

DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2021.07.029

# 青海亚麻籽中木脂素含量测定及抗氧化活性分析

## Determination of lignans in Qinghai flaxseed and its antioxidant activity

陈昫昫<sup>1</sup>      王进英<sup>1,2</sup>      王兴瑞<sup>1</sup>

CHEN Yun-yun<sup>1</sup>    WANG Jin-ying<sup>1,2</sup>    WANG Xing-rui<sup>1</sup>

韩玉泽<sup>1</sup>      李应霞<sup>1</sup>      王淑珍<sup>1</sup>

HAN Yu-ze<sup>1</sup>    LI Ying-xia<sup>1</sup>    WANG Shu-zhen<sup>1</sup>

(1. 青海大学农牧学院, 青海 西宁 810016;

2. 青海大学三江源生态与高原农牧业国家重点实验室, 青海 西宁 810016)

(1. College of Agriculture and Animal Husbandry, Qinghai University, Xining, Qinghai 810016, China; 2. State Key Laboratory of Plateau Ecology and Agriculture, Xining, Qinghai 810016, China)

**摘要:**目的:为促进青海地区亚麻籽及其加工副产物的高值化利用。方法:以青海省 20 种不同产地、品种亚麻籽为原料,采用反相高效液相色谱法测定其木脂素开环异落叶松酚葡萄糖苷和开环异落叶松脂素含量,并以 DPPH 自由基和 ABTS 自由基清除能力评价其抗氧化活性。结果:青海省不同产地、品种的亚麻籽中木脂素含量差异显著( $P < 0.05$ ),开环异落叶松酚葡萄糖苷和开环异落叶松脂素含量分别为 7.53~23.33, 0.85~2.55 mg/g; 开环异落叶松酚葡萄糖苷和开环异落叶松脂素均具有清除 DPPH 自由基和 ABTS 自由基的能力,且差异显著( $P < 0.05$ )。结论:青海省不同产地、品种的亚麻籽中木脂素含量不同,均具有良好的抗氧化能力。

**关键词:**亚麻籽;亚麻木脂素;反相高效液相色谱法;抗氧化活性

**Abstract:** Objective: It provides a basis for promoting the high-value utilization of flaxseed and its processing by-products in Qinghai. Methods: Using linseeds from different producing areas and varieties in Qinghai province as raw materials, and the content of lignan and its component-secoisolariciresinol diglucoside and secoisolariciresinol in 20 kinds of flaxseeds in Qinghai were determined by reversed-phase high performance li-

quid chromatography, based on DPPH and ABTS free radical scavenging ability to evaluate the antioxidant activity of these two lignans. Results: The content of lignans in flaxseeds from different producing areas and varieties in Qinghai Province was significantly different ( $P < 0.05$ ), and the content ranges of secoisolariciresinol diglucoside and secoisolariciresinol were 7.53~23.33 mg/g, 0.85~2.55 mg/g, respectively. Secoisolariciresinol diglucoside and secoisolariciresinol have scavenging effects on DPPH and ABTS free radicals. There were significant differences in the antioxidant activity of lignans in 20 kinds of flaxseeds ( $P < 0.05$ ). Conclusion: Linseeds from different producing areas and varieties in Qinghai Province have different lignan content, which has good antioxidant capacity.

**Keywords:** flaxseed; flaxseed ligans; reversed-phase high performance liquid chromatography; antioxidant activity

亚麻籽是木脂素最丰富的天然谷物来源,是其他谷物资源的 75~800 倍<sup>[1]</sup>。开环异落叶松酚葡萄糖苷(secoisolariciresinol diglucoside, SDG)是亚麻籽中主要的木脂素,一部分以游离形式存在,一部分与 3-羟基-3-甲基-戊二酸通过酯键结合形成低聚体;其他酚类化合物如对香豆酸、阿魏酸与糖基以糖苷键结合的方式存在于低聚体中<sup>[2]</sup>。通过碱水解和酸水解使酯键与糖苷键断裂,可生成 SDG、对香豆酸糖苷、开环异落叶松脂素(secoisolariciresinol, SECO)等<sup>[3-4]</sup>。亚麻木脂素对癌症、糖尿病和心血管疾病具有化学预防作用,其药理活性被认为是因其具有高的抗氧化能力和植物雌激素活性<sup>[5-8]</sup>。

目前,关于亚麻籽的研究主要集中在对其营养品质

**基金项目:**青海省青年自然科学基金(编号:2018-ZJ-970Q);青海大学省部共建三江源生态与高原农牧业国家重点实验室自主课题(编号:2019-ZZ-06)

**作者简介:**陈昫昫,女,青海大学在读硕士研究生。

**通信作者:**王进英(1989—),女,青海大学副教授,博士。

E-mail: wangjinying0128@126.com

**收稿日期:**2020-12-21

评价、活性物质提取与含量分析、保健食品开发等方面,而关于青海地区亚麻研究主要集中在育种的发展,对于亚麻籽中木脂素含量与抗氧化活性的差异性研究尚未见报道。试验拟采用反相高效液相色谱法定量测定青海 9 个产地、20 种亚麻籽中木脂素含量及其抗氧化能力,为促进青海地区亚麻籽及其加工副产物的高值化利用提供依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材料与试剂

