

# PEG 模拟干旱胁迫对玉米种子萌发的影响

李婉玲,陈晓龙,蔡立群,王正伟,张 军

(甘肃农业大学资源与环境学院,甘肃 兰州 730070)

**摘要:**于2021年春季选取了5个甘肃省广泛种植的玉米杂交种,以先玉335为对照,采用不同浓度PEG-6000(0%、5%、15%、25%和35%)模拟干旱胁迫,分别观察、测定其发芽势、发芽率、胚根长、胚芽长、胚根干质量、胚芽干质量等萌发指标,分析干旱对其萌发的影响。结果表明:随着PEG浓度的升高,6个品种各萌发指标总体均呈下降趋势;发芽势、发芽率、胚根长、胚芽长、萌发指数、抗旱指数、贮藏物质转化率在5%~25%PEG处理时,金丰628较先玉335的增幅范围分别为44.8%~100.0%、58.8%~137.5%、106.0%~132.8%、31.0%~60.5%、46.1%~147.9%、25.3%~112.8%、15.7%~141.8%,金丰608较先玉335的增幅范围为28.1%~237.5%、38.2%~250.0%、115.7%~271.6%、26.8%~51.0%、52.8%~335.4%、22.3%~248.5%、21.7%~146.4%,庆单3号和五谷568较先玉335总体略有增加或增幅不明显,陇单9号略有降低。通过主成分分析和综合得分建立综合评价体系可知,不同品种玉米耐旱性由强到弱排序为:金丰628、金丰608、庆单3号、五谷568、陇单9号,且庆单3号在低浓度胁迫下具有较强耐旱性。综合比较,金丰628和金丰608抗旱性最强,庆单3号次之,五谷568较强,陇单9号较弱。

**关键词:**玉米;PEG模拟干旱胁迫;萌发;幼苗生长;抗旱性综合评价

**中图分类号:**S513;Q945.78 **文献标志码:**A

## Effects of PEG simulated drought stress on maize seed germination

LI Wanling, CHEN Xiaolong, CAI Liqun, WANG Zhengwei, ZHANG Jun

(College of Resources and Environment, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

**Abstract:** Five maize hybrids widely planted in Gansu Province were selected in the spring of 2021 and compared with Xianyu 335. Different concentrations of PEG-6000 (0%, 5%, 15%, 25% and 35%) were used to simulate drought stress. The germination potential, germination rate, radicle length, germ length, dry weight of radicle, dry weight of germ were observed and measured, and the effect of drought on germination was analyzed. The results showed that the indexes of six maize varieties had a downward trend with the increase of PEG concentration. When treated with 5%~25% PEG, the increase range of Jinping 628 compared with Xianyu 335 was 44.8%~100.0%, 58.8%~137.5%, 106.0%~132.8%, 31.0%~60.5%, 46.1%~147.9%, 25.3%~112.8%, 15.7%~141.8%, and the increase range of Jinping 608 compared with Xianyu 335 was 28.1%~237.5%, 38.2%~250.0%, 115.7%~271.6%, 26.8%~51.0%, 52.8%~335.4%, 22.3%~248.5%, 21.7%~146.4%. Qingdan 3 and Wugu 568 increased slightly or did not increase significantly compared with Xianyu 335, and Longdan 9 decreased slightly. According to the comprehensive evaluation system established by principal component analysis and comprehensive score, the order of drought tolerance of different maize varieties from strong to weak was: Jinping 628, Jinping 608, Qingdan 3, Wugu 568, Longdan 9. Qingdan 3 had stronger drought resistance under low concentration stress. In summary, Jinping 628 and Jinping 608 had the strongest drought resistance, followed by Qingdan 3 and Wugu 568. Longdan 9 showed the weakest drought resistance.

