不同寒旱地域黑枸杞花青素成分及抗氧化性分析

王海歌[1,#]，李嘉俊[1,#]，叶堃鑫[1]，徐心雨[1]，范富[2]，常杰[1,*]

（1. 内蒙古民族大学生命科学与食品学院，通辽 028000；2. 内蒙古民族大学农学院，通辽 028000）

摘要：以青海省都兰县、青海省柴达木、内蒙古化德县三个旱寒地区黑枸杞为试验材料，采用高效液相色谱－电喷雾－三重四级质谱法（HPLC−ESI−TSQ/MS）分析黑枸杞花青素的成分及种类，并考察黑枸杞花青素的抗氧化能力。结果表明，三个地区黑枸杞均含有 2 种花青素和 3 种花色苷，但不同地区黑枸杞的花青素含量差异较大，化德县黑枸杞总花青素含量最高 40.078 mg/L；化德县黑枸杞花青素清除 DPPH·、$\cdot O^{2-}$ 能力最强，分别 2.24、3.27 mg/mL，三地黑枸杞花青素清除·OH 能力相近，其中柴达木的黑枸杞花青素清除·OH 能力最强，为 4.11 mg/mL。三地黑枸杞花青素清 DPPH·的能力，均显著高于清除·OH、$\cdot O^{2-}$ 的能力，且自由基清除率与提取液的浓度呈量效关系。本研究初步阐明 3 种旱寒地域黑枸杞花青素成分特征及其抗氧化活性差异，为我国黑果枸杞资源的开发与利用提供依据。

关键词：黑枸杞；花青素；含量；抗氧化

中图分类号：TS202.1/TS202.3　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1006−2513（2025）11−0008−0008

doi：10.19804/j.issn1006−2513.2025.11.002

Analysis of anthocyanidins components of black wolfberries from cold and arid areas and their antioxidant activity

WANG Haige[1,#]，LI Jiajun[1,#]，YE Kunxin[1]，XU Xinyu[1]，FAN Fu[2]，CHANG Jie[1,*]

（1. College of Life Sciences and Food，Inner Mongolia University for Nationalities，Tongliao 028000；
2. College of Agriculture，Inner Mongolia University for Nationalities，Tongliao 028000）

Abstract：Black wolfberry（*Lycium ruthenicum* Murr.）from three typical cold and drought areas−−Dulan county and Qaidam county of Qinghai province，and Huade county of Inner Mongolia−−were selected as experimental materials. Anthocyanin components and types were analyzed using high performance liquid chromatography−electrospray ionization−triple stage quadrupole /mass spectrometer（HPLC−ESI−TSQ/MS）. Antioxidant capacities of anthocyanins were assessed. The results showed that two types of anthocyanins and three types of anthocyanins glycosides were detected in black wolfberry from all three regions. However，significant regional differences were observed in anthocyanidins content. The highest total anthocyanidins content was found in Huade county（40.078 mg/L）. Samples from Huade showed the highest DPPH· and $\cdot O^{2-}$scavenging ability of 2.24，3.27 mg/mL，respectively. In terms of ·OH radical scavenging ability，the Qaidam sample exhibited the strongest effect（4.11 mg/mL）. All three samples demonstrated significantly stronger DPPH· scavenging activity compared to ·OH and $\cdot O^{2-}$free radical. and the

收稿日期：2025−02−26　　# 共同第一作者

基金项目：内蒙古自治区科技厅、财政厅批准立项“科尔沁沙地黑果枸杞秸秆营养钵育苗种植技术集成与示范”2018 科技创新引导资金项目（KCBJ2018027）

作者简介：王海歌（1997−），女，硕士，研究方向：功能性食品与健康。E−mail：1757638254@qq.com
李嘉俊（2005−），男，本科，研究方向：食品质量与安全。E−mail：3130894848@qq.com

＊通信作者：常杰（1980−），女，博士，教授，研究方向：功能性食品。E−mail：changjieouc@163.com

radical scavenging rates showed a dose−effect relationship with extract concentration. This study provides preliminarily insights into anthocyanidins composition and antioxidant variations of black wolfberry grown in different cold and arid regions，offering a scientific foundation for the targeted development and utilization of black wolfberry resources in China.

