

马蔺种质资源花瓣抗氧化能力综合评价

李楠^{1,2},毛培春¹,郑明利¹,云岚²,孟林^{1*},田小霞^{1**}

(1. 北京市农林科学院草业花卉与景观生态研究所,北京 100089;2. 内蒙古农业大学草原与资源环境学院,内蒙古 呼和浩特 010000)

摘要:【目的】探讨马蔺(*Iris lactea*)不同种质花瓣抗氧化能力的差异,筛选出花瓣抗氧化能力强的马蔺种质资源,为马蔺种质资源开发利用奠定基础。【方法】选取我国6个省区不同生境条件下22份马蔺种质资源,对其盛花期花瓣的花青素、类黄酮、总酚、原花青素、羟自由基清除率及总抗氧化能力进行测定,并进行相关性分析,同时采用主成分分析法和隶属函数法对各种质材料的抗氧化能力进行综合评价。【结果】1)22份马蔺种质间各成分含量存在一定差异,其中原花青素含量变异系数最大,为64.41%,总抗氧化能力含量变异系数最小,仅为4.53%;花青素含量为0.15~0.56 mg/g,类黄酮含量为0.51~1.34 mg/g,总酚含量为1.19~1.90 mg/g,原花青素含量为0~0.19 mg/g;羟自由基清除率在24.97%~50.82%,总抗氧化能力为1.98~2.36 $\mu\text{mol Trolox/g}$;2)测定的6项生理生化指标间均存在不同程度的相关性,且根据欧氏距离聚类分析的结果,可将参试的22份马蔺种质资源抗氧化能力聚为3大类,包括抗氧化能力强的8份(ML011、ML012、ML013、ML014、ML016、ML019、ML029和ML035),抗氧化能力中等的9份和抗氧化能力弱的5份;3)马蔺种质抗氧化能力的综合评价排序结果为ML014 > ML013 > ML011 > ML012 > ML035 > ML19 > ML016 > ML029 > ML018 > ML008 > ML010 > ML006 > ML020 > ML005 > ML009 > ML007 > ML023 > ML017 > ML032 > ML015 > ML004 > ML001,与聚类分析结果高度一致。【结论】22份马蔺种质材料中ML011、ML012、ML013、ML014、ML016、ML019、ML029和ML035抗氧化能力强,为优异马蔺种质资源的挖掘及产品开发利用提供科学依据。

关键词:马蔺;花青素;抗氧化能力;综合评价

中图分类号:S682.19 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-5500(2024)05-0088-11

DOI:10.13817/j.cnki.cyycp.2024.05.010



马蔺(*Iris lactea*)系鸢尾科(Iridaceae)鸢尾属(*Iris*)多年生宿根草本植物,亦称马莲、旱蒲等。原产于中国、朝鲜、俄罗斯,在我国主要分布于东北、华北、西北和西藏等地^[1]。马蔺花朵美丽,花香清新淡雅,根

系发达,具有较强的耐盐碱性和抗旱耐寒性,耐修剪,耐践踏,是贫瘠干旱和盐碱地区园林绿化和水土保持的理想植物。目前,关于马蔺的研究和应用多集中于根^[2]、叶^[3-4]和种子^[5-6],对花的研究与利用较少^[7-8]。马蔺花不仅花色艳丽,还具有较高的药用价值。据《本草纲目》记载,马蔺花瓣具有清热解毒、止血利尿的功效^[9],其化学成分复杂,含有黄酮类、苯醌类和芪类等多种活性物质^[10],研究发现这些活性物质具有抗肿瘤^[11]、抗疲劳^[12]、抗氧化性^[13]等对人体有益的功能。

已有研究表明,人体在新陈代谢过程中会产生大量的活性氧自由基,而过量的自由基会引起癌症、衰老或其他疾病的发生^[14]。因此对抗氧化剂的研究成

收稿日期:2023-08-02;**修回日期:**2023-08-15

基金资助:北京市农林科学院科技创新能力建设专项(KJ CX20230109);北京市自然科学基金项目(6142007)

作者简介:李楠(2000-),女,内蒙古乌兰察布人,硕士研究生。E-mail:2442281075@qq.com

*通信作者。E-mail:menglin9599@sina.com

**通信作者。E-mail:tianxi8002@126.com

为近年来的热点之一。由于化学合成的抗氧化剂具有毒性和致癌性,人们趋于寻找中草药中的天然抗氧化剂取代合成抗氧化剂^[15]。研究报道在苹果属(*Malus*)^[16]、三七(*Panax notoginseng*)^[17]、芒萁(*Dicranopteris pedata*)^[18]等植物中均具有较强的抗氧化能力。本研究以我国6个省区不同生境条件下22份马蔺种质为试验材料,采用pH示差法、亚硝酸钠-硝酸铝显色法、福林酚法等方法,测定供试材料盛花期花瓣的花青素、类黄酮和总酚等指标,通过聚类分析、主成分分析法和隶属函数法等综合评价,以期筛选出具有较强抗氧化能力的马蔺种质材料,为马蔺种质资源挖掘、功能特性分析评价及产品开发应用提供重要参考依据。

1 材料和方法

1.1 材料

以我国内蒙古、新疆、北京、山西、甘肃和吉林6个省市不同生境条件下22份马蔺种质资源为试验材料(表1),用40℃温水浸泡种子48h,撒播于装有基质

(壤土:草炭=1:1)的营养钵(8cm×8cm)中育苗,待苗高约10cm单株定植移栽到位于北京市昌平区小汤山镇的国家精准农业研究示范园草种质资源圃(40°9′16″N,116°24′32″E)。通过比色卡比色法和色差仪测色法将其划分为4大色系,即紫罗兰色5份,分别为ML010、ML011、ML012、ML013和ML014;深蓝紫色8份,分别为ML007、ML008、ML009、ML018、ML019、ML029和ML035;浅蓝紫色7份,分别为ML004、ML005、ML017、ML020、ML023和ML032;浅蓝色2份,分别为ML001和ML006。

1.2 花瓣采集与处理

2022年4月在国家精准农业研究示范园草业花卉研究所草种质资源圃分别随机采集生长健康的22份马蔺种质材料盛花期花瓣,每份材料选取10个单株,每单株选取10朵花,置于-80℃冰箱保存,用于指标的测定。

