

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2021.02.017

金灿, 李克虎, Harold Corke, 等. 黍稷籽粒含油量及脂肪酸组成分析[J]. 粮油食品科技, 2021, 29(2): 122-128.

JIN C, LI K H, HAROLD C, et al. Oil content and fatty acid composition profiles in *Panicum miliaceum* L. grain[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2021, 29(2): 122-128.

# 黍稷籽粒含油量及脂肪酸组成分析

金 灿<sup>1</sup>, 李克虎<sup>3</sup>, Harold Corke<sup>1</sup>, 李海权<sup>2</sup>✉

(1. 上海交通大学 农业与生物学院 食品科学与工程系, 上海 200240;

2. 河北省农林科学院 谷子研究所, 河北 石家庄 050035;

3. 贵州大学 生命科学学院 生物技术系, 贵州 贵阳 550025)

**摘要:** 研究分析 18 个黍稷 (*Panicum miliaceum* L.) 品种的籽粒含油量和脂肪酸组成。结果表明, 黍稷籽粒含油量为 2.54%~4.00%, 均值 3.71%。黍稷籽粒中主要脂肪酸为亚油酸(18:2n6)、油酸(18:1n9)和棕榈酸(16:0), 含量区间分别为 0.075~5.19、0.150~3.02 和 0.897~1.81 g/100 g, 并含有棕榈油酸、硬脂酸、亚麻酸、花生四烯酸、二十二烷酸和二十四烷酸。不饱和脂肪酸(UFA)占总油脂的 82.1%~94.6%。相关性分析和主成分分析的结果表明, 10 种脂肪酸含量存在显著的相关性。聚类分析表明, 脂肪酸组成在黍稷品种间的差异显著。

**关键词:** 含油量; 脂肪酸组成; 黍稷; 主成分分析; 聚类分析

中图分类号: TS224.4 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2021)02-0122-07

## Oil Content and Fatty Acid Composition Profiles in *Panicum miliaceum* L. Grain

JIN Can<sup>1</sup>, LI Ke-hu<sup>3</sup>, Harold Corke<sup>1</sup>, LI Hai-quan<sup>2</sup>✉

(1. Shanghai Jiao Tong University, Department of Food Science and Technology, Shanghai 200240, China;

2. Hebei Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Institute of Millet Crops, Shijiazhuang, Hebei

050035, China; 3. Guizhou University, College of Life Sciences, Guiyang, Guizhou 550025, China)

**Abstract:** Oil content and fatty acid composition profiles in grain of 18 proso millet accessions were investigated. The results showed that oil content in proso millet ranged from 2.54% to 4.00%, and averaged 3.71%. The major fatty acids detected were linoleic (18:2n6), oleic (18:1n9) and palmitic (16:0), ranging from 0.075 to 5.19, 0.150 to 3.02, and 0.897 to 1.81 g/100 g, respectively. Minor fatty acids included palmitoleic, stearic, linolenic, arachidic, arachidonic, docosanoic and tetracosanoic acids. The unsaturated fatty acids (UFA) accounted for 82.1%~94.6% of the total oil. Both correlation analysis and principal component analysis indicated significant inter-relationships among ten fatty acids. Cluster analysis suggested that the fatty acid profile was significantly related to genotypes.

**Key words:** oil content; fatty acid composition; proso millet; principal component analysis; cluster analysis

收稿日期: 2020-10-30

基金项目: 河北省重点研发计划(20326322D); 河北省农林科学院科学技术研究与发展计划项目(2018030301)

Supported by: Key Research Project of Hebei Province (No. 20326322D); Science and Technology Research and Development Project of Hebei Academy of Agriculture and Forestry Sciences (No. 2018030301)

作者简介: 金灿, 女, 1997 年出生, 在读研究生, 研究方向为糜子油脂品质分析。E-mail: jincan1997@sjtu.edu.cn.

通讯作者: 李海权, 男, 1977 年出生, 副研究员, 研究方向为糜子种质资源与遗传育种。E-mail: lihaiquan77@aliyun.com.

黍稷 (*Panicum miliaceum* L.) 属于禾本科植物, 是一种广泛种植的谷类作物, 被认为是人类历史上最早的种植谷物之一<sup>[1]</sup>。它是一种环境友好作物, 在贫瘠、干旱和高温环境下仍然可以生长<sup>[2]</sup>。黍稷种植过程中不需要使用化肥和农药, 种子的生长成熟周期很短。因此, 黍稷能够在其他粮食作物可能欠收的地区生长生产<sup>[3]</sup>, 所以它是重要的战略储备作物。