Keywords：black wolfberry；anthocyanin；content；antioxidant

黑果枸杞（*Lycium ruthenicum* Murr.）为茄科枸杞属植物，蒙名为“乔诺英—哈尔马格”，藏名为“旁玛”。该植株对土壤要求低、抗逆性强，具有生态固沙、保持水土等特性[1]，主要生长在我国青海、宁夏、内蒙古等阳光充足，昼夜温差大的西北部地区[2−3]，此类地区有利于黑枸杞果实（简称黑枸杞）中多种营养成分积累和维持，其浆果营养价值高，富含多糖、花青素、原花青素等多种功能性成分。黑果枸杞被誉为“花青素之王”是已知花青素含量最高的植物[4−5]。花青素能通过影响关键信号转导过程直接或间接地发挥抗氧化、降血糖、调节肠道菌群、抗疲劳等健康效应[6−11]，还能作为一种安全健康、药食两用的天然色素应用在食品行业中，具有较高研究价值，已成为近年来的研究热点[12−17]。

由于地貌、海拔、气候条件等不同，黑枸杞在不同地域栽培品质及花青素成分含量差异较大。打造具有地域特色的农产品品牌，奠定依托于特定地区自然资源和生态环境差异化的独特品质农产品发展，是当下食品开发研究的热点之一[18−23]。本文利用 HPLC−ESI−TSQ/MS 法分析黑枸杞中花青素的成分及含量，测定抗氧化活性。由于花青素因易降解的不稳定特性，常与葡萄糖、半乳糖或阿拉伯糖相连，在花青素 C 环的 C3 或 A 环的 C5 或 C7 位置糖基化形成相应的单糖、二糖或三糖基花色苷存在于植物中，因此黑枸杞花色苷种类繁多[24−26]。对于黑枸杞中可能存在的多种花青素异构体，如飞燕草素 −3−O− 阿拉伯糖苷和飞燕草素 −3−O− 葡萄糖苷，它们的紫外 − 可见吸收光谱可能非常相似，在 HPLC− ESI−TSQ/MS 质谱图中，它们的碎片离子模式会有所不同，从而可以准确区分，同时还具有定量分析优势，如灵敏度高和定量准确性，可以准确捕捉复杂物质中痕迹低的成分。本文结合三地生长环境考究黑枸杞中花青素成分及抗氧化活性，为我国黑果枸杞资源开发、利用与研究提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

黑枸杞样品：青海省都兰县、青海省柴达木诺木洪、内蒙古化德县三个地区 9～10 月份成熟季节采摘的新鲜黑枸杞，去湿吸水后，在 60 ℃ 烘箱中烘干；花青素标准品（飞燕草素（HPLC ⩾ 97%）、矢车菊素（HPLC ⩾ 96%）、矮牵牛素（HPLC ⩾ 99%）、天竺葵素（HPLC ⩾ 97%）、芍药素（HPLC ⩾ 97%）、锦葵素（HPLC ⩾ 97%））：上海源叶生物科技有限公司。

乙醇、乙腈、甲酸（色谱纯）：德国默克股份两合公司；盐酸（分析纯）：成都市科龙化工试剂工厂；DPPH（HPLC ⩾ 97%）、Tris−HCl 缓冲溶液：北京索莱宝科技有限公司；硫酸亚铁、水杨酸（分析纯）：天津市大茂化学试剂厂；双氧水溶液（分析纯）：国药集团化学试剂有限公司；邻苯三酚（分析纯）：天津市天力化学试剂有限公司；超纯水。

1.2 仪器与设备

SP−TSQ Quantum Ultra 高分辨 HPLC−ESI−MS/MS 联用仪：SHISEIDO、Thermo；BR4I 离心机：Thermo；舜宇恒平 FA−1004 电子天平：上海舜宇恒平科学仪器有限公司；MSI 涡旋混合器：德国 IKA 公司；WB100−2F 数显恒温水浴锅：群安科学仪器有限公司；UV−1600 紫外分光光度计：上海美普达仪器有限公司。

1.3 抗氧化活性测定

1.3.1 DPPH·清除率测定

参照杭园园[27]、王苑馨等[28]报道的方法稍作改动，在比色管中加入 2 mL 不同浓度的样品稀释液和 2 mL 的 DPPH 乙醇溶液，混匀后静止 20 min，于 517 nm 处，测定吸光值，记作 A_x，将不同浓度的样品稀释液与 95% 乙醇溶液混合加

入至比色管中，记作 A_y，将不同浓度的样品稀释液与 2 mL 按 1∶1 混合的 DPPH 乙醇溶液和 95% 的乙醇溶液加入至比色管中记作 A_0。以 Vc 做对照，试验重复操作 6 次。

$$\text{DPPH}\cdot\text{清除率}/\% = \frac{A_0-(A_x-A_y)}{A_0}\times 100 \quad (1)$$