1.3 测定指标与方法

本试验测试的酚类物质含量包括花青素、类黄酮、原花青素和总酚含量,抗氧化活性包括羟自由基

表1 供试马蔺种质资源基本信息

Table 1 The basic information of experimental *Iris lactea* accessions

种质材料	花色	来源地	经纬度
ML001	浅蓝色	北京海淀区四季青镇	39°56′32″N,116°16′44″E
ML006	浅蓝色	山西省太原市	37°31′12″N,112°19′00″E
ML004	浅蓝紫色	吉林省永吉县北大湖镇	43°31′12″N,126°20′24″E
ML005	浅蓝紫色	内蒙古赤峰阿鲁科尔沁旗	42°10′12″N,118°31′12″E
ML015	浅蓝紫色	新疆伊犁州昭苏县	43°08′23″N,81°07′39″E
ML017	浅蓝紫色	新疆伊犁州昭苏军马场	43°55′20″N,81°19′39″E
ML020	浅蓝紫色	新疆伊犁州巩留县七乡伊犁河南岸	43°36′49″N,81°50′39″E
ML023	浅蓝紫色	新疆伊犁州奶牛场	44°07′48″N,81°17′11″E
ML032	浅蓝紫色	内蒙古通辽市科左后旗阿古拉	43°18′26″N,122°38′6″E
ML007	深蓝紫色	内蒙古赤峰市克什克腾旗	43°15′54″N,117°32′45″E
ML008	深蓝紫色	内蒙古鄂尔多斯西部	39°48′00″N,109°49′48″E
ML009	深蓝紫色	甘肃省甘南藏族自治州合作市	34°59′10″N,102°54′41″E
ML016	深蓝紫色	内蒙古临河曙光镇永强村	40°46′14″N,107°25′20″E
ML018	深蓝紫色	内蒙古呼和浩特市大青山	40°52′38″N,111°35′27″E
ML019	深蓝紫色	新疆伊犁州伊犁河边	43°51′8″N,81°24′7″E
ML029	深蓝紫色	内蒙古科尔沁左翼中旗保康镇	44°07′48″N,123°21′12″E
ML035	深蓝紫色	新疆伊宁县胡地亚于孜乡阔旦塔木村	43°45′15″N,83°10′30″E
ML010	紫罗兰色	内蒙古临河区白脑包镇中心村	41°0′50″N,107°18′34″E
ML011	紫罗兰色	内蒙古临河区八一镇丰收村	40°48′56″N,107°29′24″E
ML012	紫罗兰色	内蒙古临河区隆胜镇新明村	40°53′09″N,107°34′18″E
ML013	紫罗兰色	内蒙古临河区城关镇万来村	40°47′43″N,107°26′18″E
ML014	紫罗兰色	内蒙古临河区双河镇丰河村	40°42′15″N,107°25′09″E

清除率和总抗氧化能力。每份材料每个指标重复3次,计算其平均值。

1.3.1 酚类物质含量的测定 花青素含量的测定采用pH示差法^[19]。取花瓣0.1 g,加入1 mL含1% HCl的甲醇溶液,振荡提取4 h后,于8 000 r/min常温离心10 min,取上清液;每个样品各取100 μ L上清液于2个2 mL离心管中,分别加入pH=1.0的KCl-HCl缓冲液和pH=4.5的醋酸钠-醋酸缓冲液900 μ L,40 $^{\circ}$ C水浴20 min,于波长为530 nm和700 nm进行比色,计算花青素含量。

类黄酮含量的测定采用亚硝酸钠-硝酸铝显色法^[20]。取花瓣0.1 g,加入2 mL 60%乙醇溶液充分研磨,60 $^{\circ}$ C振荡提取2 h,于10 000 r/min常温离心10 min,取上清液;分别吸取540 μ L上清液和蒸馏水于2个2 mL离心管,各加30 μ L NaNO₂溶液混匀;静置6 min后分别加30 μ L Al(NO₃)₃溶液,5 min后再加400 μ L NaOH溶液,室温静置15 min后于510 nm波长下进行比色,计算类黄酮含量。

原花青素含量的测定采用香草醛比色法^[21]。取0.1 g花瓣,加入2 mL乙醇,60 $^{\circ}$ C振荡提取2 h后,于10 000 r/min常温离心10 min,取上清液;每个样品各取200 μ L上清液于2个2 mL离心管中,分别加入盐酸溶液和香草醛溶液800 μ L,30 $^{\circ}$ C水浴30 min后,于500 nm波长下进行比色,计算原花青素含量。

总酚含量的测定采用福林酚法^[22]。取0.1 g花瓣,加入2 mL 60%乙醇,60 $^{\circ}$ C振荡提取2 h后,于10 000 r/min常温离心10 min,取上清液;每个样品各取50 μ L上清液于2个2 mL离心管中作为对照管和测定管,测定管中加入250 μ L Folin-Cioaltea试剂、250 μ L Na₂CO₃溶液和450 μ L水混匀,对照管中加入250 μ L Na₂CO₃溶液和700 μ L水混匀,25 $^{\circ}$ C静置5 min后,于760 nm波长下进行比色,计算总酚含量。

1.3.2 抗氧化活性测定 羟自由基清除率的测定采用邻二氮菲法^[23]。取0.1 g花瓣,加入1 mL水,冰浴匀浆,于10 000 r/min,4 $^{\circ}$ C离心10 min,取上清液,置冰上待测;分别取3个2 mL离心管为测定管、对照管和空白管,测定管中加入300 μ L上清液、150 μ L水杨酸-乙醇溶液、150 μ L FeSO₄·7H₂O溶液、450 μ L H₂O和300 μ L H₂O₂溶液,对照管中加入150 μ L水杨酸-

乙醇溶液、150 μ L FeSO₄·7H₂O溶液、750 μ L H₂O和300 μ L H₂O₂溶液,空白管中加入150 μ L水杨酸-乙醇溶液、900 μ L H₂O和300 μ L H₂O₂溶液,37 $^{\circ}$ C保温20 min,于510 nm波长下进行比色,计算羟自由基清除率(%)。

