DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20251203007
引用格式: 彭芷芯, 李梦杰, 谷亚坤, 等. 国产红葡萄酒抗氧化活性比较分析及其在品种鉴别中的应用[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(11): 51–58.
PENG ZX, LI MJ, GU YK, *et al*. Comparison analysis of antioxidant activity in Chinese red wines and its application in varietal discrimination [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(11): 51–58. (in Chinese with English abstract).

国产红葡萄酒抗氧化活性比较分析及其在品种鉴别中的应用

彭芷芯[1], 李梦杰[2], 谷亚坤[3], 尹小丽[2], 谷惠文[2*]

(1. 武汉生物工程学院食品科技学院, 武汉 430415; 2. 长江大学化学与环境工程学院/生命科学学院, 荆州 434023; 3. 武汉轻工大学食品科学与工程学院, 武汉 430023)

摘 要: 目的 利用不同品种国产红葡萄酒的抗氧化活性差异建立品种快速鉴别模型。**方法** 通过测定并比较不同品种国产红葡萄酒(黑皮诺、梅鹿辄、蛇龙珠和赤霞珠)的总酚含量、总黄酮含量、铜离子还原能力、1,1-二苯基-2-三硝基苯肼自由基和 2,2'-联氮-二(3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸)二铵盐阳离子自由基清除能力, 同时结合主成分分析(principal component analysis, PCA)和正交偏最小二乘-判别分析(orthogonal partial least squares-discriminant analysis, OPLS-DA)以及支持向量机(support vector machine, SVM)算法, 构建国产红葡萄酒品种识别模型。**结果** 对比分析发现 4 个品种的国产红葡萄酒抗氧化活性顺序为: 赤霞珠>梅鹿辄>蛇龙珠>黑皮诺。基于此, 构建的 PCA (R^2X_{cum}=0.819)以及 OPLS-DA (R^2X_{cum}=0.952、R^2Y_{cum}=0.424、Q^2_{cum}=0.387)模型能有效表征数据特征与组间差异; SVM 品种识别模型中交叉验证准确率为 94.40%, 训练集准确率达 100.00%、测试集准确率为 96.26%。**结论** 基于国产红葡萄酒抗氧化活性的品种特异性差异, 结合多元统计学方法及机器学习算法, 可以实现对国产红葡萄酒品种的快速、准确鉴别。

关键词: 国产红葡萄酒; 抗氧化活性; 主成分分析; 正交偏最小二乘-判别分析; 支持向量机; 品种鉴别

Comparison analysis of antioxidant activity in Chinese red wines and its application in varietal discrimination

PENG Zhi-Xin[1], LI Meng-Jie[2], GU Ya-Kun[3], YIN Xiao-Li[2], GU Hui-Wen[2*]

(1. *College of Food Science and Technology*, *Wuhan University of Bioengineering*, *Wuhan* 430415, *China*; 2. *College of Life Sciences/College of Chemistry and Environmental Engineering*, *Yangtze University*, *Jingzhou* 434023, *China*; 3. *College of Food Science and Engineering*, *Wuhan Polytechnic University*, *Wuhan* 430023, *China*)

ABSTRACT: Objective To establish a rapid model for varietal discrimination of Chinese red wines by leveraging the differences in antioxidant activity among different varieties. **Methods** The total phenolic content, total

收稿日期: 2025-12-03
基金项目: 国家自然科学基金项目(32371501, 32272409); 宁夏回族自治区重点研发计划重点项目(2026BEG02035)
第一作者: 彭芷芯(1999—), 女, 硕士, 助教, 主要研究方向为食品真实性检测及溯源。E-mail: 1246267506@qq.com
***通信作者:** 谷惠文(1989—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为食品安全与真实性检测及溯源。E-mail: gruyclewee@yangtzeu.edu.cn

flavonoid content, cupric ion reducing antioxidant capacity, 1,1-diphenyl-2-picryl-hydrazyl radical scavenging capacity and 2,2'-azinobis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) ammonium salt radical cation scavenging capacity of different varieties of Chinese red wines (Pinot Noir, Merlot, Cabernet Gernischt and Cabernet Sauvignon) were determined and compared. Meanwhile, principal component analysis (PCA), orthogonal partial least squares-discriminant analysis (OPLS-DA) and support vector machine (SVM) algorithms were combined to establish a varietal identification model for Chinese red wines. **Results** Comparative analysis revealed that the order of antioxidant activity of the 4 varieties was: Cabernet Sauvignon>Merlot>Cabernet Gernischt>Pinot Noir. On this basis, the constructed PCA (R^2X_{cum}=0.819) and OPLS-DA (R^2X_{cum}=0.952, R^2Y_{cum}=0.424, Q^2_{cum}=0.387) models effectively characterized the data features and intergroup differences. The SVM varietal identification model achieved a cross-validation accuracy of 94.40%, with 100.00% accuracy in the training set and 96.26% accuracy in the test set. **Conclusion** Based on the variety-specific antioxidant activity differences of Chinese red wines, combined with multivariate statistical methods and machine learning algorithms, rapid and accurate discrimination of Chinese red wine varieties can be effectively achieved.

