

# 西藏地区油用亚麻籽的脂质组成分析

曹 焜<sup>1</sup>,洛桑次仁<sup>2</sup>,董 艳<sup>1</sup>,孙宇峰<sup>1</sup>,白玛玉珍<sup>2</sup>,朱 彬<sup>3</sup>,益西边巴<sup>3</sup>,王晓楠<sup>1\*</sup>

(1.黑龙江省科学院大庆分院,黑龙江 大庆 163319;2.西藏帕哲健康产业开发有限公司,西藏 山南 856499;3.西藏加查县农牧综合服务中心,西藏 山南 856499)

**摘要:**本研究通过脂质组学方法研究油用亚麻籽的脂质组分,并进一步对不饱和脂肪酸进行初步分析。从油用亚麻籽中共获得46类2309种脂质成分,并分析每个材料的脂质组成及含量,发现西藏种植油用亚麻能改变其脂质亚类的含量和占比;还从相关性角度分析了碳链长度为18、不饱和度为3的脂肪酸与其他脂质的相关性,初步从合成与代谢角度揭示了他们之间的关系;还发现西藏地区种植油用亚麻后,亚麻籽中的油酸、亚油酸、亚麻酸等不饱和脂肪酸含量呈上升趋势,为西藏地区引种油用亚麻及延长产业链、提高附加值等产业发展提供参考。

**关键词:**油用亚麻;脂质组成;西藏

中图分类号:S563.2

文献标志码:A

## Analyze of Lipid Composition of Oilseed Flax in Tibet Region

CAO Kun<sup>1</sup>, Luosangciren<sup>2</sup>, DONG Yan<sup>1</sup>, SUN Yufeng<sup>1</sup>, Baimayuzhen<sup>2</sup>, Zhu bin<sup>3</sup>, Yixibianbao<sup>3</sup>, WANG Xiaonan<sup>1\*</sup>

(1. Daqing Branch of Heilongjiang Academy of Sciences, Heilongjiang Daqing 163319, China; 2. Xizang Pazhe health industry development Co., LTD, Tibet Shannan 856499, China; 3. Tibet Jiacha County Agriculture and Animal Husbandry Comprehensive Service Center, Tibet Shannan 856499, China)

**Abstract:** The lipid composition of oilseed flax was analyzed based on lipidomics in this study, and unsaturated fatty acid were further analyzed. The total of 46 types of 2309 lipid components were obtained from seeds of oilseed flax. The lipid composition and content of each material were analyzed. The results showed that the content and proportion of lipid subclasses of oilseed flax in plateau cultivation could be changed. The correlation between fatty acids, carbon chain length of 18 and unsaturation of 3, and other lipids was also analyzed from the perspective of correlation, and their relationship was initially revealed from the perspective of synthesis and metabolism. The contents of unsaturated fatty acids such as oleic acid, linoleic acid and linolenic acid in flax seed were found to be on the rise after flax seed was planted in Tibet Region. The results could provide references for the development of oilseed flax introduction, extension of industry chain, and increase of added value in Tibet Region.

**Key Words:** oilseed flax; lipid composition; Tibet

作为地球的第三极,中国西藏地区是世界上海拔最高、面积最广的高山地区。该地属典型高原气候,具有区昼夜温差大、日照时间长、光照强度大、空气稀薄、太阳辐射强等特点。由于其特殊的地理和气候条件,使得西藏地区的粮油作物种类相对较少。为了进一步丰富西藏地区的油料作物种类,故在西藏干旱地区开展油用亚麻的引种试验。亚麻

(*Linum usitatissimum* L.)是亚麻科(Linaceae)亚麻属(*Linum*)的一年生草本纤维植物,按用途和特征可分为纤维用型、油用型和油纤兼用型3种。亚麻籽含油率35%~45%,亚麻籽油中 $\omega$ -3脂肪酸( $\alpha$ -亚麻酸)和亚油酸的含量特别高,是人体无法合成的必需脂肪酸之一,必须从食品中摄取,因此其营养和医药价值现在变得越来越受欢迎<sup>[1-2]</sup>。

