孙文静, 陈建胜, 束超, 等. 3 株商业克鲁维酵母对贺兰山东麓赤霞珠干红葡萄酒增酸效果及酒品质的影响[J]. 食品科学技术学报, 2024, 42(4): 61-74.
- SUN W J, CHEN J S, SHU C, et al. Evaluation of acid-enhancing effect and wine quality of 3 commercial *Kluyveromyces* on cabernet sauvignon dry red wine from eastern foot of Helan Mountain[J]. Journal of Food Science and Technology, 2024, 42(4): 61-74.
- [23] 王文璇, 董荣, 慕静怡, 等. 不同单宁提升赤霞珠干红葡萄酒品质的比较分析[J]. 现代食品科技, 2020, 36(9): 270-276.
- WANG W X, DONG R, MU J Y, et al. Comparison of different tannins for improving the quality of *Cabernet sauvignon* red wine[J]. Modern Food Science and Technology, 2020, 36(9): 270-276.
- [24] 段雪荣. 橡木桶陈酿对昌黎赤霞珠干红葡萄酒品质的影响[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2012: 23-24.
- DUAN X R. The influence of oak aging on the quality of *Cabernet sauvignon* red wine from Changli[D]. Xianyang: Northwest A & F University, 2012: 23-24.
- [25] 董书甲, 任辉, 刘露, 等. 葡萄酒酿造中常用辅料及应用研究[J]. 安徽农业科学, 2024, 52(22): 1-7, 19.
- DONG S J, REN H, LIU L, et al. Research on common auxiliary materials and their applications in wine making[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2024, 52(22): 1-7, 19.
- [26] STRATI I F, TATARIDIS P, SHEHADEH A, et al. Impact of tannin addition on the antioxidant activity and sensory character of *Malagousia* white wine[J]. Current Research in Food Science, 2021, 4: 937-945.
- [27] GARCÍA-ESTÉVEZ I, ALCALDE-EON C, PUENTE V, et al. Enological tannin effect on red wine color and pigment composition and relevance of the yeast fermentation products[J]. Molecules, 2017, 22(12): 2 046.
- [28] 马懿, 喻康杰, 赖晓琴, 等. 不同种类单宁对赤霞珠葡萄酒品质及风味感官的影响[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(21): 25-33.
- MA Y, YU K J, LAI X Q, et al. Effects of different species on quality and flavor sensory of *Cabernet sauvignon* wine[J]. Food Research and Development, 2024, 45(21): 25-33.
- [29] 何丽红, 焦红茹, 方海田. 蛋清粉对马瑟兰干红葡萄酒澄清效果的影响[J]. 现代食品, 2024, 30(23): 193-198.
- HE L H, JIAO H R, FANG H T. Effects of egg white powder on the clarification of *Marselan* dry red wines[J]. Modern Food, 2024, 30(23): 193-198.
- [30] LYU J H, WANG S, MA Y, et al. Study on the interaction of tannins and salivary proteins affecting wine aroma volatility: static HS-SPME and molecular dynamics simulation approaches[J]. Food Research International, 2024, 175: 113809.
- [31] VERSARI A, DU TOIT W, PARPINELLO G P. Oenological tannins: a review[J]. Australian Journal of Grape and Wine Research, 2013, 19(1): 1-10.
- [32] CHIRA K, JOURDES M, TEISSEDE P L. *Cabernet sauvignon* red wine astringency quality control by tannin characterization and polymerization during storage[J]. European Food Research and Technology, 2012, 234(2): 253-261.
- [33] 马懿, 熊蓉, 魏鑫, 等. 葡萄酒酚类物质的产生机制及影响因素研究进展[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(13): 195-201.
- MA Y, XIONG R, WEI X, et al. Formation mechanism of phenols during winemaking and the influencing factors: a review[J]. Food Research and Development, 2023, 44(13): 195-201.
- [34] 刘庆竹, 孙凯, 司友斌. 真菌漆酶介导自由基偶联和接枝反应在绿色化学中的应用[J]. 环境化学, 2021, 40(3): 914-927.