KEY WORDS: Chinese red wine; antioxidant activity; principal component analysis; orthogonal partial least squares-discriminant analysis; support vector machine; varietal identification

0 引 言

红葡萄酒作为我国葡萄酒产业的核心产品，具有丰富的酚类、黄酮类等营养成分与醇厚独特的风味品质，随着市场规模的增加，已成为大众饮品中兼具营养与文化属性的代表性产品[1–2]。不同品种的葡萄因遗传背景、生长环境以及酿造工艺的差异，酿造出的葡萄酒在风味轮廓呈现显著区别[3–4]，这种品种特异性也成为消费者选购和企业定价的重要依据。但当前国产红葡萄酒市场仍存在诸多乱象，除了存在同种葡萄酒产地信息掺假外[5–6]，同样存在不同品种标识不清、以低价值品种冒充高价值品种等问题，给消费者选择和市场监管带来不便。因此亟需建立一种快速、准确的品种鉴别方法，为市场监管与消费者权益保障提供技术支撑。

传统葡萄酒品种鉴别方法如 DNA 分子标记技术[7]、稳定同位素比质谱技术等仪器分析方法[8–9]，虽然准确性高，但是操作复杂、检测成本高，难以满足大规模快速检测的实际需求。葡萄酒的品质与特性主要由其所含的化学成分决定，这些成分在葡萄原料生长、采摘及后续酿酒发酵过程中逐步积累形成。其中，酚类、类黄酮和氨基酸等，不仅赋予葡萄酒独特的颜色和风味，还使其具有良好的生理活性[10–11]。抗氧化活性为红葡萄酒的核心功能特性之一[12–13]，与酚类、黄酮类化合物密切相关。大量体外和体内研究表明，酚类化合物可以抑制活性氧(reactive oxygen species, ROS)的形成，减少脂质过氧化，并保护 DNA 免受氧化损伤[14–16]。而黄酮类化合物由于其结构中存在多个羟基和共轭双键，从而能够清除 ROS 和自由基，保护细胞免受氧化损伤，并且黄酮类化合物还可以通过激活细胞信号通路来调节抗氧化防御系统[17]。同时，研究表明这类物质的含量与组成受遗传背景及生长环境调控，具有显著的品种特异性[18–19]，并且相关检测方法成熟[20]，因此抗氧化能力具有作为国产红葡萄酒品种鉴别特征指标的潜力。

化学法检测抗氧化活性指标是评估体外抗氧化能力常用且操作简便的方法之一[21–22]。基于此，本研究选取总酚含量(total phenolic content, TPC)、总黄酮含量(total flavonoid content, TFC)、铜离子还原能力(cupric ion reducing antioxidant capacity, CUPRAC)、1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)自由基和 2,2'-联氮-二(3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸)二铵盐[2,2'-azinobis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) ammonium salt, ABTS]阳离子自由基清除能力 5 项核心抗氧化活性指标，对比分析 4 个品种国产红葡萄酒共 119 个样品的抗氧化能力的差异，并结合主成分分析(principal component analysis, PCA)、正交偏最小二乘-判别分析(orthogonal partial least squares-discriminant analysis, OPLS-DA)以及支持向量机(support vector machine, SVM)算法构建品种识别模型，旨在验证抗氧化活性指标用于国产红葡萄酒品种鉴别的可行性，为国产红葡萄酒产业的质量控制与品种溯源提供技术参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

不同品种国产红葡萄酒样本共 119 个，其中赤霞珠品种(Sau)葡萄酒样本 45 个，梅鹿辄品种(Mer)葡萄酒样本 32 个，蛇龙珠品种(Ger)葡萄酒样本 29 个，黑皮诺品种(Pin)葡萄酒样本 13 个。

福林酚(生物试剂)、没食子酸(色谱纯)、DPPH、乙酸铵、2,9-二甲基-1,10 邻菲洛啉(新亚铜试剂)(分析纯)(上海源叶生物科技有限公司); 芦丁(色谱纯, 北京索莱宝科技有限公司); 无水碳酸钠(分析纯, 天津市津北精细化工有限公司); 亚硝酸钠、六水合氯化铝、氢氧化钠(分析纯, 国药集团化学试剂有限公司); 五水合硫酸铜、ABTS、过二硫酸钾、6-羟基-2,5,7,8-四甲基色烷-2-羧酸(6-hydroxy-2,5,7,8-tetramethylchroman-2-carboxylic acid, Trolox)(分析纯, 上海麦克林生化科技有限公司)。

1.2　仪器与设备

TU-1900 紫外-可见分光光度计(北京普析通用仪器有限责任公司); DHG-9030A 电热恒温鼓风干燥箱(河南巩义市予华仪器有限责任公司); GL124-1SCN 电子分析天平(精度 1 mg, 德国赛多利斯公司)。

1.3　实验方法

1.3.1　抗氧化活性物质含量测定

不同品种的国产红葡萄酒中抗氧化活性物质含量的测定参考本课题组前期基于抗氧化活性指标的国产红葡萄酒产地识别研究[5], 并稍作调整。

(1)总酚含量的测定

将没食子酸工作溶液设定为 10、20、30、50、70、90 μg/mL, 参考文献[5]制定标准曲线以及进行酒样中总酚含量的测定, 每个样本进行 3 次平行实验。

(2)总黄酮含量的测定

将不同芦丁工作液质量浓度设定为 100、200、300、400、500 μg/mL, 分别移取 2 mL 加入到 10 mL 的比色管中, 加入 15%乙醇定容至 5 mL, 参考文献[5]制定标准曲线以及进行酒样中总黄酮的测定, 每个样本进行 3 次平行实验。

1.3.2　体外抗氧化能力测定

不同品种的国产红葡萄酒的 CUPRAC 的测定、ABTS+自由基清除能力的测定以及 DPPH 自由基清除能力的测定方法同样参考前期基于抗氧化活性指标的国产红葡萄酒产地识别研究[5], 每个样本进行 3 次平行实验。