脂质组学(Lipidomics)自2003年被提出后,在分析植物种子脂质代谢方面发挥重要作用<sup>[3]</sup>。脂质(Lipids)是一类疏水性或两性小分子,包括8大类。种子是脂质积累最丰富的器官,油用亚麻籽中积累的脂质种类和含量与亚麻籽油的品质和营养密切相关。在前期研究的基础上<sup>[4]</sup>,进一步开展油

收稿日期:2024-04-18

基金项目:山南市科技计划项目(SNSBJKJJHXM2023005);黑龙江省科学院青年创新基金项目(CXJQ2023DQ01)。

作者简介:曹焜(1989-),男,博士,研究方向为麻类作物抗逆性,E-mail: caokun3383@sina.com; \*为通信作者:王晓楠(1980-),女,博士,研究员,主要从事麻类作物育种及组学研究,E-mail: wxn\_fern@163.com。

用亚麻的引种和大规模生产试验,并通过脂质组学技术,分析西藏地区油用亚麻籽与平原地区油用亚麻籽的脂质成分差异,以期为藏区油用亚麻产业的发展提供参考。

# 1 材料与方法

## 1.1 试验地概况与材料

### 1.1.1 试验地概况

试验地位于西藏自治区山南市加查县(28.94° N,92.51° E),海拔3 748 m。土壤贫瘠,全氮0.91 g/kg,全磷0.66 g/kg,全钾21.14 g/kg,碱解氮40.01 mg/kg,有效磷11.95 mg/kg,速效钾57.80 mg/kg,有机质0.61%,pH 值7.48。

### 1.1.2 试验材料

油用亚麻品种坝选3号由黑龙江省科学院大庆分院提供。

## 1.2 试验设计

试验共设1个处理,即同一个品种在高原地区完成整个生长过程为一个处理。试验采用大区对比法,不设重复。播种行距为25 cm,播种密度为每平方米有效粒数800粒。江平生物(45%有机质)有机肥3 000 kg/hm<sup>2</sup>作为底肥,分别于7月25日和8月20日追施氮磷钾复合肥75 kg/hm<sup>2</sup>。从播种开始定期进行田间观测,记录各个生育阶段的物候性。种子成熟期收获种子,标记为T1。

## 1.3 试验方法

### 1.3.1 样本的采集与制备

以油用亚麻品种坝选3号为试验材料,分为CK(未在西藏地区种植收获的种子)和T1(在西藏地区完成一个生长周期后收获的种子)两个组,进行脂质代谢组学分析,每组3次重复。采用UHPLC Nexera LC-30A(岛津,日本)超高效液相色谱系统进行分离,采用Q-Exactive Plus质谱仪(赛默飞,美国)进行质谱分析,应用LipidSearch软件(赛默飞,美国)进行脂质鉴定与数据预处理<sup>[5]</sup>。

# 2 结果与分析

## 2.1 物候性调查情况

由表1可知,于5月19日完成播种,6月11日出苗,6月29日到达枹形期,7月18日进入快速生长期,现蕾期为8月19日,在10月8日达到种子成熟期,完成收获,全生育期为119 d。