1.3.2 ·OH 清除率测定

参照秦丹丹等 [29] 方法稍作改动，依次在比色管中加入 9 mmol/L 的硫酸亚铁溶液 1 mL、9 mmol/L 的水杨酸－乙醇溶液 1 mL、不同浓度的样品稀释液 1 mL、8.8 mmol/L 的双氧水溶液 1 mL，并用蒸馏水定容至 10 mL，于 35 ℃下水浴 10 min，以空白试剂做参比，在 510 nm 处测定吸光值 A_x，空白试剂吸光值记作 A_0，以 Vc 做对照，试验重复操作 6 次。

$$\cdot\text{OH 清除率}/\% = \frac{A_0-A_x}{A_0}\times 100 \quad (2)$$

1.3.3 $\cdot O^{2-}$ 自由基清除率测定

参照曹叶霞 [30]、于长春等 [31] 方法稍作改动，配制 25 mmol/L 的邻苯三酚溶液在 37 ℃的恒温水浴锅中恒温水浴，在比色管中加入 4.5 mL 的 0.1 mol/L 的 Tris−HCl 溶液和 2 mL 蒸馏水，于 37 ℃恒温水浴锅恒温水浴 20 min，在比色管中加入 0.5 mL 的 25 mmol/L 的邻苯三酚溶液，滴加 1 mL10 mol/L 的盐酸终止反应，迅速摇匀后每隔 30 s 在 320 nm 处测定吸光值记作 A_X，空白对照溶液吸光度记作 A_0。以 Vc 做对照，试验重复操作 6 次。

$$\cdot O^{2-}\text{清除率}/\% = \frac{A_0-A_x}{A_0}\times 100 \quad (3)$$

1.4 花青素成分含量测定

1.4.1 标准溶液的制备

采用体积比为乙醇：水：盐酸溶液（3 moL/L）=3∶2∶1 配制花青素提取液；分别称取 0.0500 g 的花青素标准品，用提取液定容至 5 mL，配制为 10 mg/L 的花青素标准品母液，储存于 −20 ℃冰箱，避光保存备用。取母液逐级稀释浓度为 10.00、1.000、0.500、0.100、0.050、0.005 mg/L 的标准品溶液，以浓度（X）为横坐标，峰面积（Y）为纵坐标建立标准曲线方程。

1.4.2 样品处理

将黑枸杞用高速万能粉碎机粉碎，过 80 目筛，取 1.0 g 黑枸杞粉末样品于比色管中，加入提取液定容至 100 mL，超声提取 30 min；提取后于 45 ℃水浴锅中水解 40 min，待水解液冷却至室温，以 12000 r/min 离心 10 min，取上清液过 0.45 μm 微孔过滤膜过滤，待检测。

1.4.3 液相条件

色谱系统：色谱柱：Waters BEH C18（2.1×100 mm，1.8 μm）；检测波长：525 nm；柱温：40 ℃；进样量：2 μL；洗脱梯度如表 1。

1.4.4 质谱条件

质谱参数：电喷雾离子源：正离子模式；毛细管电压：3.5 kV；离子源温度：330 ℃；源内气体：N_2；采集模式：Positive−PRM；扫描范围：m/z 50 ～ 640。

表 1 洗脱梯度条件

Table 1 Gradient elution conditions

时间	流速 /(mL/min)	1% 甲酸水 /%	乙腈 /%
0	0.3	95	5
3	0.3	95	5
16	0.3	70	30
19	0.3	0	100
20	0.3	0	100
21	0.3	95	5
25	0.3	95	5

2 结果与分析

2.1 黑枸杞花青素定性及定量分析

6 种花青素标准品，在 m/z 50 ～ 640扫描条件下，总离子流图表明，6 种花青素类型的相对保留时间分别为：飞燕草素 8.66 min、矢车菊素 9.88 min、矮牵牛素 10.50 min、天竺葵素 11.06 min、芍药素 11.44 min、锦葵素 11.72 min，见图 1。

都兰县、诺木洪、化德县三个地区的黑枸杞花青素成分，在 m/z 50 ～ 640 扫描条件下，总离子流图表明，均分离出 5 个有效峰，按保留时间的顺序标记为 S_1 ～ S_5，见图 2。

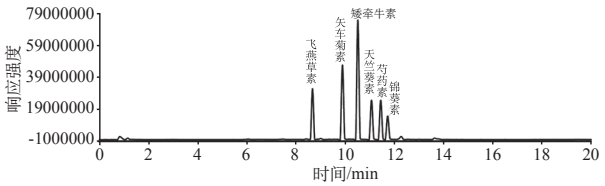

图 1　六种花青素总离子流图

Figure 1　Total ion flow map of six anthocyanidins

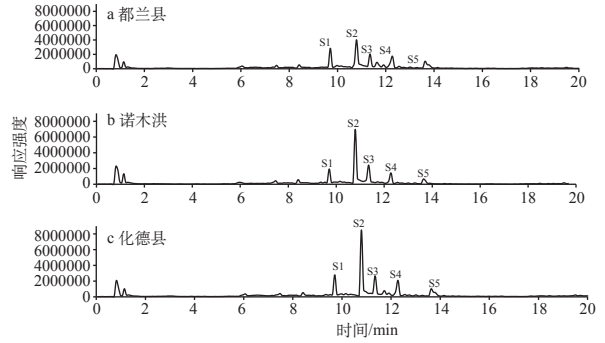

图 2　不同地区黑枸杞花青素总离子流图

Figure 2　Total ion flow map of *Lycium ruthenicum* anthocyanidins in different regions