20 种亚麻籽:详见表 1。

1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH):上海晶纯生化科技股份有限公 司;

2,2'-联氮-双-(3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸)二铵盐 (ABTS):北京索莱宝科技有限公 司;

亚麻木脂素 (SDG、SECO)标准品:四川德斯特生物公 司;

氢氧化钠、磷酸、盐酸:分析纯,天津市河东区红岩试剂厂;

乙腈、甲醇:色谱纯,德国默克公 司。

### 1.2 仪器与设备

超声波清洗机:SB-3200TDT 型,宁波新芝生物科技股份有限公 司;

循环水真空泵:SHZ-III 型,上海亚荣生化仪器厂;

分析天平:DSH-50-5 型,上海越平科学仪器有限公 司;

液相色谱仪:LC-20A 型,日本岛津公 司;

紫外分光光度计:UV-2600 型,日本岛津公 司;

脂肪测定仪:SOX406 型,山东海能科学仪器有限公 司。

### 1.3 方 法

1.3.1 脱脂亚麻籽粉的制备 亚麻籽清理、分拣、粉碎后得到亚麻籽粉,利用索氏抽提法脱脂,热风干燥得脱脂亚麻籽粉。

1.3.2 亚麻木脂素的提取 根据文献[9-10]并修改:称量每种脱脂亚麻籽粉 4 g,提取溶剂为 60%乙醇,固液比( $m_{\text{脱脂亚麻籽粉}}:V_{\text{乙醇}}$ )1:15 (g/mL),超声功率 400 W,超声时间 15 min,抽滤,离心,上清液减压浓缩后得 SDG 聚合物提取液。用 0.2 mol/L 的 NaOH 溶液将提取液 pH 值调至 11,50 °C 水浴 2 h,用 1 mol/L 盐酸调节中和,低温浓缩后得 SDG 提取液,经 0.45 mm 醋酸纤维膜过滤,待 HPLC 测定。

精确量取 5 mL SDG 溶液,用 1 mol/L 盐酸调 pH 值至 2.5,90 °C 水浴酸解 3 h,得 SECO 提取液,经 0.45 mm 醋酸纤维膜过滤,待 HPLC 测定。

1.3.3 亚麻木脂素标准品标准曲线的制备 准确将亚麻木脂素 SDG 和 SECO 标准品配制成为一定浓度范围的标准液。在已确定的液相色谱条件下进行上样检测,将标准物质质量浓度  $X$  与峰面积  $Y$  进行线性回归,得标准曲线(见表 2)。根据色谱保留时间与峰面积进行定量,结果以干基表示 (mg/g)。

1.3.4 液相色谱法测定亚麻木脂素含量 液相色谱条件见表 3,以亚麻木脂素标准品的质量浓度为横坐标,峰面积为纵坐标进行线性拟合得回归方程,并按式(1)计算亚麻籽木脂素含量。

$$M = \frac{CVN}{W}, \quad (1)$$

式中:

$M$ ——亚麻木脂素含量,mg/g;

$C$ ——提取液中木脂素的质量浓度,mg/mL;

$V$ ——提取液体积,mL;

$N$ ——稀释倍数;

$W$ ——脱脂亚麻籽粉末的质量,g。

1.3.5 亚麻木脂素抗氧化活性测定 参照文献[11-13]并稍作修改。

(1) DPPH 自由基清除能力:用体积分数为 60%的乙醇将样品液稀释 50 倍,充分振摇均匀,与 0.2 mmol/L

表 1 20 种亚麻籽样品信息

Table 1 Information on 20 flaxseed samples

| 产地   | 经度/°   | 纬度/°  | 海拔/m  | 品种编号    |
|------|--------|-------|-------|---------|
| 西宁湟中 | 101.57 | 36.56 | 2 645 | QH1~3   |
| 西宁大通 | 101.67 | 36.92 | 2 720 | QH4     |
| 西宁湟源 | 101.28 | 36.72 | 2 666 | QH5     |
| 海东互助 | 101.95 | 36.84 | 2 520 | QH6~9   |
| 海东民和 | 102.80 | 36.30 | 1 800 | QH10~12 |
| 海东平安 | 102.09 | 36.47 | 2 114 | QH13~16 |
| 海东循化 | 102.46 | 35.84 | 1 860 | QH17~18 |
| 海北门源 | 101.62 | 37.37 | 2 880 | QH19    |
| 海东乐都 | 102.38 | 36.49 | 2 000 | QH20    |