总抗氧化能力的测定采用FRAP法^[24]。取0.1 g花瓣,加入2 mL无水醋酸钠-冰醋酸溶液,冰浴匀浆,于10 000 r/min,4 $^{\circ}$ C离心10 min,取上清液,置冰上待测;分别取50 μ L上清液和50 μ L无水醋酸钠-冰醋酸溶液于2个2 mL离心管中,各加入950 μ L混合液(无水醋酸钠-冰醋酸溶液:TPTZ溶液:FeCl₃·6H₂O溶液=10:1:1),充分反应20 min,于593 nm波长下进行比色,计算总抗氧化能力。

1.4 抗氧化能力综合评价

将22份马蔺种质材料花瓣测定的6项指标进行主成分分析,根据主成分的成分矩阵和特征根可得出公因子的得分值,再计算出隶属函数值,根据主成分的贡献率可得出权重系数,根据隶属函数值和权重系数计算综合评价D值。

1.4.1 隶属函数值

$$U_{ij} = \frac{C_{ij} - C_{\min}}{C_{\max} - C_{\min}}, i = 1, 2, 3, \dots; j = 1, 2 \quad (1)$$

式中:U_{ij}表示*i*种质*j*公因子的隶属函数值,C_{ij}表示*i*种质*j*公因子的得分值,C_{min}表示所有种质*j*公因子得分值的最小值,C_{max}表示所有种质*j*公因子得分值的最大值。

1.4.2 权重系数

$$W_j = \frac{V_j}{\sum_{j=1}^m V_j}, j = 1, 2 \quad (2)$$

式中:W_j表示第*j*个公因子在所有公因子中的重要程度,即权重系数;V_j为第*j*个公因子的贡献率。

1.4.3 抗氧化能力综合评价

$$D_i = \sum_{j=1}^n [U_{ij} \times W_j], i = 1, 2, 3, \dots; j = 1, 2 \quad (3)$$

式中:D_i为各马蔺种质材料由综合指标评价所得的抗氧化能力综合评价, U_{ij}表示第*i*个种质第*j*个公因子的隶属函数值, W_j表示第*j*个公因子的权重系数。

1.5 数据处理与分析

采用Microsoft Excel 2019、SPSS 27.0和Origin 2021进行相关数据处理与作图;采用Duncan's新复

极差法、皮尔逊系数法和欧氏距离聚类分析法分别进行差异显著性分析、相关性分析和聚类分析。

2 结果与分析

2.1 马蔺种质材料酚类物质含量的差异

酚类化合物是重要的植物次生代谢产物,酚类物质含量越高,其抗氧化能力越强^[25]。22份供试马蔺种质材料花瓣的花青素含量为0.15~0.56 mg/g,平均含量为0.30 mg/g,变异系数38.81%(表2)。其中花青素含量超过0.30 mg/g的马蔺种质材料有10份,占45.45%;花瓣呈紫罗兰色的ML014花青素含量最高(0.58 mg/g),是花瓣呈浅蓝色的ML001花青素含量(仅为0.15 mg/g)的3.66倍,说明花青素含量越高,则花瓣颜色越紫。类黄酮含量变幅为0.51~1.34 mg/g,平均含量为1.00 mg/g,变异系数21.31%。其中花瓣类黄酮含量在平均含量1.00 mg/g以上的马蔺种质材料有13份,ML014花瓣类黄酮含量最高,达1.34 mg/g,是ML001(0.51 mg/g)的2.63倍。原花青素含量变幅为0~0.19 mg/g,平均含量为0.06 mg/g,变异系数64.41%,变异幅度较大。原花青素含量高于0.06 mg/g的马蔺种质材料有12份,ML009原花青素含量(0.19 mg/g)最高且显著高于其他种质材料($P<0.05$),其次是ML014(0.13 mg/g)和ML012(0.12 mg/g),原花青素含量均在0.1 mg/g以上。总酚含量变幅为1.19~1.90 mg/g,平均含量为1.46 mg/g,变异系数13.29%。其中含量超过1.46 mg/g的马蔺种质材料有10份,ML018总酚含量最高,为1.90 mg/g;其次是ML013(1.72 mg/g)、ML007(1.72 mg/g)、ML014(1.67 mg/g),含量均在1.60 mg/g以上且与ML018含量差异不显著,总酚含量最低的是ML032,仅为1.19 mg/g。

2.2 马蔺种质材料抗氧化活性的差异

羟自由基清除能力的多少反映抗氧化活性的大小,其清除率越高抗氧化活性越强。22份马蔺种质材料花瓣的羟自由基清除率为24.97%~50.82%,平均清除率为38.68%,变异系数24.09%。通过比较得知,ML014花瓣的羟自由基清除率最高,为50.82%;含量最低的是ML001,仅为24.97%(表3)。

FRAP法是以样品中的抗氧化物质为还原剂,在一定条件下可将 Fe^{3+} 还原为 Fe^{2+} ,FRAP值越高,其总

抗氧化能力则越强。22份马蔺种质材料花瓣的总抗氧化能力均在1.90 $\mu\text{mol Trolox/g FW}$ 以上,且彼此之间差异不显著,说明参试马蔺花瓣都具有很强的抗氧化能力。其中,ML014的总抗氧化能力最高,为2.36 $\mu\text{mol Trolox/g FW}$;ML006的总抗氧化能力最低,为1.98 $\mu\text{mol Trolox/g FW}$ 。

2.3 马蔺种质材料各指标间相关分析

马蔺种质材料花瓣抗氧化能力的6项指标相关性分析结果表明,除原花青素含量与总酚含量之间呈负相关外,其余各指标间均呈正相关关系。其中,羟自由基清除率与花青素含量呈极显著正相关($P<0.01$),相关系数为0.606;羟自由基清除率与类黄酮含量呈显著正相关($P<0.05$),相关系数为0.495。总抗氧化能力与类黄酮和花青素含量呈极显著正相关($P<0.01$),相关系数分别是0.665和0.597;总抗氧化能力与总酚含量呈显著正相关($P<0.05$),相关系数为0.485(表4)。