- LIU Q Z, SUN K, SI Y B. Prospects and applications of fungal laccase-mediated the radical coupling and grafting processes in green chemosynthesis[J]. Environmental Chemistry, 2021, 40(3): 914-927.
- [35] 黄静. 鲜食葡萄酿酒特性及葡萄酒品质的研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2014: 18.
- HUANG J. Research of winemaking characters and wine quality of table grapes[D]. Shihezi: Shihezi University, 2014: 18.
- [36] PITTARI E, MOIO L, PIOMBINO P. Interactions between polyphenols and volatile compounds in wine: a literature review on physicochemical and sensory insights[J]. Applied Sciences, 2021, 11(3): 1 157.
- [37] 王瑞, 李华, 张振文, 等. 单宁添加配套工艺对赤霞珠干红葡萄酒品质的影响[J]. 食品科学, 2025, 46(3): 89-96.
- WANG R, LI H, ZHANG Z W, et al. Effects of tannin addition supporting technology on the quality of *Cabernet sauvignon* dry red wine[J]. Food Science, 2025, 46(3): 89-96.
- [38] 刘佳, 赵艳艳, 陈向东. 外源单宁在葡萄酒酿造中的应用及品质影响机制[J]. 中国酿造, 2023, 42(1): 28-33.
- LIU J, ZHAO Y Y, CHEN X D. Application of exogenous tannins in wine making and their quality-influencing

- mechanisms[J]. *China Brewing*, 2023, 42(1): 28-33.
- [39] CORONA O, BAMBINA P, DE FILIPPI D, et al. Influence of pre-fermentative addition of aqueous solution tannins extracted from oak wood (*Quercus petraea*) on the composition of Grillo wines[J]. *European Food Research and Technology*, 2021, 247(7): 1 595-1 608.
- [40] FREDRICKSON A J, MANNS D C, MANSFIELD A K. Addition rate of exogenous tannin for optimal tannin retention in hybrid red wines[J]. *American Journal of Enology and Viticulture*, 2020, 71(1): 62-69.
- [41] HARBERTSON J F, PARPINELLO G P, HEYMANN H, et al. Impact of exogenous tannin additions on wine chemistry and wine sensory character[J]. *Food Chemistry*, 2012, 131(3): 999-1 008.
- [42] 简小艳, 宋江峰, 王虹娟, 等. 葡萄渣在食品中的开发利用研究进展[J]. *中国果菜*, 2023, 43(1): 55-62.
- JIAN X Y, SONG J F, WANG H J, et al. Research progress on development and utilization of grape pomace in food[J]. *China Fruit & Vegetable*, 2023, 43(1): 55-62.
- [43] 郭宾, 蒋悦, 李雅善, 等. 外源单宁对‘赤霞珠’葡萄酒花色苷和缩合单宁特性的影响[J]. *中外葡萄与葡萄酒*, 2023(1): 8-15.
- GUO B, JIANG Y, LI Y S, et al. Influence of exogenous tannin on anthocyanins and condensed tannin properties in 'Cabernet sauvignon' wine[J]. *Sino-Overseas Grapevine & Wine*, 2023 (1): 8-15.
- [44] LI L X, LI Z, WEI Z M, et al. Effect of tannin addition on chromatic characteristics, sensory qualities and antioxidant activities of red wines[J]. *RSC Advances*, 2020, 10(12): 7 108-7 117.
- [45] 朱虹, 张平, 李新榜. 葡萄酒的灵魂之一——不可或缺的单宁[J]. *中外葡萄与葡萄酒*, 2008(5): 47-51.
- ZHU H, ZHANG P, LI X B. One of the souls of wine: indispensable tannins[J]. *Sino-Overseas Grapevine & Wine*, 2008(5): 47-51.
- [46] 安家静, 郑小柏, 熊大维, 等. 麦芽威士忌在5种不同桶型陈酿两年后的风味变化[J]. *中国酿造*, 2024, 43(6): 96-101.
- AN J J, ZHENG X B, XIONG D W, et al. Flavor changes of malt whisky aged for two years in 5 different types of barrel [J]. *China Brewing*, 2024, 43(6): 96-101.
- [47] 康文军, 刘叶, 张军强, 等. 陶罐陈酿对赤霞珠干红葡萄酒颜色及味感的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2023, 49(11): 47-54.