表 2 SDG 和 SECO 的峰面积回归分析

Table 2 Regression analysis of SDG and SECO

| 标准物质 | 回归方程                   | 相关系数    | 线性范围/( $\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$ ) | 保留时间/min |
|------|------------------------|---------|---|----------|
| SDG  | $Y=14\ 393X-56\ 455$   | 0.998 4 | 20~320                                      | 6.791    |
| SECO | $Y=3\ 959.9X+2\ 759.7$ | 0.999 6 | 8~80  | 32.406   |

表3 亚麻木脂素液相色谱条件

Table 3 Liquid chromatography conditions of flax lignans

| 液相色谱条件 | SDG   | SECO   |
|--------|---|--|
| 色谱柱    | C <sub>18</sub> (4.6 mm×250 mm),5.0 mm                          | C <sub>18</sub> (4.6 mm×250 mm),5.0 mm                         |
| 紫外检测波长 | 210 nm  | 280 nm   |
| 柱温     | 35 ℃  | 30 ℃   |
| 流速     | 1.0 mL/min  | 1.0 mL/min   |
| 进样量    | 5.0 mL  | 5.0 mL   |
| 流动相    | A 为水(含 0.05%的醋酸)<br>B 为乙腈                                       | A 为水(含 0.1%的醋酸)<br>B 为乙腈                                       |
| 梯度洗脱条件 | 0~15 min,5%~100% B;<br>15~18 min,100% B;<br>18~20 min,100%~5% B | 0~35 min,15%~25% B;<br>35~36 min,25%~15% B;<br>36~40 min,15% B |

的 DPPH 溶液按  $V_{\text{样品液}} : V_{\text{DPPH液}} = 1 : 1$  混合,室温避光静置 30 min,测定 517 nm 处吸光值,按式(2)计算 DPPH 自由基清除率。

$$C = \left(1 - \frac{A_0}{A_1}\right) \times 100\%, \quad (2)$$

式中:

C——自由基清除率,%;

$A_0$ ——空白组吸光值;

$A_1$ ——样品组吸光值。

(2) ABTS 自由基清除能力:7.40 mmol/L ABTS 溶液与 2.60 mmol/L 过硫酸钾溶液按  $V_{\text{ABTS溶液}} : V_{\text{过硫酸钾溶液}} = 1 : 1$  混匀,室温避光静置 12 h,使用前用无水乙醇稀释,使吸光度在 734 nm 处为  $0.70 \pm 0.02$ ,得 ABTS 工作液。配制不同质量浓度样液,分别取 1.00 mL,加入 ABTS 工作液 3.00 mL,混匀,避光静置 10 min,测定 734 nm 处吸光度,并按式(2)计算 ABTS 自由基清除率。

#### 1.4 数据处理分析

试验数据平行测定 3 次,结果取平均值。运用 SPSS 26.0 软件进行数据统计分析,相关性分析采用 Pearson 双侧检验法,显著性差异采用 LSD 多重比较法。Origin 2019 软件作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同品种亚麻籽木脂素含量分析

由表 4 可知,SDG 含量为 7.53~23.33 mg/g,SECO 含量为 0.85~2.55 mg/g。不同品种亚麻籽木脂素含量之间具有显著性差异( $P < 0.05$ )。

亚麻籽木脂素经碱水解后主要得到 SDG,不同品种间 SDG 含量差异较大,含量最高的品种产自于海北门源(QH-19)为  $(23.33 \pm 0.14)$  mg/g,含量最低的品种产自于西宁大通(QH-4)为 7.53 mg/g。SDG 含量  $\geq 20$  mg/g 的品种有 5 种,其余 15 个品种亚麻籽中的 SDG 含量为 7~

19 mg/g。亚麻籽木脂素经酸水解后主要得到 SECO,海北门源(QH-19)亚麻籽中 SECO 含量最高为  $(2.55 \pm 0.12)$  mg/g,西宁湟源(QH-5)亚麻籽中 SECO 含量最低为  $(0.85 \pm 0.22)$  mg/g。SECO 含量  $\geq 2$  mg/g 的品种有 5 种,其余 15 个品种亚麻籽中的 SECO 含量为 0.89~1.99 mg/g。此外,亚麻籽中 SDG 和 SECO( $r = 0.986$ ,  $P < 0.01$ )含量具有显著相关性,表明 SDG 含量高的亚麻籽品种,SECO 含量也相对较高。这可能与亚麻籽中木脂素的存在形式及稳定性有关。亚麻籽中的 SECO 与糖苷结合,以开环异落叶松酚葡萄糖苷(SDG)形式存在。SDG 聚合物碱水解会游离出 SDG,通过酶水解或酸水解使 SDG 糖苷键断裂,释放出 SECO<sup>[2]</sup>。这也可能是受收获成熟度的影响。因为亚麻籽成熟过程伴随着催化木酚素合成酶的表达和活性的改变<sup>[14-16]</sup>。综上,海北门源(QH-19)亚麻籽中两种木脂素含量最高。