## 2.2 样本质量控制

对质控样本进行Pearson相关性分析,见图1。试验结果表明质控样本间的相关性系数都在0.9以上,说明试验稳定性较好。

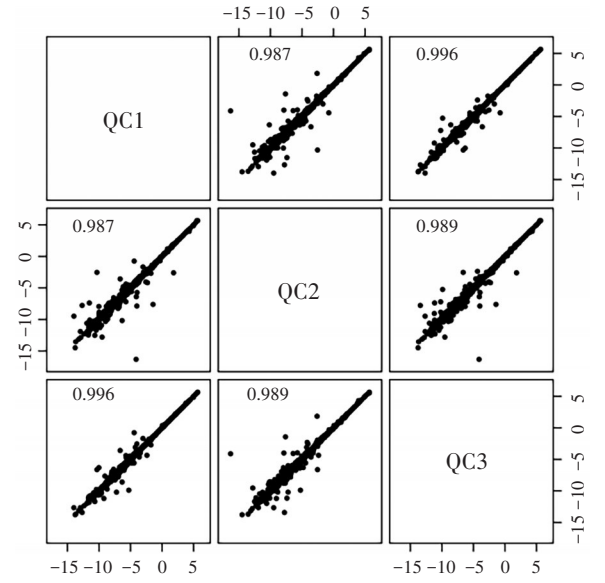


图1 质控样本相关性图谱

## 2.3 油用亚麻种子种代谢物总体分布

油用亚麻种子中鉴定出2 309种代谢物,可分为46类,其中三酰甘油最多,为788种,占总数的34.13%。进一步分析每个材料的脂质组成及含量,发现高原种植油用亚麻后,其中主要成分甘油三酯(TG)、甘油二酯(DG)和磷脂酰甘油(PG)的含量分别降低了0.33%、5.97%和14.74%,而磷脂酰乙醇胺(PE)和甘油磷脂酸(PA)含量分别升高了7.10%和6.34%(图3)。说明,高原种植油用亚麻能改变其脂质亚类的含量和占比。

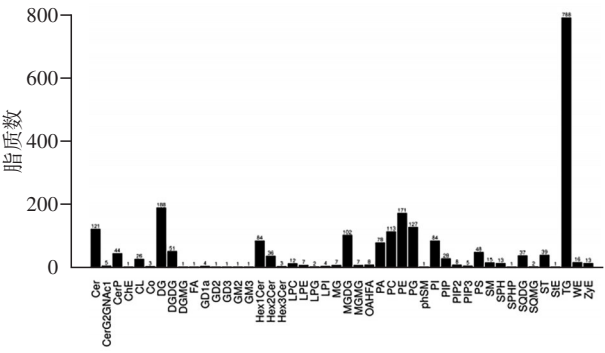


图2 油用亚麻脂质亚类个数

对两个材料中所有检测到的脂质分子进行了差异分析(FC>1.5, $p<0.05$ ),差异显著的用玫红色表示,差异不显著代谢物用黑色表示,结果见图4,筛选得到的显著差异脂质分子理化性质见表1。