由图 3 可知，成分 S_1～S_5 母离子与碎片母离子皆相同。其中 S_2 母离子 m/z 为 317.06，碎片离子 m/z 为 302.04，与矮牵牛素标准品相同，因此 S_2 为矮牵牛素，如图 3a 所示。S_3 母离子 m/z 为 271.06，碎片离子 m/z 为 272.07，与天竺葵素标准品相同，因此 S_3 为天竺葵素，如图 3b 所示。三个地区黑枸杞花青素的 S_2 和 S_3 的母离子与碎片离子均相同，S_2 和 S_3 分别为矮牵牛素和天竺葵素。将三个地区的黑枸杞花青素的 S_2 和 S_3 的峰面积代入相应的标准曲线方程，可计算得出都兰县、诺木洪、化德县黑枸杞矮牵牛素含量分别为 2.964、4.267、9.060 mg/L；天竺葵素含量分别为 0.062、0.082、0.087 mg/L。

对剩余有效峰 S_1、S_4、S_5 进行分析，因为糖基不稳定易断裂，所以花色苷类化合物在 ESI 离子源质谱碎裂时，通常先掉落糖基，首先将得到一个丢失糖的碎片离子 m/z。参考已报道的参考文献中的信息，花色苷母离子 m/z 与碎片离子 m/z，推测黑枸杞花青素成分结构如下：

成分 S_1：S_1 的母离子 m/z 为 435.09，碎片离子 m/z 为 303.04 $[M+H-132]^+$，如图 3c 所示，花色苷糖基断裂丢失阿拉伯糖苷，与文献报道中的飞燕草素苷元相符 [32−33]，推测成分 S_1 为飞燕草素−3−O−阿拉伯糖苷。

成分 S_4：S_4 的母离子 m/z 为 465.10，碎片离子 m/z 为 303.04 $[M+H-162]^+$，如图 3d 所示，花色苷糖基断裂丢失葡萄糖苷或者半乳糖苷，与文献中报道的飞燕草素苷元相符 [34−35]，推测成分 S_4 为飞燕草素−3−O−葡萄糖苷或飞燕草素−3−O−半乳糖苷。

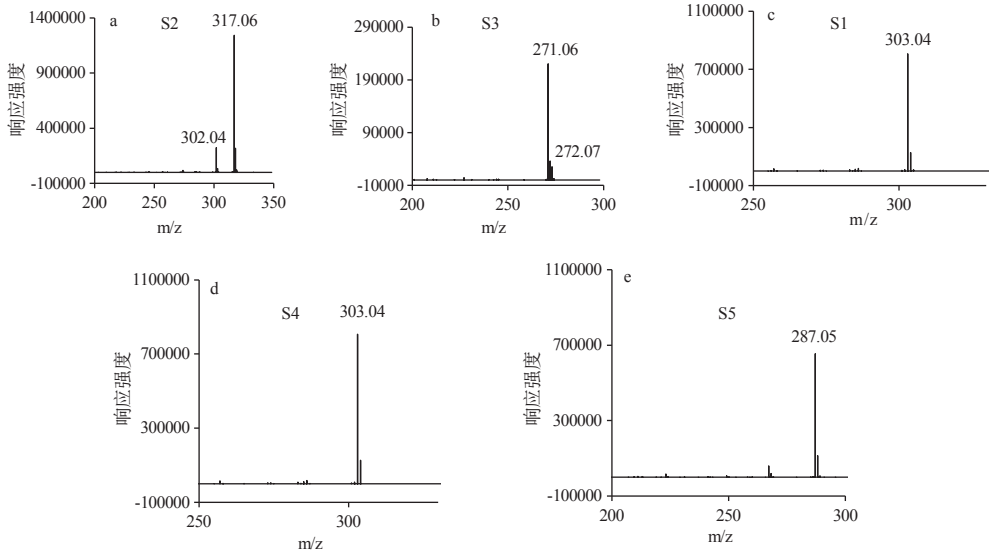

图 3　花青素 MS^2 质谱图

Figure 3　MS^2 quality spectrum of anthocyanidins

成分 S_5：S_5 的母离子 m/z 为 449.10，碎片离子 m/z 为 287.06 $[M+H-162]^+$，如图 3e 所示，花色苷糖基断裂丢失葡萄糖苷或者半乳糖苷，与文献中报道的矢车菊素苷元相符 [32, 36]，推测成分 S_5 为矢车菊素 −3−O− 葡萄糖苷或者矢车菊素 −3−O− 半乳糖苷。