### 2.2 不同产地亚麻籽木脂素含量分析

由图 1 可知,青海不同产地亚麻籽样品中的木脂素含量均具有显著性差异( $P < 0.05$ )。海北门源、海东乐都、西宁湟中、海东民和及海东互助的亚麻籽样品中的 2 种木脂素含量均显著高于海东平安、海东循化、西宁湟源和西宁大通的。

不同产地的亚麻籽中 SDG 含量差异较大。西宁湟中亚麻籽中的 SDG 平均含量为  $(16.95 \pm 5.09)$  mg/g,其中 SDG 含量  $\geq 15$  mg/g 的品种有 2 个;海东互助亚麻籽中的 SDG 平均含量为  $(15.77 \pm 3.38)$  mg/g,其中 SDG 含量  $\geq 15$  mg/g 的品种有 3 个;海东民和亚麻籽中的 SDG 平均含量为  $(16.86 \pm 4.95)$  mg/g,其中 SDG 含量  $\geq 15$  mg/g 的品种有 2 个;海东平安亚麻籽中的 SDG 平均含量为  $(14.62 \pm 3.20)$  mg/g,其中 SDG 含量  $\geq 15$  mg/g 的品种有 2 个;海北门源亚麻籽中的 SDG 含量最高,为  $(23.33 \pm 0.14)$  mg/g,西宁大通的最低,为 7.53 mg/g。

不同产地的亚麻籽中 SECO 含量差异性显著( $P <$

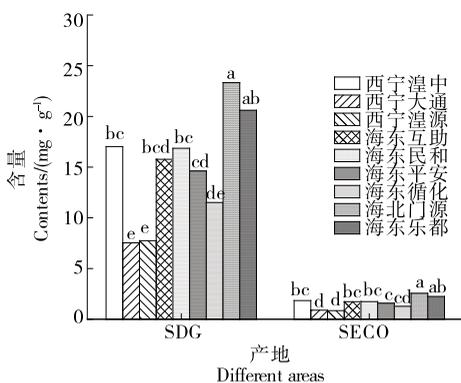
0.05)。西宁湟中亚麻籽中的 SECO 平均含量为(1.83±0.58) mg/g,其中 SECO 含量≥1.5 mg/g 的品种有 2 个;海东互助亚麻籽中的 SECO 平均含量为(1.73±0.38) mg/g,其中 SECO 含量≥1.5 mg/g 的品种有 3 个;

表 4 青海不同品种亚麻籽中木脂素含量<sup>†</sup>

Table 4 Contents of lignan from different varieties of flaxseeds in Qinghai mg/g

| 产地   | 编号    | SDG                     | SECO                     |
|------|-------|-------------------------|--------------------------|
| 西宁湟中 | QH-1  | 10.98±0.15 <sup>b</sup> | 1.16±0.11 <sup>f</sup>   |
|      | QH-2  | 17.20±1.01 <sup>e</sup> | 1.84±0.13 <sup>de</sup>  |
|      | QH-3  | 22.67±0.21 <sup>b</sup> | 2.48±0.14 <sup>ab</sup>  |
| 西宁大通 | QH-4  | 7.53±0.22 <sup>i</sup>  | 0.89±0.11 <sup>g</sup>   |
| 西宁湟源 | QH-5  | 7.75±0.25 <sup>i</sup>  | 0.85±0.22 <sup>g</sup>   |
|      | QH-6  | 15.08±0.32 <sup>f</sup> | 1.68±0.09 <sup>e</sup>   |
| 海东互助 | QH-7  | 12.02±0.07 <sup>g</sup> | 1.31±0.07 <sup>f</sup>   |
|      | QH-8  | 20.94±0.15 <sup>c</sup> | 2.29±0.14 <sup>bc</sup>  |
|      | QH-9  | 15.03±0.14 <sup>f</sup> | 1.64±0.15 <sup>e</sup>   |
| 海东民和 | QH-10 | 11.02±0.16 <sup>b</sup> | 0.90±0.12 <sup>g</sup>   |
|      | QH-11 | 22.44±0.15 <sup>b</sup> | 2.45±0.13 <sup>abc</sup> |
|      | QH-12 | 17.13±0.06 <sup>e</sup> | 1.87±0.08 <sup>de</sup>  |
| 海东平安 | QH-13 | 17.15±0.12 <sup>e</sup> | 1.81±0.11 <sup>de</sup>  |
|      | QH-14 | 11.22±0.14 <sup>b</sup> | 1.22±0.14 <sup>f</sup>   |
|      | QH-15 | 18.16±0.12 <sup>d</sup> | 1.99±0.12 <sup>d</sup>   |
|      | QH-16 | 11.95±0.08 <sup>g</sup> | 1.31±0.08 <sup>f</sup>   |
| 海东循化 | QH-17 | 10.94±0.25 <sup>b</sup> | 1.20±0.12 <sup>f</sup>   |
|      | QH-18 | 12.08±0.18 <sup>g</sup> | 1.34±0.17 <sup>f</sup>   |
| 海北门源 | QH-19 | 23.33±0.14 <sup>a</sup> | 2.55±0.12 <sup>a</sup>   |
| 海东乐都 | QH-20 | 20.61±0.14 <sup>c</sup> | 2.25±0.11 <sup>c</sup>   |