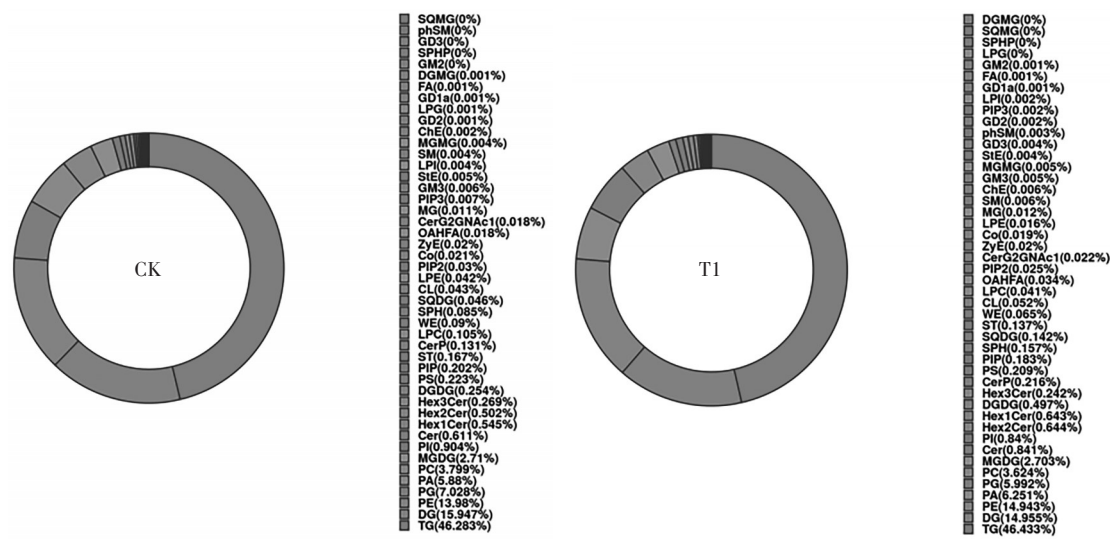


图3 不同油用亚麻的脂质亚类组成

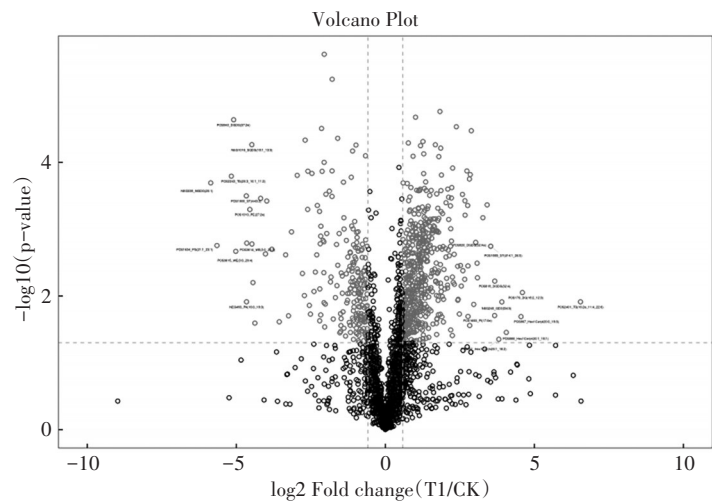


图4 油用亚麻籽中差异脂质分子火山图

表1 油用亚麻籽中显著性差异脂质分子

脂质	等级	离子配方	CalMz	RT-/min	折变	p 值	VIP
PE(33:2)+Na	PE	C <sub>38</sub> H <sub>72</sub> O <sub>8</sub> N <sub>1</sub> P <sub>1</sub> Na <sub>1</sub>	724.488 8	3.661 9	2.444 2	0.001 2	9.225 5
PE(35:5)+H	PE	C <sub>40</sub> H <sub>71</sub> O <sub>8</sub> N <sub>1</sub> P <sub>1</sub>	724.491 2	3.672 0	2.335 5	0.006 2	8.632 1
DG(18:0_18:3)+NH <sub>4</sub>	DG	C <sub>39</sub> H <sub>74</sub> O <sub>5</sub> N <sub>1</sub>	636.556 2	8.670 8	0.688 3	0.007 1	7.769 3
DG(18:3_18:3)+NH <sub>4</sub>	DG	C <sup>39</sup> H <sub>68</sub> O <sub>5</sub> N <sub>1</sub>	630.509 2	6.209 9	1.410 7	0.003 5	6.866 4
PE(35:4)+H	PE	C <sub>40</sub> H <sub>73</sub> O <sub>8</sub> N <sub>1</sub> P <sub>1</sub>	726.506 8	4.559 5	1.348 9	0.003 3	6.794 5
DG(18:0_18:2)+NH <sub>4</sub>	DG	C <sub>39</sub> H <sub>76</sub> O <sub>5</sub> N <sub>1</sub>	638.571 8	9.529 7	0.529 7	0.001 1	6.376 9
DG(34:1e)+Na	DG	C <sub>37</sub> H <sub>72</sub> O <sub>4</sub> Na <sup>1</sup>	603.532 3	7.072 9	0.572 1	0.002 1	6.154 1
DG(12:1e_22:4)+Na	DG	C <sub>37</sub> H <sub>64</sub> O <sub>4</sub> Na <sub>1</sub>	595.469 7	3.656 7	2.418 5	0.001 5	5.986 3
DG(36:4e)+H	DG	C <sub>39</sub> H <sub>71</sub> O <sub>4</sub>	603.534 7	7.082 3	0.586 8	0.001 7	5.837 3
DG(12:0e_22:2)+Na	DG	C <sub>37</sub> H <sub>70</sub> O <sub>4</sub> Na <sub>1</sub>	601.516 6	6.197 6	0.713 3	0.005 6	5.817 4