**Keywords:** maize; PEG simulated drought stress; germination; seedling growth; comprehensive evaluation of drought resistance

收稿日期:2021-11-16

修回日期:2022-06-27

基金项目:甘肃农业大学公招博士科研启动基金(GAU-KYQD-2019-10);甘肃省耕地质量建设保护总站土肥有关试验(03721203)

作者简介:李婉玲(1997-),女,河北省秦皇岛人,硕士研究生,研究方向为农业资源利用。E-mail:694107913@qq.com

通信作者:张军(1977-),男,甘肃省张掖人,教授,博士,主要从事农业生态学和土地资源管理研究。E-mail:zhangjun@gsau.edu.cn

玉米(*Zea mays* L.)是全球第一大粮食和饲料作物,也是干旱区旱作农业的主力作物<sup>[1]</sup>。玉米种子的正常生长需要充足的水分条件,尤其是在种子萌发期。种子萌发是玉米的关键生育期,萌发期水分不足将严重抑制种子的萌发和正常生长<sup>[2]</sup>。目前已有较多关于干旱胁迫对小麦、水稻、亚麻等作物种子萌发影响的文献报道<sup>[3-5]</sup>,但关于干旱胁迫对适于甘肃省种植的玉米种子萌发的影响研究还不多。

甘肃地处黄土高原,78%的耕地为旱地,主要依赖自然降水,粮食作物中玉米的播种面积占比高达78.3%<sup>[6-7]</sup>,干旱是制约甘肃玉米产量和产业发展的最主要问题之一<sup>[8]</sup>。尽管有学者曾在甘肃西部旱作区土壤类型对玉米生长的影响试验研究中提到要研发出适合甘肃种植的抗旱性玉米品种<sup>[9]</sup>,但近年来对玉米抗旱性评价与筛选的研究主要局限在以往市场上表现良好的玉米品种<sup>[10-14]</sup>,并未对目前具有潜力的种质进行评价与筛选,因此仍需尽快筛选出当前适宜甘肃省种植的抗旱型玉米。

聚乙二醇(PEG-6000)水溶液作为一种高渗溶液调节剂,具有保持稳定渗透压、不含营养物质、无毒害、重复性好、使活细胞缓慢吸水、可模拟田间干旱环境等优良性状<sup>[15]</sup>,已成为玉米自交系抗旱评价的常用方法<sup>[16]</sup>。研究表明,不同浓度的PEG-6000对玉米种子发芽率、发芽指数、根长、芽长及鲜质量等形态指标均有抑制作用,并且随着PEG-6000浓度的升高其抑制作用逐渐增强<sup>[17]</sup>。

本文采用PEG-6000溶液模拟不同程度的干旱胁迫<sup>[18]</sup>,旨在探明干旱胁迫程度对甘肃省常见的几个玉米品种种子萌发的影响,比较其抗旱性,以期为今后甘肃省的玉米抗旱栽培实践提供理论依据。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料

采用6个不同的玉米杂交种,分别为金萃608、金萃628、庆单3号、五谷568、先玉335和陇单9号;其中金萃608和金萃628种子购置于武威金苹果农业股份有限公司,其余种子购置于甘肃省农业科学院。

### 1.2 试验方法

共设置了5个溶液梯度处理,分别为0(清水对照CK)、5%PEG-6000溶液(相应水势为-0.028,简称为 $\Psi 5\% = -0.028$  MPa下同)、15%PEG-6000溶

液( $\Psi 15\% = -0.099$  MPa)、25%PEG-6000溶液( $\Psi 25\% = -0.189$  MPa)和35%PEG-6000溶液( $\Psi 35\% = -0.298$  MPa),参照Michel等<sup>[19]</sup>关于PEG-6000溶液浓度与其渗透势的关系计算并配制,每个处理3次重复。