<sup>†</sup> 字母不同表示差异显著(P<0.05)。



字母不同表示差异显著(P<0.05)

图 1 青海不同产地亚麻籽木脂素含量

Figure 1 Contents of lignan of flaxseeds from different areas in Qinghai

海东民和亚麻籽中的 SECO 平均含量为(1.74±0.69) mg/g,其中 SECO 含量≥1.5 mg/g 的品种有 2 个;海东平安亚麻籽中的 SECO 平均含量为(1.58±0.35) mg/g,其中 SECO 含量≥1.5 mg/g 的品种有 2 个;海北门源亚麻籽中 SECO 含量最高为(2.55±0.12) mg/g,西宁湟源的最低,为(0.85±0.22) mg/g。

综上,青海省 9 个不同产地中海北门源、海东乐都、西宁湟中以及海东民和亚麻籽样品中的木脂素含量显著优于其他 5 个产地,其含量趋势是海拔越高、纬度越高、气候越冷凉,亚麻籽中木脂素含量越高,与胡晓军等<sup>[17]</sup>的结论基本一致。

2.3 亚麻籽中木脂素抗氧化活性分析

2.3.1 DPPH 自由基清除能力 DPPH 自由基比羟基自由基和超氧自由基更加稳定<sup>[18]</sup>,因此 DPPH 自由基清除能力常被用作评价抗氧化能力的一种方法。由表 5 可知,20 种亚麻籽中两种木脂素均具有较强的抗氧化能力,且不同样品间差异显著(P<0.05)。SDG 和 SECO 对 DPPH 自由基的清除率分别为 53.18%~62.97%,52.87%~61.86%。其中,海北门源(QH-19)亚麻籽样品的抗氧化能力较强,SDG 和 SECO 的 DPPH 自由基清除率分别为 62.97%,61.86%;西宁大通(QH-4)亚麻籽样品的抗氧化能力最低,SDG 和 SECO 的 DPPH 自由基清除率分别为 53.18%,52.87%。

从青海省不同产地来看,海北门源、海东乐都、海东平安、西宁湟中亚麻籽样品中 SDG 的 DPPH 自由基清除率较强,分别为 62.97%,59.34%,58.50%,58.50%;SECO 的 DPPH 自由基清除率较强的产地分别是海北门源、海东乐都、海东民和、西宁湟中,分别为 61.86%,60.32%,56.89%,56.73%。综上,海北门源、海东乐都、海东平安、海东民和以及西宁湟中的亚麻籽木脂素的抗氧化活性优于其他产地的。不同产地及同一产地间亚麻木脂素抗氧化能力存在差异,与臧茜茜等<sup>[8]</sup>的研究结果一致。亚麻木脂素含量及抗氧化活性会受品种、生长环境、气候条件、贮藏时间等因素的影响,因此木脂素含量及抗氧化活性存在不同程度的差异<sup>[1,19-20]</sup>,而且不同品种的同一种间,营养成分含量也不同<sup>[21]</sup>。

2.3.2 ABTS 自由基清除能力 由表 6 可知,青海 20 种亚麻籽中两种木脂素均具有较强的抗氧化能力,且不同样品间差异显著(P<0.05)。SDG 和 SECO 对 ABTS 自由基的清除能力分别为 52.98%~62.59%,51.08%~61.99%。其中,海北门源(QH-19)亚麻籽样品的抗氧化能力较强,SDG 和 SECO 的 ABTS 自由基清除率分别为 62.59%,61.99%;西宁大通(QH-4)亚麻籽样品的抗氧化能力最低,SDG 和 SECO 的 ABTS 自由基清除率分别为 52.98%,51.08%。