1.4　数据处理

所有数据的统计及收集通过 Microsoft Excel 2016 完成, 结果以平均值±标准偏差表示; 采用 Python 3.9 进行单因素方差分析, 对不同品种红葡萄酒组间数据的显著性差异进行检验, 根据 P 大小判断差异的显著性水平。同时, 也通过此软件进行皮尔逊相关性分析; 采用 Origin 2018 完成所有绘图工作; PCA 及 OPLS-DA 分析采用 SIMCA-P 14.1 完成, 通过模型拟合度(R^2X_{cum}, R^2Y_{cum})与预测能力(Q^2)评价模型的稳定性与有效性; 利用 MATLAB R2023b 中的 LIBSVM 工具包, 构建基于径向基函数(adial basis function, RBF)核函数的 SVM 模型, 采用分层抽样法对 4 个品种红葡萄酒样本分别按 7:3 比例划分训练集与测试集, 其中包括 3 次平行实验数据。具体分配为: Pin 品种(训练集 n=27, 测试集 n=12)、Mer 品种(训练集 n=68, 测试集 n=28)、Ger 品种(训练集 n=61, 测试集 n=26)、Sau 品种(训练集 n=94, 测试集 n=41)。通过网格搜索法优化惩罚参数(C)与核函数参数(γ), 实现对不同品种红葡萄酒的鉴别。

2　结果与分析

2.1　不同品种国产红葡萄酒抗氧化活性比较分析

2.1.1　TPC 及 TFC 差异性比较

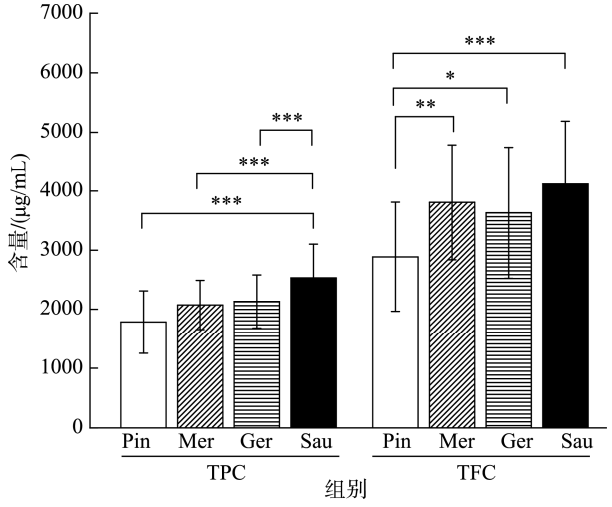
酚类化合物及黄酮类化合物是植物中抗氧化活性的主要来源[23−24]。根据表 1 中构建的标准曲线方程(拟合系数均大于 0.99), 对不同品种的红葡萄酒样中的 TPC 以及 TFC 含量进行测定, 结果显示, 4 个品种红葡萄酒样本的 TPC 平均值范围为(1781.11±527.22)~(2532.17±567.06) μg/mL, 而 TFC 为(2886.90±925.53)~(4121.93±1064.63) μg/mL。其中, 同种葡萄酒不同样本间的 TPC 以及 TFC 存在一定差异性, 这是由于葡萄酒作为一种极具“风土”特征的饮品, 在葡萄栽培过程中, 不同产区的土壤、气候、温度以及其他环境因素都会显著影响葡萄酒的质量[25−27]。对数据进行单因素方差分析发现(图 1), Sau 品种的 TPC 均值强极显著高于另外 3 个品种(P<0.001), 而其他酒样间无显著差异(P>0.05)。对于 TFC 均值的比较而言, Sau 品种、Mer 品种以及 Ger 品种间无显著差异, 但三者均高于 Pin 品种, 并且存在不同程度的显著性差异(P<0.05、P<0.01 或 P<0.001)。整体而言, Sau 品种的 TPC 以及 TFC 含量最高, 具备更强的酚类化合物及黄酮类化合物生物合成及积累能力, 而 Pin 品种两者含量最低。另外, Mer 品种以及 Ger 品种的 TPC 以及 TFC 含量之间无明显差异, 需要结合另外的抗氧化活性指标进行比较。

为了明确葡萄酒品种与 TPC、TFC 的关联性, 对不同品种红葡萄酒样本与 TPC、TFC 进行 Pearson 相关性分析。从表 2 中可以发现, 整体方面 TPC、TFC 与品种之间均呈正相关, 表明 TPC、TFC 随不同品种样品呈规律性变化, 可作为品种鉴别的指标之一。进一步分析发现, Pin 样品与 TPC、TFC 均呈负相关, Mer 样品与 TPC 呈负相关, 与 TFC 相关性较弱, Ger 与 TPC、TFC 均呈弱负相关, Sau 与 TPC、TFC 均呈正相关, 说明 Pin 样品、Sau 样品与 TPC、TFC 相关性较强, 而 Mer 与 Ger 需结合其他指标联合区分。上述结果表明, 在 TPC 及 TFC 指标方面, 4 个品种红葡萄酒整体上存在不同程度的统计学显著性差异, 且两个指标与品种之间具有一定相关性, 因此可将 TPC、TFC 作为品种鉴别的指标之一, 但需要结合其他指标联合分析, 以提升品种鉴别的准确度。

表 1 抗氧化活性指标测定标准曲线方程

Table 1 Standard curve equation for the determination of antioxidant activity index

