不同花色睡莲品种花瓣中黄酮和酚类物质含量及抗氧化能力分析

令狐克兰[1]，龚健鑫[1]，赵霞[1]，吴文滔[1]，王恩博[1]，赵莹[1]，宋希强[1]，王健[1]，温旭丁[2*]

（1.海南省热带特色花木资源生物学重点实验室，海南大学热带农林学院,海南海口 570228）

（2.海南省林业集团有限公司，海南海口 570228）

摘要：为了筛选高黄酮含量且抗氧化性能优良的睡莲品种，为睡莲高附加值产品研发提供数据支持，该文对 10 个睡莲品种花瓣的花色、总黄酮与总酚含量、含水量、pH 值、提取物抗氧化活性等进行综合分析。结果表明，黄金国睡莲花瓣中总黄酮含量最高，为 20.40 mg g^{-1}，紫乔伊睡莲花瓣中总酚含量最高，为 31.22 mg g^{-1}，且各品种总酚含量均显著高于总黄酮含量。总黄酮含量与亮度 L^*（R=0.652）和色相 b^*（R=0.645）表现出显著正相关（P<0.05），与色相 a^*（R=-0.733）表现出显著负相关性（P<0.05），而总酚含量与花色参数无显著相关性。DPPH 法中，红色闪耀睡莲花瓣黄酮提取液清除能力最强，EC_{50}为 2.51 μg·mL^{-1}；其次是多丽丝，EC_{50}为 4.51 μg·mL^{-1}，清除能力强于 Vc，其余品种花瓣黄酮提取液清除能力都弱于 Vc；ABTS 法中，紫贝壳睡莲花瓣黄酮提取液清除能力最强，EC_{50}为 24.31 μg·mL^{-1}，并且在铁离子还原/抗氧化能力（Ferric Reducing Antioxidant Power，FRAP）法中也表现较好，但各品种睡莲清除能力均弱于 Vc。综合分析表明，睡莲花瓣普遍富含黄酮类与酚类物质并展现出良好的抗氧化活性，尤其红色闪耀和多丽丝在 DPPH 自由基清除方面表现突出，具有作为优质天然抗氧化剂开发的巨大潜力；该研究结果为睡莲资源在保健品及化妆品等高附加值产品中的定向利用提供了重要的理论依据和数据支撑。

关键词：睡莲；花色；总黄酮；总酚；抗氧化活性

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.6.0902

Analysis of Flavonoid and Phenolic Content and Antioxidant Capacity in Petals of Different Varieties of Water Lilies

LINGHU Kelan[1], GONG Jianxin[1], ZHAO Xia[1], WU Wentao[1], WANG Enbo[1], ZHAO Ying[1], SONG Xiqiang[1], WANG Jian[1], WEN Xuding[2*]

(1.Hainan Biological Key Laboratory for Germplasm Resources of Tropical Special Ornamental Plants/College of Tropical Agriculture and Forestry, Hainan University, Haikou 570228, China) (2.Hainan Forestry Industry Group Co., LTD, Haikou 570228, China)

Abstract: In order to screen out the water lily varieties with high flavonoid content and excellent antioxidant performance, and provide data support for the research and development of high value-added products of water lilies**, t**he flower color, total flavonoids and total phenols content, water content, pH value and antioxidant activity of the extracts of 10 water lily varieties ware analyzed comprehensively. The petals of the *Nymphaea ‘Eldorado’* was contained the most total flavonoids, 20.40 mg g^{-1}; the petals of the *Nymphaea ‘Purple Joy’* contained the most total phenols, 31.22 mg g^{-1}. The total phenol content of each variety was significantly higher than that of total flavonoids. Significant positive correlations were observed between total flavonoids content and brightness L^* (R=0.652) and color phase b* (R=0.645) (P<0.05), whereas a significant negative correlation was identified with color phase a^* (R=-0.733) (P<0.05). The total phenol content showed no significant correlation with the flower color parameters. In the DPPH method, the *Nymphaea ‘Red Flare’* petals flavonoid extract was shown the best scavenging ability, with an EC_{50} of 2.51 μg·mL^{-1}; the *Nymphaea ‘Doris Holt’* was shown better performance, with an EC_{50} of 4.51 μg·mL^{-1}, and the scavenging ability was stronger than that of Vc, while the scavenging ability of the remaining species' petal flavonoid extracts was weaker than that of Vc. In the ABTS method, the scavenging ability of the *Nymphaea ‘Zi Beike’* petals flavonoid extract showed the best performance,

收稿日期：2025-06-29；修回日期：2025-12-29；接受日期：2026-01-05

基金项目：国家自然科学基金项目（32160400）；海南省科技厅重点研发基金项目（ZDYF2022XDNY179）；海南省林业局基金项目（HD-KYH-2023150）

作者简介：令狐克兰（2000-），女，硕士研究生，研究方向：园林植物资源与应用，E-mail：3168659511@qq.com

通讯作者：温旭丁（1987-），男，硕士，高级工程师，研究方向：林业，E-mail：wenxuding@qq.com

with EC_{50} of 24.31 μg·mL^{-1}, and it also showed especially outstanding performance in the Ferric Reducing Antioxidant Power (FRAP) method, but the scavenging ability of each variety of waterlily was weaker than that of Vc. In the comprehensive analysis, the water lily petals are generally rich in flavonoids and phenols and exhibit excellent antioxidant activity. Notably, the *Nymphaea 'Red Flare'* and *Nymphaea 'Doris Holt'* stand out in DPPH free radical scavenging, showing great potential as high-quality natural antioxidants. These findings provide crucial theoretical foundations and data support for targeted utilization of water lily resources in high-value-added products such as health supplements and cosmetics.

Keywords: water lily; flower color; total flavonoids; total phenols; antioxidant activity

睡莲（*Nymphaea* spp.）是睡莲科（*Nymphaeaceae*）睡莲属（*Nymphaea*）的一种多年生水生植物，主要分布于除南极洲以外的陆地[1]。根据其附属物形态差异，可分为广热带、古热带、澳洲、新热带和广温带五个亚属[2]。目前在我国分布的原生种有五个[3]。睡莲的应用范围广泛，可装饰园林景观，亦能较好地治理富营养化水体。此外，睡莲花朵可用于泡茶，一些品种叶柄、花柄或根茎可食用[4]。范杨杨等[5]研究表明，粉睡莲和蓝睡莲花瓣的氨基酸含量较高，具有一定的食用价值。从睡莲中提取的精油展现出良好的抗氧化和抑菌能力，陈彦甫等[6]的研究结果表明，热带睡莲精油具有显著的抑菌效果，因此睡莲也被应用于抑菌等日化产品的制作。

睡莲提取物中含有酚酸和黄酮等化合物，展现出抗氧化、增强免疫力等多种功效[7]，因此备受关注。Semaming 等[8]从睡莲属植物中分离出 74 种黄酮类和酚酸类化合物，使得睡莲属植物被视为天然抗氧化剂的重要来源。Yin 等[9]的研究发现，睡莲花茶中富含黄酮类化合物，其浓度与抗氧化活性呈现量效关系。吴文滔等[10]对蓝鸟睡莲各部位的总黄酮和总酚含量进行了研究，结果表明这两者在花瓣中的含量较高，花瓣和花萼对自由基的清除能力显著。在医学领域，黄酮化合物的应用与研究也日益受到重视，黄酮化合物不仅具有抗病毒的功效，对预防和治疗口腔疾病也表现出良好的效果。此外，睡莲提取物在糖尿病治疗中也显示出应用潜力。Huang 等[11]的动物实验研究表明，延药睡莲提取物对动物肠内的葡萄糖苷酶具有明显的抑制作用，能够有效降低糖尿病患者的高血糖水平。Ishrat 等[12]研究发现睡莲提取物有助于提高胰岛素敏感性和降低脂肪的积累，展现较好地抗糖尿病特性。

尽管初步研究表明，睡莲中黄酮类及多酚类物质的绝对含量可能低于牡丹等陆生观赏植物，且其体外抗氧化活性与 Vc 接近、显著低于虾青素等强效抗氧化剂[13]，但选择睡莲作为抗氧化物质分离的对象仍具有重要研究价值。首先，睡莲生长于水生环境，其次生代谢产物结构与陆生植物可能存在显著差异，这为发掘新型抗氧化化合物提供了可能性；其次，睡莲在传统应用中的功效提示其可能通过多种活性成分协同发挥作用，而非仅依赖于某类高含量成分；更重要的是，目前对睡莲活性成分的系统研究仍较为有限，其资源开发利用潜力尚未充分挖掘。