续表

脂质	等级	离子配方	CalMz	RT-/min	折变	p 值	VIP
DG(36:5e)+H	DG	C <sub>39</sub> H <sub>69</sub> O <sub>4</sub>	601.519 0	6.190 2	0.715 2	0.005 1	5.789 1
DG(16:0_18:3)+NH <sub>4</sub>	DG	C <sub>37</sub> H <sub>70</sub> O <sub>5</sub> N <sub>1</sub>	608.524 9	7.819 7	1.813 6	0.000 2	5.306 5
DG(18:3_18:2)+NH <sub>4</sub>	DG	C <sub>39</sub> H <sub>70</sub> O <sub>5</sub> N <sub>1</sub>	632.524 9	6.977 4	1.279 3	0.007 9	4.892 0
PA(17:0_18:3)-H	PA	C <sub>38</sub> H <sub>68</sub> O <sub>8</sub> N <sub>0</sub> P <sub>1</sub>	683.465 7	5.399 7	1.769 3	0.000 3	4.702 9
PA(17:0_18:2)-H	PA	C <sub>38</sub> H <sub>70</sub> O <sub>8</sub> N <sub>0</sub> P <sub>1</sub>	685.481 4	6.146 2	1.432 5	0.007 9	4.684 4
DG(34:4e)+Na	DG	C <sub>37</sub> H <sub>66</sub> O <sub>4</sub> Na <sub>1</sub>	597.485 3	4.565 6	1.356 1	0.003 6	4.574 8
TG(18:3_18:3_18:3)+H	TG	C <sub>57</sub> H <sub>93</sub> O <sub>6</sub>	873.696 7	9.233 8	0.810 1	0.030 2	4.550 5
PC(16:1_14:1)+H	PC	C <sub>38</sub> H <sub>73</sub> O <sub>8</sub> N <sub>1</sub> P <sub>1</sub>	702.506 8	5.409 5	1.622 1	0.006 3	4.485 2
DGDG(18:3_18:3)+Na	DGDG	C <sub>51</sub> H <sub>84</sub> O <sub>15</sub> Na <sub>1</sub>	959.570 2	4.067 1	3.392 4	0.000 7	4.304 9
PC(16:0_14:1)+H	PC	C <sub>38</sub> H <sub>75</sub> O <sub>8</sub> N <sub>1</sub> P <sub>1</sub>	704.522 5	6.118 2	1.428 0	0.017 2	4.292 2

为了更全面直观地显示样本之间的关系以及脂质在不同样本中的表达模式差异,对显著性差异脂质(VIP>1, $p<0.05$ )进行层次聚类分析。如图5所示,高原地区种植油用亚麻的种子种脂质分子的含量发生显著变化,红色代表含量相对较高,蓝色代表含量相对较低,表达模式接近的脂质分子聚在左侧同一分支下。从图中的各类脂质代谢物变化趋势可以看出,约62.4%的脂质物质含量呈上升趋势。

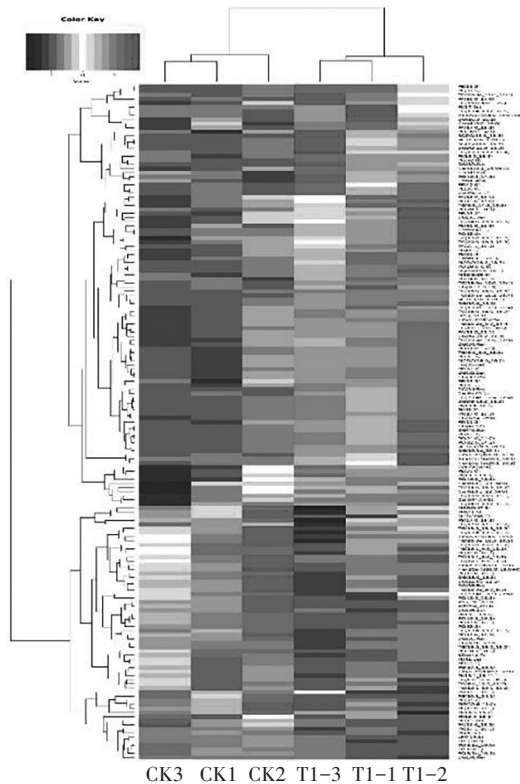


图5 油用亚麻籽中差异脂质聚类热图

2.4 正交偏最小二乘法判别分析(OPLS-DA)及模型验证

为了更准确地反应西藏环境对油用亚麻中脂质代谢物的变化特征,采用 OPLS-DA 对西藏地区种植的油用亚麻材料 and 对照组的数据进行分析,从而进一步得到两组样本的差异代谢物的信息。研究结果表明, $Q^2$  为 0.99,说明该模型具有较好的预测能力;由 OPLS-DA 得分图结果可知,各组样本聚集较为集中,均在 95% 置信区间内,说明组内差异较小,在可接受范围内,表明高原地区种植改变了油用亚麻材料的脂质代谢物含量(图6)。