目前已发表有关黍稷的研究主要集中在其营养成分和抗氧化性方面。Yu Wen 等研究了不同地理来源的黍稷所含淀粉特性的相关性, 发现黍稷淀粉的理化性质受基因型和环境因素的影响<sup>[4]</sup>。Akharume 等测定了籽粒蛋白质组分的物理化学和功能特性, 并讨论了蛋白质结构与功能关系<sup>[5]</sup>。Shen 等比较了 9 个来自中国的黍稷品种之间的化学成分、抗氧化和抗细菌增殖活性<sup>[6]</sup>。然而, 目前国内外对以黍稷为主要原料的食品开发还不够充分, 作为一种新的商业用油类别, 谷物油由于其独特的健康效益而引起消费者的兴趣<sup>[7-9]</sup>。有研究表明, 黍稷籽粒有生产食用油或生物柴油的开发前景<sup>[10]</sup>。由于目前国内外有关黍稷油的资料有限, 还需要进行基础性和系统性的研究, 以便更好地了解这种油的质量和潜在用途。类似研究已经在主要谷类作物 (玉米和水稻) 上开展, 甚至许多小杂粮作物也有了一定研究。Mehmood 等为了研究新型食用油来源, 测定了 10 个高粱品种的油脂含量和脂肪酸组成<sup>[11]</sup>。在燕麦中, Banas 研究了不同品种和不同种子发育阶段籽粒中的含油量和脂肪酸分布<sup>[12]</sup>。在谷子中, 粗脂肪含量、脂肪酸组成及其相关性已经得到了很好的研究<sup>[13-14]</sup>。

谷物的含油量决定了其油脂产品开发的潜力, 脂肪酸组成决定着油脂的理化性质、营养功能及开发前景。目前, 脂肪酸组成在黍稷品种间的差异, 各脂肪酸的相关性, 均鲜有报道。因此, 本研究以来自不同产地的 18 个黍稷品种为研究对象, 测定籽粒含油量及脂肪酸组成, 分析油性状的相关性及品种间的差异, 旨在为黍稷油脂的开发利用以及定向育种提供一定的科学指导。

## 1 材料和方法

### 1.1 材料和仪器

实验材料: 18 个来自不同地区的黍稷原料, 产地和品种名如表 1 所列。

实验仪器: JLG-II A 砻谷机: 中储粮成都储藏研究院有限公司; HC-700Y 高速粉碎机: 永康市天祺盛世工贸有限公司; SZC-101 脂肪测定仪: 上海纤检仪器有限公司; DHG-9030A 电热鼓风干燥箱: 上海精宏实验设备有限公司; LE204E/02 电子天平: 梅特勒-托利多仪器上海有限公司; 7890B-5975B 气相色谱-质谱联用仪 (GC-MS): 美国安捷伦公司。

### 1.2 石油醚提取黍稷油工艺

将黍稷籽粒用砻谷机脱去外壳, 烘干至恒重后, 用高速粉碎机将其打碎成粉末状备用。然后用索氏提取法提取黍稷油: 用滤纸准确称取 2 g (精确到 0.001 g) 黍稷粉, 包裹后放入滤纸筒, 放入索氏提取仪并打开循环冷凝水, 每个样品杯中加入一定比例的石油醚, 打开脂肪提取仪进行四个阶段的温度和时间设置: (1) 浸泡: 55 °C, 30 min; (2) 淋洗: 80 °C, 30 min; (3) 回收: 95 °C, 15 min; (4) 蒸干: 110 °C, 10 min。然后取出样品杯进行称重, 计算黍稷油的得率。重复三次实验, 选取得率的平均值。

$$\text{含油量} / \% = \frac{M_1 - M_0}{M} \times 100\%$$

式中:  $M_1$  为提取后样品杯与油的质量 (g);  $M_0$  为提取前空的样品杯的质量 (g);  $M$  为样品黍稷粉末的质量 (g)。

### 1.3 样品检测脂肪酸前处理

在进行 GC-MS 分析前要进行脂肪酸的甲酯化。精确称量 50 mg 经上述方法得到的黍稷油, 并将其转移到 10 mL 反应管中, 然后, 添加 2 mL 正己烷和 2 mL 甲醇氢氧化钠溶液 (0.4 mol/L)。盖紧管盖后, 在旋涡混合器上将其振荡混合 30 s。将盛有样品的管子放入 70 °C 的水浴中 10 min, 然后取出并使其冷却至室温。加入饱和 NaCl 溶液至总体积达到 10 mL, 将混合物摇匀后分层, 收集上清液, 经微滤后转移至色谱瓶待用。

### 1.4 样品检测 GC-MS 条件

气相色谱条件: 色谱柱: DB-wax (30 m × 0.25 mm × 0.25 μm); 升温程序: 初始柱 GC-MS 温为 70 °C, 持续 5 min, 随后以 4 °C/min 的速率升高至 200 °C, 以 2 °C/min 的速率升至 240 °C, 温度保持在 240 °C 下 10 min; 进样温度: 260 °C; 进样量: 1.00 μL; 分流比: 不分流; 载

气：氦气（99.999%）；流速：1 mL/min。

质谱条件：电离方式：EI<sup>+</sup>，70 eV；扫描方式：全扫描；选择离子监测：74 m/z；质量扫描范围 30~500 amu；离子源温度：230 °C；四级杆温度：150 °C。