本研究旨在通过系统分析 10 个热带睡莲品种的花色表型与内在活性成分，不仅为睡莲种质资源的综合评价提供基础数据，更期望达成以下目标：其一，阐明睡莲花色与黄酮、多酚等功能性成分积累的关联，为通过直观花色表型快速筛选高活性品种的育种实践提供理论依据；其二，筛选出抗氧化活性优异（如 DPPH 清除力强）的特定品种，评估其替代合成抗氧化剂（如 BHT）的工业应用潜力，为睡莲资源在功能食品、化妆品等领域的高值化开发提供精准的数据与品种方案。

1 材料和方法

1.1 实验材料

1.1.1 植物材料

海南岛凭借其独特的热带地理优势，蕴藏着丰富的热带睡莲资源，但其高附加值开发潜力尚未被充分挖掘。该研究旨在筛选具有代表性的热带睡莲品种进行高附加值产品开发。花色和花型是最直观的遗传表征，其多样性不仅反映了植物的观赏价值，还揭示了其背后的生化代谢途径差异[15]。因此，该研究最终选定的 10 个品种（隶属于 3 个不同亚属）在花色、花型、生长习性等核心目标性状上展现了最广泛的变异范围，兼具研究的实用性与可行性。具体品种包括：广热带亚属睡莲多丽丝（*Nymphaea 'Doris Holt'*）、黄金国（*Nymphaea 'Eldorado'*）、林夕伍德（*Nymphaea 'Lindsey Woods'*）、紫乔伊（*Nymphaea 'Purple Joy'*）、九品红（*Nymphaea 'hybrid'*）、银河系（*Nymphaea 'Galaxy'*）、岩山日出（*Nymphaea 'Sunrise'*）；古热带亚属睡莲红色闪耀（*Nymphaea 'Red Flare'*）、泰国粉（*Nymphaea 'Jongkolnee'*）、澳洲亚属睡莲紫贝壳（*Nymphaea 'Zi Beike'*）（图 1）。所有实验材料均采自海口市内海南佛渡莲源

生态农业有限公司睡莲基地（110°11′38.39″E，20°02′45.97″N，海拔 78 m）。于 2023 年 7 月初，采集各品种盛花期花朵，取其花瓣置于保鲜袋中，于实验室 4 ℃冰箱保存备用。

图 1 热带睡莲品种花色

Fig.1 Flower color of tropical water lilies

注：A.多丽丝；B.黄金国；C.红色闪耀；D.九品红；E.林夕伍德；F.泰国粉；G.岩山日出；H.银河系；I.紫贝壳；J.紫乔伊。

1.1.2 主要试剂

芦丁标准品、没食子酸标准品、1,1-二苯基-2-苦基肼（1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl radical，DPPH）、2,2'-联氮基双（3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸）[2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid)，ABTS]、40 mmol L^{-1} HCl 溶液、2,4,6-三吡啶基三嗪（2,4,6-tripyridin-2-yl-1,3,5-triazine，TPTZ）、硫酸亚铁（$FeSO_4$ $7H_2O$），北京索莱宝科技有限公司；无水乙醇、硝酸铝、碳酸钠、过硫酸钾、0.3 mol/L 醋酸钠缓冲液，西陇科学股份有限公司；L-抗血坏酸（Vc）、氯化铁（$FeCl_3$ $6H_2O$），上海麦克林生化科技股份有限公司；Folin-phenol 溶液，上海源叶生物科技有限公司。

1.1.3 主要仪器

SFE 500 超临界 CO_2 流体萃取仪，美国 ASI 公司；LS173B 色差仪，深圳市林上科技有限公司；PHS-3EpH 计，上海仪电科学仪器股份有限公司；XMTD-8222 电热恒温干燥箱，甘易仪器设备（上海）有限公司；DE-200 g 万能粉碎机，浙江红景天工贸有限公司；UV-5500 紫外可见分光光度计，上海元析仪器有限公司；英国皇家园艺协会（RHS）植物标准比色卡，第六版（2015 年；2019 年重印），英国皇家园艺学会出版。

1.2 方法

1.2.1 黄酮提取物的制备

参考吴文滔等[10]的方法，略作修改。将 10 种新鲜睡莲花瓣分别置于烘箱中 60 ℃烘干至恒重，用粉碎机将脱水花瓣打碎，过筛剔除较大颗粒后，称量 20.00 g 各品种睡莲花瓣粉末。向样品粉末中加入约 10 mL 无水乙醇，搅拌使其充分湿润，静置 5 min。随后将样品装入萃取釜，置于 CO_2 超临界萃取仪中，在压力为 100 MPa，温度为 35 ℃，CO_2 流速为 5 L·min^{-1}的条件下进行萃取，直至收集瓶中不再有透明液体流出。所得睡莲黄酮提取物用棕色玻璃瓶密封，保存于 4 ℃冰箱中备用。

1.2.2 花色测定

参考李浙浙等[16]的方法，花色测定采用英国皇家园艺比色卡（RHS Colour Chart）目视比色法与柯尼卡美能达 CR-400 色差仪定量检测相结合的方法。每个品种选取盛花期花朵，沿内、中、外三轮花瓣分别标记 3 个标准检测点（距花瓣基部 1/3 处、中心点及距尖端 1/3 处）。使用色差仪时，测量前以标准白板校准。每检测点连续读取 3 次亮度 L^*、色相 a^*和色相 b^*，最后根据公式（1）和（2）获得彩度 C^*和色相角 $h(°)$。每品种重复测定 3 株独立个体，数据取三轮花瓣各检测点的算术平均值。

$$C^* = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2} \quad (1)$$

$$h = \arctan(b^* / a^*) \quad (2)$$

式中:

C^*——彩度;

a^*——色相;

b^*——色相;

h——色相角，°。

1.2.3 pH 值测定

参考 Zhao 等[17]方法，取 0.10 g 新鲜花瓣放入 2 mL 试管，再加入 2 颗小钢珠，用去离子水定容至 2 mL。将试管放入震荡机用 50 Hz 频率震荡 2 min 后，在温度为 4 ℃，速度为 12 000 r·min^{-1} 的条件下离心 5 min，随后吸取约 1 mL 左右上层清液，移入 5 mL 离心管中，加入去离子水定容到 4 mL，使用 pH 计测定花瓣的 pH 值。每个品种进行 3 组重复实验。

1.2.4 含水量测定

采摘新鲜的睡莲花瓣，每种睡莲新鲜花瓣约 5 g，称量后将其放入干燥箱烘干 48 h 至恒重后，再次称量，计算花瓣的含水量。每个品种进行 3 组重复实验。

1.2.5 总黄酮含量的测定

根据关奎奎等[18]测量总黄酮含量的方法，略作修改。精确称取 10.00 mg 芦丁标准品，用无水乙醇溶解并定容至 5 mL，配制成 2.0 mg·mL^{-1} 的储备液。随后使用无水乙醇将储备液逐级稀释，配制质量浓度分别为 0.20、0.40、0.60、0.80、0.85 mg·mL^{-1} 的芦丁标准溶液。精密吸取各浓度标准溶液 1.0 mL 于 10 mL 离心管中，依次加入 150 μL 质量分数 5%的亚硝酸钠溶液，振荡混匀后避光静置 5 min；再加入 150 μL 质量分数 10%的硝酸铝溶液，混匀后避光静置 5 min；最后加入 2.0 mL 质量分数 4%的氢氧化钠溶液，并用无水乙醇定容至 10 mL 刻度，混匀后避光反应 20 min。以去离子水作为参比，于 510 nm 波长处测定各反应体系的吸光度值。以芦丁标准溶液浓度 C 为横坐标，相应吸光度值 A 为纵坐标，绘制标准曲线，得到回归方程：A=3.589 3C-0.031 2（R^2=0.989 9）。

取适量睡莲花瓣黄酮提取液，用无水乙醇稀释至适当浓度（确保其吸光度值落在标准曲线线性范围内），吸取 1.0 mL 稀释液，同上操作，测定吸光度值并代入标准曲线回归方程计算提取液中黄酮类化合物的质量浓度，并按公式（3）计算样品中的总黄酮含量。每个品种进行 3 组重复实验。

$$E = \frac{m}{M} \times 100\% = \frac{c \times v}{M} \times 100\% \quad (3)$$

式中:

E——萃取率，%;

m——提取液中黄酮类化合物的质量，mg;

c——提取液中黄酮类化合物的质量浓度，mg·mL^{-1};

v——提取液的体积或定容后的体积，mL;

M——干粉的质量，mg。

1.2.6 总酚含量的测定

根据唐才林等[19]测量总酚含量的方法，略作修改。首先取 0.10 g 没食子酸标准品于 50 mL 容量瓶中，加入去离子水使其溶解并达到容量瓶刻度线，并将制备的标准液按质量浓度配制成 0.10、0.20、0.40、0.60、0.80、1.00 mg·mL^{-1} 6 个浓度梯度。之后，向 10 mL 离心管分别加入各梯度溶液 0.1 mL，且向其中加入 5 mL 去离子水和 0.5 mL 的 Folin-phenol 溶液，后立即将离心管放于高速振荡器上晃动离心管，避光 5 min。待时间结束后，称取 10 g 碳酸钠固体溶于 40 mL 去离子水中，取其溶液 1.5 mL 置于离心管中，加去离子水至刻度线。随后立即用避光锡纸将其包裹放于 37 ℃水浴锅中反应 30 min。最后，用分光光度计测定各混合液在 765 nm 波长的吸光值并记录数据，根据上述数据计算以没食子酸当量（Gallic Acid Equivalent，GAE）的标准曲线，以没食子酸质量浓度 C

为横坐标与吸光度 A 为纵坐标，制作标准曲线方程：A=1.145C+0.043 4（R^2=0.988 6）。不同品种睡莲黄酮提取液根据获得量，取一定的量置于 10 mL 离心管内，加无水乙醇至刻度线。按组取一定量稀释的样品溶液，依照上述步骤，记录吸光值。每个品种进行 3 组重复实验。

$$Y=\frac{C\times v}{M} \tag{4}$$

式中：

Y——总酚含量，mg g^{-1};

C——总酚质量浓度，mg mL^{-1};

v——定容后体积，mL;

M——睡莲干粉的质量，g。

1.2.7 DPPH 自由基清除测定

根据傅贤明等[20]的方法，略作修改。首先制备浓度为 0.1 mmol L^{-1} DPPH 的无水乙醇溶液，避光保存。将总黄酮提取液用无水乙醇根据预实验稀释成 5 个不同的质量浓度，所有品种的提取液均稀释至 0.001~15 mg mL^{-1} 范围内进行抗氧化活性测定，具体浓度根据预实验结果调整，以确保测定落在标准曲线线性范围内（具体浓度范围参见图 3 a）。然后取 1.5 mL 稀释液与 2.5 mL DPPH 溶液移入 5 mL 离心管中，避光放置 20 min。以无水乙醇作为空白组，以 Vc 为对照组，浓度范围为 0.001~0.02 mg mL^{-1}，在 517 nm 波长下测定各组溶液的吸光值。此外，将 1.5 mL 稀释液和 2.5 mL 无水乙醇加入 5 mL 离心管中，按照上述步骤进行实验。对比各品种对 DPPH 自由基清除能力。每个品种进行 3 组重复实验。

$$Cr_{DPPH}=(1-\frac{A-A_1}{A_0})\times 100\% \tag{5}$$

式中：

Cr_{DPPH}——DPPH 清除率，%;

A——样品溶液与 DPPH 混合液吸光值;

A_1——样品溶液与无水乙醇混合液吸光值;

A_0——蒸馏水与 DPPH 混合液吸光值。

1.2.8 ABTS$^+$自由基清除测定

根据任倩倩等[21]的方法，略作修改。首先将等体积的 2.5 mol L^{-1} 过硫酸钾溶液与 7 mol L^{-1} ABTS 溶液混合，锡纸密封避光反应 12~16 h。之后将 ABTS 备用液与无水乙醇按 1:49（V/V）比例混合，最后用分光光度计在 734 nm 波长下测定溶液吸光值，应为 0.7（以无水乙醇作空白）。将总黄酮提取液用无水乙醇根据预实验稀释成 5 个不同的质量浓度，所有品种的提取液均稀释至 0.01~10 mg mL^{-1} 范围内进行抗氧化活性测定，具体浓度根据预实验结果调整，以确保测定落在标准曲线线性范围内（具体浓度范围参见图 3 b）。向 5 mL 离心管中加入 1 mL 稀释液和 3 mL ABTS 备用液，立即高速振荡混匀，避光放置 6 min。在 734 nm 波长下测定混合液的吸光值（无水乙醇作空白），以 Vc 作为对照组，浓度范围为 0.001~0.02 mg mL^{-1}，对比各品种对 ABTS$^+$自由基清除能力。每组进行 3 次重复实验。

$$Cr_{ABTS}=\frac{A_1-A_2}{A_1}\times 100\% \tag{6}$$

式中：

Cr_{ABTS}——ABTS 清除率，%;

A_1——样品溶液与 ABTS 混合液吸光值;

A_2——无水乙醇与 ABTS 混合液吸光值。

1.2.9 铁离子还原能力测定

根据晏俊玲等[22]的方法，略作修改。FRAP 工作液由 10 mmol L^{-1} TPTZ（40 mmol L^{-1} HCl 溶解）、0.3 mol L^{-1} 醋酸钠缓冲液和 20 mmol L^{-1} $FeCl_3$溶液按 1:10:1（$V/V/V$）现用现配混合而成。标准曲线绘制：将 100 mmol L^{-1} $FeSO_4$

溶液稀释为0.001至0.25 mmol L^{-1}浓度梯度（共8个点），取2 mL各浓度$FeSO_4$溶液与2 mL现配工作液混合，测定593 nm波长下的吸光值（空白组为2 mL乙醇与2 mL工作液混合液），每组进行3次重复实验，根据吸光值绘制标准曲线。样品测定：将总黄酮提取液用无水乙醇根据预实验稀释成6个不同的质量浓度，所有品种的提取液均稀释至0.1~10 mg mL^{-1}范围内进行抗氧化活性测定，具体浓度根据预实验结果调整，以确保测定落在标准曲线线性范围内（具体浓度范围参见图3c）。取2 mL各稀释液与2 mL新配工作液混合，立即测定593 nm波长下的吸光值（空白同上），并计算睡莲黄酮的FRAP值确定其铁离子还原能力，每组重复进行3次实验。

1.2.10 数据分析

该研究中的数据均以“mean±SD”（均值±标准差）表示，以反映数据的离散性和可靠性，所有数据分析均使用了SPSS统计软件进行，采用了单因素方差分析（ANOVA）来比较不同组间的差异，显著性水平设定为$P<0.05$，确保实验结果具有统计学意义。相关性分析采用SPSS 26.0软件完成，并使用Origin 2021进行曲线拟合与图表绘制。

2 结果与讨论

2.1 结果与分析

2.1.1 睡莲花瓣黄酮和总酚含量

表1 各品种总黄酮与总酚含量

Table 1 Total flavonoids and total phenolic content of each variety

品种	总黄酮含量/(mg GAE/g)	总酚含量/(mg GAE/g)
多丽丝（*Nymphaea 'Doris Holt'*）	11.57±0.24^{d}	12.27±0.18^{f}
黄金国（*Nymphaea 'Eldorado'*）	20.40±0.13^{a}	23.40±1.30^{c}
红色闪耀（*Nymphaea 'Red Flare'*）	6.35±0.056^{f}	18.73±0.78^{e}
九品红（*Nymphaea 'hybrid'*）	13.88±0.42^{c}	28.29±2.93^{b}
林夕伍德（*Nymphaea 'Lindsey Woods'*）	9.58±0.15^{e}	18.22±0.064^{e}
泰国粉（*Nymphaea 'Jongkolnee'*）	5.02±0.0052^{g}	7.77±0.019^{g}
银河系（*Nymphaea 'Galaxy'*）	4.85±0.093^{g}	5.21±0.12^{g}
岩山日出（*Nymphaea 'Sunrise'*）	17.22±0.70^{b}	19.50±0.95^{de}
紫贝壳（*Nymphaea 'Zi Beike'*）	13.17±0.26^{c}	21.73±2.48^{cd}
紫乔伊（*Nymphaea 'Purple Joy'*）	17.51±0.30^{b}	31.22±8.11^{a}