2.4 马蔺种质材料花瓣抗氧化能力欧氏距离聚类分析

马蔺种质资源花瓣抗氧化能力聚类分析结果显示,当欧式距离为6.5时,可将22份马蔺种质材料的抗氧化能力聚为3大类,其中,抗氧化能力强的有8份材料,包括ML011、ML012、ML013、ML014、ML016、ML019、ML029和ML035;抗氧化能力弱的有9份材料,包括ML001、ML004、ML005、ML007、ML009、ML015、ML017、ML023和ML032;抗氧化能力中等的有5份材料,包括ML006、ML008、ML010、ML018和ML020(图1)。

2.5 马蔺种质花瓣抗氧化能力综合评价

2.5.1 主成分分析 对22份马蔺种质资源抗氧化能力的指标主成分分析结果显示,第1主成分受总酚含量、羟自由基清除率和总抗氧化能力3个指标影响,贡献率达53.874%,第2主成分受类黄酮含量和花青素含量的影响,贡献率达17.868%(表5-6)。

2.5.2 综合评价 基于抗氧化相关指标的主成分分析中成分矩阵和特征根,得到公因子的得分值,再根据式(1)求出对应的隶属函数值。根据式(2)可得出前2个主成分的权重系数分别为0.7509和0.2491,然后依据隶属函数值和权重系数,求出抗氧化能力的综合评价D值,D值越高表明抗氧化能力越强。22份马

表 2 22份马蔺种质材料酚类物质含量分析

Table 2 Analysis of phenolic content of 22 *I. lactea* accessions

种质材料	类黄酮含量/ (mg·g ⁻¹)	花青素含量/ (mg·g ⁻¹)	原花青素含量/ (mg·g ⁻¹)	总酚含量/ (mg·g ⁻¹)
ML001	0.51±0.05 ^j	0.15±0.02 ^k	0.03±0.01 ^{def}	1.35±0.04 ^{defg}
ML004	1.16±0.11 ^b	0.31±0.02 ^{cd}	0.00±0.00 ^{f*}	1.37±0.07 ^{defg}
ML005	0.72±0.04 ^{hi}	0.18±0.03 ^{ijk}	0.06±0.02 ^{de}	1.50±0.05 ^{bcd}
ML006	0.81±0.03 ^{efg}	0.20±0.01 ^{hijk}	0.04±0.04 ^{def}	1.30±0.04 ^{efg}
ML007	0.89±0.01 ^{def}	0.27±0.02 ^{efgh}	0.03±0.00 ^{def}	1.72±0.06 ^{ab}
ML008	0.94±0.10 ^{cde}	0.37±0.03 ^{bc}	0.07±0.01 ^{bcde}	1.43±0.17 ^{bcd}
ML009	1.13±0.02 ^b	0.38±0.02 ^{bc}	0.19±0.01 ^a	1.19±0.17 ^g
ML010	1.22±0.10 ^{ab}	0.42±0.04 ^b	0.07±0.00 ^{cde}	1.56±0.06 ^{bcde}
ML011	1.10±0.01 ^{bc}	0.28±0.01 ^{defg}	0.01±0.00 ^{ef}	1.42±0.15 ^{defg}
ML012	1.21±0.01 ^{ab}	0.55±0.04 ^a	0.12±0.01 ^{bc}	1.62±0.02 ^{bcd}
ML013	1.07±0.00 ^{bc}	0.36±0.05 ^{bcd}	0.05±0.01 ^{def}	1.72±0.09 ^{ab}
ML014	1.34±0.08 ^a	0.56±0.00 ^a	0.13±0.01 ^b	1.67±0.02 ^{abc}
ML015	1.04±0.03 ^{cd}	0.22±0.01 ^{ghijk}	0.03±0.01 ^{def}	1.56±0.04 ^{bcde}
ML016	0.93±0.09 ^{cde}	0.40±0.02 ^b	0.02±0.00 ^{def}	1.45±0.05 ^{bcd}
ML017	0.67±0.00 ^{hi}	0.17±0.03 ^{jk}	0.06±0.02 ^{def}	1.19±0.05 ^g
ML018	1.09±0.01 ^{bc}	0.26±0.03 ^{ghi}	0.06±0.05 ^{de}	1.90±0.06 ^a
ML019	1.10±0.01 ^{bc}	0.21±0.01 ^{ghijk}	0.08±0.04 ^{bed}	1.57±0.03 ^{bcde}
ML020	0.73±0.02 ^{ghi}	0.25±0.02 ^{fghij}	0.06±0.01 ^{de}	1.21±0.15 ^{fg}
ML023	1.07±0.08 ^{bc}	0.25±0.00 ^{fghij}	0.05±0.02 ^{def}	1.38±0.06 ^{cd}
ML029	1.20±0.06 ^{ab}	0.35±0.03 ^{bcde}	0.08±0.02 ^{bed}	1.59±0.05 ^{bcde}
ML032	0.73±0.02 ^{hi}	0.17±0.02 ^{jk}	0.06±0.01 ^{de}	1.18±0.08 ^g
ML035	1.05±0.02 ^{bcd}	0.38±0.02 ^{bc}	0.08±0.01 ^{bed}	1.25±0.13 ^f
平均值	1.00	0.30	0.06	1.46
变异系数/%	21.31	38.81	64.41	13.29

注:表中数据为平均值±标准误。同列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$),*表示未检测到含量。

蔺种质材料花瓣抗氧化能力从强到弱次序为ML014>ML013>ML011>ML012>ML035>ML19>ML016>ML029>ML018>ML008>ML010>ML006>ML020>ML005>ML009>ML007>ML023>ML017>ML032>ML015>ML004>ML001(表7)。其中ML014的综合评价D值最大(0.577),表明抗氧化能力最强。

3 讨论

植物中酚类物质都是天然抗氧化剂,包括花青素^[26-27]、类黄酮^[28]、原花青素^[29]和总酚^[30]等物质,这些

物质都具有极强的抗氧化和消除自由基的作用^[31]。许多研究报道已证实,多花野牡丹(*Melastoma malabathricum*)^[32]、玫瑰(*Rosa rugosa*)^[33]、宫粉紫荆(*Bauhinia variegata*)^[34]等植物的花瓣中富含大量的酚类物质,具有较强的抗氧化能力。目前对物质的抗氧化评价的方法,通常选用DPPH自由基清除活性、FRAP法测定总抗氧化能力和Cu²⁺还原能力测定等2种或2种以上的方法才能获得较为准确的测定结果^[35]。因此,本研究采用了清除羟自由基活性和FRAP值对马蔺花瓣抗氧化能力进行抗氧化能力的评价,结果表明,22份马蔺种质材料花瓣中花青素、类黄