人工挑选颗粒饱满大小均一符合试验标准的玉米种子,用0.1%高锰酸钾溶液浸泡10 min进行消毒处理,再用蒸馏水冲洗干净,然后将其放至铺有双层滤纸的培养皿中,每个培养皿中放置20粒,加入配制好的不同浓度PEG-6000溶液(以溶液没过种子1/3为标准),盖好盖子放在25℃恒温培养箱中培养,每天补充相应的培养液保证种子所受到的胁迫浓度一致,培养期间每天至少观察记录一次种子发芽情况。

1.2.1 玉米种子发芽情况 每天观察并记录统计玉米种子的发芽数,直至玉米种子连续4 d不再新增发芽数截止。在第4天统计计算玉米种子的发芽势;在发芽截止期统计计算发芽率;种子萌发抗旱系数参考王学智等<sup>[20]</sup>和葛云侠等<sup>[21]</sup>的计算方法。

发芽势=(前4 d内发芽的种子数/供试种子总数)×100%

发芽率=(截止期发芽的种子数/供试种子总数)×100%

$$\text{种子萌发指数}(PI) = 1.00 \times nd2 + 0.75 \times nd4 + 0.50 \times nd6 + 0.25 \times nd8$$

式中, $nd2$ 、 $nd4$ 、 $nd6$ 、 $nd8$ 分别为萌发试验第2天、第4天、第6天、第8天种子的萌发率,1.00、0.75、0.50和0.25分别为相应萌发天数所对应的抗旱系数<sup>[22]</sup>。

种子萌发抗旱指数( $GDRI$ )=PEG胁迫下种子萌发指数( $PIS$ )/对照种子萌发指数( $PIC$ )×100%

式中, $PIS$ 为PEG胁迫下种子萌发指数, $PIC$ 为对照种子萌发指数<sup>[22]</sup>。

1.2.2 玉米种子幼苗生长情况 从种子萌发第2天开始观察种子生长情况,在第7天测定胚芽长、胚根长、胚根干质量和胚芽干质量。

贮藏物质转化率=[(芽+根)干质量/(芽+根+籽粒)干质量]×100%

### 1.3 数据分析

本文数据、图表采用Microsoft Excel 2016处理,采用SPSS 20.0进行单因素方差分析、显著性差异分析和主成份分析,显著性水平均为 $P < 0.05$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 PEG-6000 处理对不同品种玉米种子发芽势的影响

发芽势是衡量供试种子的发芽快慢和整齐度的重要指标<sup>[22]</sup>。由图 1 可知,不同品种玉米种子的发芽势随 PEG-6000 浓度的升高整体均呈下降趋势,各品种间响应程度不同,35% PEG 处理时均未萌发。5% PEG 处理时,庆单 3 号的发芽势较 CK 高 5.4%,金苹 628、五谷 568、金苹 608 和先玉 335 的发芽势较 CK 分别低 2.3%、17.1%、19.2% 和 29.3%,均无显著差异 ( $P>0.05$ )。15% PEG 处理时,金苹 628 的发芽势较 CK 高 18.6%,陇单 9 号、庆单 3 号、金苹 608、先玉 335 和五谷 568 的发芽势分别较 CK 低 10.7%、16.2%、21.2%、22.0% 和 39.0%,均无显著差异 ( $P>0.05$ )。25% PEG 处理时,金苹 608、金苹 628、五谷 568、先玉 335 和陇单 9 号的发芽势分别较 CK 显著降低 48.1%、62.8%、68.3%、80.5% 和 92.9% ( $P<0.05$ ),庆单 3 号的发芽势较 CK 下降,但差异不显著 ( $P>0.05$ )。