抗氧化活性指标	标准曲线方程	决定系数(r^2)	线性范围/(μg/mL)
TPC	Y=0.01155X+0.02651	0.9987	10~90
TFC	Y=0.01092X+0.00110	0.9982	20~100
CUPRAC	Y=0.00137X–0.01051	0.9963	50~400
DPPH 自由基清除能力	Y=0.21697X+8.26334	0.9900	50~300
ABTS+自由基清除能力	Y=0.40132X–3.26365	0.9968	50~250



注: *为差异显著(P<0.05), **为差异极显著(P<0.01), ***为差异强极显著(P<0.001)。图 2 同。

图 1 不同品种国产红葡萄酒的 TPC 以及 TFC 对比

Fig.1 Comparison of TPC and TFC in different varieties of Chinese red wine

2.1.2 DPPH 自由基、ABTS+自由基清除能力以及 CUPRAC 差异性比较

DPPH 自由基、ABTS+自由基清除能力以及 CUPRAC 是体外评价抗氧化活性的常用指标。根据得到的标准曲线方程(表 1), 测定得到不同品种酒样的 3 个抗氧化活性指标平均值范围如下: DPPH 自由基清除能力为(1835.62±459.79)~(4822.39±986.18) μg Trolox/mL, ABTS+自由基清除能力为(3574.93±651.79)~(5934.65±893.67) μg Trolox/mL, CUPRAC 为(4699.57±1197.55)~(6813.18±1602.64) μg Trolox/mL。通过对不同品种酒样的 3 个抗氧化活性指标结果对比分析发现, 4 个品种间存在不同程度的显著性差异(图 2)。具体而言, 在对 DPPH 自由基清除能力方面, Sau 品种强极显著高于 Pin、Mer 和 Ger 品种(P<0.001)。而 Mer 和 Ger 品种对 DPPH 自由基的清除能力没有明显差异, 但二者均显著高于 Pin 品种(P<0.001 或 P<0.05)。在对 ABTS+自由基清除能力方面, Pin 品种的酒样极显著低于其他 3 种酒样(P<0.001), 而 Sau 品种仍表现出最高的自由基清除能力。对于 CUPRAC, Sau 品种与 Mer 品种结果相似, 均极显著高于 Pin 品种与 Ger 品种(P<0.001)。因此, 在体外评价 3 个品种酒样抗氧化活性方面, 与 TPC 及 TFC 分析结果一致, 3 项抗氧化活性指标测定结果依次为: Sau>Mer>Ger>Pin。在相关性分析中(表 2), 整体上品种与 3 个体外抗氧化指标间同样均为正相关, 进一步证明了抗氧化活性指标可以作为品种鉴别的有效指标。细分至单个品种来看, Pin 品种与所有指标均呈负相关, 其中与 ABTS+自由基清除能力的负相关性最强。Sau 品种与 3 项指标均呈正相关, 尤其与 DPPH 自由基清除能力的相关系数高达 0.812。另外, 相比于与 TPC 及 TFC 之间的相关性, Mer 与 Ger 品种与 3 个体外抗氧化指标间的相关性较强。

综上所述, 不同品种红葡萄酒的抗氧化能力具有明显差异, 这与 CHEN 等[28]结果类似。其中, Sau 品种在各项抗氧化指标上均表现出最强活性, 其次为 Mer 和 Ger 品种, 而 Pin 品种抗氧化能力相对最弱。这种品种间抗氧化活性的差异性, 为进一步红葡萄酒的品种鉴别提供了重要的实验依据。

表 2 4 个品种国产红葡萄酒与抗氧化活性指标的 Pearson 相关性系数

Table 2 Pearson correlation coefficients between 4 varieties of Chinese red wines and antioxidant activity indices

品种	抗氧化活性指标				
	TPC	TFC	DPPH 自由基清除能力	ABTS+自由基清除能力	CUPRAC
Pin	–0.283	–0.289	–0.366	–0.485	–0.268
Mer	–0.173	0.015	–0.249	0.049	0.220
Ger	–0.101	–0.079	–0.394	–0.093	–0.386
Sau	0.429	0.242	0.812	0.350	0.313
整体	0.446	0.281	0.707	0.435	0.214

注: 表中数值为 Pearson 相关系数(r), 负号表示负相关, 正号表示正相关; 相关系数绝对值越接近 1, 表明品种与对应抗氧化活性指标的线性关联程度越强。

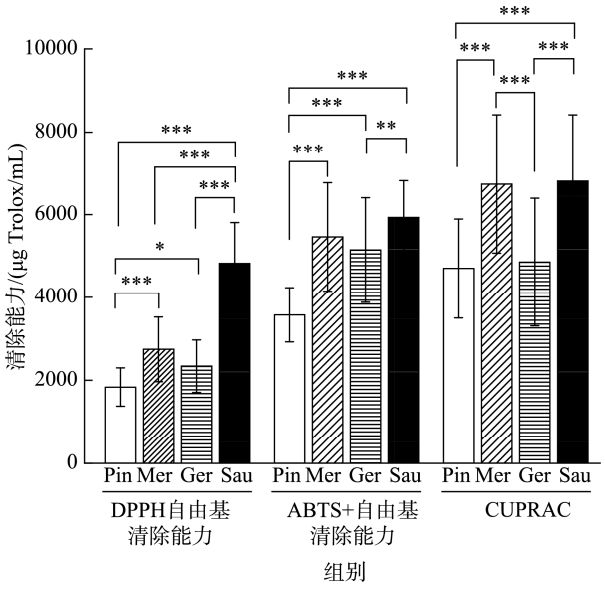


图 2　不同品种国产红葡萄酒的 DPPH 自由基清除能力、ABTS+自由基清除能力以及 CUPRAC 对比

Fig.2　Comparison of DPPH radical scavenging capacity, ABTS+ radical scavenging capacity, and CUPRAC of Chinese red wines from different varieties