注：不同字母表示在0.05水平上显著差异。

如表1所示，为10个睡莲品种花瓣中的总黄酮与总酚含量的具体数据，不同品种间总黄酮与总酚含量差异显著，进一步验证了不同品种睡莲的抗氧化性能的差异。这10种睡莲花瓣提取液的总黄酮含量范围为4.85~20.40 mg g^{-1}。其中黄金国的花瓣总黄酮含量最高，为20.40 mg g^{-1}。相对较高的依次为紫乔伊、岩山日出、九品红，分别为17.51、17.22、13.88 mg g^{-1}。然后为紫贝壳、多丽丝、林夕伍德，分别为13.17、11.57、9.58 mg g^{-1}。相对较低的为红色闪耀、泰国粉，分别为6.35、5.02 mg g^{-1}。银河系的花瓣黄酮含量最低，为4.85 mg g^{-1}。黄金国花瓣的总黄酮含量是银河系花瓣总黄酮含量的4.21倍（表1）。

这10种睡莲花瓣提取液的总酚含量范围为5.21~31.22 mg g^{-1}。其中紫乔伊花瓣中的总酚含量最高，为31.22 mg g^{-1}。相对较高的依次为九品红、黄金国、紫贝壳，分别为28.29、23.40、21.73 mg g^{-1}。然后为岩山日出、红色闪耀、林夕伍德，分别为19.50、18.73、18.22 mg g^{-1}。相对较低的为多丽丝、泰国粉，分别为12.27、7.77 mg g^{-1}。银河系花瓣的总酚含量较低，为5.21 mg g^{-1}。紫乔伊花瓣的总酚含量是银河系花瓣总酚含量的5.99倍（表1）。

这些品种间总黄酮与总酚含量的显著差异（$P<0.05$），且二者呈显著正相关（R=0.756，图2），表明其合成代谢可能存在协同调控。然而，与牡丹等陆生花卉相比[13]，本研究中睡莲花瓣的总黄酮含量（4.85~20.40 mg g^{-1}）虽与之相近，但总酚含量（5.21~31.22 mg g^{-1}）却显著偏低。这种差异可能主要源于物种遗传背景、水生与陆生环境的不同，以及提取方法等对黄酮释放效率的影响。该结果提示，睡莲在总酚积累上或有其特异性，但其黄酮成分的抗氧化潜力不容忽视。同时，各个品种的睡莲花瓣所含有的总黄酮与总酚含量差值显著相关，这可能是由于总

黄酮物质属于总酚物质的一类，导致总黄酮含量始终少于总酚含量，且二者都在花瓣部位合成，故二者的含量具有一定相关性[23]。但因总黄酮（以芦丁当量计）和总酚（以没食子酸当量计）是两种不同的定量方法，其结果不宜直接比较绝对值，但可反映相对趋势。进一步来看总酚并非仅由黄酮类物质构成，还包含多种非黄酮类酚酸及其衍生物（如没食子酸、绿原酸、阿魏酸等），这些酚酸类化合物在植物花瓣中广泛存在，与黄酮类共同决定了总酚含量水平[24]。因此，不同品种间总酚与总黄酮的差值变化，既反映了黄酮在总酚中的相对占比，也体现了酚酸等其他酚类与黄酮的协同积累。这共同导致了该差值与总酚、总黄酮的绝对含量均呈现出显著相关性。

2.1.2 睡莲花瓣黄酮与花色、含水量、pH 值相关分析

表 2 各品种花色数量化指标

Table 2 Date of the petals color of each variety

编号	品种	L^*	a^*	b^*	C^*	h	pH 值	含水量
A	多丽丝	40.43	17.49	-28.97	33.84	-1.03	6.00	91.29%
B	黄金国	88.32	-6.66	30.22	30.94	-1.35	5.53	90.40%
C	红色闪耀	42.21	55.44	-6.58	55.83	-0.12	4.77	91.02%
D	九品红	58.85	32.04	-17.79	36.64	-0.51	5.36	90.11%
E	林夕伍德	60.07	20.06	-22.18	29.91	-0.84	5.53	90.35%
F	泰国粉	78.88	21.39	-4.97	21.96	-0.23	5.42	91.70%
G	银河系	37.13	29.01	-30.03	41.75	-0.61	5.38	90.47%
H	岩山日出	75.09	12.64	8.84	15.43	-0.80	5.12	88.85%
I	紫贝壳	66.15	12.77	-19.45	23.27	-0.99	5.28	90.82%
J	紫乔伊	87.29	3.48	1.06	3.64	0.29	5.37	89.88%

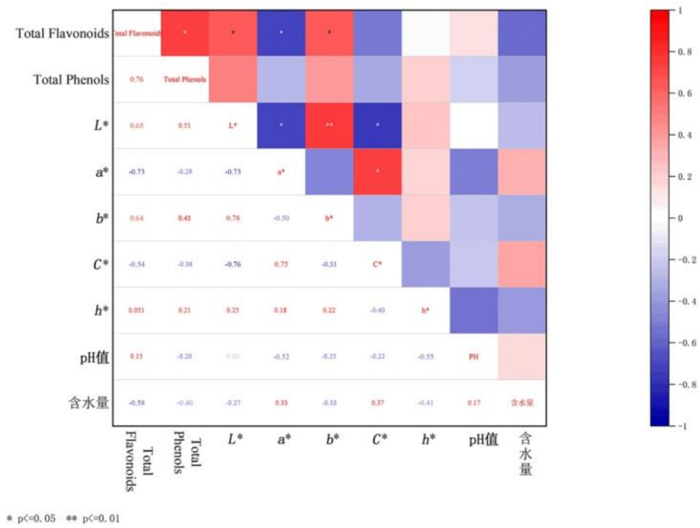


图 2 睡莲总黄酮、总酚含量与花色值、pH 值、含水量之间的相关性

Fig.2 Correlation between total flavonoids, total polyphenols and flower color value, pH value, water content of water lily

注：$^*P<=0.05$、$^{**}P<=0.01$。

表 2 与图 2 展示了不同睡莲花色值、含水量和 pH 值的数量化指标以及与总黄酮、总酚含量之间的相关性。10 种睡莲的花瓣比色卡结果如下，多丽丝为 Strong Purplish A；黄金国为 Brilliant Greenish Yellow A；红色闪耀为 Deep Purplish Red A；九品红为 Vivid Reddish Purple B；林夕伍德为 Strong Purple B；泰国粉为 Light purple B；银河系为 Deep Purple B；岩山日出为 Vivid Reddish Purple A；紫贝壳为 Light Purple C；紫乔伊为 Light Violet A。10 种睡莲的花色色相 a^*在-6.66~55.44 之间，颜色因品种而异；色相 b^*介于-30.03~30.22 之间；亮度 L^*值在 37.13~87.29 之间；彩度 C^*在 3.64~41.75 之间；色相角 h 在-1.35~0.29 之间（表 2）。

对睡莲总黄酮含量与花色值进行相关性分析，结果表明，睡莲总黄酮含量与亮度 L^*相关性 R=0.652 和色相 b^*相关性为 R=0.645，表现为正相关；而与色相 a^*相关性为 R=-0.733，表现出负相关，故睡莲花瓣黄酮物质的组成、多少和结构可能会影响花色的亮度 L^*、色相 a^*和色相 b^*，从而影响花瓣的花色性状。同时又因为亮度 L^*与

色相 a^*、彩度 C^*表现出显著负相关，相关性分别为 R=-0.732、R=-0.763；亮度 L^*与色相 b^*表现出显著正相关，相关性为 R=0.776；色相 a^*与彩度 C^*表现出显著正相关，相关性为 R=0.747，故存在亮度 L^*、色相 a^*、色相 b^*与彩度 C^*的互相影响，间接导致花色性状变化（图 2）。鉴于黄酮类化合物的显色特性[25]，其含量与亮度 L^*的正相关，可解释为它发挥了显色与共色因子的作用；同时，花瓣色彩也受 pH 和含水量的调节，黄酮在不同 pH 条件下的离子化状态会影响其光吸收特性，导致颜色表现差异[26]，而含水量则影响色素的溶解和扩散，例如在意大利黑麦草青贮的研究中，高含水量虽然可能导致生物质损失，但也促进了色素的释放和分布[27]。因此睡莲黄酮与花色参数的显著相关性，既反映了其在显色机制中的直接作用，也体现了黄酮与其他色素（如花青素）、理化因子之间的复杂相互作用。