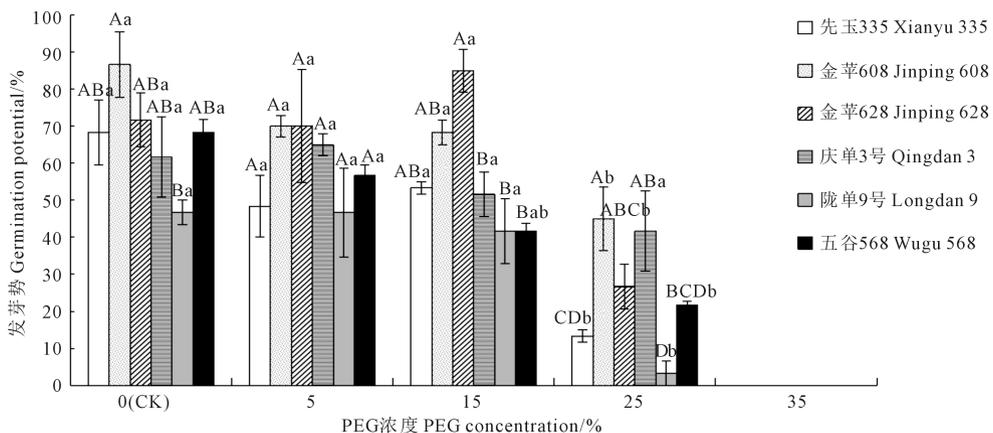
无 PEG 胁迫时,各品种玉米种子的发芽势由高到低依次是:金苹 608、金苹 628、五谷 568、先玉 335、庆单 3 号和陇单 9 号;相较先玉 335,金苹 608 和金苹 628 的发芽势分别高 26.8% 和 4.9%,庆单 3 号和陇单 9 号的发芽势分别低 9.8% 和 31.7%,五谷 568 无变化,各品种均差异不显著 ( $P>0.05$ )。5% PEG 处理时,相较先玉 335,金苹 608、金苹 628、庆单 3 号和五谷 568 的发芽势分别高 44.8%、44.8%、34.5% 和 17.2%,陇单 9 号的发芽势低 3.5%,品种间

无显著差异 ( $P>0.05$ )。15% PEG 处理时,相较先玉 335,金苹 628 和金苹 608 的发芽势分别高 59.4% 和 28.1%,庆单 3 号、五谷 568 和陇单 9 号的发芽势分别较先玉 335 低 3.1%、21.9% 和 21.9%,品种间差异不显著 ( $P>0.05$ )。25% PEG 处理时,相较先玉 335,金苹 608 和庆单 3 号的发芽势分别显著高 237.5% 和 212.5% ( $P<0.05$ ),金苹 628 和五谷 568 的发芽势分别高 100.0% 和 62.5%,陇单 9 号的发芽势低 75.0%,均无显著差异 ( $P>0.05$ )。

### 2.2 PEG-6000 处理对不同品种玉米种子发芽率的影响

发芽率是衡量供试种子出苗情况的重要指标<sup>[23]</sup>。由图 2 可知,不同品种玉米种子的发芽率随 PEG-6000 浓度的升高整体均呈下降趋势,各品种间响应程度不同,35% PEG 处理时几乎不萌发。5% PEG 处理时,先玉 335 的发芽率较 CK 显著降低 39.1% ( $P<0.05$ ),其他品种的发芽率均较 CK 无显著差异 ( $P>0.05$ )。15% PEG 处理时,陇单 9 号和金苹 628 的发芽率分别较 CK 高 9.7% 和 1.9%,五谷 568、金苹 608、庆单 3 号和先玉 335 的发芽率分别较 CK 低 10.6%、13.0%、20.9% 和 26.1%,均无显著差异 ( $P>0.05$ )。25% PEG 处理时,庆单 3 号、金苹 608、金苹 628、五谷 568、陇单 9 号和先玉 335 的发芽率分别较 CK 显著低 44.2%、48.2%、64.2%、66.0%、77.4% 和 82.6% ( $P<0.05$ )。

无 PEG 胁迫时,各品种的发芽率趋势与发芽势一致;各品种的发芽率均较先玉 335 差异不显著 ( $P>0.05$ )。5% PEG 处理时,金苹 628 和五谷 568 的发芽率分别较先玉 335 显著高 89.3% 和 78.6% ( $P<0.05$ ),



注:图中大写字母表示相同浓度 PEG-6000 处理下不同玉米品种间差异显著 ( $P<0.05$ );小写字母表示不同浓度 PEG-6000 处理下同一玉米品种间差异显著 ( $P<0.05$ ),下同。

Note: Capital letters in the figure indicate that there are significant differences among different maize varieties at the level of  $P<0.05$  under the same concentration of PEG-6000. Lowercase letters indicate that there are significant differences among the same maize varieties under different concentrations of PEG-6000 ( $P<0.05$ ). The same below.

