

# 亚麻全生育期耐旱性评价及耐旱种质筛选\*

谢芳, 郭栋良, 葛优, 张泽阳, 江海霞, 朱磊磊, 黎远东, 杨阳, 谢丽琼<sup>†</sup>

(新疆大学 生命科学与技术学院, 新疆 乌鲁木齐 830017)

**摘要:** 对来自40多个国家和地区的243份亚麻核心种质资源进行全生育期耐旱性综合评价, 以为亚麻耐旱育种的亲本提供丰富的耐旱材料. 设置干旱胁迫和正常灌溉两种处理, 计算各种质的相对株高 ( $R-PH$ )、相对茎粗 ( $R-SD$ )、相对地上重 ( $R-GW$ ) 和相对产量 ( $R-Y$ ), 通过综合抗旱系数 ( $CDC$ )、抗旱指数 ( $DI$ )、产量抗旱系数 ( $YDC$ ) 进行耐旱性直接鉴定, 根据抗旱隶属函数  $D$  值进行耐旱性综合评价. 结果表明: (1) 地上重和产量的耐旱权重值较高, 株高和茎粗的耐旱权重值较小. (2) 根据抗旱隶属函数  $D$  值可将243份亚麻种质分为5个耐旱等级: 高耐6份、耐旱28份、中耐156份、敏感45份、高敏8份. (3) VNIIL-725、T. 126、DE METCHA 1-3-3 VILM在所有指标中表现最优、耐旱性最强, G 2063-5-10耐旱性最弱; 共筛选出3份高耐和1份高敏亚麻种质. (4) 油用亚麻亚群比纤用亚麻亚群更耐旱.

**关键词:** 亚麻; 全生育期; 耐旱性; 综合评价; 筛选

**DOI:** 10.13568/j.cnki.651094.651316.2022.09.07.0001

**中图分类号:** S563.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-7675(2023)04-0467-09

**引文格式:** 谢芳, 郭栋良, 葛优, 张泽阳, 江海霞, 朱磊磊, 黎远东, 杨阳, 谢丽琼. 亚麻全生育期耐旱性评价及耐旱种质筛选[J]. 新疆大学学报(自然科学版)(中英文), 2023, 40(4): 467-475+485.

**英文引文格式:** XIE Fang, GUO Dongliang, GE You, ZHANG Zeyang, JIANG Haixia, ZHU Leilei, LI Yuandong, YANG Yang, XIE Liqiong. Evaluation and screening of flax germplasm for drought tolerance in the entire growth period[J]. Journal of Xinjiang University(Natural Science Edition in Chinese and English), 2023, 40(4): 467-475+485.

## Evaluation and Screening of Flax Germplasm for Drought Tolerance in the Entire Growth Period

XIE Fang, GUO Dongliang, GE You, ZHANG Zeyang, JIANG Haixia, ZHU Leilei, LI Yuandong, YANG Yang, XIE Liqiong

(School of Life Science and Technology, Xinjiang University, Urumqi Xinjiang 830017, China)

**Abstract:** 243 flax germplasms, which are from more than 40 countries and regions, were synthetically evaluated for drought tolerance in the whole growing period, in order to provide abundant drought tolerant materials for the parents of flax drought tolerant breeding. Calculating flax-related traits-relative plant height ( $R-PH$ ), relative stem diameter ( $R-SD$ ), relative above-ground weight ( $R-GW$ ) and relative yield ( $R-Y$ ), we analyzed the drought tolerance difference in flax under full irrigation conditions and drought stress, respectively. Synthetic drought tolerance coefficient ( $CDC$ ), drought tolerance index ( $DI$ ), and yield drought tolerance coefficient ( $YDC$ ) were used for direct identification of drought resistance and drought tolerance affiliation function  $D$  value ( $D$ ) was used for comprehensive evaluation. The results showed that: (1) The weight of above-ground weight and yield were relatively higher than the others when evaluating drought resistance, plant height and stem diameter were smaller. (2) By  $D$  values, 243 flax core germplasm were divided into five drought tolerance classes: 6 highly tolerant, 28 drought tolerant, 156 moderately tolerant, 45 sensitive, and 8 highly sensitive. (3) VNIIL-725, T. 126 and DE METCHA 1-3-3 VILM had the best performance and the strongest drought resistance among all indicators, while G 2063-5-10 was the weakest; 3 high-tolerance and 1 high sensitivity flax germplasm were selected. (4) Flax subgroups for oil are more drought tolerant than flax for fiber.

**Key words:** flax (*Linum usitatissimum* L.); entire growth period; drought tolerance; comprehensive evaluation; screening

\* 收稿日期: 2022-09-07

基金项目: 国家自然科学基金“亚麻白粉病抗病机制的初步分析与候选抗病基因挖掘利用”(32060426); 新疆维吾尔自治区资源平台项目“新疆栽培亚麻、野生亚麻种质资源实物与信息资源共享平台建设项目”(PT1808).

作者简介: 谢芳 (1997-), 女, 硕士生, 从事作物遗传育种的研究, E-mail: 2602089440@qq.com.

<sup>†</sup> 通讯作者: 谢丽琼 (1972-), 女, 博士, 教授, 主要从事作物遗传育种的研究, E-mail: picea@xju.edu.cn.

## 0 引言

干旱胁迫是影响作物生存和生物量最严重的非生物胁迫之一<sup>[1]</sup>. 近年来, 全球气候恶化、干旱频发, 涉及非洲西部<sup>[2]</sup>、华中地区<sup>[3]</sup>、地中海地区等<sup>[4]</sup>. 培育耐旱作物成为应对全球干旱问题的良策. 亚麻 (*Linum usitatissimum* L.) 是全球重要的油料和纤维作物, 在我国主要分布在西北较干旱地区. 目前, 我国国土面积约38%受到严重的水分胁迫<sup>[5]</sup>, 其中新疆因缺水没有开发的土地面积巨大<sup>[6]</sup>. 筛选亚麻耐旱种质不仅可为亚麻生产提供育种资源, 而且对于因地制宜开发利用旱土资源具有重要意义.