经 HPLC−ESI−TSQ/MS 对黑枸杞花青素进行分离鉴定，均共鉴定出 5 种花青素，包含矮牵牛素、天竺葵素、飞燕草素 −3−O− 葡萄糖苷 / 半乳糖苷、矢车菊素 −3−O− 葡萄糖苷 / 半乳糖苷、飞燕草素 −3−O− 葡萄糖苷 / 半乳糖苷。含量和种类如表 2 所示。不同产地黑枸杞花青素含量按照从高到低的顺序依次为：化德县＞都兰县＞诺木洪，这些花青素的种类在不同地区间没有差异，但不同地区花青素含量差异较大。化德县黑枸杞中矮牵牛素含量是都兰县 3 倍，诺木洪黑枸杞中飞燕草素 −3−O− 阿拉伯糖苷含量约是都兰县的 1.6 倍，都兰县黑枸杞中飞燕草素 −3−O− 葡萄糖苷 / 半乳糖苷的含量高于柴达木诺木洪和化德县。三个地区均属于旱寒地域，有昼夜温差大、干旱少雨、日照充沛辐射强、土壤沙质盐碱化的特点，属于典型的植物生长特殊环境，对花青素积累有一定程度影响。但在气候上都兰县、诺木洪属于高原大陆性气候，化德县属于半干旱大陆性季风气候，雨水积累更多，温度变化更为温和，更具有生态多样性，对黑枸杞的生长与花青素的积累有正向的作用。汪洋等 [33] 测定了青海省及其他地区的黑枸杞花青素含量有差异，与本实验研究结果类似，即不同地区黑枸杞花青素含量差异较大。花青素精确复杂的合成调控网络确保了其能够在合适的时间、空间内沉着富集，从而提高植物对环境的适应性 [37]。

表 2　三个西北地区黑枸杞花青素种类和含量

Table 2　Three northwest region black wolfberry anthocyanidins species and content

花青素	青海省都兰县 /(mg/L)	柴达木诺木洪 /(mg/L)	内蒙古化德县 /(mg/L)
矮牵牛素	2.964	4.267	9.060
飞燕草素−3−O− 阿拉伯糖苷	5.695	8.164	8.995
天竺葵素	0.062	0.082	0.082
矢车菊素−3−O− 葡萄糖苷 / 半糖苷	0.463	0.424	0.545
飞燕草素−3−O− 葡萄糖苷 / 半乳糖苷	28.174	22.849	21.396
总含量	37.358	35.786	40.078

2.2　黑枸杞花青素抗氧化能力

以 Vc 为阳性对照，对比三个地区黑枸杞花青素清除 DPPH·、·OH、$·O^{2-}$ 的能力，由图 4 ～图 6 可以看出，在试验浓度范围内，三个地区黑枸杞花青素均随着浓度增大，抗氧化能力也增强，具有明显的量效关系。造成此结果的原因可能与三地光照因素有关，三地均日照充沛辐射强，光照对黑枸杞花青素的积累具有显著影响，这是因为调控花青素合成的酶类大多属于光调节酶，光照特别是强光能够调节花青素合成的相关基因，如 CHS、CHI、DFR 等的表达，推动花青素的合成，光照时间也与花青素积累密切相关，在一定范围内，光照时长越长，植物体内花青素积累量就越多 [38]，花青素含量越高则表现为抗氧化能力越强。

2.2.1　DPPH·清除能力

由图 4 可知，在三个地区黑枸杞花青素对 DPPH·清除能力，化德县黑枸杞花青素 DPPH·清除率高于 Vc 和其他两个地区 DPPH·清除率。随着浓度的增加，化德县和诺木洪黑枸杞花青素 DPPH· 清除率差距减小，在 4.5 mg/mL 时，DPPH·清除率最相近，清除率分别为 90.44% 和 88.94%。当黑枸杞花青素浓度＜ 2.5 mg/mL 时，都兰县黑枸杞花青素低于 Vc 的 DPPH·清除率，当黑枸杞花青素浓度＞ 2.5 mg/mL 时，三个地区黑枸杞花青素 DPPH·清除率均高于 Vc。和已报道的相关结果具有良好的一致性 [27, 39−40]，在一定范围内，黑枸杞花青素 DPPH·清除能力强于 Vc。

2.2.2　· OH 清除能力

图 5 展示了三个地区的黑枸杞花青素·OH 清除能力。当浓度＜ 3.5 mg/mL 时，都兰县黑枸杞花青素·OH 清除能力强于诺木洪黑枸杞花青素，化德县黑枸杞花青素清除率最低，三个地区黑枸杞花青素·OH 清除率变化趋势不显著。当浓度为 4.5 mg/mL 时，化德县黑枸杞花青素·OH 清除率显著增加，并高于其他两个地区，可能缘由当地独特的光照或土壤条件促使花青素形成稳定聚合

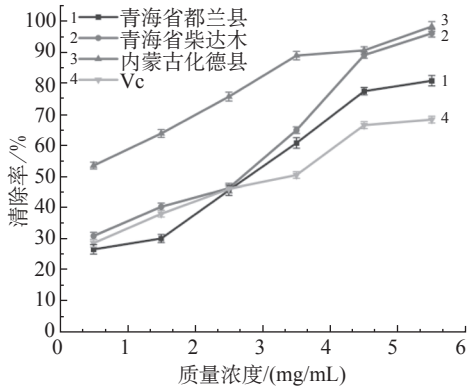

图 4　不同地区黑枸杞花青素清除 DPPH·能力

Figure 4　The DPPH· scavenging ability of anthocyanidins in blackberries from different regions