### 1.5 脂肪酸含量分析

为了确保鉴定的准确性，将主要成分与 Supelco 37 个组分脂肪酸甲酯（FAME）混合物标准品（CRM47885，Sigma-Aldrich，St. Louis，MO）进行比较。将标准品用正己烷逐级稀释至原浓度的 1/2、1/4、1/8、1/16，得到一系列不同浓度的标准品。标准品在 1.4 条件下进行 GC-MS 分析后建立标准曲线。利用 NIST 谱库，并对比标准品中的脂肪酸出峰时间鉴定脂肪酸，根据峰面积，利用标准曲线计算脂肪酸含量。

### 1.6 统计分析

所有样品分析重复两次，数据使用 SPSS Statistics 19.0（IBM，Armonk，NY）进行处理。方差分析和 Duncan 多重极差检验差异显著性（ $P < 0.05$ ）。采用 Pearson 相关性分析和主成分分析法对油脂性状相关性进行分析。采用 Ward 方法对 18 份不同地区的黍稷种质进行聚类分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 黍稷含油量

表 1 列出了 18 个黍稷种质的籽粒含油量。含油量在 2.54%~4.00% 之间，平均 3.71%（表 2）。其中红糜子（内蒙古）含油量最低，小黑黍（山西）含油量最高（表 1）。Osman 等对五个大麦品种、六个高粱品种进行含油量的研究，得出大麦籽粒的含油量在 1.90%~2.87% 之间，高粱种子的含油量在 3.95%~5.63%<sup>[15]</sup>。Vázquez 等对 6 个不同基因型的玉米进行研究，得出玉米种子的油的含量在 4.2%~6.8% 之间<sup>[16]</sup>，Zhang 等在研究了 7 个品种的小米含油量后得出其粗脂肪含量在 3.38%~6.49% 之间<sup>[14]</sup>。Kitta 等对 9 个品种的粳稻进行研究，发现粳稻的含油量在 2.76%~3.91% 之间<sup>[17]</sup>。在对 4 000 多份燕麦材料研究后统计发现燕麦的含油量从 3.1% 到 11.6% 不等，平均为 7.0%<sup>[18]</sup>。总体来说，与其他谷类作物相比，黍稷的含油量通常高于大麦，低于玉米和燕麦，与水

表 1 本研究中使用的 18 个样品的品种名、产地和含油量

Table 1 Common name, geographical origin and oil content of 18 samples used in this study

编号	品种名	产地	含油率/%
4	红糜子	内蒙古	2.54
5	密穗红	宁夏	2.71
1	蚂蚱眼	辽宁	2.74
15	黄糜子	辽宁	2.76
17	青陇黄黍	河北	2.78
18	白稷子	江苏	2.87
16	红鹤鹑尾	黑龙江	3.07
9	黑糜子	黑龙江	3.08
10	黄黍子	内蒙古	3.10
6	黑稷子	山东	3.12
8	白黍子	河北	3.20
2	黍子	波兰	3.21
3	790051	印度	3.33
11	红粘糜	甘肃	3.42
7	白圪塔糜	青海	3.45
13	红糜	陕西	3.74
14	白软黍	山西	3.95
12	小黑黍	山西	4.00

稻和谷子相似。

### 2.2 脂肪酸组成

表 2 列出了 18 个黍稷品种的脂肪酸组成。共检测到 10 种主要脂肪酸：棕榈酸（16:0）、棕榈油酸（16:1n9）、硬脂酸（18:0）、油酸（18:1n9）、亚油酸（18:2n6）、亚麻酸（18:3n6）、花生烯酸（20:1n11）、二十二烷酸（22:0）和二十四烷酸（24:0），如图 1。其中亚油酸（18:2n6）、油酸（18:1n9）和棕榈酸（16:0）是黍稷油中含量最高的三种脂肪酸。这三种脂肪酸的范围分别为 0.075~5.19、0.150~3.02 和 0.897~1.81（g/100 g），平均值分别为 1.61、1.18 和 1.39（g/100 g）。

黍稷油的脂肪酸组成与其他谷类作物相似。研究发现燕麦中含量最丰富的脂肪酸是亚油酸、油酸和棕榈酸<sup>[19]</sup>，玉米油中的主要脂肪酸是油酸、亚油酸和棕榈酸，糙米中的主要脂肪酸是棕榈酸、亚油酸和油酸<sup>[20]</sup>。但是与其他谷类品种相比，黍稷油中不饱和脂肪酸（UFA）的比例更高。

在 18 个样品中，不饱和脂肪酸（UFA）的含量在 82.1%~94.7% 之间。饱和脂肪酸，包括硬脂酸、花生烯酸、二十二烷酸和二十四烷酸含量相对较低。在不饱和脂肪酸中，单不饱和脂肪酸（MUFA）的含量在 42.1%~75.6% 之间，多不饱和脂肪酸（PUFA）的含量在 10.5%~52.4% 之间。

表 2 18 个不同基因型黍稷的脂肪酸组成和含量  
Table 2 Composition and content of fatty acids in 18 proso millet genotypes