表3 22份马蔺种质材料抗氧化活性分析
Table 3 Antioxidant activity analyses of 22 *I. lactea* accessions

种质材料	羟自由基清除率/%	总抗氧化能力/($\mu\text{mol Trolox}\cdot\text{g}^{-1}$)
ML001	24.79 \pm 0.02 ^g	2.11 \pm 0.09 ^a
ML004	26.07 \pm 0.02 ^g	2.28 \pm 0.02 ^a
ML005	33.88 \pm 0.01 ^{efg}	2.26 \pm 0.15 ^a
ML006	39.80 \pm 0.04 ^{b cdef}	1.98 \pm 0.20 ^a
ML007	31.61 \pm 0.04 ^{fg}	2.29 \pm 0.15 ^a
ML008	39.95 \pm 0.01 ^{abcdef}	2.30 \pm 0.14 ^a
ML009	34.77 \pm 0.03 ^{defg}	2.33 \pm 0.04 ^a
ML010	38.52 \pm 0.03 ^{cdef}	2.30 \pm 0.11 ^a
ML011	48.59 \pm 0.02 ^{abc}	2.19 \pm 0.14 ^a
ML012	46.22 \pm 0.02 ^{abc}	2.31 \pm 0.10 ^a
ML013	49.98 \pm 0.03 ^{ab}	2.18 \pm 0.12 ^a
ML014	50.82 \pm 0.01 ^a	2.36 \pm 0.09 ^a
ML015	26.67 \pm 0.01 ^g	2.23 \pm 0.09 ^a
ML016	44.94 \pm 0.03 ^{abcd}	2.20 \pm 0.09 ^a
ML017	32.74 \pm 0.04 ^{fg}	2.25 \pm 0.07 ^a
ML018	41.19 \pm 0.05 ^{abcdef}	2.32 \pm 0.02 ^a
ML019	44.84 \pm 0.01 ^{abcd}	2.29 \pm 0.08 ^a
ML020	40.15 \pm 0.05 ^{abcdef}	2.19 \pm 0.12 ^a
ML023	31.85 \pm 0.03 ^{fg}	2.22 \pm 0.12 ^a
ML029	43.75 \pm 0.07 ^{abcde}	2.27 \pm 0.16 ^a
ML032	32.40 \pm 0.04 ^{fg}	2.02 \pm 0.12 ^a
ML035	47.56 \pm 0.02 ^{abc}	2.34 \pm 0.10 ^a
平均值	38.68	2.23
变异系数/%	24.09	4.53

注:表中数据为平均值 \pm 标准误。同列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

表4 22份参试马蔺种质材料不同指标的相关分析
Table 4 Correlation analyses of different indexes of 22 *I. lactea* accessions

相关系数	羟自由基清除率	总抗氧化能力	总酚含量	原花青素含量	类黄酮含量	花青素含量
羟自由基清除率	1					
总抗氧化能力	0.342	1				
总酚含量	0.099	0.485 [*]	1			
原花青素含量	0.305	0.383	-0.15	1		
类黄酮含量	0.495 [*]	0.665 ^{**}	0.544 ^{**}	0.355	1	
花青素含量	0.606 ^{**}	0.597 ^{**}	0.305	0.511 [*]	0.748 ^{**}	1

注:*表示在 $P<0.05$ 水平上显著相关;**表示在 $P<0.01$ 水平上显著相关。

酮、原花青素和总酚等酚类物质含量呈显著差异,且花瓣颜色越紫,酚类物质越多,抗氧化能力越强。

花青素含量、类黄酮含量、原花青素含量、总酚含量、羟自由基清除率和总抗氧化能力6个评价指标间存在一定相关性。许英一等^[36]对紫花苜蓿(*Medicago*

sativa)叶片中类黄酮含量及抗氧化能力分析,发现紫花苜蓿对有较强的还原能力,且与类黄酮含量呈正相关。卢柏山等^[37]在对不同品种鲜食玉米(*Zea mays*)抗氧化能力的研究表明,鲜食玉米的类黄酮含量、花青素含量与羟自由基清除能力呈极显著正相关($P<$

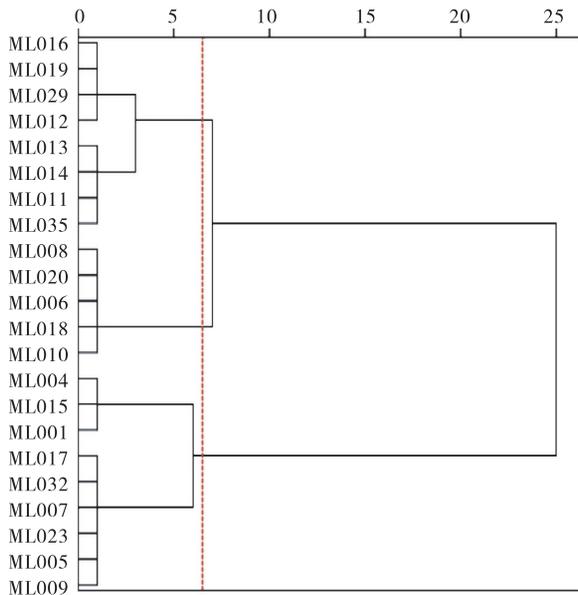


图1 22份马蔺种质材料抗氧化能力欧氏距离聚类分析图
Figure 1 Euclidean distance cluster analysis of antioxidant capacity of 22 *I. lactea* accessions

表5 马蔺种质资源抗氧化能力综合评价的主成分贡献率
Table 5 Principal component contribution of comprehensive evaluation of antioxidant capacity of *I. lactea* accessions

主成分	方差百分比	累计贡献率
1	53.874	53.874
2	17.868	71.742
3	13.097	84.839
4	6.802	91.641
5	4.916	96.557
6	3.443	100.000

表6 马蔺种质资源抗氧化能力综合评价2个主成分的成分矩阵

Table 6 Component matrix of two principal components for comprehensive evaluation of antioxidant capacity of *I. lactea* accessions