对 10 种睡莲花瓣含水量（质量分数）进行测定，结果表明，10 种睡莲的含水量的范围在 88.85%~91.70%，其中泰国粉的含水量最高为 91.70%，岩山日出的含水量最低为 88.85%，由此可看出各品种花瓣含水量无明显差异（表 2）。对其进行相关性分析，睡莲花瓣的含水量与总黄酮含量、pH 值、花色值均无明显的相关性，各品种睡莲的最大含水量与最小含水量仅存在 2.85%的偏差，因睡莲为水生植物，本身生活于水中，故含水量在花色形成时可忽略，但可从水中所含金属离子等物质与睡莲花色、黄酮含量等内容分析，进行深入研究（图 2）。

对 10 种睡莲花瓣的 pH 值进行测定，结果表明，10 种睡莲的 pH 值的范围在 4.77~6.00，每种睡莲的 pH 值都为酸性，其中红色闪耀的 pH 值最高为 4.77，多丽丝的 pH 值最低为 6.00（表 2）。对其进行相关性分析，睡莲花瓣的 pH 值与总黄酮含量均无明显的相关性，故可见睡莲体内的酸性环境并未对睡莲花瓣黄酮相关物质合成有显著的影响（图 2）。

整体来说，睡莲花瓣的花色与总黄酮含量之间存在相关性，尤其是亮度 L^*和色相 b^*与总黄酮含量呈正相关，说明花瓣的黄颜色或浅色与黄酮含量较高的品种相关联，尽管含水量在不同品种中有所不同，但它与总黄酮含量的关系较弱，可能表明水分含量对黄酮积累的影响较小。

2.1.3 睡莲黄酮总抗氧化能力

表 3 为不同睡莲品种提取物自由基清除的 EC_{50} 值，图 3 和图 4 展示了不同睡莲品种黄酮提取液的 DPPH、$ABTS^+$自由基清除能力与铁离子还原能力以及总黄酮、总酚含量与抗氧化活性之间的相关性。

以消除 DPPH 自由基的 EC_{50} 值对各品种睡莲排序可得：红色闪耀<多丽丝<泰国粉<紫贝壳<林夕伍德<黄金国<紫乔伊<九品红<岩山日出<银河系。EC_{50} 最高的品种为银河系，为 7 496.71 μg mL^{-1}；EC_{50} 最低的品种为红色闪耀，为 2.51 μg mL^{-1}；Vc 的 EC_{50} 为 4.85 μg mL^{-1}；多丽丝的 EC_{50} 为 4.51 μg mL^{-1}；泰国粉的 EC_{50} 为 5.01 μg mL^{-1}。比较 EC_{50} 可知，红色闪耀的 DPPH 自由基清除能力明显强于 Vc，多丽丝略强于 Vc，泰国粉略低于 Vc。Vc 在 20 μg mL^{-1} 时清除率基本稳定，其余品种睡莲的黄酮提取液质量浓度均超过 20 μg mL^{-1} 才能使 DPPH 自由基清除达到稳定，剩余品种睡莲黄酮提取液清除能力略低于 Vc（表 3）。由结果可知，每种睡莲花瓣黄酮提取液均具备一定的抗氧化能力，正因为有这种性质才能在一定程度上清除各种氧化离子或者自由基，且在实验设定的浓度梯度内，睡莲黄酮提取物的抗氧化能力与其质量浓度呈现明显的量效关系，甚至完全清除氧化离子或自由基（图 3 a）。

根据表 3，对消除 $ABTS^+$自由基的 EC_{50} 值对各品种睡莲排序可得：紫贝壳<红色闪耀、多丽丝、泰国粉<黄金国<九品红<林夕伍德<紫乔伊<岩山日出<银河系。EC_{50} 最高的品种为银河系，为 4 209.31 μg mL^{-1}；EC_{50} 最低的品种为紫贝壳，为 24.31 μg mL^{-1}。Vc 在 10 μg mL^{-1} 时清除率基本稳定，而各品种睡莲的黄酮提取液质量浓度均超过 10 μg mL^{-1} 才能使 ABTS+自由基清除达到稳定，故各品种睡莲花瓣黄酮提取液清除能力低于 Vc。睡莲黄酮提取物对 $ABTS^+$自由基的清除率随提取物质量浓度的增加而升高，表现出量效关系，这主要是由于不同品种的睡莲花瓣控制合成的黄酮物质的种类与含量存在基因型差异[28]，故对 $ABTS^+$自由基清除能力而表现出一定差距（图 3 b）。

对各品种睡莲花瓣黄酮提取液清除 DPPH 自由基的 EC_{50} 值与的 $ABTS^+$自由基的 EC_{50} 进行分析，发现提取液的两项抗氧化能力表现出显著相关（R=0.900）（图 4），这种极强的相关性可能源于两方面：其一，从方法学上看，DPPH 与 $ABTS^+$测定法虽有差异，但核心均涉及抗氧化成分的电子转移能力，对富含多酚黄酮的提取物常得出协同变化的结果；其二，从物质基础上看，它强烈提示不同睡莲品种中普遍含有对两类自由基均有效的关键黄酮组分，或存在稳定的多成分协同抗氧化模式。这种强相关性提示，不同品种睡莲提取物中可能普遍含有某些对 DPPH 和 $ABTS^+$自由基均具有高效清除能力的黄酮类化合物（如某些特定的黄酮苷或黄酮醇），也可能是多种抗氧化成分协同作用的结果。

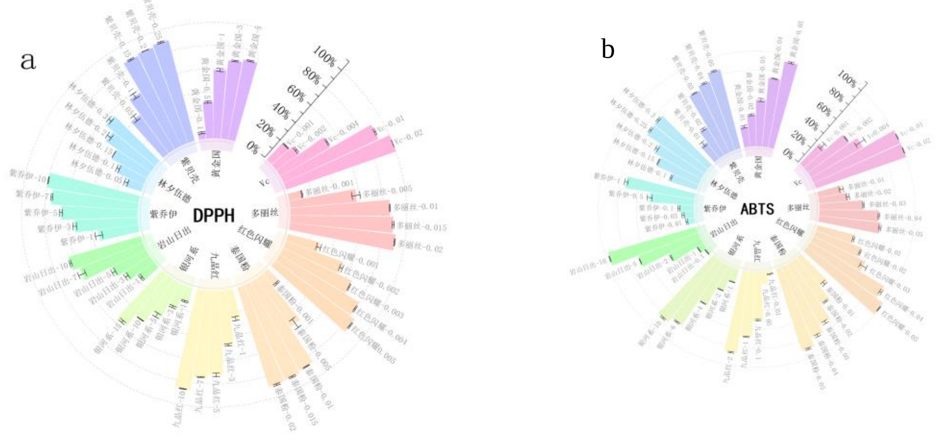
此外，表现出最强的铁离子还原能力的品种为紫贝壳，当其黄酮提取液质量浓度为 0.8 mg mL^{-1} 时对铁离子还原能力就已经显著优于其他品种，这可能与提取液中所含有的黄酮化合物种类以及数量有关（图 3 c）。在实验设定的浓度梯度内，睡莲黄酮提取物对铁离子还原能力与其质量浓度呈现明显的量效关系，即 FRAP 值在一定范围内随着质量浓度的提高而增高。