表 5 DPPH 自由基清除能力<sup>†</sup>

Table 5 DPPH free radical scavenging ability %

| 产地   | 编号    | SDG                       | SECO                     |
|------|-------|---------------------------|--------------------------|
| 西宁湟中 | QH-1  | 55.26±0.13 <sup>jk</sup>  | 53.26±1.09 <sup>cd</sup> |
|      | QH-2  | 58.55±1.22 <sup>ef</sup>  | 56.37±0.42 <sup>b</sup>  |
|      | QH-3  | 61.69±1.34 <sup>b</sup>   | 60.56±0.58 <sup>a</sup>  |
| 西宁大通 | QH-4  | 53.18±0.90 <sup>l</sup>   | 52.87±0.29 <sup>d</sup>  |
| 西宁湟源 | QH-5  | 54.33±0.71 <sup>k</sup>   | 52.91±0.53 <sup>d</sup>  |
|      | QH-6  | 57.53±0.88 <sup>fgb</sup> | 55.16±0.67 <sup>b</sup>  |
| 海东互助 | QH-7  | 56.45±0.66 <sup>bhj</sup> | 54.78±2.94 <sup>bc</sup> |
|      | QH-8  | 60.24±0.68 <sup>cd</sup>  | 60.15±1.16 <sup>a</sup>  |
|      | QH-9  | 56.12±0.69 <sup>ij</sup>  | 55.21±0.37 <sup>b</sup>  |
| 海东民和 | QH-10 | 55.22±0.67 <sup>jk</sup>  | 52.89±0.20 <sup>d</sup>  |
|      | QH-11 | 61.71±0.33 <sup>b</sup>   | 61.36±1.07 <sup>a</sup>  |
|      | QH-12 | 55.62±0.53 <sup>j</sup>   | 56.41±0.86 <sup>b</sup>  |
| 海东平安 | QH-13 | 57.69±0.50 <sup>fg</sup>  | 56.46±0.68 <sup>b</sup>  |
|      | QH-14 | 57.31±0.43 <sup>ghj</sup> | 53.35±0.74 <sup>cd</sup> |
|      | QH-15 | 58.35±0.33 <sup>ef</sup>  | 60.14±0.69 <sup>a</sup>  |
|      | QH-16 | 60.66±0.36 <sup>bc</sup>  | 53.29±1.05 <sup>cd</sup> |
| 海东循化 | QH-17 | 58.21±0.70 <sup>efg</sup> | 53.32±0.69 <sup>cd</sup> |
|      | QH-18 | 57.02±0.33 <sup>ghi</sup> | 53.35±0.38 <sup>cd</sup> |
| 海北门源 | QH-19 | 62.97±0.33 <sup>a</sup>   | 61.86±0.29 <sup>a</sup>  |
| 海东乐都 | QH-20 | 59.34±0.46 <sup>de</sup>  | 60.32±0.70 <sup>a</sup>  |

† 同列字母不同表示差异显著(P<0.05)。

从青海省不同产地来看,海北门源、海东乐都、海东民和、海东平安亚麻籽样品中 SDG 的 ABTS 自由基清除率较强,分别为 62.59%,62.33%,60.19%,58.92%。SECO 的 ABTS 自由基清除率较强的产地分别是海北门源、海东乐都、西宁湟中、海东民和,分别为 61.99%,60.59%,60.23%,60.01%。综上,海北门源、海东乐都、西宁湟中、海东民和的亚麻籽木脂素的抗氧化活性优于其他 5 个产地的,可能是由于亚麻籽中木脂素含量不同。

### 3 结论

青海省 9 个产地的亚麻籽中木脂素含量及抗氧化能力差异性显著(P<0.05),其中海北门源(QH-19)的亚麻籽木脂素含量最高,西宁大通(QH-4)的最低,前者的木脂素含量是后者的约 3 倍。海东民和、海东互助、海东乐都的亚麻籽中木脂素含量高于西宁大通及西宁湟源的。青海省亚麻籽中木脂素也具有较强的抗氧化能力,其中,海北门源(QH-19)亚麻籽样品的抗氧化活性最强。9 个产地中海东乐都、海东平安、海东民和及西宁湟中的亚麻籽木脂素的抗氧化活性显著高于其他 5 个产地的。后续可进一步扩大青海省不同产地和品种样本量,并对木脂