图 1 PEG-6000 处理对不同品种玉米种子发芽势的影响

Fig.1 Effects of PEG-6000 treatment on seed germination potential of different maize varieties

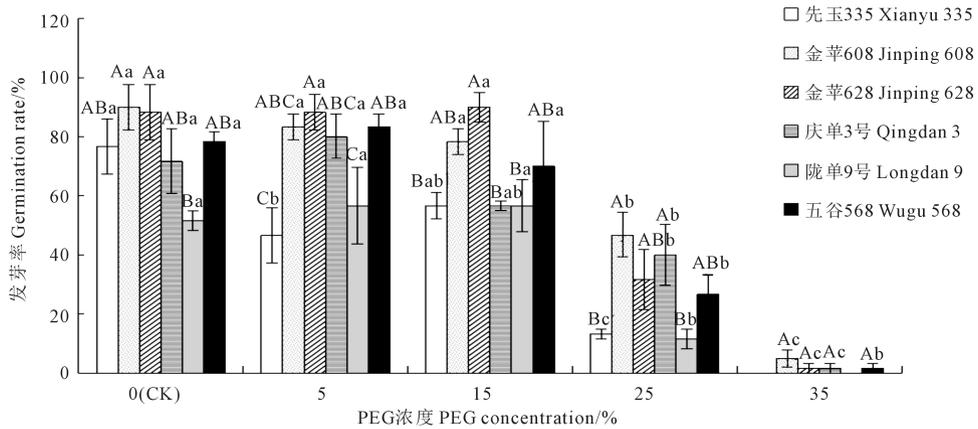


图 2 PEG-6000 处理对不同品种玉米种子发芽率的影响

Fig.2 Effects of PEG-6000 treatment on seed germination rate of different maize varieties

其他品种差异性不显著 ( $P>0.05$ )。15% PEG 处理时金苹 628 的发芽率较先玉 335 显著高 58.8% ( $P<0.05$ ), 其他品种的发芽率均与先玉 335 间的差异不显著 ( $P>0.05$ )。25% PEG 处理时, 金苹 608 和庆单 3 号的发芽率分别较先玉 335 显著高 250.0% 和 200.0% ( $P<0.05$ ), 金苹 628 和五谷 568 的发芽率分别较先玉 335 高 137.5% 和 100.0%, 陇单 9 号的发芽率较先玉 335 低, 但差异均不显著 ( $P>0.05$ )。

### 2.3 PEG-6000 处理对不同品种玉米种子萌发指数的影响

萌发指数是可以反映种子发芽能力和活力的指标<sup>[24]</sup>。由图 3 可知, 不同品种玉米种子的萌发指数随 PEG-6000 浓度的升高整体均呈下降趋势, 各品种间响应程度不同。5% PEG 处理时, 先玉 335 的萌发指数较 CK 显著降低 34.2% ( $P<0.05$ ), 其他品种的萌发指数均较 CK 无显著差异 ( $P>0.05$ )。15% PEG 处理时, 五谷 568 和先玉 335 的萌发指数分别较 CK 显著降低 44.0% 和 28.9% ( $P<0.05$ ), 金苹 608、金苹 628 和陇单 9 号的萌发指数分别较 CK 下降, 但差异不显著 ( $P>0.05$ )。25% PEG 处理时, 庆单 3 号、金苹 608、金苹 628、五谷 568、先玉 335 和陇单 9 号的萌发指数分别较 CK 显著降低 51.9%、53.1%、71.4%、77.1%、86.6% 和 87.9% ( $P<0.05$ )。