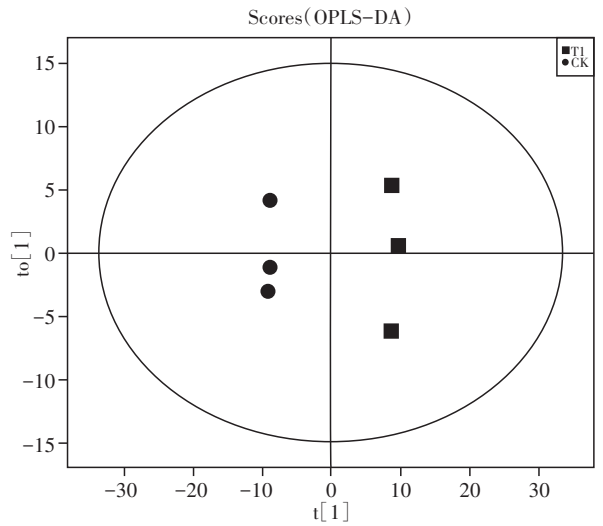


图6 油用亚麻籽的脂质代谢物 OPLS-DA 得分图

链长度是脂质分子所具有的脂肪酸链的 C 原子总和,图7(A)显示,脂肪酸 FA 的碳链长度为 18,在西藏地区种植后,碳链长度为 18 的 FA 含量高于



对照材料。链饱和度是该脂质分子所具有的脂肪酸链的双键数量的总和,进一步对其链饱和度分析,图7(B)显示,不饱和度为3。

为探讨油用亚麻油中不同脂质间的相互关系,对显著性差异脂质(VIP>1, $p<0.05$ )之间的代谢密切程度进行相关性分析(图8)。正相关的脂质也可能表明其来源于同一合成途径,负相关表明可能被分解用于其他脂质的合成,即合成转化关系。脂