编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
棕榈酸 (16:0)	1.760 <sup>ab</sup>	0.969 <sup>fg</sup>	1.158 <sup>defg</sup>	0.934 <sup>g</sup>	1.403 <sup>bcd</sup>	1.512 <sup>abcd</sup>	1.397 <sup>cde</sup>	1.793 <sup>a</sup>	1.333 <sup>cde</sup>	1.637 <sup>abc</sup>	1.609 <sup>abc</sup>	1.315 <sup>cdef</sup>	1.814 <sup>a</sup>	1.794 <sup>a</sup>	1.466 <sup>abcd</sup>	1.199 <sup>defg</sup>	1.065 <sup>efg</sup>	0.897 <sup>g</sup>
棕榈油酸 (16:1n9)	0.120 <sup>a</sup>	0.040 <sup>b</sup>	0.023 <sup>b</sup>	0.032 <sup>b</sup>	0.039 <sup>b</sup>	0.032 <sup>b</sup>	0.041 <sup>b</sup>	0.041 <sup>b</sup>	0.044 <sup>b</sup>	0.037 <sup>b</sup>	0.031 <sup>b</sup>	0.049 <sup>b</sup>	0.043 <sup>b</sup>	0.037 <sup>b</sup>	0.041 <sup>b</sup>	0.029 <sup>b</sup>	0.029 <sup>b</sup>	0.025 <sup>b</sup>
硬脂酸 (18:0)	0.050 <sup>f</sup>	0.025 <sup>f</sup>	0.250 <sup>de</sup>	0.030 <sup>f</sup>	0.205 <sup>e</sup>	0.215 <sup>e</sup>	0.380 <sup>e</sup>	0.610 <sup>a</sup>	0.220 <sup>e</sup>	0.050 <sup>f</sup>	0.485 <sup>b</sup>	0.020 <sup>f</sup>	0.290 <sup>d</sup>	0.085 <sup>f</sup>	0.035 <sup>f</sup>	0.040 <sup>f</sup>	0.025 <sup>f</sup>	0.020 <sup>f</sup>
油酸 (18:1n9)	0.265 <sup>e</sup>	0.330 <sup>e</sup>	1.700 <sup>d</sup>	0.180 <sup>e</sup>	2.340 <sup>bc</sup>	2.075 <sup>cd</sup>	3.015 <sup>a</sup>	2.575 <sup>b</sup>	2.220 <sup>bc</sup>	0.280 <sup>e</sup>	2.535 <sup>b</sup>	0.335 <sup>e</sup>	2.175 <sup>bc</sup>	0.330 <sup>e</sup>	0.265 <sup>e</sup>	0.505 <sup>e</sup>	0.150 <sup>e</sup>	0.150 <sup>e</sup>
亚油酸 (18:2n6)	0.235 <sup>e</sup>	0.110 <sup>e</sup>	0.435 <sup>e</sup>	0.100 <sup>e</sup>	4.000 <sup>cd</sup>	3.910 <sup>d</sup>	5.185 <sup>a</sup>	4.735 <sup>b</sup>	4.435 <sup>bc</sup>	0.260 <sup>e</sup>	4.040 <sup>cd</sup>	0.195 <sup>e</sup>	0.495 <sup>e</sup>	0.320 <sup>e</sup>	0.180 <sup>e</sup>	0.205 <sup>e</sup>	0.105 <sup>e</sup>	0.075 <sup>e</sup>
亚麻酸 (18:3n6)	0.260 <sup>ab</sup>	0.100 <sup>de</sup>	0.085 <sup>e</sup>	0.105 <sup>e</sup>	0.220 <sup>ab</sup>	0.225 <sup>ab</sup>	0.270 <sup>a</sup>	0.270 <sup>a</sup>	0.240 <sup>ab</sup>	0.210 <sup>b</sup>	0.215 <sup>b</sup>	0.115 <sup>cde</sup>	0.1550 <sup>c</sup>	0.140 <sup>cd</sup>	0.155 <sup>c</sup>	0.145 <sup>cd</sup>	0.100 <sup>de</sup>	0.100 <sup>de</sup>
花生酸 (20:0)	0.365 <sup>a</sup>	0.105 <sup>de</sup>	0.095 <sup>e</sup>	0.110 <sup>de</sup>	0.105 <sup>de</sup>	0.110 <sup>de</sup>	0.160 <sup>bcd</sup>	0.220 <sup>b</sup>	0.110 <sup>cde</sup>	0.210 <sup>bc</sup>	0.180 <sup>bcd</sup>	0.120 <sup>bcd</sup>	0.200 <sup>bcd</sup>	0.160 <sup>bcd</sup>	0.145 <sup>bcd</sup>	0.155 <sup>bcd</sup>	0.110 <sup>cde</sup>	0.095 <sup>e</sup>
花生烯酸 (20:1n11)	0.250 <sup>d</sup>	0.090 <sup>cd</sup>	0.075 <sup>d</sup>	0.090 <sup>cd</sup>	0.130 <sup>cd</sup>	0.145 <sup>cd</sup>	0.135 <sup>cd</sup>	0.095 <sup>cd</sup>	0.155 <sup>c</sup>	0.090 <sup>cd</sup>	0.095 <sup>cd</sup>	0.090 <sup>cd</sup>	0.105 <sup>cd</sup>	0.230 <sup>ab</sup>	0.165 <sup>bc</sup>	0.100 <sup>cd</sup>	0.165 <sup>bc</sup>	0.145 <sup>cd</sup>
二十二烷酸 (22:0)	0.085 <sup>b</sup>	0.025 <sup>e</sup>	0.030 <sup>e</sup>	0.030 <sup>e</sup>	0.090 <sup>b</sup>	0.085 <sup>b</sup>	0.105 <sup>ab</sup>	0.125 <sup>a</sup>	0.100 <sup>ab</sup>	0.050 <sup>c</sup>	0.115 <sup>ab</sup>	0.030 <sup>c</sup>	0.040 <sup>c</sup>	0.050 <sup>c</sup>	0.040 <sup>c</sup>	0.030 <sup>c</sup>	0.035 <sup>c</sup>	0.030 <sup>c</sup>
二十四烷酸 (24:0)	0.040 <sup>k</sup>	0.130 <sup>bc</sup>	0.155 <sup>a</sup>	0.145 <sup>ab</sup>	0.060 <sup>ij</sup>	0.050 <sup>jk</sup>	0.065 <sup>hij</sup>	0.080 <sup>gh</sup>	0.060 <sup>ij</sup>	0.105 <sup>ef</sup>	0.075 <sup>hi</sup>	0.120 <sup>cde</sup>	0.155 <sup>a</sup>	0.105 <sup>ef</sup>	0.110 <sup>def</sup>	0.095 <sup>fg</sup>	0.125 <sup>cd</sup>	0.130 <sup>bc</sup>
饱和脂肪酸 (SFA) /%	15.74	14.81	13.23	17.94	5.35	5.50	6.60	9.82	5.49	14.17	9.12	12.14	12.52	12.31	12.68	12.78	15.45	16.50
总不饱和脂肪酸 (MUFA) /%	69.83	74.27	73.79	70.39	45.53	45.03	42.67	42.72	42.08	69.78	45.52	74.88	75.60	73.54	74.44	73.23	73.81	73.01
总多不饱和脂肪酸 (PUFA) /%	14.43	10.91	12.98	11.67	49.12	49.47	50.73	47.47	52.43	16.05	45.36	12.98	11.88	14.15	12.87	13.98	10.74	10.50
总单不饱和 (UFA) /%	84.26	85.19	86.77	82.06	94.65	94.50	93.40	90.18	94.51	85.83	90.88	87.86	87.48	87.69	87.32	87.22	84.55	83.50