亚麻耐旱种质的筛选和评价已有报道. 石仓吉<sup>[7]</sup>采用田间自然鉴定法对15份胡麻种质资源进行抗旱分级, 使用抗旱系数、抗旱指数共鉴定出10份耐旱性强的亚麻种质. 闫文亮等<sup>[8]</sup>对15份亚麻材料在萌发期的耐旱性进行评价, 利用发芽势、发芽率、相对发芽势等7个不同指标结合隶属函数法综合评估了亚麻种质的耐旱性. 宋鑫玲<sup>[9]</sup>使用土壤干旱法对30份亚麻种质在全生育期的耐旱性进行评价, 以株高、工艺长度、原蓬数为鉴定指标, 采用抗旱指数、主成分分析法、方差分析法共筛选出3份耐旱种质. You等<sup>[10]</sup>通过测定产量和千粒重等性状在6个环境中评估了加拿大亚麻189份核心种质的抗旱性. Soto-Cerda等<sup>[11]</sup>使用8个胁迫指标对105份亚麻材料在灌溉和干旱胁迫下进行了比较分析, 聚类 and 热图分析表明2份油用亚麻种质的耐旱性最强. 已有研究对亚麻耐旱性的评价多选择苗期或萌发期, 然而在多种作物的研究中发现, 发育早期的水分亏缺对植株整个生长周期的影响并不显著<sup>[12-15]</sup>, 因此以苗期和萌发期为主的耐旱性评价难以应用到亚麻的田间生产. 与之相较, 在大田中通过控制灌水量模拟作物的季节性干旱, 根据产量和干物质积累量对作物全生育期的耐旱性评价有更重要的现实意义. 本文选用遗传多样性丰富的243份亚麻核心种质, 利用相对株高、相对茎粗、相对地上重、相对产量四个指标, 结合抗旱系数、抗旱指数、抗旱隶属函数 $D$ 值等对亚麻种质全生育期的耐旱性进行综合评价, 并筛选耐旱性高的种质材料.

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验材料

供试亚麻材料为本课题组构建的核心亚麻种质资源<sup>[16]</sup>, 选择了其中243份亚麻种质资源(表1), 来自美国、加拿大、罗马尼亚等40多个国家和地区, 遗传多样性丰富, 具有代表性.

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 田间试验设计

2021年4月12日, 于新疆乌鲁木齐市安宁渠试验田(经度: 87° 30' E, 纬度: 43° 58' N)进行播种. 乌鲁木齐市属温带大陆性干旱气候, 降雨量少, 蒸发量大, 严重依赖田间灌溉, 因此适宜开展田间人工模拟干旱. 试验田设置正常灌溉和干旱胁迫两种处理, 两个处理之间设置3 m保护行. 选择籽粒均匀饱满的亚麻种质243份, 每份种植长度约为2 m, 行间距为0.3 m. 设置两个生物学重复. 每行设置一条滴灌带以满足亚麻生长所需的水分. 新疆春季干燥少雨, 易影响出苗率, 因此旱地在播种和出苗后共浇水两次, 后期通过自然降雨补充水分, 从营养生长到生殖生长长期持续干旱胁迫. 水地约15天灌溉一次, 成熟期逐渐减少灌溉, 防止亚麻贪青晚熟.

#### 1.2.2 表型测定方法

在亚麻成熟期分别测量水地和旱地的农艺性状, 随机选择20株长势均匀、具有代表性的亚麻植株定株标记. 调查株高(plant height, PH/cm)、茎粗(stem diameter, SD/mm)、地上重(above-ground weight, GW/g)、种子产量(yield, Y/g)这四个农艺性状. 测量方法参考王玉

表 1 243份供试亚麻种质材料数量及地理来源

地理来源	材料数量	地理来源	材料数量
埃及	2	罗马尼亚	13
阿富汗	1	美国	26
埃塞俄比亚	2	摩洛哥	4
澳大利亚	4	墨西哥	1
巴基斯坦	4	尼泊尔	1
巴西	2	日本	2
保加利亚	1	瑞典	1
比利时	1	塞尔维亚	1
波兰	4	塞浦路斯	1
玻利维亚	1	塔吉克斯坦	3
德国	3	土耳其	2
俄罗斯	4	乌拉圭	2
法国	11	西班牙	1
芬兰	1	希腊	1
哥斯达黎加	1	新西兰	1
韩国	1	匈牙利	7
荷兰	6	亚美尼亚	3
加拿大	10	伊朗	3
捷克斯洛伐克	2	意大利	1
津巴布韦	1	其它	68
印度	18	中国	20
印度尼西亚	1	合计	243

富等编著的《亚麻种质资源描述规范和数据标准》<sup>[17]</sup>.

### 1.3 耐旱性直接鉴定

使用各性状的相对值,以减少各材料之间的背景差异,以相对值为基础对各耐旱指标进行计算.

相对株高 (relative plant height,  $R-PH$ ) = 旱地株高/水地株高 $\times 100\%$ ;

相对茎粗 (relative stem diameter,  $R-SD$ ) = 旱地茎粗/水地茎粗 $\times 100\%$ ;

相对地上重 (relative above-ground weight,  $R-GW$ ) = 旱地植株地上重/水地植株地上重 $\times 100\%$ ;

相对种子产量 (relative yield,  $R-Y$ ) = 旱地植株种子产量/水地植株种子产量 $\times 100\%$ ;

计算综合抗旱系数 ( $CDC$ )、抗旱指数 ( $DI$ )<sup>[18]</sup>、产量抗旱系数 ( $YDC$ ) 进行亚麻耐旱性评价.

$$DI = \frac{Y_d \times Y_d / Y_p}{\sum Y_d / n} \quad (1)$$

$$CDC = \frac{RPH + RSD + RGW + RY}{4} \quad (2)$$

$$YDC = \frac{Y_p}{Y_d} \quad (3)$$

式中:  $Y_d$  为水地产量,  $Y_p$  为旱地产量,  $\sum Y_d / n$  为旱地产量平均值;  $RPH$  为相对株高,  $RSD$  为相对茎粗,  $RGW$  为相对地上重,  $RY$  为相对种子产量.