肪酸与磷脂酰肌醇、磷脂酰胆碱、甘油三酯等物质正相关,与磷脂酸、磷脂酰肌醇一磷酸、单半乳糖基二酰基甘油、甘油二酯等物质负相关。

3 讨论与结论

3.1 讨论

2023年在西藏加查县开展油用亚麻的大面积生产试验,该品种的生育期为105 d,引种至加查县

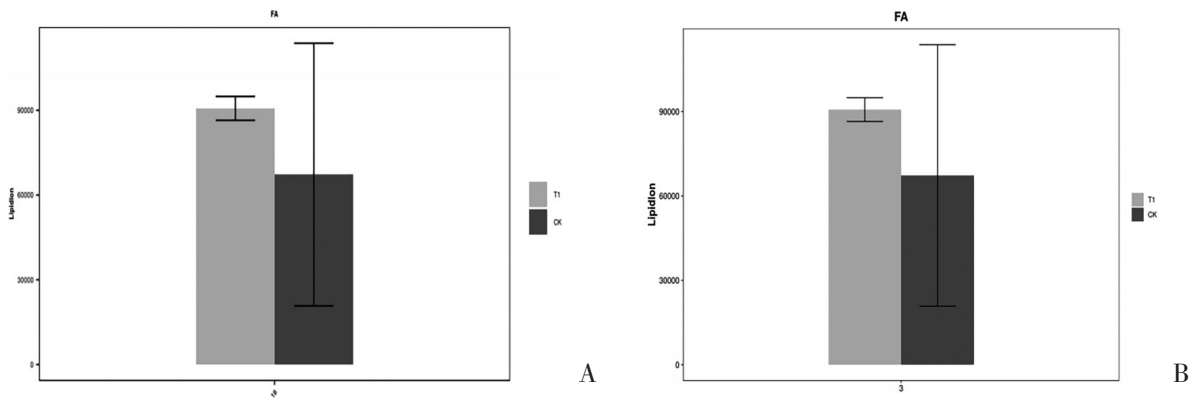


图7 脂肪酸碳链长度(A)和脂肪酸链饱和度(B)分析

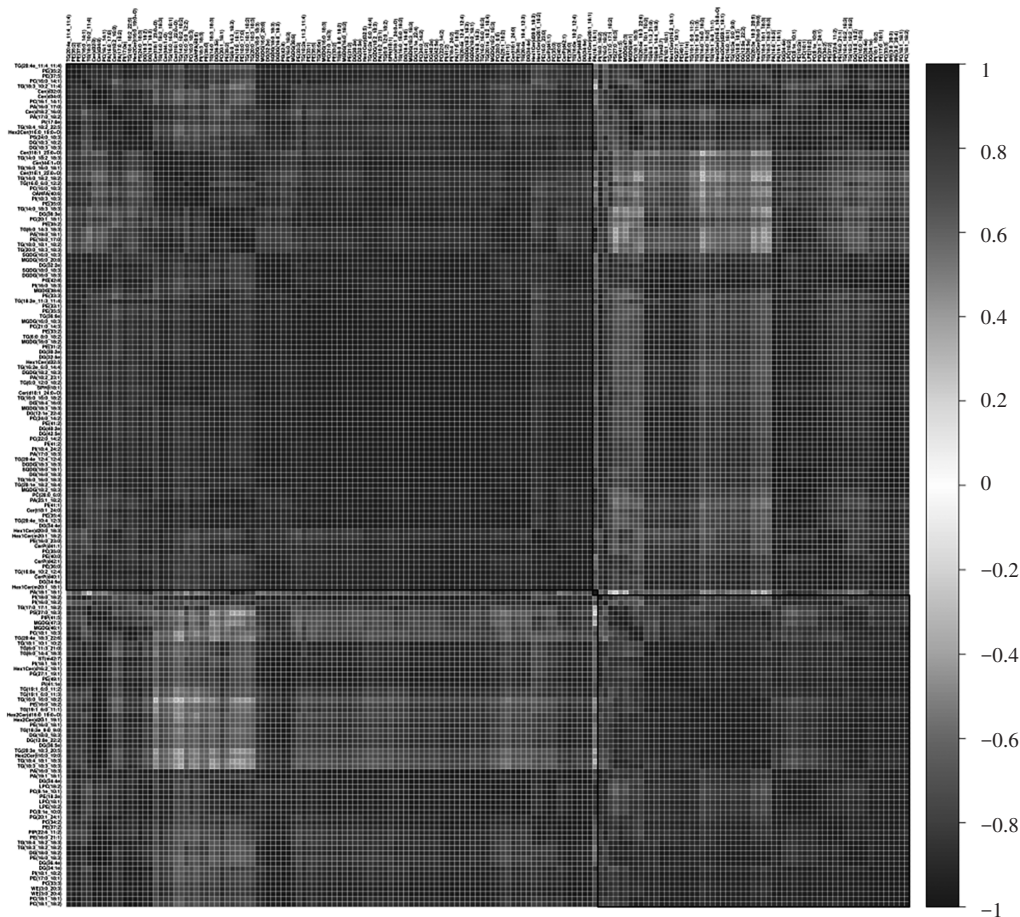


图8 油用亚麻籽中脂质成分相关性聚类分析

后,生育期延长至119 d。油用亚麻是长日照作物,北方品种引种至南方后,生育期存在延长现象<sup>[4]</sup>。

西藏山南地区位于藏南谷地,气温相对偏低,降水较少,昼夜温差较大且太阳辐射量丰富<sup>[6]</sup>。通过多年引种试验发现,油用亚麻在该地区可以生长,且农艺性状和产量性状表现较好<sup>[4]</sup>。亚麻籽中含油35%以上,且富含 $\alpha$ -亚麻酸, $\alpha$ -亚麻酸是人们必须的营养素之一,对人体的健康有重要的意义<sup>[7]</sup>。本研究利用脂质代谢组学,分析了西藏地区油用亚麻籽与平原地区油用亚麻籽的脂质成分差异,发现西藏种植油用亚麻能改变其脂质亚类的含量和占比;进一步分析发现,碳链长度为18的FA含量高于对照材料,且其不饱和度为3,推测这些脂肪酸类物质可能是油酸、亚油酸、亚麻酸等,具体分类有待进一步研究。从整体水平看,高原地区种植的油用亚麻籽中碳链长度为18、不饱和度为3的脂肪酸含量呈上升趋势。因此,初步推测西藏地区特殊的高原环境促进了油用亚麻籽中脂肪酸类物质的合成,有利于油酸、亚油酸、亚麻酸等物质的积累,进而提高亚麻油的营养成分<sup>[8-9]</sup>。