抗氧化实验结果表明，这 10 种睡莲花瓣黄酮提取液都具备明显的抗氧化效果。对于清除 DPPH 自由基，红色闪耀和多丽丝表现突出，提示其黄酮组分在清除稳定自由基方面具有较高活性，然而需要注意的是，黄酮类化合物在实际应用中的抗氧化稳定性常常受到环境因素的影响。例如黄酮的多酚羟基结构对 pH 和温度具有敏感性，在酸性或碱性条件下容易发生结构变化，从而影响其清除自由基的效果[29]；在高温条件下，部分黄酮还可能发生降解，导致抗氧化能力下降，例如 *Satureja thymbra* 提取物中的黄酮类化合物在 40 ℃ 下存储时，其抗氧化保护因子显著下降，从 73%~81%降至 53%[30]。因此，红色闪耀与多丽丝的抗氧化价值，不能仅凭单一 DPPH 指标判定，其应用潜力取决于在复杂体系中的稳定性及协同作用，同时也受其黄酮特定结构在不同检测机制中活性差异的影响[31]。究其原因，在实际应用中，环境因素及与其他抗氧化剂（如 Vc、VE）的配伍至关重要。在检测层面，DPPH、$ABTS^{+}$、FRAP 三种方法分别评估清除稳定自由基、水相自由基和还原能力，而黄酮 B 环上的取代基差异（如邻二羟基或甲氧基[34]）会使其在不同体系中表现迥异。因此，红色闪耀和多丽丝中可能富含特定类型的黄酮，使其在 DPPH 实验中优势明显，而在 ABTS 和 FRAP 测定中表现较弱。综上，不同睡莲的黄酮物质结构与成分可能有一定区别，进而导致对不同自由基清除能力不同，故应综合考虑睡莲黄酮的抗氧化能力。

表 3 各品种提取物自由基清除的 EC_{50} 值

Table 3 EC_{50} values of radical scavenging in extracts of each cultivar

样品	EC_{50}/(μg·mL^{-1})	
	DPPH 自由基	$ABTS^{+}$ 自由基
Vc	4.85 ±0.08	3.32±1.44
多丽丝	4.51±0.32	29.91±0.42
黄金国	570.52±3.95	54.83±5.61
红色闪耀	2.51±0.19	34.71±1.13
九品红	3 618.71±115.66	85.42±0.47
林夕伍德	158.82±8.85	156.81±14.53
泰国粉	5.01±0.25	28.52±1.31
银河系	7 496.71±223.74	4 209.31±29.26
岩山日出	5 913.45±632.26	3 849.31±77.61
紫贝壳	95.81±14.53	24.31±0.52
紫乔伊	3 562.42±724.63	960.71±76.52



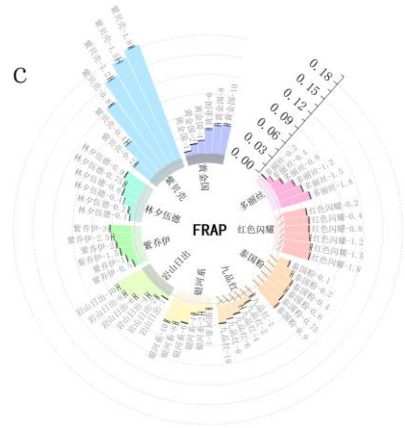


图 3 不同睡莲花瓣黄酮的抗氧化能力

Fig.3 Antioxidant capacity of flavonoids in different water lily petals

注：a 为不同睡莲花瓣黄酮对 DPPH 自由基的清除作用；b 为不同睡莲花瓣黄酮对 $ABTS^+$自由基的清除作用；c 为不同睡莲花瓣黄酮的铁离子还原能力。

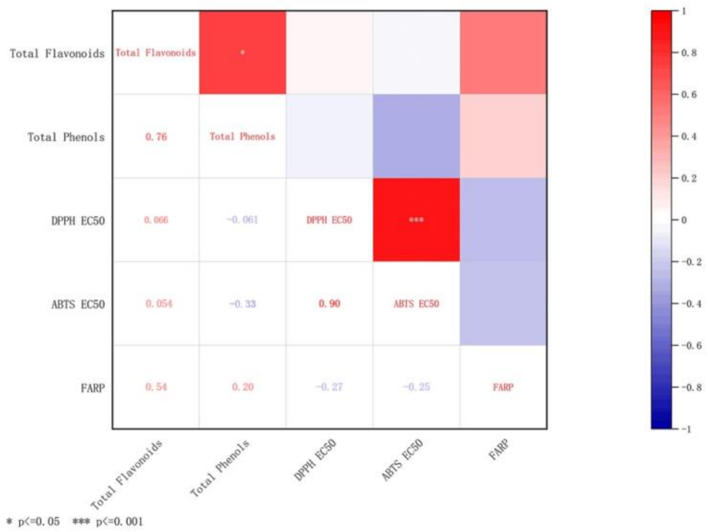


图 4 睡莲总黄酮、总酚含量与抗氧化活性之间的相关性

Fig.4 Correlation between total flavonoids, total polyphenols and antioxidant activity of water lily

注：$^*P<=0.05$、$^{***}P<=0.001$。

2.1.4 基于活性成分与抗氧化能力的多变量统计分析

为综合评价 10 个睡莲品种的综合特性并揭示其内在分组规律，本研究测定了总黄酮含量（TF）、总酚含量（TP）及三种抗氧化活性（DPPH、ABTS、FRAP）共 5 项关键指标，并进行了主成分分析（Principal Component Analysis，PCA）与系统聚类分析（Hierarchical Cluster Analysis，HCA）。

PCA 分析结果（图 5a）显示，前两个主成分（PC1 和 PC2）的累计方差贡献率达 87.5%（PC1 为 67.2%，PC2 为 20.3%），能够充分反映原始数据信息。由载荷图（图 5a 右）可知，PC1 主要由总黄酮、总酚含量及 ABTS 和 FRAP 抗氧化能力驱动，表明这些指标之间存在强烈的协同变化趋势；DPPH 自由基清除能力则在 PC2 上具有较高载荷，显示其与其他抗氧化指标机制的独特性。得分图（图 5a 左）直观展示了品种间的差异与分布：紫贝壳、黄金国和紫乔伊位于 PC1 正半轴，构成高活性成分-抗氧化组，这些品种在黄酮、酚类积累及 ABTS、FRAP 抗氧化能力上表现卓越；红色闪耀与多丽丝独特地分布于 PC2 正半轴，构成 DPPH 强效清除组，凸显了其在特定抗氧化途径上的突出优势；而银河系、岩山日出等品种则集中于原点附近及负半轴，被归为综合低值组。

为进一步验证 PCA 分组，进行了系统聚类分析（HCA）。结果（图 5b）与 PCA 结论高度一致，在欧氏距离为 10 处，所有品种被清晰地划分为三个大类：第一类为红色闪耀和多丽丝，以其卓越的 DPPH 自由基清除能力为特征；第二类为紫贝壳、黄金国、紫乔伊及九品红，为核心的高活性成分品种；其余品种聚为第三类，其各项

指标均相对较低。

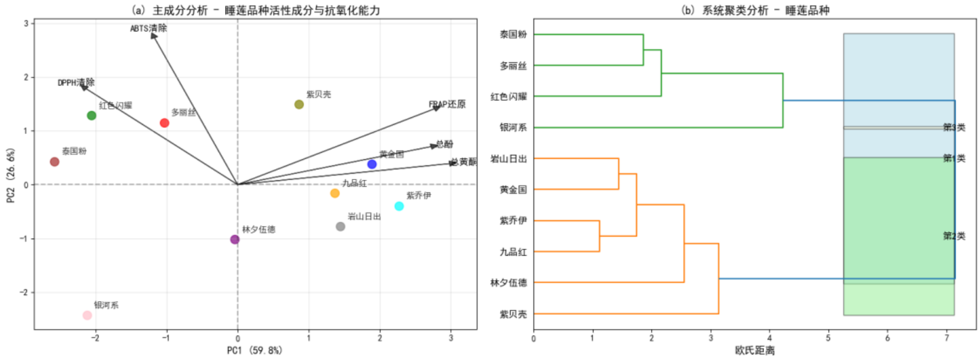


图 5 不同睡莲品种基于活性成分与抗氧化能力的多变量分析

Fig.5 Multivariate analysis of different water lily varieties based on active ingredients and antioxidant capacity

注：（a）主成分分析得分图（左）与载荷图（右）；（b）系统聚类分析树状图。

2.2 讨论

该研究在方法学上注重科学性、可重复性与绿色理念。采用超临界 CO_2萃取技术，在温和条件下高效、选择性地提取目标黄酮，有效保护了热敏成分[35]。样品前处理采用 60 ℃烘干，此标准化方法在确保活性成分保留的同时，兼顾了实验室的普遍条件。花色表征结合了比色卡与色差仪的客观量化，所获色度参数（如色相 a*和色相 b*）为精准解析花色与黄酮含量的相关性奠定了可靠基础[16]。