### 1.4 耐旱性综合鉴定

通过计算抗旱隶属函数综合评价亚麻耐旱性强弱.

$$\mu(X_i) = (X_i - X_{(i\min)}) / (X_{(i\max)} - X_{(i\min)}) \quad (4)$$

$$W_i = CV_i / \sum_{i=1}^n CV_i \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (5)$$

$$D = \sum_{i=1}^n [\mu(X_i) W_i] \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (6)$$

式中:  $X_i$  为测定值,  $X_{(i\min)}$  为隶属函数最小值,  $X_{(i\max)}$  为隶属函数最大值,  $\mu(X_i)$  为基于  $X_i$  的隶属函数值.  $CV_i$  为  $\mu(X_i)$  的变异系数,  $W_i$  为权重.  $D$  值表示各指标隶属函数值  $\mu(X_i)$  与其权重  $W_i$  乘积的累加, 最后对各性状加权隶属函数值求和, 综合评价供试亚麻种质的耐旱性.

### 1.5 数据分析

使用Excel 2019整理相关数据, 利用SPSS Statistics 20.0和Prism 5进行T检验、方差分析、相关性分析、聚类分析等.

## 2 结果与分析

### 2.1 干旱胁迫对供试亚麻各表型性状的影响

全生育期持续干旱胁迫影响亚麻的生长发育. 在243份亚麻材料中, 相比正常生长, 干旱胁迫显著降低了亚麻株高 (从73.45 cm下降到53.73 cm,  $p < 0.000 1$ )、茎粗 (从1.91 mm下降到1.55 mm,  $p < 0.000 1$ )、地上重 (从2.83 g下降到1.34 g,  $p < 0.000 1$ )、产量 (从0.95 g下降到0.41 g,  $p < 0.000 1$ ) (图1 a~d), 说明水分亏缺使亚麻的生长受到抑制, 具体表现为植株矮小长势弱、茎干细弱, 通过降低自身高度来应对干旱胁迫, 同时缩小叶面积和叶柄长度, 株型呈现矮小紧凑型, 植物地上部分生物量的合成及干物质的积累受到严重影响. 这些表型变化都是植物在遇到胁迫时的一种自我保护机制.

对照组和试验组各性状差异显著. PH、SD、GW、Y这四个表型指标在干旱条件下的平均值比对照条件下分别减少了23.7%、18.8%、52.7%、56.8% (表2), 表明在本试验中干旱胁迫对亚麻的农艺和产量性状具有显著的抑制效果, 由此能够有效地鉴别不同亚麻种质的耐旱性.

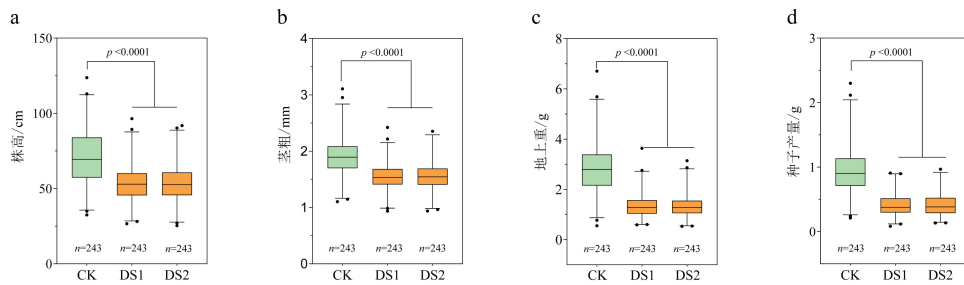


图 1 干旱胁迫对亚麻各表型性状的影响

注: a为干旱胁迫对株高影响的箱线图; b为干旱胁迫对茎粗影响的箱线图; c为干旱胁迫对地上重影响的箱线图; d为干旱胁迫对种子产量影响的箱线图. CK为对照; DS为干旱胁迫处理, 两次独立的重复试验分别用DS1和DS2表示.

表 2 243份亚麻种质在干旱胁迫和对照条件下各指标的变异分析

鉴定指标	对照					处理				
	最大值	最小值	平均值	标准差	变异系数/%	最大值	最小值	平均值	标准差	变异系数/%
PH/cm	123.69	32.50	70.45	17.21	24.43	94.15	26.01	53.73	12.56	23.38
SD/mm	3.11	1.10	1.91	0.32	16.75	2.39	0.94	1.55	0.22	14.19
GW/g	6.71	0.55	2.83	0.95	33.57	3.64	0.59	1.34	0.45	33.58
Y/g	2.78	0.21	0.95	0.37	38.95	0.91	0.08	0.41	0.17	41.46

从干旱胁迫对各相对指标的影响来看,  $R-PH$ 的变异系数为0.13,  $R-SD$ 的变异系数为0.12,  $R-GW$ 的变异系数为0.31,  $R-Y$ 的变异系数为0.42(表3). 变异系数越大, 说明该性状在不同种质间的离散程度越大, 对干旱胁迫也更加敏感. 各性状对干旱胁迫的敏感程度依次为:  $R-Y > R-GW > R-PH > R-SD$ .  $R-Y$ 和 $R-GW$ 变异系数最大, 对干旱胁迫敏感程度高, 能够有效地评价亚麻种质的耐旱性.