表 6 ABTS 自由基清除能力<sup>†</sup>

Table 6 ABTS free radical scavenging capacity %

| 产地   | 编号    | SDG                      | SECO                     |
|------|-------|--------------------------|--------------------------|
| 西宁湟中 | QH-1  | 59.94±0.09 <sup>c</sup>  | 59.68±0.26 <sup>d</sup>  |
|      | QH-2  | 60.05±0.11 <sup>c</sup>  | 59.75±0.19 <sup>d</sup>  |
|      | QH-3  | 62.54±0.21 <sup>a</sup>  | 61.26±0.09 <sup>b</sup>  |
| 西宁大通 | QH-4  | 52.98±0.06 <sup>g</sup>  | 51.08±0.38 <sup>h</sup>  |
| 西宁湟源 | QH-5  | 53.02±0.20 <sup>g</sup>  | 51.16±0.22 <sup>h</sup>  |
|      | QH-6  | 58.78±0.36 <sup>d</sup>  | 57.65±0.29 <sup>g</sup>  |
| 海东互助 | QH-7  | 58.65±0.30 <sup>d</sup>  | 57.69±0.27 <sup>g</sup>  |
|      | QH-8  | 62.39±0.20 <sup>a</sup>  | 60.75±0.12 <sup>c</sup>  |
|      | QH-9  | 58.74±0.42 <sup>d</sup>  | 57.92±0.07 <sup>g</sup>  |
| 海东民和 | QH-10 | 57.55±0.19 <sup>f</sup>  | 57.67±0.43 <sup>g</sup>  |
|      | QH-11 | 62.45±0.13 <sup>a</sup>  | 61.86±0.15 <sup>a</sup>  |
|      | QH-12 | 60.58±0.47 <sup>b</sup>  | 60.51±0.37 <sup>c</sup>  |
| 海东平安 | QH-13 | 59.98±0.19 <sup>c</sup>  | 59.12±0.62 <sup>e</sup>  |
|      | QH-14 | 57.65±0.33 <sup>f</sup>  | 59.56±0.30 <sup>de</sup> |
|      | QH-15 | 60.02±0.32 <sup>c</sup>  | 58.49±0.43 <sup>f</sup>  |
|      | QH-16 | 58.02±0.38 <sup>ef</sup> | 57.97±0.34 <sup>fg</sup> |
| 海东循化 | QH-17 | 58.49±0.34 <sup>de</sup> | 58.09±0.30 <sup>fg</sup> |
|      | QH-18 | 58.53±0.42 <sup>de</sup> | 58.13±0.22 <sup>fg</sup> |
| 海北门源 | QH-19 | 62.59±0.39 <sup>a</sup>  | 61.99±0.24 <sup>a</sup>  |
| 海东乐都 | QH-20 | 62.33±0.34 <sup>a</sup>  | 60.59±0.06 <sup>c</sup>  |

† 同列字母不同表示差异显著(P<0.05)。

素的活性进行更深入探究,从而为青海亚麻籽深加工和综合利用提供理论支持。

### 参考文献

[1] GARROS L, DROUET S, CORBIN C, et al. Insight into the influence of cultivar type, cultivation year, and site on the lignans and related phenolic profiles, and the health-promoting antioxidant potential of flax (*Linum usitatissimum* L.) seeds[J]. *Molecules*, 2018, 23(10): 2 636-2 651.

[2] STRUIJS K, VINCKEN J P, VERHOEF R, et al. Hydroxycinnamic acids are ester-linked directly to glucosyl moieties within the lignan macromolecule from flaxseed hulls[J]. *Phytochemistry*, 2008, 69(5): 1 250-1 260.

[3] CLAVEL T, HENDERSON G, ENGST W, et al. Phylogeny of human intestinal bacteria that activate the dietary lignan secoisolariciresinol diglucoside[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2006, 55 (3): 471-478.

[4] SINGH K K, MRIDULA D, REHAL J, et al. Flaxseed: A potential source of food, feed and fiber[J]. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 2011, 51 (3): 210-222.