该研究证实，热带睡莲花色丰富，是探究花色-成分-功能关联的优异材料[36]。该研究发现，其花瓣普遍富含黄酮与酚类物质，且红色闪耀与多丽丝等品种在 DPPH 自由基清除能力上表现卓越，部分指标甚至优于 Vc。这凸显了睡莲作为优质天然抗氧化剂新来源的巨大潜力，为其在保健品、化妆品等领域的高值化开发提供了直接依据。

与牡丹等陆生花卉的比较发现，睡莲的总黄酮含量与之接近，但总酚含量显著较低[13]。这种差异可能源于物种遗传和水生环境以及提取效率等多重因素[37][37]。关键的是，该研究揭示了睡莲花色与黄酮含量显著相关的规律。这可以从共享的苯丙烷代谢途径得到解释：在红/紫色品种中，代谢流主要合成花青素，其共色的黄酮醇（如槲皮素苷）亦协同积累；而在黄色品种（如黄金国）中，颜色则直接源于黄酮（醇）本身。这从生化层面阐明了花色多样性背后的成分积累逻辑。综上，该研究系统评估了睡莲种质资源，筛选出特性鲜明的品种。未来研究可朝两个方向深入：一是结合代谢组学与转录组学，揭示关键品种黄酮合成与调控的分子机制；二是优化提取工艺并探究其与 Vc/VE 等其他天然抗氧化剂的协同效应，以提升产品的稳定性与功效，从而为睡莲资源的定向育种与产业化利用提供坚实的理论与技术支撑。

该研究表明，不同花色睡莲品种花瓣中的总黄酮与总酚含量存在显著差异，这种变异是遗传背景、代谢通路及环境因素共同作用的复杂结果。其可能成因主要涉及以下几个方面：遗传与代谢通路的固有差异是根本原因。黄酮和酚类物质均源自苯丙烷代谢途径，但不同分支通路的代谢流强度在不同基因型中存在固有差异。例如，黄金国、紫乔伊等品种表现出高黄酮积累，可能与其体内查尔酮合成酶（CHS）、查尔酮异构酶（CHI）和黄酮醇合成酶（FLS）等关键酶的高表达活性密切相关，从而驱动了黄酮类物质的高效合成[38]。反之，含量较低的品种（如银河系）可能这些关键酶的活性或其调控基因的表达水平相对较低。次生代谢产物的种类与功能特异性导致了积累差异。黄酮类物质兼具抗氧化与显色的双重功能，其总含量与花色参数显著相关。在红色、紫色系品种（如红色闪耀、九品红）中，代谢流主要导向花青素合成以呈现花色，其共色的黄酮醇（如槲皮素、山奈酚的苷类）也同步积累，因此这些品种常同时拥有较高的总黄酮和总酚含量。而对于黄色系品种（如黄金国），其花色则直接来源于黄酮或黄酮醇本身，其高黄酮含量不仅构成了花色表型，也直接贡献了强抗氧化活性。此外，作为暴露于强紫外辐射的水生植物，睡莲花瓣中的黄酮与酚类物质还充当着内源的紫外屏蔽剂和抗氧化剂。花瓣的色彩与抗氧化成分共同服务于吸引传粉者与保护组织的双重功能，不同品种在此功能上的权衡差异，可能最终导致其次生代谢物积累模式的分化[39]。

该研究揭示了睡莲花色与黄酮类物质积累的显著关联。黄酮与花青素在共享的苯丙烷代谢途径中存在竞争关系，共同调控花色表现，如当木棉花瓣中黄酮和酮醇代谢流占优势时，会抑制花青素积累导致黄色显现，反之当

花青素占主导时，则呈现深红色特征[39]。这在该研究结果中得到体现：呈现黄色的黄金国积累了高含量的黄酮，而呈深红色的红色闪耀其总黄酮含量则相对较低，暗示其代谢流更多导向了花青素合成。与某些植物（如樱花）中花色与成分无相关性的报道不同[40]，本研究发现睡莲总黄酮含量与特定色度参数（与色相 *a* 负相关，与亮度 *L*、色相 *b**正相关）显著相关，这与紫薇[41]的研究结论一致，表明睡莲的花色表型可作为其黄酮代谢强度的潜在指示性状。此外，环境因素如 pH 值也对花色有调节作用，相关研究表明，在强酸性环境中，植物花色苷呈红色；在碱性环境中则呈蓝色，而在弱酸性至中性环境中呈红紫色[42]。该研究所有品种花瓣环境均为弱酸性，其中多数呈现红色、粉色或紫色，符合花色苷显色规律，而黄金国呈现黄色，可能与类胡萝卜素或特定黄酮醇的主导积累有关[43]。

在抗氧化活性方面，该研究取得了关键发现：红色闪耀与多丽丝品种的黄酮提取物在 DPPH 自由基清除能力上表现卓越，提示其可能富含如飞燕草素、槲皮素衍生物等高效抗氧化多酚。然而，睡莲的整体抗氧化效力是多种成分协同作用的结果。例如，紫贝壳在 ABTS 和 FRAP 体系中的优异表现，可能归因于水溶性酚酸或强还原性成分的贡献，这表明除黄酮外，其他酚类物质也扮演了重要角色。该研究结果差异恰恰系统揭示了不同睡莲品种抗氧化成分的特性差异：红色闪耀与多丽丝可能富含脂溶性抗氧化成分，而紫贝壳则在水相自由基清除或电子供给能力上占优。因此，采用多方法联评对于全面解析睡莲复杂多样的抗氧化特性、进而为其功能活性与高值化定向开发提供精准理论依据，显得尤为重要。

3 结论

该研究通过对 10 种睡莲花瓣的系统分析表明，该研究对 10 个睡莲品种花瓣的分析表明，睡莲种质资源普遍富含黄酮与酚类物质。具体数据（表 1）显示，总黄酮含量范围为 4.85（银河系）至 20.40 mg g^{-1}（黄金国），而总酚含量范围为 5.21（银河系）至 31.22 mg g^{-1}（紫乔伊）。在所有品种中，总酚含量均显著高于总黄酮含量，且两者含量呈显著正相关（R=0.756，P<0.05），表明其积累具有协同性。不同品种间功能性成分含量与抗氧化活性存在显著的基因型差异。在黄酮积累方面，九品红和紫乔伊表现突出，含量分别达到 13.88 和 17.51 mg g^{-1}。更具潜力的是，在 DPPH 自由基清除能力评估中（表 3），红色闪耀和多丽丝的 EC_{50} 值分别为 2.51 和 4.51 μg·mL^{-1}，均优于阳性对照 Vc（EC_{50} 为 4.85 μg·mL^{-1}），显示出卓越的抗氧化潜力。

该研究不仅证实了睡莲花瓣作为天然抗氧化剂来源的巨大潜力，更重要的是，揭示了睡莲花色特征（特别是亮度*L*与色相*b*）与总黄酮含量间的显著关联，这为通过直观花色表型快速筛选高价值品种提供了关键的理论依据与实践策略。基于上述发现，睡莲资源在保健品、化妆品等领域的高值化开发前景广阔。基于该研究，未来工作可聚焦于以下方向：解析高活性品种黄酮合成的代谢与转录调控机制；探索提取工艺优化及其与Vc、VE等抗氧化剂的复配协同效应；利用PCA、聚类等多维统计方法，构建睡莲种质资源的化学-功能分类体系，从而为其分子育种与产业化开发提供精准策略。

参考文献

[1] LOCUM P D. Waterlilies and lotuses: species, cultivars, and new hybrids [M]. Portland: Timber Press, 2005.

[2] DKHAR J, KUMARIA S, RAO S R, et al. Sequence characteristics and phylogenetic implications of the nrDNA internal transcribed spacers (ITS) in the genus *Nymphaea* with focus on some Indian representatives [J]. Plant Systematics and Evolution, 2012, 298(1): 93-108.

[3] FU D Z, WIERSEMA J H. Flora of China.vol. 6. Nymphaeaceae [M]. Beijing: Science Press, 2001:115-118.

[4] JESURUN J, JAGADEESH S, GANESAN S, et al. Antiinflammatory activity of ethanolic extract of *Nymphaea alba* flower in *Swiss albino mice* [J]. International Journal of Medical Research & Health Sciences, 2013: 2(3): 474-478.

[5] 范杨杨,岳焯,阮音音,等.4 种热带睡莲营养成分对比分析[J].食品研究与开发,2019,40(14):143-149.