无 PEG 胁迫时, 各品种的萌发指数由高到低依次是: 金苹 608、金苹 628、五谷 568、庆单 3 号、先玉 335 和陇单 9 号; 相较先玉 335, 陇单 9 号的萌发指数显著低 37.5%; 金苹 608、金苹 628 和五谷 568 的萌发指数分别高 24.9%、16.5% 和 6.4%, 庆单 3 号的萌发指数无显著差异 ( $P>0.05$ )。5% PEG 处理时, 相较先玉 335, 金苹 608、庆单 3 号和金苹 628 的萌发指数分别显著高 68.5%、66.4% 和 59.6% ( $P<0.05$ ), 五谷 568 的萌发指数高 12.3%, 陇单 9 号的

萌发指数低 10.6%, 无显著差异 ( $P>0.05$ )。15% PEG 处理时, 相较先玉 335, 金苹 608 的萌发指数显著高 52.8% ( $P<0.05$ ), 金苹 628 的萌发指数高 46.1%, 庆单 3 号、庆单 3 号、五谷 568 和陇单 9 号的萌发指数分别低 5.9%、16.1% 和 31.1%, 无显著差异 ( $P>0.05$ )。25% PEG 处理时, 相较先玉 335, 金苹 608 和庆单 3 号的萌发指数分别显著高 335.4% 和 260.4% ( $P<0.05$ ); 金苹 628 和五谷 568 的萌发指数分别高 147.9% 和 81.3%, 陇单 9 号低 43.8%, 无显著差异 ( $P>0.05$ )。

### 2.4 PEG-6000 处理对不同品种玉米种子萌发抗旱指数的影响

抗旱指数表示不同品种的抗旱性的强弱<sup>[25]</sup>。由图 4 可知, 不同品种玉米的抗旱指数随 PEG-6000 浓度的升高整体均呈下降趋势。5% PEG 处理时, 先玉 335 的抗旱指数较 CK 显著降低 34.2% ( $P<0.05$ ), 其他品种的抗旱指数较 CK 无显著差异 ( $P>0.05$ )。15% PEG 处理时, 先玉 335、庆单 3 号和五谷 568 的抗旱指数分别较 CK 显著降低 28.9%、33.6% 和 44.0% ( $P<0.05$ ), 其他品种的抗旱指数较 CK 无显著差异 ( $P>0.05$ )。25% PEG 处理时, 庆单 3 号、金苹 608、金苹 628、五谷 568、先玉 335 和陇单 9 号的抗旱指数分别较 CK 显著降低 51.9%、53.1%、71.4%、77.1%、86.6% 和 87.9% ( $P<0.05$ , 图 4)。

5% PEG 处理时, 相较先玉 335, 五谷 568、金苹 608、金苹 628、陇单 9 号和庆单 3 号的抗旱指数分别高 5.5%、34.9%、36.9%、43.1% 和 65.0%, 但差异不显著 ( $P>0.05$ )。15% PEG 处理时, 相较先玉 335, 陇单 9 号、金苹 608 和金苹 628 的抗旱指数分别高 10.3%、22.3% 和 25.4%, 庆单 3 号和五谷 568 的抗旱指数分别低 6.7% 和 21.2%, 均无显著差异 ( $P>$

0.05)。25%PEG 处理时,相较先玉 335,金萃 608 和庆单 3 号的抗旱指数分别显著高 248.5%和 257.4% ( $P<0.05$ ),金萃 628、五谷 568 的抗旱指数分别高 112.8%、70.3%,陇单 9 号的抗旱指数低 10.0%,无显著差异( $P>0.05$ )。