表 3 243份亚麻种质各相对性状的变异系数

项目	$R-PH$	$R-SD$	$R-GW$	$R-Y$
最小值	0.54	0.62	0.20	0.16
最大值	1.28	1.23	1.14	1.82
平均值	0.77	0.82	0.50	0.47
标准差	0.10	0.10	0.16	0.20
变异系数	0.13	0.12	0.31	0.42
权重	0.13	0.18	0.32	0.43

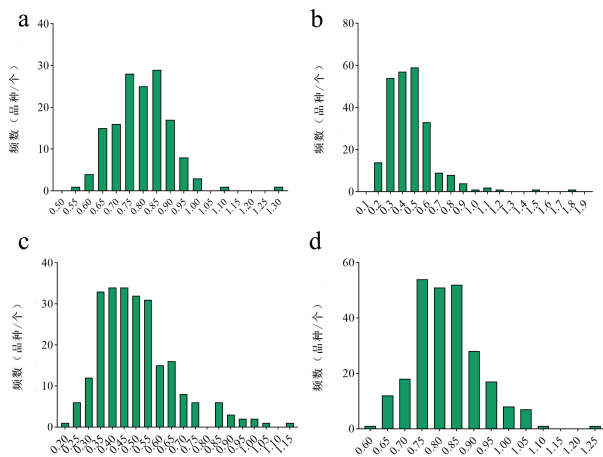


图 2 干旱胁迫下243份亚麻种质各性状频数分布图

注: a为株高的频数分布图; b为茎粗的频数分布图; c为地上重的频数分布图; d为种子产量的频数分布图.



图 3 干旱胁迫下243份亚麻种质各指标相关系数

注: \*\*\*表示在 $p < 0.001$ 水平极显著相关; \*\*表示在 $p < 0.01$ 水平显著相关; \*表示在 $p < 0.05$ 水平显著相关.

### 2.2 供试亚麻各性状指标的相关性分析

对亚麻四个耐旱指标进行相关性分析,  $R-PH$ 、 $R-SD$ 、 $R-GW$ 、 $R-Y$ 呈偏正态分布(图2), 表明各性状分布稳定, 均为数量性状, 是由大量的微效基因控制, 为多基因遗传. 使用Pearson相关系数法计算相关系数

(图3),两重复试验各性状之间的相关系数介于0.19~0.86.各性状间相关程度较高,如*RGW-2*和*RY-2*的相关系数为0.86,*RSD-1*和*RSD-2*的相关系数为0.71,呈显著正相关,两重复间相关性较好,表明这些指标在耐旱基因型的排序上具有较高的一致性,可以互换用于选择耐旱基因型.

### 2.3 243份亚麻种质全生育期耐旱性的鉴定

产量抗旱系数(*YDC*)通过计算干旱和对照下产量的比值来评价作物的耐旱性.亚麻对水分亏缺非常敏感,产量的变化可以从一定程度上反映其在干旱胁迫下的适应性和稳定性<sup>[19]</sup>,反映各种质间的耐旱性差异,是种质耐旱性初选最直接的指标.抗旱指数(*DI*)是在抗旱系数的基础上进行指数化,以水地产量性状为参考,对于旱条件下作物的丰产和稳产性进行评价<sup>[20]</sup>,抗旱指数越小,作物对干旱就越敏感.综合抗旱系数(*CDC*)是全面反映各种质耐旱性的指标,有利于区分干旱对不同材料的影响程度.

*CDC*、*DI*、*YDC*这三个指标能够从不同的角度区分亚麻群体中各种质的耐旱性,243份亚麻种质资源通过*CDC*、*DI*和*YDC*进行评价(表4),其中:*CDC*最高的种质为VNIL-725、T. 126、DE METCHA 1-3-3 VILM、Cili 2038,*CDC*最低的为G 2063-5-10、C.I. 19 x C.I.140、Tajga、Argos;*DI*最高的为VNIL-725、T. 126、Jinya-7、DE METCHA 1-3-3 VILM,*DI*最低的为Svetoch mutation、G 2063-5-10、Argos、Verchnevolzhkij;*YDC*最高的为VNIL-725、T. 126、Common、DE METCHA 1-3-3 VILM,*YDC*最低的为G 2063-5-10、Qingyanglao、阿卡特、Svetoch mutation.

基于*CDC*、*DI*、*YDC*对各种质的耐旱性进行排序(表4),三个指标筛选的耐旱和敏感种质有共性的同时兼具差异性.VNIL-725、T. 126、DE METCHA 1-3-3 VILM在三个指标的耐旱性排序中均处于前四名,表现出较好的耐旱性,可被评价为耐旱种质.但这些种质在三个指标中的耐旱性排序不同,如T. 126在*CDC*、*DI*中耐旱性排在第二位,而在*YDC*指标中耐旱性排在第四位;Cili 2038、Jinya-7和Common分别只在*CDC*、*DI*、*YDC*中表现较好.G 2063-5-10在*CDC*、*DI*、*YDC*指标中耐旱性排序均处在末位,耐旱性较差,可被评价为敏感种质.另外,Argos的*CDC*和*DI*值较低,耐旱性排序较低、处在末四位,而在*YDC*中耐旱性排序为224.由此可见三个指标筛选的耐旱和敏感种质有共性也有差异.

表4 对243份亚麻种质的耐旱性直接鉴定

种质名称	综合抗旱系数	排序	抗旱指数	排序	产量抗旱系数	排序
VNIL-725	1.13	1	2.24	1	1.82	1
T. 126	1.05	2	2.18	2	1.11	4
DE METCHA 1-3-3 VILM	1.03	3	1.75	4	1.17	3
Cili 2038	0.98	4	0.68	45	1.09	5
G 2063-5-10	0.44	243	0.10	242	0.16	243
Res. x Hoshangabad (C.I. 19 x C.I.140)	0.46	240	0.17	221	0.29	213
Tajga	0.45	241	0.27	183	0.24	232
Argos	0.44	242	0.10	241	0.26	224
Jinya-7	0.92	7	1.85	3	0.89	10
Svetoch mutation	0.47	235	0.08	243	0.20	240
Verchnevolzhkij	0.50	229	0.10	240	0.23	237
Common	0.87	13	1.10	15	1.48	2
Qingyanglao	0.48	234	0.24	194	0.19	242
阿卡特	0.49	230	0.15	229	0.20	241
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

注:完整数据请在<https://xjdz.cbpt.cnki.net/WKID2/WebPublication/wkDownFileByLink.aspx?fid=0ec97665-7c4e-409d-93bb-81c861c1e0c0&mid=xjdz&nid=54253c13-816a-4cda-85b4-048f7444fa78>自行下载.