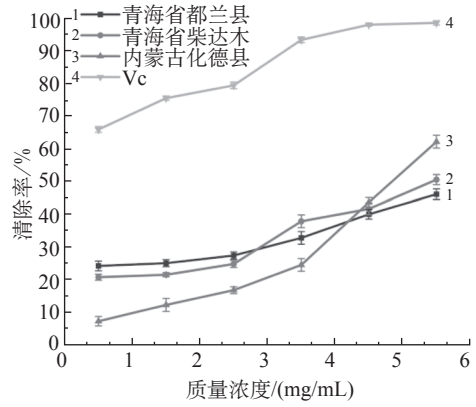

图 5　不同地区黑枸杞花青素清除·OH 能力

Figure 5　The hydroxyl radical（·OH）scavenging ability of anthocyanidins in blackberries from different regions

态或与酚酸等辅助成分结合，增强了高浓度下的自由基猝灭效率。实验表明 Vc 清除·OH 能力均高于三地黑枸杞花青素，杭园园、于长春等 [27, 31] 研究表明，Vc 清除·OH 能力高于黑枸杞花青素，与本实验研究结果一致。

2.2.3　· O^{2-} 清除能力

图 6 为三个地区黑枸杞花青素·O^{2-} 清除能力，都兰县黑枸杞花青素·O^{2-} 清除率低于 Vc 以及其他两个地区黑枸杞花青素。O^{2-} 的清除与人体健康息息相关，黑枸杞花青素的成分含量及清除·O^{2-} 的相关机制还需进一步探索。三个地区黑枸杞花青素浓度为 1.5 mg/mL 时，化德县和诺木洪黑枸杞花青素·O^{2-} 清除率与 Vc 最相近，当浓度＞ 3.5 mg/mL 时，Vc 清除·O^{2-} 能力高于三个地区的黑枸杞花青素，随浓度升高，化德县黑枸杞花青素·O^{2-} 清除率与 Vc 逐渐接近，诺木洪黑枸杞花青素·O^{2-} 清除率变化趋势不明显。

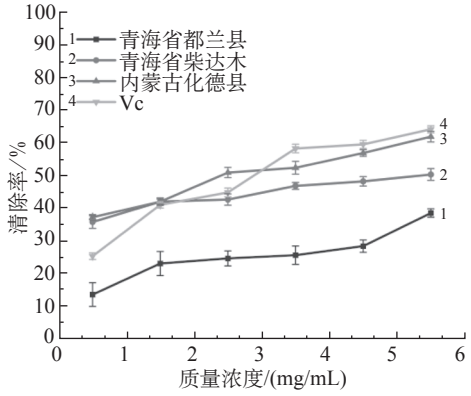

图 6　不同地区黑枸杞花青素清除·O^{2-} 能力

Figure 6　The ·O^{2-} scavenging ability of anthocyanidins in blackberries from different regions

为了进一步说明黑枸杞花青素与抗氧化活性之间的相关性，进一步计算 IC_{50} 值（DPPH·法、·OH 法、·O^{2-} 法）与花青素含量之间皮尔逊相关系数，根据改良寇式法计算 IC_{50} 值：

$$\lg IC_{50}=Xm-I[P-\frac{(3-Pm-Pn)}{4}] \quad (4)$$

式中：*Xm*：lg 最大剂量；*I*：lg（最大剂量 / 相邻剂量）；*P*：自由基清除率之和；*Pm*：最大自由基清除率；*Pn*：最小自由基清除率。

表 3　三个西北地区黑枸杞花青素清除自由基的 IC_{50} 值

Table 3　IC_{50} values for free radical scavenging by anthocyanidins in blackberries from three Northwest regions

黑枸杞	IC_{50} 值 /(mg/mL)		
	DPPH·	·OH	·O^{2-}
青海省都兰县	3.12	4.13	4.54
青海省柴达木诺木洪	2.80	4.11	3.54
内蒙古化德县	2.24	4.38	3.27

黑枸杞花青素抗氧化活性研究结果表明，不同地区的黑枸杞花青素抗氧化能力有一定差异。在试验浓度范围内，三个黑枸杞花青素清除 DPPH· 能力分别为 3.12、2.80、2.24 mg/mL，