注：采用 Duncan 分析法进行显著性差异分析，同一行中的不同字母在 P<0.05 水平上有显著性差异。

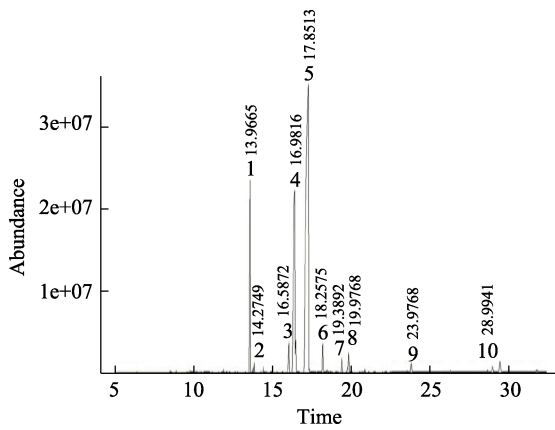


图 1 黍稷油中脂肪酸甲酯的总离子流色谱图

Fig.1 Total ion current chromatogram of fatty acid methyl esters in proso millet oil

注：色谱峰：1=棕榈酸（16:0）；2=棕榈油酸（16:1n9）；3=硬脂酸（18:0）；4=油酸（18:1n9）；5=亚油酸（18:2n6）；6=亚麻酸（18:3n6）；7=花生酸（20:0）；8=花生烯酸（20:1n11）；9=二十二烷酸（22:0）；10=二十四烷酸（24:0）。

其中不饱和脂肪酸（UFA）的含量以密穗红（宁夏）最高，红糜子（内蒙古）最低。UFA 是必需的脂肪酸，必须通过饮食摄入<sup>[21]</sup>。缺乏必需脂肪酸会导致一系列疾病，据报道，UFA 对人体健康有许多益处。例如，亚油酸在细胞生理学、免疫和生殖方面发挥着重要作用<sup>[22]</sup>。多不饱和脂肪酸可以降低冠心病、老年痴呆症、精神分裂症和代谢综合征的风险<sup>[23]</sup>。从本研究的数据来看，黍稷油中含有丰富的不饱和脂肪酸，表明食用黍稷油对人体健康有益。