### 2.4 243份亚麻种质全生育期耐旱性的评价

综合隶属函数*D*值可以全面评估作物耐旱性,代表各种质的综合耐旱能力,*D*值越大耐旱性就越强,对243份亚麻种质的*D*值进行排序(表5),*D*值较高、耐旱性较强的种质有:VNIL-725、T. 126、DE METCHA 1-3-3 VILM、Cili 2038;*D*值较低、耐旱性较差的种质有:G 2063-5-10、Argos、Tajga、C.I. 19 x C.I.140.

根据抗旱隶属函数 $D$ 值的大小对243份亚麻种质进行耐旱性等级评定,供试亚麻材料被划分成五类(图4):高耐、耐、中耐、敏感、高敏.其中:高耐亚麻种质有6份, $D$ 值在0.5667~0.8052之间;耐旱亚麻种质有28份, $D$ 值在0.3807~0.5529之间;中耐亚麻种质有156份, $D$ 值在0.1693~0.3772之间;敏感种质有45份, $D$ 值在0.0898~0.1690之间;高度敏感亚麻种质有8份, $D$ 值在0.0508~0.0884之间.

表 5 基于 $D$ 值对243份亚麻种质进行耐旱等级分析

耐旱性排序	种质名称	$D$ 值	等级
1	VNIIL-725	0.805 2	高耐
2	T. 126	0.680 6	高耐
3	DE METCHA 1-3-3 VILM	0.677 4	高耐
4	Cili 2038	0.657 9	高耐
243	G 2063-5-10	0.050 8	高敏
242	Argos	0.060 1	高敏
241	Tajga	0.065 8	高敏
240	Res. x Hoshangabad (C.I. 19 x C.I.140)	0.073 1	高敏
⋮	⋮	⋮	⋮

注:完整数据请在<https://xjdz.cbpt.cnki.net/WKd2/WebPublication/wkDownFileByLink.aspx?fid=0ec97665-7c4e-409d-93bb-81c861c1e0c0&mid=xjdz&nid=54253c13-816a-4cda-85b4-048f7444fa78>自行下载.

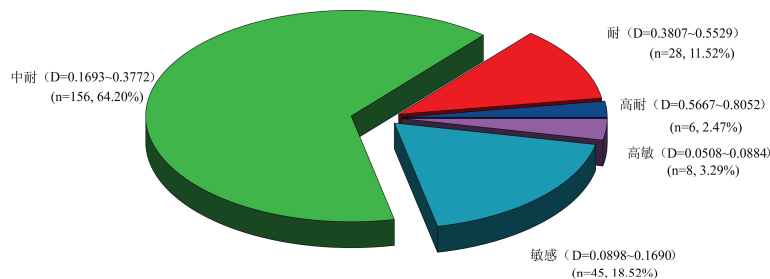


图 4 243份亚麻种质耐旱性评价等级分布

## 2.5 亚麻耐旱种质的综合评价及农艺性状分析

$CDC$ 综合利用四个相对指标对亚麻全生育期的耐旱性作出评价。 $DI$ 以旱地高产为目标来评价作物的耐旱性<sup>[21]</sup>。 $YDC$ 不能直接通过产量的高低对作物的耐旱性作出评价,而是以产量的变化来评估干旱胁迫下各种质的稳产性,从而评价作物的耐旱能力。 $D$ 值借助隶属函数数值区别不同受试种质在群体中的耐旱性分布.综上,243份亚麻种质以 $CDC$ 、 $DI$ 、 $YDC$ 、 $D$ 为耐旱指标进行耐旱、中耐和敏感材料的筛选(图5a),结果显示VNIIL-725、T. 126、DE METCHA 1-3-3 VILM在四个指标的抗性材料筛选中均被检测到,表现出较高的耐旱性,Cili 2038在至少三个指标中被评价为高耐种质.谢列波、25-1076、Cili 908、VNIIL-1104、Gaolanbai在至少两个指标中被评价为中耐种质.G 2063-5-10在四个指标中均被评价为高敏种质,CYPRUS、Argos在三个指标中被评价为高敏种质,C.I. 19 x C.I.140、Tajga、Qingyanglao在至少两个指标中重叠被评价为高敏种质.

对243份亚麻种质的四个相对指标 $R-PH$ 、 $R-SD$ 、 $R-GW$ 、 $R-Y$ 进行聚类分析(图5b),四个指标中 $R-PH$ 、 $R-SD$ 被聚成一类, $R-GW$ 、 $R-Y$ 被聚成一类.对243份亚麻种质进行Q型聚类分析,可以分为两大类五个亚组,分别是聚类I和聚类II.聚类I被分为I-a亚组和I-b亚组,聚类II被分为II-a亚组、II-b亚组、II-c亚组.聚类I的各相对值最高,在亚麻全生育期中具有较好的耐旱性,I-a亚组的株高、茎粗受干旱胁迫影响较小,I-b亚组的地上重、产量受干旱胁迫影响较小.聚类II的各相对值最低,受干旱影响较大,在全生育期中对干旱较为敏感.基于相对指标的聚类分析结果表明VNIIL-725、T. 126、DE METCHA 1-3-3 VILM被聚类到I-a亚组和I-b亚组,表明干旱胁迫对各性状影响较小,为耐旱种质的聚类.谢列波、25-1076、Cili 908、VNIIL-1104、Gaolanbai均聚类在II-b亚组,该组属于中间型材料的聚类.G 2063-5-10、CYPRUS、Argos、C.I. 19 x C.I.140、Tajga、Qingyanglao被聚类到II-a亚组,该组各相对指标的耐旱系数最低,为干旱高度敏感种质的聚类.