2.2　不同品种红葡萄酒 PCA 及 OPLS-DA 结果

基于收集的 5 个抗氧化活性指标数据, 对 4 个品种的酒样共 119 个样品进行 PCA 和 OPLS-DA, 以此探究抗氧化活性对实现国产红葡萄酒的品种鉴别的潜力。其中, PCA 结果显示, 第一主成分的方差解释率为 72.10%, 第二主成分的方差解释率为 9.83%, 二者累积方差解释率达 81.90%, 这一结果表明, 前两个主成分可有效代表总体数据的核心信息, 能有效表征数据规律, 并且该模型具有良好的预测能力(Q^2_{cum} 为 0.520)。同时结合图 3A 可以发现, 不同品种的国产红葡萄酒样品呈现一定聚类趋势, 但品种间没有实现完全分离。

为了过滤与分类信息无关的噪声, 探究不同品种的葡萄酒样本的组间差异, 进一步将收集的样本抗氧化活性数据进行 OPLS-DA。结果显示(图 3B、表 3), 模型的 R^2X_{cum} 为 0.952, R^2Y_{cum} 为 0.424, 表明所构建的 OPLS-DA 模型可良好解释并拟合抗氧化活性数据, 且能有效获取组间主要差异信息。但是 Q^2_{cum} 为 0.387, 略低于通常认为具有良好预测能力的 0.5 阈值, 这是由于不同品种的红葡萄酒虽然具有明显与抗氧化活性相关的差异代谢物[3], 但抗氧化活性同样受产区、发酵工艺等多因素共同调控[29], 所以品种内同样存在一定差异, 这些因素共同影响了模型的预测稳定性。然而, R^2X_{cum} 和 R^2Y_{cum} 的结果能够证明抗氧化活性指标可以作为区分国产红葡萄酒品种的依据。

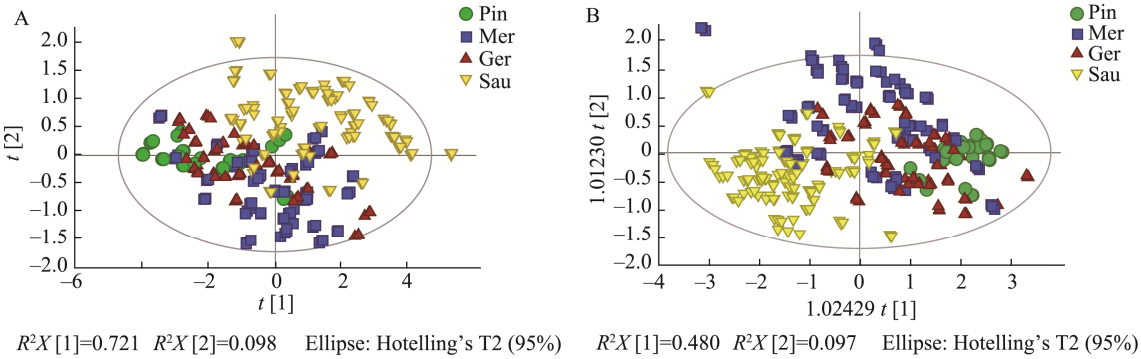


图 3　4 个品种国产红葡萄酒的 PCA (A)及 OPLS-DA (B)得分图

Fig.3　Score plots of PCA (A) and OPLS-DA (B) for 4 varieties of Chinese red wines

表 3　4 个品种国产红葡萄酒的 PCA 以及 OPLS-DA 模型统计学参数

Table 3　Evaluation parameters of PCA and OPLS-DA models for 4 varieties of Chinese red wines