强于清除·OH 和·O^{2-} 的能力，化德县黑枸杞花青素清除 DPPH·和·O^{2-} 能力分别为 2.24、3.27 mg/mL，强于其他两地。对三个不同西北地区黑枸杞样品 IC_{50} 值与花青素含量进行相关性分析，发现 IC_{50} 值（·O^{2-}）与天竺葵素呈极显著负相关（$P<0.01$），表明天竺葵素是主要的抗氧化物质。与白粉娥等 [36] 研究结果一致，不同的花青素成分具有不同的抗氧化活性，天竺葵素的抗氧化能力强于矮牵牛素。

3 结论与展望

在三种黑枸杞均共鉴定出矮牵牛素、天竺葵素、飞燕草素 −3−O− 葡萄糖苷 / 半乳糖苷、矢车菊素 −3−O− 葡萄糖苷 / 半乳糖苷、飞燕草素 −3−O− 葡萄糖苷 / 半乳糖苷等 5 种花青素。不同地区间花青素的种类没有差异，但含量差异较大，且不同地区的黑枸杞花青素抗氧化能力有一定差异，IC_{50} 值（·O^{2-}）与天竺葵素呈极显著负相关（$P<0.01$），表明天竺葵素是主要的抗氧化物质，具有较强的抗氧化活性。

黑枸杞具有多种药理性，以其天然抗氧化剂花青素而闻名。目前对黑枸杞活性成分作用机制研究仍有待深入，可探究天竺葵素的核心抗氧化作用，结合其与超氧阴离子清除能力（IC_{50}）的强负相关性，系统揭示其通过清除自由基、调控氧化应激信号通路（如 Nrf2/ARE）的作用靶点；另外，矮牵牛素、矢车菊素等组分可能存在协同增效机制，构建多组分活性预测模型，指导花青素的开发利用和配方设计很有必要。未来需加强多学科间的交叉研究，深入揭示地域环境影响黑枸杞的功能效用，发掘环境诱导的分子响应机理，建立“产地溯源 − 加工参数 − 活性保留”数据库，实现从原料优选到功能食品、医用抗氧化剂等高附加值产品的全链质控，推动黑枸杞产业向标准化、高值化升级。

参考文献：

[1] 张建山 . 青海省黑枸杞的生物学特性及研究开发综述 [J]. 青海农技推广，2022（4）：2−4.
[2] 邓瑜 . 黑枸杞花青素的提取及软胶囊制备工艺研究 [D]. 石河子：石河子大学，2022.
[3] 刘超 . 黑枸杞花色苷的提取及其稳定性和抗氧化活性的研究 [D]. 重庆：重庆大学，2018.
[4] 任小娜，曾俊，王玉涛 . 黑果枸杞的植物化学成分及生物活性研究现状 [J]. 食品工业，2014，35（11）：231−235.
[5] Ai P Y，Wei G，A B，et al. Multi−omics reveal the molecular basis of LrAN2 overexpression in black goji callus promoting the excessive accumulation of petanin，a promising food blue colorant [J]. Food Frontiers，2024，5（5）：2221−2234.
[6] 眭静怡，王敏，徐丽萍 . 黑枸杞活性成分的提取、开发利用研究进展 [J]. 现代食品，2023，29（3）：49−51，58.
[7] 毕樱馨 . 五种食源性活性成分抗运动疲劳的作用及机制研究 [D]. 长春：长春工业大学，2022.
[8] 陈思宇 . 不同干燥方式对黑枸杞抗炎、抗氧化活性及肠道体外发酵的影响 [D]. 兰州：兰州大学，2022.
[9] 宋瑞龙，王紫薇，章海风 . 黑枸杞与红枸杞营养及活性成分比较 [J]. 美食研究，2021，38（1）：84−87.
[10] 杨丰绮，胡铁军，唐玉娇，等 . 黑枸杞提取物与红枸杞提取物抗氧化效果的比较 [J]. 江苏调味副食品，2018，35（1）：31−33.
[11] Zeng S H，Lin S，Wang Z Q，et al. The health−promoting anthocyanin petanin in *Lycium ruthenicum* fruit：A promising natural colorant [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition，2024，64（28）：10484−10497.
[12] 解蕙铭 . 紫山药黑枸杞复合酸乳发酵工艺优化及体外模拟胃肠消化的研究 [J]. 食品科技，2023，48（5）：97−106.
[13] 贾丽敏，王伟，柏婷，等 . 枸杞多糖对高糖诱导衰老小鼠角膜上皮细胞增殖的影响 [J]. 吉林医学，2023，44（7）：1752−1755.
[14] 李倩，邓艳红，赵聪，等 . 十一种植物中原花青素单体和低聚体的比较分析 [J]. 陕西科技大学学报，2023，41（4）：58−63.
[15] 胡佳坤 . 蒙古黑果枸杞果实多糖的分离工艺、抗氧化活性及其益生元应用 [D]. 杨凌：西北农林科技大学，2021.
[16] Lu Y Y，Kong X F，Zhang J H，et al. Composition changes in *Lycium ruthenicum* fruit dried by different methods [J]. Frontiers in Nutrition，2021，8：737521.
[17] Luan G X，Wang Y W，Ouyang J，et al. Stabilization of *Lycium ruthenicum* Murr. anthocyanins by natural polyphenol extracts [J]. Journal of Food Science，2021，86（10）：4365−4375.
[18] 杨学儒，王少牧 . 特色农业发展的县域共同富裕效应 [J]. 中国农村经济，2025（3）：81−100.
[19] Zahedi S M，Karimi M，Venditti A. Plants adapted to arid areas：Specialized metabolites [J]. Natural Product Research，2021，35（19）：3314−3331.
[20] Maldini M，Chessa M，Petretto G L，et al. Profiling and simultaneous quantitative determination of anthocyanins in wild *Myrtus communis* L. berries from different geographical areas in *Sardinia* and their comparative evaluation [J]. Phytochemical Analysis，2016，27（5）：249−256.
[21] 奉综涛，田梦乐，买地那·帕尔哈提，等 . 西藏三种枸杞基本营养成分及代谢物差异分析 [J/OL]. 食品与发酵工业，2025：1−17.（2025−02−17）. https://link.cnki.net/doi/10.13995/j.cnki.11−1802/ts.041838.
[22] 冯雷，罗长莲，郑津津，等 . 盐碱地野生和栽培黑果枸杞营养组分比较分析 [J]. 华北农学报，2024，39（S1）：101−107.
[23] 陈莎莎，索有瑞，白波，等 . 青藏高原黑果枸杞花青素稳