结合综合评价的分析和聚类分析的结果,可将VNIL-725、T. 126、DE METCHA 1-3-3 VILM评价为高度耐旱种质,G 2063-5-10为干旱高度敏感种质。

基于指标CDC、DI、YDC和D值对243份亚麻种质资源进行耐旱性评价,共筛选出3份高耐干旱的亚麻种质和1份干旱高度敏感种质,对这4份亚麻种质的农艺性状进行评价(表6),包括株高、工艺长度、分枝数、蒴果数、千粒重、种子长度、种子宽度。其中:T. 126种子千粒重最高,为10.51 g;种子长度和宽度也最高,分别为5.19 mm和2.62 mm。DE METCHA 1-3-3 VILM的分枝数和蒴果数最多。G 2063-5-10的分枝数、蒴果数最少,千粒重最低。

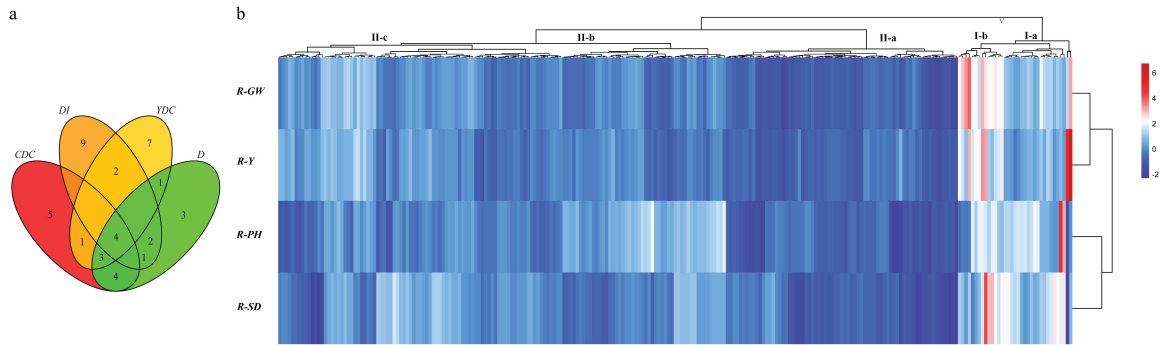


图5 243份亚麻种质的耐旱性分析

注:a为不同指标评价下耐旱种质的韦恩图;b为243份亚麻种质的耐旱性聚类分析。

表6 亚麻种质各农艺性状详情

种质名称	株高/cm	工艺长度/cm	分枝数	蒴果数	千粒重/g	种子长度/mm	种子宽度/mm
VNIL-725	48.57	30.57	4.86	14.43	4.43	3.85	2.04
T. 126	55.14	37.58	8.43	44.67	10.51	5.19	2.62
DE METCHA 1-3-3 VILM	57.88	35.56	8.81	50.55	5.03	4.12	2.13
G 2063-5-10	74.86	55.07	4.21	9.36	4.42	3.90	2.14