指标	主成分	
	1	2
羟自由基清除率	0.68	0.05
总抗氧化能力	0.76	-0.05
总酚	0.55	0.73
原花青素含量	0.58	-0.71
类黄酮含量	0.87	0.14
花青素含量	0.89	-0.12

0.01),总酚含量、原花青素含量与羟自由基清除能力呈显著正相关($P < 0.05$)。本研究的相关性分析结果

表明,马蔺种质材料花瓣中的羟自由基清除率和花青素含量、总抗氧化能力和类黄酮含量、总抗氧化能力和花青素含量、类黄酮含量和总酚含量、类黄酮含量和花青素含量间的相关性均达到极显著水平($P < 0.01$),羟自由基清除率和类黄酮含量、总抗氧化能力和总酚含量间的相关性均达到显著水平($P < 0.05$),充分说明,6个测试分析指标间的密切程度较高。

抗氧化能力是综合性状的表现,为了避免单一指标对植物抗氧化能力做出的片面性和差异性评价,本文采用了6个分析指标对马蔺种质材料花瓣抗氧化能力进行综合评价。其中,主成分分析法具有消除各测定分析指标之间的相互影响、降低工作量等优点^[38]。本研究通过对花青素含量、类黄酮含量、原花青素含量、总酚含量、羟自由基清除率和总抗氧化能力6个理化指标的主成分分析,发现2个主成分的累积贡献率达到了71.724%,基本代表了本试验种质材料所测指标的绝大部分信息,因此可初步作为2个新的相互独立的综合指标对马蔺种质材料花瓣的抗氧化能力进行评价,结果更为可靠。隶属函数法在植物抗性研究中应用广泛^[39]。抗氧化能力的综合评价值(D 值)越大,表明种质抗氧化能力越强。本研究结果显示,22份马蔺种质花瓣的抗氧化能力由高到低依次为ML014>ML013>ML011>ML012>ML035>ML19>ML016>ML029>ML018>ML008>ML010>ML006>ML020>ML005>ML009>ML007>ML023>ML017>ML032>ML015>ML004>ML001。同时,通过对上述6个指标的欧氏距离聚类分析,22份马蔺种质材料可聚为抗氧化能力强、抗氧化能力居中和抗氧化能力弱3大类,与依据综合评价 D 值得到的评价结果高度吻合,这也进一步表明综合评价法和欧氏距离聚类分析法在马蔺种质材料花瓣抗氧化能力综合评价中具有较好的可行性和准确性。

4 结论

通过对22份马蔺种质材料盛花期花瓣中花青素含量、类黄酮含量、总酚含量、羟自由基清除率和总抗氧化能力等6项指标的测试分析,根据综合评价 D 值和欧氏距离聚类分析结果,筛选出ML011、ML012、ML013、ML014、ML016、ML019、ML029和ML035共

表7 22份参试马蔺种质资源的公因子得分值C(x)、隶属函数值U(x)和综合评价D值
Table 7 The membership function value, weight and comprehensive D value of each index of 22 samples of *I. lactea* accessions

种质材料	C(1)	C(2)	U(1)	U(2)	综合评价D值	排序
ML001	11.057	1.785	0.000	0.000	0.000	22
ML004	11.999	1.922	0.088	0.106	0.053	21
ML005	14.745	2.244	0.377	0.358	0.216	14
ML006	16.859	2.391	0.541	0.472	0.306	12
ML007	14.082	2.323	0.282	0.419	0.184	16
ML008	17.248	2.440	0.577	0.511	0.327	10
ML009	15.352	2.025	0.400	0.187	0.202	15
ML010	16.901	2.500	0.545	0.557	0.319	11
ML011	20.500	2.847	0.880	0.827	0.506	3
ML012	19.928	2.793	0.827	0.785	0.476	4
ML013	21.151	3.069	0.941	1.000	0.558	2
ML014	21.784	3.018	1.000	0.961	0.577	1
ML015	12.176	2.052	0.104	0.208	0.075	20
ML016	19.102	2.686	0.750	0.702	0.431	7
ML017	14.179	1.996	0.291	0.164	0.151	18
ML018	17.883	2.828	0.636	0.813	0.397	9
ML019	19.147	2.756	0.754	0.757	0.440	6
ML020	17.051	2.304	0.559	0.404	0.304	13
ML023	14.120	2.133	0.286	0.271	0.164	17
ML029	18.853	2.727	0.727	0.734	0.425	8
ML032	13.981	1.994	0.273	0.163	0.143	19
ML035	20.162	2.630	0.849	0.659	0.467	5

8份抗氧化能力强的马蔺种质材料,对优异马蔺种质资源挖掘及产品开发利用具有重要科学价值。

参考文献:

- [1] 王育青,秦艳,王晓晶,等. 内蒙古野生马蔺种质农艺性状遗传多样性研究[J]. 植物遗传资源学报, 2014, 15(4): 772-778.
- [2] 田小霞,毛培春,郭强,等. 镉胁迫对马蔺根系形态及部分生理指标的影响[J]. 西北植物学报, 2019, 39(6): 1105-1113.
- [3] 李启东,李翠,陈治民,等. 马蔺IINRAMP5介导Cd²⁺吸收功能初探[J]. 草地学报, 2023, 31(6): 1640-1647.
- [4] Ni L J, Wang Z Q, Liu L Q, et al. The IINRF-YC6 transcription factor of *Iris lactea* var. *chinensis* (Fisch.) activates the IICDT1 gene and enhances tolerance to cadmium stress in *Arabidopsis thaliana* [J]. Industrial Crops & Products, 2023, 197: 116558.
- [5] 朱莹,宋华,张琮琦,等. 20种鸢尾属植物种子休眠与萌发响应机制研究[J]. 种子, 2022, 41(1): 26-37.
- [6] Wang H, Zhang Y, Yu W J, et al. Radiosensitizing effect of *Irisquinone* on glioma through the downregulation of HIF-1 α evaluated by 18F-FDG and 18F-FMISO PET/CT[J]. Nuclear medicine communications, 2016, 37(7): 705-714.
- [7] 贾文庆,陈韵. 马蔺花粉生活力测定及贮藏特性研究[J]. 资源开发与市场, 2014, 30(3): 263-264.
- [8] 虎娟. 黑果枸杞和马蔺花青素生物合成关键基因的克隆和功能解析[D]. 银川:宁夏大学, 2018.
- [9] 韩景泰. 清热解毒马蔺花[J]. 开卷有益(求医问药), 2014, 303(9): 22.
- [10] 孟宇,谢国勇,石璐,等. 马蔺化学成分和药理活性研究进展[J]. 中国野生植物资源, 2017, 36(3): 42-49.
- [11] 边亮,陈华国,周欣. 植物多糖的抗肿瘤活性研究进展[J]. 食品科学, 2020, 41(7): 275-282.
- [12] 王健,张珍珍,梅秀珍,等. 黄酮类化合物的抗菌作用及机制研究进展[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(1): 1-8.