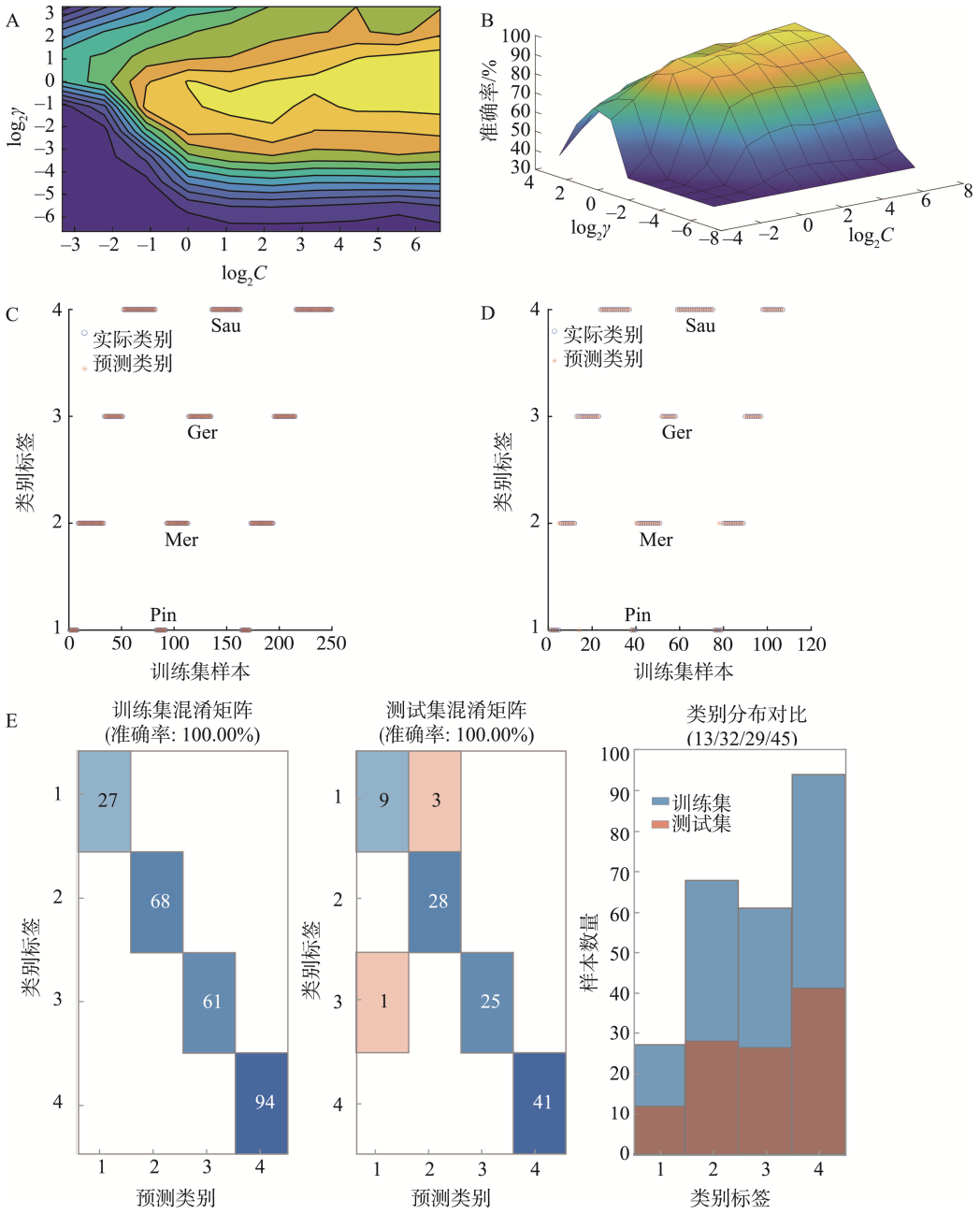
模型	R^2X_{cum}	R^2Y_{cum}	Q^2_{cum}
PCA	0.819	-	0.520
OPLS-DA	0.952	0.424	0.387

注: -为未检出。

2.3　不同品种红葡萄酒 SVM 分析

由于采用OPLS-DA方法建立的模型预测能力有限, 为了验证基于抗氧化活性差异的葡萄酒品种识别方法的可行性。本研究进一步通过 SVM 算法建立国产红葡萄酒的品种识别模型。按照分层抽样法将 4 个品种国产红葡萄酒样本按 7:3 的比例划分为训练集与测试集。SVM 算法在处理非线性分类问题中具有显著优势, 其中核函数的选择会显著影响分类模型的性能[30]。本研究在构建模型时选用 RBF, 并且通过网格搜索算法优化惩罚因子 C 和核参数 γ, 其中 C 的优化范围为 10^{-1}~10^{2}(共 10 个梯度值), γ 的优化范围为 10^{-2}~10^{1}(共 10 个梯度值)。结果显示, 最优参数组合为 C=21.5443、γ=1.0000, 最佳交叉验证准确率达 94.40%(图 4A~B)。

由图 4C~E 可知, 构建的 SVM 模型对不同品种红葡萄酒训练集样本的的预测标签与实际类别标签一致, 分类准确率达 100.00%。而对于测试集样本, 仅 Pin 品种与 Ger 品种的个别样本存在预测标签与实际类别标签的偏差,



注: A. 等高线视图; B. 三维视图; C. SVM 模型对训练集样本的实际类别标签与预测类别标签对比; D. SVM 模型对测试集样本的实际类别标签与预测类别标签对比; E. 训练集与测试集的混淆矩阵图(Pin 品种、Mer 品种、Ger 品种、Sau 品种分别对应标签 1、2、3、4)。

图 4 网格搜索法优化 SVM 参数 C 和 γ 的结果及模型预测性能

Fig.4 Optimization results of SVM parameters C and γ via grid search method and model prediction performance

其余样本的预测标签与实际类别标签基本一致，分类准确率达 96.26%。上述结果表明，基于抗氧化活性指标可有效实现国产红葡萄酒的品种区分。

3 结 论

本研究系统测定并对比分析了黑皮诺、梅鹿辄、蛇龙珠和赤霞珠 4 个品种国产红葡萄酒的 TPC、TFC、CUPRAC、DPPH 自由基清除能力及 ABTS+自由基清除能力 5 项抗氧化活性指标，并结合 PCA、OPLS-DA 与 SVM 算法，构建了这 4 个红葡萄酒品种的识别模型。结果显示，在不同品种的比较中，4 个品种国产红葡萄酒的综合抗氧化活性顺序为：赤霞珠>梅鹿辄>蛇龙珠>黑皮诺，并且不同品种红葡萄酒的抗氧化能力间存在不同程度的显著性差异。造成该差异主要归因于酚类物质作为抗氧化活性的核心贡献者，其累积含量主要由葡萄品种决定[31]。其中，赤霞珠葡萄酒展现出最强的综合抗氧化能力，是由于其苯丙