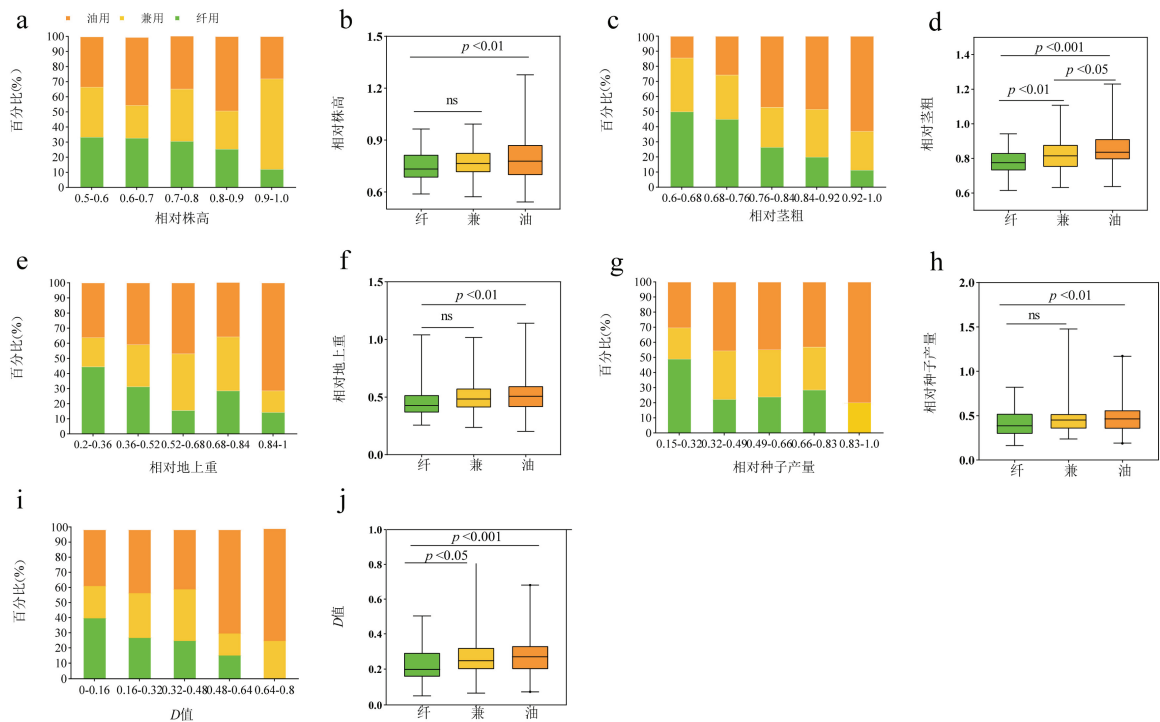


图6 亚麻不同亚群间全生育期耐旱性的差异

注:a、c、e、g、i为干旱胁迫下亚麻不同亚群各耐旱系数的分布;b、d、f、h、j为亚麻不同亚群间各耐旱系数的箱线图。

## 2.6 亚麻不同亚群间全生育期耐旱性的差异

为比较亚麻不同亚群间的耐旱性,分析243份亚麻种质中(油用105份,纤用68份,兼用70份)不同亚群比例的变化情况(图6)。随着各耐旱等级的提高,油用亚麻在各指标间所占比例不断提高,纤用亚麻的比例不断降低,兼用亚麻变化不明显。在各指标中油用亚麻耐旱系数均显著高于纤用亚麻( $p < 0.01$ 或 $p < 0.001$ ),兼用亚麻的 $R-SD$ 和 $D$ 值显著高于纤用亚麻( $p < 0.05$ )。在高耐级别中,油用亚麻占比高达80%,纤用亚麻占比为0~14.5%。在高敏级别中,纤用亚麻占比高达50%,而油用亚麻占比为14%~37%。三个亚群间各指标的差异显示油用亚麻亚群中 $R-PH$ 、 $R-SD$ 、 $R-GW$ 、 $R-Y$ 、 $D$ 值均显著高于纤用亚麻亚群,以上结果表明油用亚麻亚群的耐旱性总体强于纤用亚麻亚群。

## 3 讨论

干旱胁迫抑制作物的生长和发育,阻碍了全球作物的生产和粮食供应<sup>[22]</sup>。干旱胁迫可能发生在作物发育的整个时期或特定阶段,不同生长阶段和不同程度的干旱对作物的生长发育及产量的影响不同<sup>[23]</sup>。姜鹏等<sup>[24]</sup>在探究不同发育时期干旱胁迫对玉米生长的影响发现,不同发育时期干旱胁迫对玉米的生长发育和产量均有显著抑制作用,具体表现为植株变矮、叶面积降低、产量相关性状均发生不同程度的降低,其中抽穗期减产最严重。亚麻在不同时期遭受干旱胁迫后生物量、产量、株高等均呈现不同程度的下降。若干旱胁迫发生在亚麻早期生长阶段可能直接影响亚麻的发芽率和生长活力,导致幼苗死亡<sup>[25]</sup>。其中现蕾期和花期受干旱胁迫影响最大,苗期和枞形期受干旱胁迫影响最小。因此作物在不同生育时期受到干旱胁迫后其敏感程度和表现都存在差异<sup>[26]</sup>。

目前,针对亚麻耐旱性评价的研究已有报道,但多集中于亚麻萌发期和苗期,全生育期耐旱性评价报道较少。亚麻耐旱种质的有效评价仍然面临阻碍,存在的主要问题是:亚麻在不同发育时期受到干旱胁迫后的表现存在差异且无法全面反映其生长特性。李龙等<sup>[27]</sup>对323份小麦种质苗期和成株期抗旱性进行评价,发现苗期存活率与成株期抗旱系数和综合抗旱性 $D$ 值均无显著相关性,由此可见种子萌发期和苗期难以全面反映作物的抗旱性,全生育期的考察更能体现各种质的综合抗性,对实际生产具有重要意义。赵兴震等<sup>[28]</sup>以全生育期大豆的单株粒重和单株荚数为指标,评估了247份大豆种质的抗旱性,获得了优异的抗旱种质。李忠旺等<sup>[29]</sup>结合全生育期的10个农艺性状和产量指标对76份棉花种质进行抗旱种质的筛选及抗旱性评价,筛选出高抗棉花种质5份。以苗期和萌发期为主的耐旱性评价不足以代表整个发育时期的耐旱性,筛选的耐旱种质难以直接应用到实际亚麻生产中。本文选择遗传多样性丰富的243份亚麻核心种质,使用株高、产量等重要农艺性状对亚麻全生育期的耐旱性进行评价,为亚麻耐旱育种提供了参考。

耐旱性是一种复杂的多基因调控的数量性状,作物的耐旱性受干旱胁迫的程度和时间的影响,与作物的发育时期也密切相关<sup>[30]</sup>。在作物的全生育期,由于叶绿素含量、渗透调节物质的变化、光合作用水平等的常规生理指标变化幅度较大,无法准确评估干旱对作物生长的整体影响。而产量抗旱系数和抗旱指数是基于作物的产量性状(如籽粒重等)的变化,对耐旱性进行直接评价鉴定<sup>[31]</sup>。赵岩等<sup>[32]</sup>发现,通过产量抗旱系数、产量抗旱指数、综合抗旱指数和综合抗旱系数4个指标可完成小麦全生育期种质资源的耐旱性评价,利用此方法在119份种质中筛选出抗旱种质15份。Li等<sup>[33]</sup>认为在干旱情况下作物能否高产、稳产是评价作物抗旱性的重要依据,产量是作物耐旱性的最直接表现形式。陈卫国等<sup>[34]</sup>利用抗旱系数、抗旱指数和隶属函数法对211份小麦种质资源的6个产量性状进行耐旱性评价,共鉴定出8份高度抗旱种质。综合抗旱系数也可以综合反映作物的耐旱性。王敏等<sup>[35]</sup>使用抗旱系数等5个指标将15份大豆材料划分为4个抗旱等级,筛选鉴定出4份抗旱性较好的种质。隶属函数法可对作物耐旱性进行综合评价。在大麦中,周元成等<sup>[36]</sup>通过13个农艺性状和生理指标,利用抗旱系数、抗旱指数和隶属函数法对15份种质的耐旱性进行评价和鉴定,根据综合隶属函数 $D$ 值将15份大麦种质划分为4类。这些基于产量性状的综合指标对作物抗旱性的评价各有其应用场景。

亚麻是一种古老的农作物,是在长期的自然选择和人工驯化下演变而来的,根据性状可分为油用、兼用和纤用亚麻。本文对亚麻三个亚群抗旱系数的分析结果表明,油用亚麻亚群在 $R-PH$ 、 $R-SD$ 、 $R-GW$ 、 $R-Y$ 中的抗旱系数显著高于纤用亚麻亚群。前人研究发现油用亚麻亚群的耐盐性显著强于纤用亚麻亚群<sup>[37-38]</sup>,李泉等<sup>[39]</sup>对200份亚麻高盐胁迫下种子萌发影响的研究表明,高耐盐种质中油用亚麻占比高达70%,且油用亚麻亚群的耐盐性强于纤用亚麻亚群;You等<sup>[40]</sup>研究发现,在319份亚麻材料中油用和纤用亚麻抗病性存在差异,油用