定性评价 [J]. 天然产物研究与开发，2017，29（2）：322−328.
[24] 刘润雨 . 红葡萄酒花色苷对 α− 葡萄糖苷酶活性的影响 [D]. 杨凌：西北农林科技大学，2022.
[25] Deng K，Ouyang J，Hu N，et al. Improved stability of blue colour of anthocyanins from *Lycium ruthenicum* Murr. based on copigmentation [J]. Molecules，2022，27（18）：6089.
[26] Mattioli R，Francioso A，Mosca L，et al. Anthocyanins：A comprehensive review of their chemical properties and health effects on cardiovascular and neurodegenerative diseases [J]. Molecules，2020，25（17）：3809.
[27] 杭园园，李悦，束彤，等 . 黑果枸杞花青素制备及其抗氧化活性研究 [J]. 食品科技，2018，43（5）：237−242.
[28] 王苑馨，宋娇娇，任寅印，等 . 不同品种草莓果实生物活性物质和抗氧化能力比较 [J]. 山西农业大学学报：自然科学版，2022，42（1）：69−76.
[29] 秦丹丹，曹慧馨，白洋，等 . 黑木耳黑枸杞复合饮料研制及其体外抗氧化性 [J]. 食品研究与开发，2020，41（3）：108−116.
[30] 曹叶霞，王泽慧，贺金凤，等 . 静乐黑枸杞多糖的提取及抗氧化性分析 [J]. 食品工业科技，2019，40（14）：196−202.
[31] 于长春，孙添添 . 三个不同地区黑枸杞花青素的抗氧化活性分析 [J]. 吉林师范大学学报：自然科学版，2019，40（1）：95−99.
[32] 李仲叶，韩豪，孙茜，等 . 黑枸杞中花青苷的定性分析及主要花青苷的抗氧化活性研究 [J]. 食品科技，2019，44（9）：216−222.
[33] 汪洋，丁龙，王四清 . 不同产地黑果枸杞中原花青素和花青素含量研究 [J]. 食品工业科技，2016，37（13）：122−126.
[34] 周银颖，薛莹，王乾龙，等 . UPLC−ESI−Q−TOF/MS 法筛查蓝莓中 77 种功能活性成分 [J]. 食品科技，2018，43（2）：286−292.
[35] 薛莹，徐先顺，雍莉，等 . 杨梅功能活性成分的 UPLC−ESI−Q−TOF/MS 分析 [J]. 食品研究与开发，2018，39（15）：123−127，148.
[36] 白粉娥，成宇峰 . 两种彩色马铃薯品种花色苷成分分析及其总抗氧化活性的比较研究 [J]. 保鲜与加工，2018，18（2）：108−113.
[37] 胡彦如，黄兴连，叶静文 . 植物花青素合成及其调控因素研究进展 [J]. 生命科学研究，2024，28（6）：493−502.
[38] 王凤华，郭佳，吴正景，等 . 植物花青素合成的环境调控研究进展 [J]. 中国野生植物资源，2024，43（2）：78−83.
[39] 韩雪，袁玮琼，武艺，等 . 利用 HPLC−DAD−ESI/IT−TOF/MS^n 分析不同品种蓝莓果实的花青素结构 [J]. 食品工业科技，2020，41（8）：210−216，223.
[40] 陈昕旸，李耀宇，谢培根，等 . 青海省都兰县棕熊适宜栖息地与日活动节律 [J]. 兽类学报，2024，44（3）：321−332.