烷代谢通路具备品种特异性高活性, 该通路作为酚类物质合成的核心途径, 其 *PAL*、*4CL*、*F3H* 等关键酶基因在果实发育关键期显著上调表达, 且这些基因的转录丰度与羟基肉桂酸、黄酮醇、花青素等酚类物质积累呈高度显著正相关。而黑皮诺品种的酚类物质累积量较少, 许多葡萄品种具有非常复杂的花青素谱, 包含多达 20 种不同的花青素, 但黑皮诺品种只有 5 种 3-单葡萄糖苷花青素[32], 说明其抗氧化活性相较于其他品种而言较弱。

因此, 以 4 个不同葡萄酒品种的 5 项抗氧化活性指标之间的差异为基础, 开展 PCA 与 OPLS-DA 以实现对葡萄酒品种的分类。结果显示, PCA 前两个主成分的累积方差解释率达 81.93%, OPLS-DA 模型的 R^2X_{cum} 为 0.952、R^2Y_{cum} 为 0.424、Q^2_{cum} 为 0.387, 两种模型的得分图均显示不同品种葡萄酒样本具有一定聚类特征, 表明抗氧化活性指标具备区分红葡萄酒品种的应用基础。为进一步验证该指标对葡萄酒品种鉴别的可行性, 采用 SVM 算法中径向基核函数构建品种识别模型, 结果显示模型最优参数组合为 C=21.5443、γ=1.0000, 最佳交叉验证准确率达 94.40%, 对训练集的识别准确率达 100.00%, 对测试集的识别准确率为 96.26%, 展现出良好的预测稳定性与泛化能力。

综上所述, 相比于全基因组重测序技术所存在的操作繁琐、品种覆盖单一及样本兼容性有限等不足[7], 本研究基于抗氧化活性差异结合 SVM 算法构建的鉴别模型能够实现对不同品种国产红葡萄酒的高效、精准区分。本研究对国产红葡萄酒的快速识别提供了一定参考思路, 但是不同品种国产红葡萄酒抗氧化能力差异的深层分子机理与代谢调控机制, 仍有待后续进一步深入探究。

参考文献

[1] 冯泽山, 杨和财. 地理标志对国内葡萄酒消费动机的唤醒与激励机制的研究[J]. 中国酿造, 2024, 43(2): 269–275.
FENG ZS, YANG HC. Research on the arousal and incentive mechanism of geographical indications on wine consumption motivation in China [J]. China Brewing, 2024, 43(2): 269–275.

[2] 段照彤, 张波, 张鑫鑫, 等. 大学生葡萄酒消费认知与行为——基于甘肃农业大学在校生的问卷研究[J]. 中国食品工业, 2025(17): 92–95.
DUAN ZT, ZHANG B, ZHANG XX, *et al*. College student' wine consumption cognition and behavior—a questionnaire study based on current students of Gansu Agricultural University [J]. China Food Industry, 2025(17): 92–95.

[3] YIN XL, PENG ZX, PAN Y, *et al*. UHPLC-QTOF-MS-based untargeted metabolomic authentication of Chinese red wines according to their grape varieties [J]. Food Research International, 2024, 178: 113923.

[4] 何少华, 商华, 都振江, 等. 贺兰山东麓砾石土壤下不同品种葡萄品质和葡萄酒香气特征[J]. 酿酒科技, 2025(4): 17–26.
HE SH, SHANG H, DU ZJ, *et al*. Quality of different grape varieties and aroma characteristics of wine in gravel soil at east helan mountain [J]. Liquor-Making Science & Technology, 2025(4): 17–26.

[5] 彭芷芯, 吕毅, 石洁, 等. 基于抗氧化活性指标的国产红葡萄酒产地识别[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(2): 175–182.
PENG ZX, LV Y, SHI J, *et al*. Geographical origin identification of Chinese red wines based on antioxidant activity indexes [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(2): 175–182.

[6] PAN Y, GU HW, LV Y, *et al*. Untargeted metabolomic analysis of Chinese red wines for geographical origin traceability by UPLC-QTOF-MS coupled with chemometrics [J]. Food Chemistry, 2022, 394: 133473.

[7] 孙倩, 李娜, 杨冰艺, 等. 基于全基因组重测序的赤霞珠葡萄插入缺失标记开发及其在葡萄酒真实性鉴定中的初步验证[J]. 食品科学, 2025, 46(18): 92–101.
SUN Q, LI N, YANG BY, *et al*. Development of insertion-deletion markers for Cabernet Sauvignon grapes bsed on whole genome resequencing and their usefulness in wine authentication [J]. Food Science, 2025, 46(18): 92–101.

[8] 申可, 唐绍培, 王力, 等. 稳定同位素比质谱技术在酒类研究中的应用进展[J]. 酿酒科技, 2025(7): 101–105.
SHEN K, TANG SP, WANG L, *et al*. Application progress of stable isotope ratio mass spectrometry in the research of alcoholic beverages [J]. Liquor-Making Science and Technology, 2025(7): 101–105.

[9] 崔泽方, 开建荣, 张媛珂, 等. 基于矿质元素差异的宁夏不同小产区葡萄酒的判别分析[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(13): 311–319.
CUI ZF, KAI JR, ZHANG YK, *et al*. Appellation identification of wines from different small production areas in Ningxia based on mineral elements [J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(13): 311–319.

[10] CHALONS P, AMOR S, COURTAUT F, *et al*. Study of potential anti-inflammatory effects of red wine extract and resveratrol through a modulation of interleukin-1-beta in macrophages [J]. Nutrients, 2018, 10(12): 1856.

[11] CHENG X, HAN X, ZHOU L, *et al*. Cabernet sauvignon dry red wine ameliorates atherosclerosis in mice by regulating inflammation and endothelial function, activating AMPK phosphorylation, and modulating gut microbiota [J]. Food Research International, 2023, 169: 112942.