## 2.5 PEG-6000 处理对不同品种玉米种子幼苗生长的影响

### 2.5.1 PEG-6000 处理对不同品种玉米种子幼苗长势的影响

根长和芽长是植物对于干旱胁迫耐受的重要指标<sup>[26]</sup>。由图 5 可知,不同品种玉米种子正常

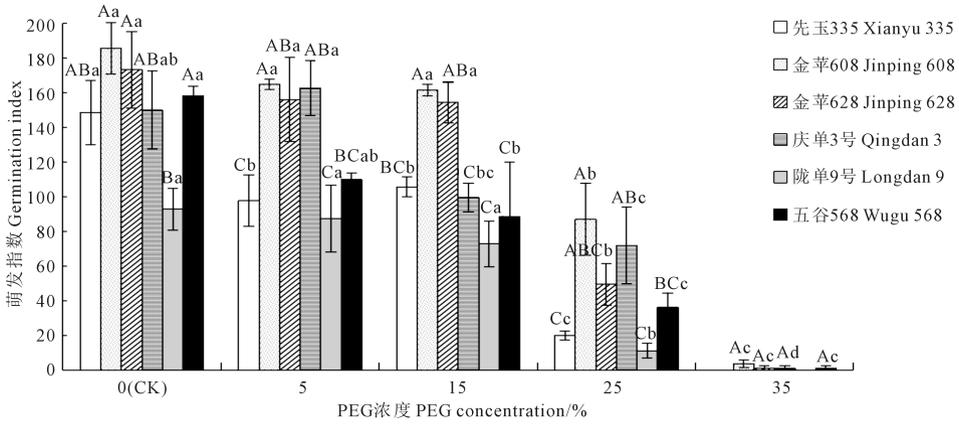
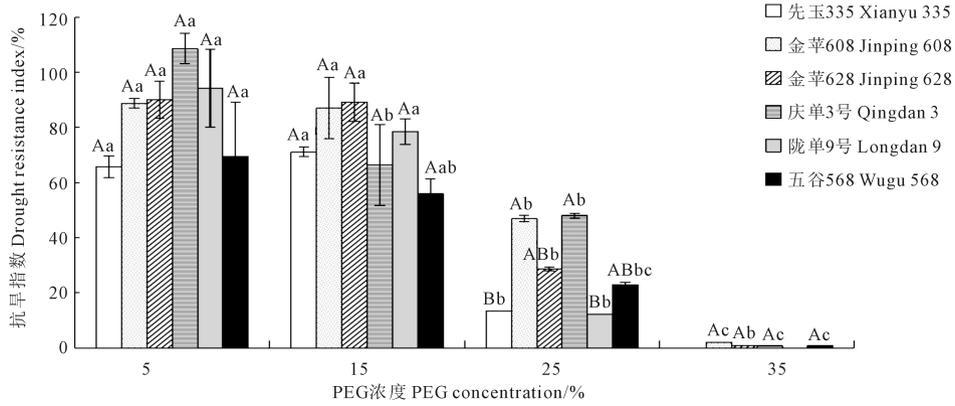


图 3 PEG-6000 处理对不同品种玉米种子萌发指数的影响

Fig.3 Effects of PEG-6000 treatment on seed germination index of different maize varieties



注:CK 抗旱指数为 100.00%。

Note: CK drought resistance index is 100.00%.

图 4 PEG-6000 处理对不同品种玉米种子抗旱指数的影响

Fig.4 Effects of PEG-6000 treatment on drought resistance index of different maize varieties