[5] TANG Yao, LI Xi-hong, ZHANG Bing, et al. Characterisation of

- phenolics, betanins and antioxidant activities in seeds of three *Cheopodium quinoa* Willd genotypes[J]. *Food Chemistry*, 2015, 166: 380-388.
- [6] ZHAO Ling, CHEN Jian-ping, SU Jian-yu, et al. In vitro antioxidant and anti-proliferative activities of 5-hydroxymethyl furfural[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2013, 61(44): 10 604-10 611.
- [7] KOSINSKA A, PENKACIK K, WICZKOWSKI W, et al. Presence of caffeic acid in flaxseed lignan macromolecule[J]. *Plant Foods for Human Nutrition*, 2011, 66(3): 270-274.
- [8] 臧茜茜, 魏晓珊, 陈鹏, 等. 不同品种亚麻籽木酚素多聚体水解物的组成及含量[J]. *中国油料作物学报*, 2017, 39(2): 253-259. ZANG Xi-xi, WEI Xiao-shan, CHEN Peng, et al. Lignan content and its hydrolysates of flaxseeds in different cultivars[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2017, 39(2): 253-259.
- [9] 付亚琦. 亚麻籽木酚素不同水解产物结构鉴定及活性研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2013: 15-17. FU Ya-qi. Structure identification of different hydrolysates of the lignan macromolecule and activity study[D]. Hangzhou: Zhejiang Gong Shang University, 2013: 15-17.
- [10] 陈祥, 贾景明, 杨郁, 等. 亚麻地上部分的木脂素成分及其活性[J]. *国际药学研究杂志*, 2017, 44(6): 590-594. CHEN Xiang, JIA Jing-ming, YANG Yu, et al. Lignan constituents and activities of *Linum usitatissimum* L. above ground[J]. *Journal of International Pharmaceutical Research*, 2017, 44(6): 590-594.
- [11] 禹晓, 黄沙沙, 程晨, 等. 不同品种亚麻籽组成及抗氧化特性分析[J]. *中国油料作物学报*, 2018, 40(6): 879-888. YU Xiao, HUANG Sha-sha, CHENG Chen, et al. Composition and antioxidant characteristics of different flaxseed cultivars[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2018, 40(6): 879-888.
- [12] 李会珍, 李娜, 张志军, 等. 响应面法优化超声波辅助亚麻木酚素提取工艺及抗氧化性研究[J]. *中国粮油学报*, 2016, 31(8): 62-67, 74. LI Hui-zhen, LI Na, ZHANG Zhi-jun, et al. Response surface method to optimize the ultrasonic-assisted extraction process and antioxidant activity of lignans from flaxseed[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2016, 31(8): 62-67, 74.
- [13] 赵萌萌, 杨希娟, 党斌, 等. 不同粒色藜麦营养品质及多酚组成与抗氧化活性比较分析[J]. *食品与机械*, 2020, 36(8): 29-35. ZHAO Meng-meng, YANG Xi-juan, DANG Bin, et al. Comparative analysis of nutrient quality and polyphenol composition and antioxidant activity of different colored quinoa[J]. *Food & Machinery*, 2020, 36(8): 29-35.
- [14] 潘根, 张义, 赵立宁, 等. 利用 SSR 标记构建我国亚麻品种 DNA 指纹图谱及遗传多样性分析[J]. *中国麻业科学*, 2019, 41(4): 145-150. PAN Gen, ZHANG Yi, ZHAO Li-ning, et al. Establishment of DNA fingerprinting and genetic diversity analysis of flax varieties in China using SSR markers[J]. *Plant Fiber Sciences in China*, 2019, 41(4): 145-150.
- [15] 刘栋, 马琴, 李爱荣, 等. 亚麻种质资源种子形态性状与含油量的分析与评价[J]. *作物杂志*, 2020(3): 34-41. LIU Dong, MA Qin, LI Ai-rong, et al. Analysis and evaluation of seed morphological characteristics and oil content of flax germplasms[J]. *Crops*, 2020(3): 34-41.
- [16] 萨如拉, 宋晓玲, 赵小庆, 等. 亚麻木酚素含量与遗传多样性的评价[J]. *作物杂志*, 2019(1): 56-62. SA Ru-la, SONG Xiao-ling, ZHAO Xiao-qing, et al. Evaluation of the content of flax lignan and genetic diversity[J]. *Crops*, 2019(1): 56-62.
- [17] 胡晓军, 李群, 梁霞, 等. 亚麻品种及生态环境对亚麻木脂素含量的影响[J]. *中国油料作物学报*, 2009, 31(2): 256-258. HU Xiao-jun, LI Qun, LIANG Xia, et al. Impact of flax variety and the ecological environment to secoisolariciresinol diglucoside [J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2009, 31(2): 256-258.
- [18] 洪梦佳, 黄庆德, 许继取, 等. 亚麻木脂素抗氧化性能的研究及应用现状[J]. *中国油脂*, 2018, 43(11): 122-126. HONG Meng-jia, HUANG Qing-de, XU Ji-qu, et al. Research and application status of antioxidant activity of flaxseed lignan[J]. *China Oils and Fats*, 2018, 43(11): 122-126.
- [19] 欧巧明, 叶春雷, 李进京, 等. 油用亚麻品种资源主要性状的鉴定与评价[J]. *中国油料作物学报*, 2017, 39(5): 623-633. OU Qiao-ming, YE Chun-lei, LI Jin-jing, et al. Identification and evaluation of main breeding characteristics of oil flax resources[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2017, 39(5): 623-633.
- [20] 李秋芝, 宋鑫玲, 曹洪勋, 等. 100 份亚麻种质资源遗传多样性及亲缘关系的 RAPD 分析[J]. *现代农业科技*, 2015(24): 65-67, 71. LI Qiu-zhi, SONG Xin-ling, CAO Hong-xun, et al. Genetic Diversities and Phylogenetic Relationships of 100 Flax Germplasm Resources Based on RAPD [J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2015(24): 65-67, 71.
- [21] 邓欣, 陈信波, 邱财生, 等. 我国亚麻种质资源研究与利用概述[J]. *中国麻业科学*, 2015, 37(6): 322-329. DENG Xin, CHEN Xin-bo, QIU Cai-sheng, et al. Review on research and utilization of flax (*Linum usitatissimum* L.) germplasm resources[J]. *Plant Fiber Sciences in China*, 2015, 37(6): 322-329.