- KANG W J, LIU Y, ZHANG J Q, et al. Effects of clay pot aging on Cabernet sauvignon dry red wine based on color-related and taste-related indicators[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2023, 49(11): 47-54.
- [48] 郑昊. 橡木调制技术及在白兰地陈酿中的应用研究[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2024: 32.
- ZHENG H. Oak modulation technology and its application in brandy aging[D]. Jinan: Qilu University of Technology, 2024: 32.
- [49] 马小强, 王有梁, 潘艺波, 等. 超声催陈对葡萄酒色泽品质的影响[J]. *食品研究与开发*, 2023, 44(15): 15-23.
- MA X Q, WANG Y L, PAN Y B, et al. The effects of ultrasonic aging on the color quality of wine[J]. *Food Research and Development*, 2023, 44(15): 15-23.
- [50] 杨健. 葡萄酒酿造的新技术和新工艺[J]. *中外食品工业*, 2024(5): 1-3.
- YANG J. New technologies and processes for wine making[J]. *Chinese and Foreign Food Industry*, 2024(5): 1-3.
- [51] PICHLER A, IVIĆ I, BABIĆ J, et al. Phenolic profile, antioxidant activity, chemical composition, and elements of Merlot wine stored in toasted oak barrels[J]. *Foods*, 2024, 13 (24): 4 100.
- [52] 闫雪. 遮光处理对‘赤霞珠’葡萄果实中辅色物质代谢及葡萄酒颜色稳定性的影响[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2021: 8.
- YAN X. Effect of shading treatment on the metabolism of co-color substances and wine color stability in 'Cabernet sauvignon' grape berry[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2021: 8.
- [53] 白晓璇, 凌梦琪, 陈柏年, 等. 添加葡萄籽单宁对橡木桶陈酿‘赤霞珠’和‘马瑟兰’干红葡萄酒香气的影响[J]. *食品科学*, 2022, 43(18): 251-257.
- BAI X X, LING M Q, CHEN B N, et al. Effect of grape seed tannin addition before barrel aging on the aroma of Cabernet sauvignon and Marselan dry red wine[J]. *Food Science*, 2022, 43(18): 251-257.
- [54] 苏洁, 张军翔. 葡萄酒圆润度研究进展[J]. *食品与机械*, 2013, 29(2): 238-241.
- SU J, ZHANG J X. Progress on research in rounded taste of wine[J]. *Food & Machinery*, 2013, 29(2): 238-241.
- [55] 刘畅. 复合酒曲的制备与催陈方法对糯玉米酒品质的影响研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2021: 53.
- LIU C. Study on the production of mixed Qu and the effect of aging treatment on the quality of waxy maize wines[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2021: 53.
- [56] 赵益梅, 王新, 唐佳代, 等. 橡木片对‘赤霞珠’葡萄酒酚类物质与抗氧化能力的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2023, 49(13): 108-113.
- ZHAO Y M, WANG X, TANG J D, et al. Effect of oak chips processing on phenolic compounds and antioxidant capacity of Cabernet Sauvignon wine[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2023, 49(13): 108-113.
- [57] 孙海燕. 贺兰山东麓干红葡萄酒多酚组分与其抗氧化、抗癌活性的关联性研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2019: 46-47.
- SUN H Y. Study on antioxidant and anticancer activity of polyphenols in dry red wines from eastern foot of Helan Mountain in Ningxia[D]. Xianyang: Northwest A & F University, 2019: 46-47.
- [58] 李蕊蕊. 葡萄酒酿造过程中单宁的变化规律[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2016: 38.
- LI R R. Change of tannins during winemaking[D]. Jinan: Qilu University of Technology, 2016: 38.
- [59] 强文乐, 余飞, 赵晓兰, 等. 陈酿期不同调配比例对赤霞珠—美乐葡萄酒化学成分和感官品质的影响[J]. *核农学报*, 2024, 38(4): 703-714.
- QIANG W L, YU F, ZHAO X L, et al. Effect of different blending ratio on chemical parameters and sensory properties of Cabernet sauvignon-Merlot wines during barrel aging period [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2024, 38(4): 703-714.