如表 3 所示，每种脂肪酸在不同品种间差异显著。亚油酸含量以青海白圪塔糜最高，白稷子（江苏）最低。油酸含量以白圪塔糜（青海）最高，青陇黄黍（河北）最低。棕榈酸含量以红糜（陕西）最高，白稷子（江苏）最低。本研究所揭示的黍稷脂肪酸浓度的广泛变化，表明后续可以利用分子生物学的方法来阐明黍稷脂肪酸生物合成途径。

### 2.3 脂肪酸相关性分析

如表 4 的相关分析表明，不同脂肪酸之间存在显著的相互关系。在三种主要脂肪酸中，油酸与亚油酸（ $r=0.886, P<0.0001$ ）和二十二烷酸的含量（ $r=0.764, P<0.001$ ）呈显著相关。亚油酸与亚麻酸（ $r=0.771, P<0.001$ ）和二十二烷酸含量（ $r=0.904, P<0.0001$ ）呈正相关。先前的研究也报道了燕麦、大米和谷子油中的亚油酸与亚麻

表 3 18 个基因型黍稷的脂肪酸组成统计分析

Table 3 Descriptive statistics of oil traits in 18 proso millet genotypes

	最大值	最小值	平均值	标准差	CV/%
棕榈酸（16:0）	1.814	0.897	1.392	0.318	28.83
棕榈油酸（16:1n9）	0.120	0.023	0.040	0.022	55.61
硬脂酸（18:0）	0.610	0.020	0.168	0.176	104.49
油酸（18:1n9）	3.015	0.150	1.183	1.065	89.99
亚油酸（18:2n6）	5.185	0.075	1.607	1.978	123.08
亚麻酸（18:3n6）	0.270	0.085	0.173	0.065	37.57
花生酸（20:0）	0.365	0.095	0.154	0.072	46.72
花生烯酸（20:1n11）	0.250	0.075	0.130	0.053	41.08
二十二烷酸（22:0）	0.125	0.025	0.061	0.034	55.73
二十四烷酸（24:0）	0.155	0.040	0.100	0.036	35.63

酸含量显著相关<sup>[24]</sup>。

对于其他脂肪酸，棕榈油酸与亚麻酸（ $r=0.817, P<0.0001$ ）和花生烯酸的含量（ $r=0.817, P<0.0001$ ）呈正相关。硬脂酸与油酸（ $r=0.889, P<0.0001$ ）、亚油酸（ $r=0.791, P<0.0001$ ）和二十二烷酸的含量呈正相关（ $r=0.784, P<0.001$ ）。亚麻酸与二十二烷酸的含量呈正相关（ $r=0.908, P<0.001$ ），而与二十四烷酸的含量呈负相关（ $r=-0.861, P<0.001$ ）。二十二烷酸与二十四烷酸的含量呈显著负相关（ $r=-0.861, P<0.0001$ ）。

此外，棕榈酸与硬脂酸、亚麻酸、花生酸和二十二烷酸之间的相关性较弱。本研究揭示脂肪酸之间的相互关系对以改善油质为目标的黍稷育种计划具有重要价值，因为根据脂肪酸之间的相关性，提高一种脂肪酸的浓度可能导致另一种脂肪酸浓度的增加或降低。然而，正如淀粉研究中发现的那样，相关性分析的结果可能因不同研究中使用的样本而异<sup>[25-26]</sup>，因此，本研究中的黍稷油中脂肪酸之间的相关性有待后续研究验证。

### 2.4 主成分分析（PCA）

本研究利用 spss2.0 对 18 个黍稷的 10 种脂肪酸进行主成分分析，以探讨油脂性状之间的关系。如表 5 所示，前两个主成分的累积贡献率达到 80.3%，基本包含了所有脂肪酸的信息。如表 6 所示，第一主成分包含棕榈酸、硬脂酸、油酸、亚油酸、亚麻酸和二十二碳酸，二十四碳酸。第二主成分包含棕榈油酸、花生酸和花生烯酸，硬脂酸和油酸。

### 2.5 聚类分析

对原始变量进行标准化处理后，对 18 个黍稷

表 4 18 个基因型黍稷的脂肪酸组成的相关分析  
Table 4 Correlation analysis of oil traits in 18 proso millet genotypes