[12] MUCACA C, TAVARES FILHO JH, ARRUDA LL, *et al*. Antioxidant, hypolipidemic and hypoglycemic effect of red wine in wistar rats fed with obesogenic diet [J]. Food Bioscience, 2022, 471: 01671.

[13] PENG ZX, GU HW, WANG Y, *et al*. Revealing the key antioxidant compounds and potential action mechanisms of Chinese Cabernet Sauvignon red wines by integrating UHPLC-QTOF-MS-based untargeted metabolomics, network pharmacology and molecular docking approaches [J]. Food Chemistry, 2024, 460: 140540.

[14] KAN J, CAO M, CHEN C, *et al*. *In vitro* antioxidant and lipid-lowering properties of free and bound phenolic compounds from buckwheat hulls [J]. Food Bioscience, 2023, 53: 102725.

[15] SUNAGAR RR, SREERAMA YN. Implication of solvent polarities on browntop millet (*Urochloa ramosa*) phenolic antioxidants and their ability to protect oxidative DNA damage and inhibit α-amylase and α-glucosidase enzymes [J]. Food Chemistry, 2023, 411: 135474.

[16] 范丽敏, 谢冰冰. 植物黄酮类化合物的抗癌活性及其机制解析[J]. 分子植物育种, 2025, 23(23): 8001–8006.
FAN L M, XIE BB. Analysis of the anticancer activity and mechanisms of plant flavonoids [J]. Molecular Plant Breeding, 2025, 23(23): 8001–8006.

[17] JIANG C, LIU F, YANG H, *et al*. Flavonolignans and biflavonoids from *Cephalotaxus oliveri* exert neuroprotective effect via Nrf2/ARE pathway [J]. Phytochemistry, 2022, 204: 113436.

[18] 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 ZY, HUANG YC, YANG WM, *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.

[19] 开建荣, 张伟, 王彩艳, 等. 贺兰山东麓 5 种红葡萄酒酚类物质特征分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(21): 106–114.
KAI JR, ZHANG W, WANG CY, *et al*. Characteristics of phenolic substances in 5 varieties of red wines from the eastern foot of Helan Mountain [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(21): 106–114.

[20] 朱艳红. 水果中的总酚测定[J]. 现代食品, 2023, 29(24): 194–196.
ZHU YH. Determination of total phenols in fruits [J]. Modern Food, 2023, 29(24): 194–196.

[21] RUMPF J, BURGER R, SCHULZE M. Statistical evaluation of DPPH, ABTS, FRAP, and Folin-ciocalteu assays to assess the antioxidant capacity of lignins [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 2331: 23470.

[22] 李希尤, 顾笑远, 毛江浩, 等. 体内和体外抗氧化活性检测方法[J]. 生命的化学, 2024, 44(5): 853–862.
LI XY, GU XY, MAO JH, *et al*. *In vivo* and *in vitro* antioxidant activity detection methods [J]. Chemistry of Life, 2024, 44(5): 853–862.

[23] TAO Y, ZHANG H, WANG Y. Revealing and predicting the relationship between the molecular structure and antioxidant activity of flavonoids [J]. LWT, 2023, 174: 114433.

[24] 林登蕃, 郑志豪, 周映君, 等. 植物基食品中多酚的生物转化及生物活性研究进展[J]. 食品科学, 2024, 45(14): 319–327.
LIN DF, ZHENG ZH, ZHOU YJ, *et al*. Research progress in biotransformation and biological activity of polyphenols in plant-based foods [J]. Food Science, 2024, 45(14): 319–327.

[25] HAN X, LU HC, WANG Y, *et al*. Region, vintage, and grape maturity co-shaped the ionomic signatures of the cabernet sauvignon wines [J]. Food Research International, 2023, 163: 112165.

[26] JU Y, FRANCOISE U, LI D, *et al*. Effect of light-selective sunshade net on the quality and aromatic characteristics of Cabernet Sauvignon grapes and wine: Exploratory experiment on strong solar irradiance in northwestern China [J]. Food Chemistry: X, 2023, 17: 100510.

[27] TU Q, LIU S, LI Y, *et al*. The effects of regions and the wine aging periods on the condensed tannin profiles and the astringency perceptions of Cabernet Sauvignon wines [J]. Food Chemistry: X, 2022, 15: 100409.

[28] CHEN X, WANG Z, LI Y, *et al*. Survey of the phenolic content and antioxidant properties of wines from five regions of China according to variety and vintage [J]. LWT, 2022, 169: 114004.

[29] CHEN X, LI H, ZHANG B, *et al*. The synergistic and antagonistic antioxidant interactions of dietary phytochemical combinations [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2022, 62(20): 5658–5677.

[30] 丁世飞, 孙玉婷, 梁志贞, 等. 弱监督场景下的支持向量机算法综述[J]. 计算机学报, 2024, 47(5): 987–1009.
DING SF, SUN YT, LIANG ZZ, *et al*. Survey on support vector machine algorithms in weakly supervised scenarios [J]. Chinese Journal of Computers, 2024, 47(5): 987–1009.

[31] YANG J, MARTINSON TE, LIU RH. Phytochemical profiles and antioxidant activities of wine grapes [J]. Food Chemistry, 2009, 116(1): 332–339.

[32] CORTELL JM, KENNEDY JA. Effect of shading on accumulation of flavonoid compounds in (*Vitis vinifera* L.) pinot noir fruit and extraction in a model system [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2006, 54(22): 8510–8520.

(责任编辑: 韩晓红 安香玉)