- [13] 丁春发,魏小红. 野生麻花秦艽中龙胆苦苷和黄酮对牧草的化感作用及抗氧化性研究[J]. 草地学报,2017,25(1):92-99.
- [14] Devasagayam T P A, Tilak J C, Bloor K K, *et al.* Free radicals and antioxidants in human health: current status and future prospects[J]. The Journal of the Association of Physicians of India, 2004, 52: 794-804.
- [15] 封家福, 谯时文, 张知贵, 等. 天然抗氧化剂研究的进展[J]. 北方药学, 2012, 9(5): 37-39.
- [16] Xu X X, Zhang X L, Liu C L, *et al.* Appropriate increasing potassium supply alleviates the inhibition of high nitrogen on root growth by regulating antioxidant system, hormone balance, carbon assimilation and transportation in apple[J]. Scientia Horticulturae, 2023, 311: 111828.
- [17] Dipayan P, Subhash K, Das D G, *et al.* Phytochemical, nutritional and antioxidant potential of *Panaxbipinnatifidus* and *Panaxpseudoginseng*: A study of two underutilized and neglected species from the eastern Himalayan region of India[J]. South African Journal of Botany, 2022, 149: 837-852.
- [18] 欧阳可凡, 王文君. 苜蓿黄酮类物质成分鉴定及体外抗氧化活性研究[J]. 草原与草坪, 2021, 41(5): 113-118.
- [19] Jia Z S, Tang M C, Wu J M. The determination of flavonoid contents in mulberry and their scavenging effects on superoxideradicals [J]. Food Chemistry, 1999, 64 (4) : 555-559.
- [20] Azyadeth F B M, Jesus S G S, Olga B C N, *et al.* Validation of a micro-assay based on the pH differential method to quantify total monomeric anthocyanins in red cabbage (*Brassica oleracea* var. capitata frubra)[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2022, 16(5): 3967-3976.
- [21] Sajid L, Paul A. W, Russell A. B, *et al.* Metabolic profiling provides unique insights to accumulation and biosynthesis of key secondary metabolites in annual pasture legumes of mediterranean origin[J]. Metabolites, 2020, 10(7): 267.
- [22] Garzon G A, Manns D C, Ridel K, *et al.* Identification of phenolic compounds in petals of nasturtium flowers (*Tropaeolum majus*) by high-performance liquid chromatography coupled to mass spectrometry and determination of oxygen radical absorbance capacity (ORAC)[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2015, 63(6): 1803-1811.
- [23] Lee H Y, Lee J H, Shin E C, *et al.* Changes in chemical compositions and antioxidant activities from fresh to fermented red mountain-cultivated ginseng[J]. Molecules, 2022, 27(14): 4550.
- [24] Narayan P P, Prabodh S, Rakesh S, *et al.* Chemical composition, enantiomeric distribution, antimicrobial and antioxidant activities of *Origanum majorana* L. essential oil from nepal[J]. Molecules, 2022, 27(18): 6136-6136.
- [25] Chen G L, Chen S G, Xie Y Q, *et al.* Total phenolic, flavonoid and antioxidant activity of 23 edible flowers subjected to in vitro digestion [J]. Journal of Functional Foods, 2015, 17: 243-259.
- [26] 陈智力, 王秋红, 匡海学. 蓝靛果不同提取部位花青素、多酚类的含量测定及体外抗氧化活性[J]. 中国实验方剂学杂志, 2016, 22(1): 48-52.
- [27] 徐春明, 庞高阳, 李婷. 花青素的生理活性研究进展[J]. 中国食品添加剂, 2013(3): 205-210.
- [28] Kat C D, Mazza G J, Holub B J. Anthocyanins exist in the circulation primarily as metabolites in adult men[J]. The Journal of Nutrition, 2005, 135(11): 2582-2588.
- [29] 张欣. 黑果腺肋花楸原花青素的提取, 抗氧化及其抑菌活性研究[D]. 长春: 吉林大学, 2021.
- [30] 邵郅胜, 杨波, 朱成, 等. 不同生长阶段欧李叶片酚类物质含量及其抗氧化性[J]. 西北植物学报, 2022, 42(10): 1720-1727.
- [31] 朱文华, 杨为海. 澳洲坚果花发育过程中抗氧化物质含量及抗氧化活性的变化[J]. 经济林研究, 2023, 41(1): 63-70.
- [32] Kasunmala I G G, Navaratne S B, Wickramasinghe I. Antioxidant activity and physicochemical properties changes of *Melastoma malabathricum* (L.) and *Syzygium caryophyllatum* (L.) fruit during ripening [J]. International Journal of Fruit Science, 2020, 20(S3): 1819-1828.
- [33] 王向东, 马艳芝, 张胜珍, 等. 不同玫瑰品种抗氧化能力比较与综合评价[J]. 农学学报, 2022, 12(11): 37-41
- [34] Ratchuporn S, Apinya R, Ratchadawan P, *et al.* Phytochemical and nutritional compositions and antioxidants properties of wild edible flowers as sources of new tea formulations[J]. NFS Journal, 2021, 24: 15-25.
- [35] Klimczak I, Maacka M, Szlachta M, *et al.* Effect of storage on the content of polyphenols, vitamin C and the antioxidant activity of orange juices[J]. Journal of Food Com-

- position and Analysis, 2006, 20(3):313–322.
- [36] 许英一, 王宇, 杨伟光. 紫花苜蓿叶总黄酮提取及抗氧化性[J]. 草地学报, 2018, 26(3):757–763.
- [37] 卢柏山, 董会, 史亚兴, 等. 不同品种鲜食玉米体外抗氧化能力综合评价[J]. 华北农学报, 2021, 36(S1):101–110.
- [38] Yan S P, Chong P F, Zhao M. Effect of salt stress on the photosynthetic characteristics and endogenous hormones, and a comprehensive evaluation of salt tolerance in *Reaumuria soongorica* seedlings[J]. Plant Signaling & Behavior, 2022, 17(1):2031782.
- [39] Ji X Y, Tang J L, Fan W, et al. Phenotypic differences and physiological responses of salt resistance of Walnut with four rootstock types[J]. Plants, 2022, 11(12):1557.