	棕榈酸	棕榈油酸	硬脂酸	油酸	亚油酸	亚麻酸	花生酸	花生烯酸	二十二烷酸	二十四烷酸
棕榈酸 (16:0)										
棕榈油酸 (16:1n9)	0.421 4									
硬脂酸 (18:0)	0.479 26*	0.421 4								
油酸 (18:1n9)	0.374 39	-0.116 85	0.889 26****							
亚油酸 (18:2n6)	0.303 79	-0.078 25	0.790 67****	0.886 39****						
亚麻酸 (18:3n6)	0.650 03**	0.811 60****	0.596 73**	0.638 30**	0.770 67***					
花生酸 (20:0)	0.694 99**	0.811 60****	0.175 5	-0.007 3	-0.022 49	0.555 60*				
花生烯酸 (20:1n11)	0.323 97	0.582 88*	-0.265 3	-0.265 3	-0.072 75	0.246 32	0.413 96			
二十二烷酸 (22:0)	0.546 16*	0.247 01	0.784 15***	0.764 02***	0.903 52****	0.908 31****	0.363 28	0.159 11		
二十四烷酸 (24:0)	-0.432 45	-0.460 63	-0.316 01	-0.416 49	-0.681 24**	-0.861 25****	-0.396 9	-0.445 59	-0.802 73***	

注：\*、\*\*、\*\*\*、\*\*\*\*和\*\*\*\*\*分别表示  $P < 0.05$ 、0.01、0.001 和 0.000 1 水平的显著性。

表 5 黍稷脂肪酸的主成分分析  
Table 5 The principal component analysis of the fatty acids in proso millet

成分	初始特征值			提取平方和载入		
	合计	方差的/%	累积/%	合计	方差的/%	合计/%
1	5.291	52.909	52.909	5.291	52.909	52.909
2	2.736	27.364	80.273	2.736	27.364	80.273
3	0.961	9.609	89.882			
4	0.474	4.741	94.623			
5	0.266	2.663	97.286			
6	0.15	1.495	98.782			
7	0.063	0.629	99.411			
8	0.047	0.471	99.882			
9	0.009	0.091	99.973			
10	0.003	0.027	100.000			

表 6 黍稷脂肪酸主成分的成分矩阵

脂肪酸组分	成分 1	成分 2
棕榈酸	0.696	0.326
棕榈油酸	0.376	0.826
硬脂酸	0.755	-0.506
油酸	0.755	-0.574
亚油酸	0.836	-0.481
亚麻酸	0.957	0.105
花生酸	0.512	0.707
花生烯酸	0.226	0.742
二十二烷酸	0.966	-0.137
二十四烷酸	-0.816	-0.223

品种采用系统聚类分析法进行分析。以欧式平方距离作为度量标准，聚类结果如图 2 所示。

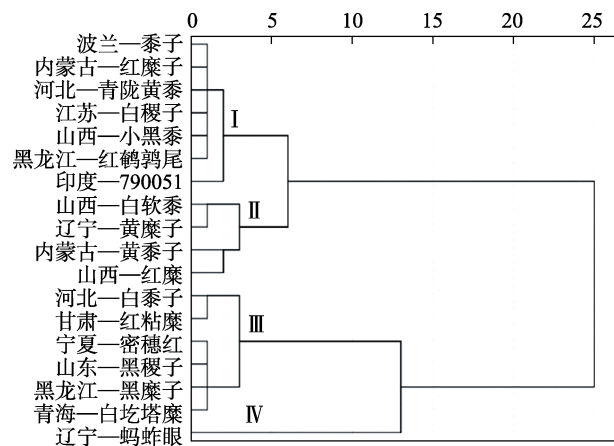


图 2 18 种黍稷的脂肪酸组成的聚类图

Fig.2 Hierarchical clustering of 18 proso millet genotypes based on oil traits

如图 2 所示，当距离为 5 时，18 个样本可分为四类。蚂蚱眼（辽宁）的棕榈烯酸含量最高，被单独分为一类。黍子（波兰）、红糜子（内蒙古）、青陇黄黍（河北）、白稷子（江苏）、小黑黍（山西）、红鹤鹑尾（黑龙江）、790051（印度）归为 I 类。II 类包括白软黍（山西）、黄糜子（辽宁）、黄黍子（内蒙古）、红糜（山西）组成。其余 5 个

品种属于Ⅲ类。当距离为 10 时,分为三类,蚂蚱眼(辽宁)仍然单独一类,每一类都有相似的脂肪酸组成。聚类分析结果表明,18 份材料可以通过脂肪酸组成谱进行区分。

### 3 结论

本文研究了 18 个黍稷种质的含油量、脂肪酸组成及其相互关系。总体来说,黍稷籽粒含油率高,不饱和脂肪酸比例高,属于优质食用油。脂肪酸含量在品种间存在显著差异,这表明利用分子生物学方法在黍稷中鉴定脂肪酸生物合成相关基因型具有良好的研究前景。综上所述,对于后续研究,在探索黍稷在食用油开发中的潜在用途以及研究黍稷油脂性状的遗传基础,本研究将提供一定的数据支撑。