亚麻在白粉病、枯萎病等生物逆境胁迫中抗性更高,表现出更强的抗逆性。随着耐旱等级的提高,纤用亚麻所占比例都在不断下降,而油用亚麻所占比例都在不断升高(图6),这也表明油用亚麻亚群的耐旱能力强于兼用和纤用亚麻亚群,油用亚麻可为亚麻耐旱分子育种提供更多的遗传变异位点。

干旱胁迫易导致亚麻产量大幅度降低(图1d),对亚麻的生产相当不利,建议在亚麻生长关键阶段适时补充水分,加强田间水肥管理,以减少干旱胁迫带来的经济损失。

## 4 结论

通过直接鉴定、间接分析和综合评价的方法比较了243份亚麻种质的耐旱性。利用综合抗旱系数(*CDC*)、抗旱指数(*DI*)和产量抗旱系数(*YDC*)对243份亚麻种质资源的耐旱性进行直接评价。基于*D*值对243份材料的耐旱性进行评级,获得高耐材料6份、耐旱材料28份、中耐材料156份、敏感材料45份、高敏材料8份。其中:VNIL-725、T. 126、DE METCHA 1-3-3 VILM在所有的耐旱性评价中均表现出较强的耐旱性,G 2063-5-10表现为对干旱胁迫高度敏感;聚类分析结果显示243份材料被分为5个集群,VNIL-725、T. 126、DE METCHA 1-3-3 VILM被聚类到耐旱性较强的亚群,G 2063-5-10被聚类到干旱高度敏感的亚群。亚麻三个亚群的耐旱性评价结果显示不同亚麻亚群耐旱性存在差异,油用亚麻的耐旱能力强于纤用亚麻。本研究为亚麻种质资源耐旱性评价及耐旱种质培育奠定了基础,为更进一步筛选鉴定亚麻耐旱功能基因的研究提供了条件。

## 参考文献:

- [1] SCHWEIGHOFER A, HIRT H, MESKIENE I. Plant PP2C phosphatases: emerging functions in stress signaling[J]. Trends in Plant Science, 2004, 9(5): 236-243.
- [2] MASIH I, MASKEY S, MUSSÁ F E F, et al. A review of droughts on the African continent: a geospatial and long-term perspective[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2014, 18(9): 3635-3649.
- [3] WANG Z L, LI J, LAI C G, et al. Does drought in China show a significant decreasing trend from 1961 to 2009?[J]. Science of the Total Environment, 2017, 579: 314-324.
- [4] NAUMANN G, ALFIERI L, WYSER K, et al. Global changes in drought conditions under different levels of warming[J]. Geophysical Research Letters, 2018, 47(5): 3285-3296.
- [5] 李周, 柯水发, 刘勇, 等. 中国西部土地退化防治成效及经验借鉴: 以中国-全球环境基金干旱生态系统土地退化防治伙伴关系项目为例[J]. 北京林业大学学报(社会科学版), 2014, 13(1): 71-76.
- [6] 中华人民共和国国土资源部. 2016中国国土资源公报[J]. 国土资源通讯, 2017, 18(4): 3-4.
- [7] 石仓吉. 亚麻品种抗旱性评价研究[J]. 干旱地区农业研究, 2008, 18(4): 1-5.
- [8] 闫文亮, 郭栋良, 钟俐, 等. 不同品种亚麻萌发期抗旱性评价[J]. 新疆农业科学, 2018, 55(1): 82-94.
- [9] 宋鑫玲. 亚麻资源抗旱性鉴定及对干旱胁迫生理反应的研究[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2015.
- [10] YOU F M, XIAO J, LI P, et al. Genome-wide association study and selection signatures detect genomic regions associated with seed yield and oil quality in flax[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2018, 19(8): 2303.
- [11] SOTO-CERDA B J, CLOUTIER S, GAJARDO H A, et al. Identifying drought-resilient flax genotypes and related-candidate genes based on stress indices, root traits and selective sweep[J]. Euphytica, 2019, 215(3): 1-16.
- [12] 董馥慧. 不同时期干旱胁迫及复水对不同品种苦荞生长发育的影响[D]. 太原: 山西师范大学, 2020.
- [13] 郭爱刚. 玉米品种生长特性对不同生育时期干旱胁迫程度的响应[J]. 甘肃科技纵横, 2022, 51(4): 9-17.
- [14] 夏扬. 水稻生长对干旱胁迫的响应[D]. 南京: 南京农业大学, 2008.
- [15] 朱海平, 李贵勇, 夏琼梅, 等. 不同时期干旱胁迫对水稻产量和生长特性的影响[J]. 中国稻米, 2017, 23(4): 135-138.
- [16] GUO D L, JIANG H X, YAN W L, et al. Resequencing 200 flax cultivated accessions identifies candidate genes related to seed size and weight and reveals signatures of artificial selection[J]. Frontiers in Plant Science, 2019, 10: 1682.
- [17] 王玉富, 粟建光. 亚麻种质资源描述规范和数据标准[M]. 北京: 中国农业出版社, 2006.
- [18] 兰巨生. 农作物综合抗旱性的评价[J]. 中国农学通报, 1994, 7(3): 85-87.
- [19] STITT M, HELD T H W. Control of photosynthetic sucrose synthesis by fructose-2,6-bisphosphate[J]. Planta, 1985, 164(2): 179-188.
- [20] 刘丹丹. 花生品种抗旱性鉴定和叶片抗旱生理机制研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2013.
- [21] 张健, 池宝亮, 黄学芳, 等. 春玉米不同灌溉定额条件下抗旱指数的运用研究[J]. 玉米科学, 2007, 15(5): 104-107.