Comprehensive Evaluation of Antioxidant Capacity of *Iris lactea* Accession Petals

LI Nan^{1,2}, MAO Pei-chun¹, ZHENG Ming-li¹, YUN Lan², MENG Lin^{1**},

TIAN Xiao-xia^{1*}

(1. Institute of Grassland, Flowers and Ecology, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100089, China; 2. College of Grassland, Resources and Environment, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010000, China)

Abstract: [Objective] In order to explore the differences in antioxidant capacity of petals of various germplasm materials of *Iris lactea* Pall. var. *chinensis* (Fisch.) Koidz., the accessions of *I. lactea* with strong antioxidant capacity were screened out, which would lay a foundation for the evaluation, development and utilization of *Iris lactea* accessions. Method In this paper, 22 *I. lactea* accessions under different habitat conditions in 6 provinces of China were selected to determine anthocyanin, flavonoid, total phenol, proanthocyanidin, hydroxyl radical scavenging rate and total antioxidant capacity of petals at full flowering stage, and the correlation between each index was analyzed. At the same time, the antioxidant capacity of each material was comprehensively evaluated by principal component analysis combined with membership function method. [Result] (1) The results showed that there were some differences in the content of each component among 22 *I. lactea* accessions. Among them, the coefficient of variation of proanthocyanidin content was the largest (64.41%), and the coefficient of variation of total antioxidant capacity content was the smallest (4.53%). The anthocyanin content of the 22 samples was 0.15~0.56 mg/g, the flavonoid content was 0.51~1.34 mg/g, the total phenol content was 1.19~1.90 mg/g, the proanthocyanidin content was 0~0.19 mg/g, and the hydroxyl radical scavenging rate ranged from 24.97% to 50.82%. The total antioxidant capacity was between 1.98 μ mol Trolox/g and 2.36 μ mol Trolox/g. (2) The results of correlation analysis showed that there were different degrees of correlation among the six physiological and biochemical indexes. According to the results of Euclidean distance cluster analysis, the antioxidant capacity of 22 *I. lactea* accessions could be clustered into three categories, of which 8 had strong antioxidant capacity, including ML011, ML012, ML013, ML014, ML016, ML019, ML029 and ML035, 9 had moderate antioxidant capacity and 5 had weak antioxidant capacity. (3) The results of comprehensive comparison of antioxidant capacity of *I. lactea* accessions by principal component analysis combined with membership function method were ML014 > ML013 > ML011 > ML012 > ML035 > ML19 > ML016 > ML029 > ML018 > ML008 > ML010 > ML006 > ML020 > ML005 > ML009 > ML007 > ML023 >

ML017 > ML032 > ML015 > ML004 > ML001, which were highly consistent with the results of cluster analysis. 【Conclusion】 The above research shows that ML011, ML012, ML013, ML014, ML016, ML019, ML029 and ML035 have strong antioxidant capacity in 22 *I. licatea* accessions, which provides scientific basis for the excavation of excellent Iris germplasm resources and the development and utilization of products.

Key words: *Iris lactea*; Anthocyanins; Antioxidant capacity; Comprehensive evaluation

(责任编辑 康宇坤)

(上接 87 页)

Effect of Cp2 lipopolysaccharides of *Erwinia persicina* on the growth and development of *Caenorhabditis elegans*

ZHANG Hong, HUANG Rong, YAO Bo, ZHAO LIANG, ZHANG Zhen-fen*

(College of Pratacultural Science, Gansu Agricultural University, Key Laboratory of Grassland Ecosystem, Ministry of Education, Pratacultural Engineering Laboratory of Gansu Province, Sino-U. S. Center for Grassland Ecosystem Sustainability, Lanzhou 730070, China)

Abstract: 【Objective】 The study is aimed to investigate the effect of Cp2 Lipopolysaccharides (Cp2-LPSe) of *Erwinia persicina* on the growth and development of *Caenorhabditis elegans*. 【Method】 In this experiment, Cp2-LPSe was extracted and purified by kit method using wild-type *Caenorhabditis elegans* N2 as the material. Different concentrations of Cp2-LPSe (0, 0.157, 0.314, 0.471, 0.628 and 0.785 EU/mL) were used to treat *Caenorhabditis elegans* with different concentrations of Cp2-LPSe (0, 0.157, 0.314, 0.471, 0.628 and 0.785 EU/mL) to determine the number of throat pumps, reproductive capacity, body fat content, life span, movement speed, movement amplitude, body bending frequency and other indicators. 【Result】 The experiment showed that the growth and development of *Caenorhabditis elegans* had a general trend of first rising and then decreasing under the treatment of each Cp2-LPSe concentration. When the concentration of Cp2-LPSe was 0.314 EU/mL, all indexes except body fat content reached a maximum and were significantly higher than those of the control ($P < 0.05$), and when the concentration exceeded 0.314 EU/mL, all indexes were significantly lower than those of control ($P < 0.05$). 【Conclusion】 0.314 EU/mL Cp2-LPSe treatment of *Caenorhabditis elegans* could increase the number of throat pumps, movement speed, body bending frequency and movement amplitude, improve its reproductive ability, prolong its lifespan, and promote its growth and development without increasing its body fat content. This study provides a theoretical basis and practical basis for the development of Cp2-LPSe as a anti-aging agent.

Key words: Cp2 Lipopolysaccharides of *Erwinia persicina*; *Caenorhabditis elegans*; growth and development

(责任编辑 康宇坤)