### 参考文献:

- [1] LU, H, ZHANG J, LIU K, et al. Earliest domestication of common millet (*Panicum miliaceum*) in East Asia extended to 1000 years ago[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2009, 106: 7367-7372.
- [2] HABİYAREMYE C, MATANGUIHAN J B, D'ALPOIM G J, et al. Proso millet (*Panicum miliaceum* L.) and its potential for cultivation in the Pacific Northwest, U.S.: A Review[J]. Frontiers Plant Science, 2016, 7: 1961.
- [3] AMADOU I, GOUNGA M E, SHI Y, et al. Fermentation and heat-moisture treatment induced changes on the physicochemical properties of foxtail millet (*Setaria italica*) flour[J]. Food and Bioproducts Processing, 2014, 92: 38-45.
- [4] WEN Y, LIU J, MENG X, et al. Characterization of proso millet starches from different geographical origins of China[J]. Food Science and Biotechnology, 2014, 23: 1371-1377.
- [5] AKHARUME F, SANTRA D, ADEDEJI A. Physicochemical and functional properties of proso millet storage protein fractions[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 108: 105497.
- [6] SHNE R, MA Y, JIANG L, et al. Chemical composition, antioxidant, and antiproliferative activities of nine Chinese proso millet varieties[J]. Food and Agricultural Immunology, 2018, 29: 625-637.
- [7] GHOSH M. Review on recent trends in rice bran oil processing[J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 2007, 84: 315-324.
- [8] BEN H N, BEN S R, KHEMAKHEM B, et al. Oat (*Avena sativa* L.): Oil and nutriment compounds valorization for potential use in industrial applications[J]. Journal of Oleo Science, 2015, 64: 915-32.
- [9] TAJAMUL R S, KAMLESH P, PRADYUMAN K. Maize—A potential source of human nutrition and health: A review[J]. Cogent Food & Agriculture, 2016, 2: 1, 1166995.
- [10] 田翔, 乔治军. 响应面法优化提取糜子油[J]. 中国农学通报, 2016, 32(28): 183-188.
- [11] TIAN X, QIAO Z. Response surface methodology optimizing extraction process of oil from *Panicum miliaceum* L[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016, 32(28): 183-188.
- [12] MEHMOOD S, ORHAN I, AHASN Z, et al. Fatty acid composition of seed oil of different *Sorghum bicolor* varieties[J]. Food Chemistry, 2008, 109: 855-9.
- [13] BANAS A, DEBSKI H, BANAS W, et al. Lipids in grain tissues of oat (*Avena sativa*): differences in content, time of deposition, and fatty acid composition[J]. Journal of Experimental Botany, 2007, 58: 2463-2470.
- [14] LIANG S, YANG G, MA Y. Chemical characteristics and fatty acid profile of foxtail millet bran oil[J]. Journal of the American Oil Chemists Society, 2010, 87: 63-67.
- [15] ZHANG A, LIU X, WANG G, et al. Crude fat content and fatty acid profile and their correlations in foxtail millet[J]. Cereal Chemistry, 2015, 92: 455-459.
- [16] OSMAN R O, ABD EI GWLIL F M, EI-NOAMANY H M, et al. Oil content and fatty acid composition of some varieties of barley and sorghum grains[J]. Grasas Aceites, 2000, 51: 157-162.
- [17] VAZQUEZ C, MARIA G, SANTIAGO R, et al. High oil content maize: Physical, thermal and rheological properties of grain, masa, and tortillas[J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 60: 156-161.
- [18] KITTA K, MITSUKO E, IIZUKA T, et al. Variations in lipid content and fatty acid composition of major non-glutinous rice cultivars in Japan[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2005, 18: 269-278.
- [19] BROWN C M, CRADDOCK J C. Oil content and groat weight of entries in the world oat collection 1[J]. Crop Science, 1972, 12(4): 514-515.
- [20] KOURIMSKA L, SABOLOVA M, HORCICKA P, et al. Lipid content, fatty acid profile, and nutritional value of new oat cultivars[J]. Journal of Cereal Science, 2018, 84: 44-48.
- [21] BARTHOLE G, LEPINIEC L, ROGOWSKY P M, et al. Controlling lipid accumulation in cereal grains[J]. Plant Science, 2012, 185-186: 33-39.
- [22] KIM K B, NAM Y A, KIM H S, et al.  $\alpha$ -Linolenic acid: nutraceutical, pharmacological and toxicological evaluation[J]. Food and Chemical Toxicology, 2014, 70: 163-178.
- [23] MALCICKA M, VISSER B, ELLERS J. An evolutionary perspective on linoleic acid synthesis in animals[J]. Evolutionary Biology, 2018, 45: 15-26.
- [24] HULBERT A J, TURNER N, STORLIEN L H, et al. Dietary fats and membrane function: implications for metabolism and disease[J]. Biological Reviews, 2005, 80: 155-169.
- [25] LEONOVA S, SHELENGA T, HAMBER M, et al. Analysis of oil composition in cultivars and wild species of oat (*Avena* sp.)[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2008, 56: 7983-7991.
- [26] LI K, ZHANG T, SUI Z, et al. Genetic variation in starch physicochemical properties of Chinese foxtail millet (*Setaria italica* Beauv.)[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 133: 337-345.
- [27] LI K, LI Q, JIN C, et al. Characterization of morphology and physicochemical properties of native starches isolated from 12 *Lycoris* species[J]. Food Chemistry, 2020, 316: 126263. 完