[6] 陈彦甫,范杨杨,周卫娟,等.热带红睡莲精油主要成分及其抑菌活性分析[J].食品研究与开发,2022,43(1):32-38.

[7] ZHOU Q, SHI M, ZHANG H H, et al. Comparative study of the petal structure and fragrance components of the *Nymphaea hybrid*, a precious water lily [J]. Molecules, 2022, 27(2): 408.

[8] SEMAMING Y, CHUNPRICHA S, SURIYA A. Antioxidant activity and protective effect against oxidative stress induced-hemolysis of *Nymphaea lotus* L. extracts [J]. Asia-Pacific Journal of Science Technol, 2018, 23(4): 1-7.

[9] YIN D D, YUAN R Y, WU Q, et al. Assessment of flavonoids and volatile compounds in tea infusions of water lily flowers and their antioxidant activities [J]. Food Chem. 2015:187: 20-28.

[10] 吴文滔,赵霞,李高宇,等.响应面法优化蓝鸟睡莲总黄酮提取工艺及抗氧化活性分析[J/OL].分子植物育种,2024:1-21.

[11] HUANG Y N, ZHAO Y L, GAO X L, et al. Intestinal α-glucosidase inhibitory activity and toxicological evaluation of *Nymphaea stellata* flowers extract [J]. Journal of Ethnopharmacology, 2010, 131(2): 306-312.

[12] ISHRAT N, GUPTA A, KHAN M F, et al. Phytoconstituents of *Nymphaea rubra* flowers and their anti-diabetic metabolic targets [J]. Fitoterapia, 2024, 176: 106014.

[13] 尹承芃.5 个牡丹品种花瓣食用价值评价研究[D].山东:山东农业大学,2022.

[14] LIU H M, LEI S N, TANG W, et al. Optimization of ultrasound-assisted cellulase extraction from *Nymphaea* hybrid flower and biological activities: antioxidant activity, protective effect against ROS oxidative damage in HaCaT cells and inhibition of melanin production in B16 cells [J]. Molecules, 2022, 27(6): 1914.

[15] WANG D, MA Y, ZHAO X L, et al. Genetic diversity of *Rhododendron dauricum* based on morphological traits and SSR markers [J]. Front Plant Science. 2025, 16: 1533824.

[16] 李浙浙,张一丹,王波,等.木槿开花过程中花色素的变化规律及其影响因素[J].植物研究,2023,43(4):550-561.

[17] ZHAO D Q, WEI M R, LIU D, et al. Anatomical and bio-chemical analysis reveal the role of anthocyanins in flower coloration of herbaceous peony [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2016, 102: 97-106.

[18] 关奎奎,汪露,李聪聪,等.马蹄黄总黄酮、总酚酸提取工艺优化及其抗氧化、抗菌活性研究[J].中成药,2022,44(1):6-12.

[19] 唐才林,陈嘉丽,张荣菲,等.不同产地阳春砂总酚与总黄酮测定及抗氧化活性研究[J].中华中医药杂志,2021,36(1):122-126.

[20] 傅贤明,卢诗,黄欣,等.超声提取福鼎白茶总黄酮工艺优化及抗氧化能力研究[J].粮食与油脂,2022,35(12):114-118+122.

[21] 任倩倩,高朋,马致静,等.响应面法优化超声辅助提取北柴胡黄酮工艺及抗氧化活性[J].北方园艺,2023,(5):93-100.

[22] 晏俊玲,樊扬,秦川,等.苦笋总黄酮提取工艺优化及其体外抗炎抗氧化活性研究[J].四川农业大学学报,2022,40(2):276-285.

[23] GHARARI Z, BAGHERI K, DERAKHSHANI B, et al. HPLC-DAD-ESI/MS^n analysis of phenolic components of *Scutellaria araxensis*, *S. bornmuelleri* and *S. orientalis* [J]. Natural Product Research, 2022, 36(9): 2440-2445.

[24] HAO J F, GE G T, JIA Y S, et al. Metabolic profiling provides insights into the accumulation patterns of flavonoids and phenolic acids in different parts of *Lactuca indica* L [J]. Food Chemistry: X, 2023, 20: 101012.

[25] CUI Y Q, LAI G P, WEN M C, et al. Identification of low-molecular-weight color contributors of black tea infusion by metabolomics analysis based on UV-visible spectroscopy and mass spectrometry [J]. Food Chemistry, 2022, 386: 132788.

[26] ANGELINE P, THOMAS A, SANKARANARAYANAN S A, et al. Effect of pH on Isoliquiritigenin (ISL) fluorescence in lipopolymeric system and metallic nanosystem [J]. Spectrochim Acta A Mol Biomol Spectrosc, 2021, 252: 119545.

[27] XIA G H, WU C R, ZHANG M Z, et al. The metabolome and bacterial composition of high-moisture Italian ryegrass silage inoculated with lactic acid bacteria during ensiling [J]. Biotechnol Biofuels Bioprod, 2023,16(1): 91.

[28] 焦慧君,冉昆,董冉,等.基于代谢组学比较分析 5 个栽培种梨叶片代谢物的差异[J].果树学报,2024,41(6):1111-1124.

[29] CHOULITOUDI E, XRISTOU M, TSIMOGIANNIS D, et al. The effect of temperature on the phenolic content and oxidative stability of o/w emulsions enriched with natural extracts from *Satureja thymbra* [J]. Food Chemistry. 2021, 349: 129206.

[30] FARAHMANDFAR R, RAMEZANIZADEH M H. Oxidative stability of canola oil by *Biarum bovei* bioactive components during storage at ambient temperature [J]. Food Science Nutrition. 2018, 6(2): 342-347.

[31] CHENG Z H, MOORE J, YU L L. High-throughput relative DPPH radical scavenging capacity assay [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2006, 54(20): 7429-7436.

[32] ILYASOV I R, BELOBORODOV V L, SELIVANOVA I A, et al. ABTS/PP decolorization assay of antioxidant capacity reaction pathways [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2020, 21 (3): 1131.

[33] ASTUTI A, NUR K, WAHYU H. Aktivitas Antioksidan Ekstrak Etanol Batang, Daun, dan Akar Kopasanda (*Chromolaena odorata* L.) dengan Metode FRAP *(Ferric Reducing Antioxidant Power*) [J]. Jurnal Sains Dan Kesehatan, 2022, 4(5): 473-480.

[34] CHAABAN H. Kinetic study and modeling of the effects of heat treatments and physical-chemical environment on the antioxidant activity of flavonoids and their derivatives [D]. France: University of Lorraine, 2017.

[35] PATTIRAM P D, ABAS F, SULEIMAN N, et al. Edible oils as a co-extractant for the supercritical carbon dioxide extraction of

flavonoids from propolis [J]. PLoS One, 2022, 17(4): e0266673.

[36] WU Q, WU J, LI S S, et al. Transcriptome sequencing and metabolite analysis for revealing the blue flower formation in waterlily [J]. BMC Genomics, 2016, 17(1): 897.

[37] ZAMZAHAILA M Z, ATIQAH Z M S, IBRAHIM K, et al. Effect of different extraction solvents on antioxidant properties of water lily (*Nymphaeaceae antares*) flower petal and stamen [J]. Food Research, 2021, 5(3): 359-368.

[38] 赵炜,景兴怀,杨涛,等.类黄酮 3′-羟化酶及其在大麦中的研究进展[J].湖北农业科学,2025,64(3):29-35.

[39] 杨会肖,桑贤东,崔雯珺,等.木棉不同颜色花瓣黄酮类物质代谢组学分析[J].广西林业科学,2024,53(6):793-800.

[40] 欧阳莎莎,曹受金,熊颖,等.不同樱花花瓣色值和花色素测定及抗氧化能力分析[J].中南林业科技大学学报,2024,44(2):166-173+183.

[41] 卢帅杰,尹若勇,秦欣如,等.5 个紫薇品种花色呈色生理研究[J].华南农业大学学报,2025,46(4):577-586.

[42] DENNY E G, COSTON D C, BALLARD R E. Peach skin discoloration [J]. Journal of The American Society for Horticultural Science. 1986, 111(4): 549-553.

[43] 张译心.基于叶绿体基因组和花色素成分的淫羊藿属植物分类学研究[D].北京:北京协和医学院,2024.