植物种子中的脂肪通常以甘油三酯的形式存在,脂肪的合成与代谢都是十分复杂的生物过程<sup>[10]</sup>。相关性分析显示,油用亚麻中脂肪酸与磷脂酰肌醇、磷脂酰胆碱、甘油三酯等物质正相关,与磷脂酸、磷脂酰肌醇一磷酸、单半乳糖基二酰基甘油、甘油二酯等物质负相关。从脂质代谢物含量角度,初步揭示了他们之间的代谢关系。下一步将结合油用亚麻种子中 $\alpha$ -亚麻酸等脂类物质的表达量进行检测,揭示油用亚麻在青藏高原这种特殊条件下 $\alpha$ -亚麻酸等脂质合成转化关系;再进一步通过对脂代谢酶的功能及相关基因研究,从基因和蛋白层面揭示青藏高原特殊的环境条件对油用亚麻中 $\alpha$ -亚麻酸等脂类物质代谢的影响<sup>[11]</sup>。

## 3.2 结论

通过在西藏地区引种油用亚麻,不仅可以调整种植结构、丰富农作物类型,还有较好的经济效益。与平原地区相比,青藏高原种植的油用亚麻籽中油酸、亚油酸、亚麻酸等不饱和脂肪酸含量呈上升趋势。本研究从油用亚麻籽的脂质成分含量角度,为青藏高原引种油用亚麻及延长产业链、提高附加值等产业发展提供参考。

## 参考文献:

- [1] ZHANG D, LI X J, DUAN X L, et al. Lipidomics Reveals the Changes in Lipid Profile of Flaxseed Oil Affected by Roasting [J]. Food Chemistry, 2021, 364: 130431.
- [2] 邓乾春,禹晓,黄庆德,等.亚麻籽油的营养特性研究进展[J].天然产物研究与开发,2010,22(4):715-721.
- [3] 殷志斌,陈旭峰,江彪,等.脂质分析技术及其在植物种子脂质代谢调控研究中的应用进展[J].广东农业科学,2022,49(11):74-85.
- [4] 欧珠,白玛玉珍,杨斌,等.山南市亚麻引种试验[J].现代农业科技,2022(23):41-43,47.
- [5] SHI C P, GUO H, WU T T, et al. Effect of Three Types of Thermal Processing Methods on the Lipidomics Profile of Tilapia Fillets by UPLC-Q-Extrative Orbitrap Mass Spectrometry [J]. Food Chemistry, 2019, 298: 125029.
- [6] 其米玉珍,洛桑旺姆,赤桑单吉.西藏山南地区农业气候资源特点及主要气象灾害分析[J].安徽农业科学,2016,44(26):161-162,172.
- [7] 林凤英,林志光,邱国亮,等.亚麻籽的功能成分及应用研究进展[J].食品工业,2014,35(2):220-223.
- [8] 谢正新,次仁曲宗,杨智永,等.植物对高寒环境的生理生态适应性研究进展[J].西藏科技,2023,45(6):11-19.
- [9] 曹昆,屈文言,徐洪伟,等.冷驯化下的牛皮杜鹃转录组变化分析[J].吉林师范大学学报(自然科学版),2021,42(1):92-98.
- [10] 周奕华,陈正华.植物种子中脂肪酸代谢途径的遗传调控与基因工程[J].植物学通报,1998(5):16-23.
- [11] YU S Y, ZHANG X, HUANG L B, et al. Transcriptomic Analysis of  $\alpha$ -Linolenic Acid Content and Biosynthesis in *Paeonia Ostii* Fruits and Seeds [J]. BMC Genomics, 2021, 22(1):297.