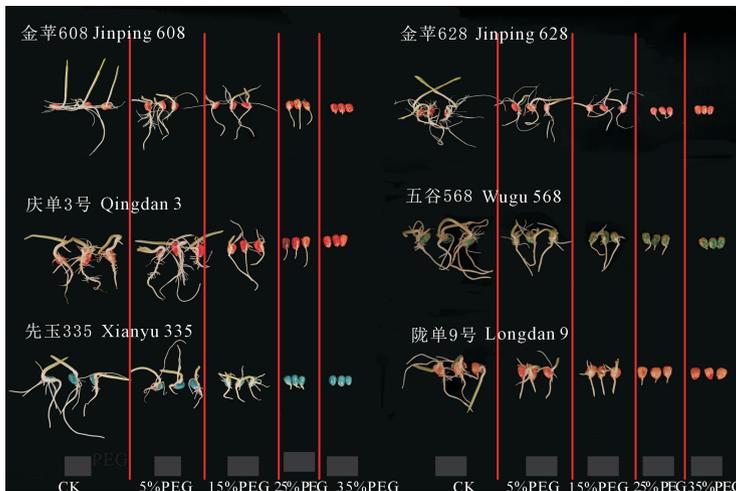


图 5 PEG-6000 处理对不同品种玉米种子第 7 天长势的影响

Fig.5 Effects of PEG-6000 treatment on the seventh day growth of different maize varieties

处理下长势最好,且随 PEG-6000 浓度的升高长势整体呈下降趋势,不同品种间比较可以看出金萃 608、金萃 628 和庆单 3 号长势相对较好,其他品种次之。

**2.5.2 PEG-6000 处理对不同品种玉米种子胚根长、胚芽长的影响** 由表 1 可知,不同品种玉米种子的胚根长及胚芽长均随 PEG-6000 浓度的升高整体呈下降趋势,不同处理时各品种玉米的胚根长较 CK 均存在显著性差异 ( $P>0.05$ )。5% PEG 处理时,金萃 608、金萃 628、五谷 568、先玉 335 和陇单 9 号的胚根长分别较 CK 显著降低 37.3%、42.4%、30.6%、59.0%和 44.2% ( $P<0.05$ ),庆单 3 号的胚根长较 CK 显著升高 48.8% ( $P<0.05$ );金萃 628、金萃 608 和陇单 9 号的胚芽长较 CK 分别显著降低 33.4%、45.4%和 27.0% ( $P<0.05$ );庆单 3 号、先玉 335 和五谷 568 的胚芽长均无显著差异 ( $P>0.05$ )。15% PEG 处理时,金萃 608、金萃 628、五谷 568、先玉 335 和陇单 9 号的胚根长分别显著低 34.5%、44.1%、44.3%、62.3%和 48.1% ( $P<0.05$ ),庆单 3 号的胚根长与 CK 差异不显著 ( $P>0.05$ );金萃 608、金萃 628、庆单 3 号、五谷 568、先玉 335 和陇单 9 号的胚芽长较 CK 分别显著低 58.2%、63.0%、69.8%、63.7%、45.1%和 56.9% ( $P<0.05$ )。25% PEG 处理时,金萃 608、金萃 628、庆单 3 号、五谷 568、先玉 335 和陇单 9 号的胚根长显著降低 68.8%、86.9%、61.2%、78.6%、88.2%和 83.4% ( $P<0.05$ ),胚芽长较 CK 分别显著降低 93.1%、96.0%、93.8%、92.2%、100.0%和 100.0% ( $P<0.05$ )。

无 PEG 胁迫时,相较先玉 335,金萃 628 和金萃 608 的胚根长分别高 46.8%和 41.0% ( $P>0.05$ ),金萃 628 和金萃 608 的胚芽长分别显著高 115.0%和 107.0% ( $P<0.05$ );庆单 3 号和陇单 9 号的胚根长分别低 29.0%和 36.7%;庆单 3 号和陇单 9 号的胚芽长分别高 39.5%和 23.7%,五谷 568 的胚根长和胚芽长下降,但差异均不显著 ( $P>0.05$ )。5% PEG 处理时,相较先玉 335,金萃 608、金萃 628 和庆单 3 号的胚根长分别显著高 115.7%、106.6%和 158.1% ( $P<0.05$ ),五谷 568 和陇单 9 号的胚根长无显著差异 ( $P>0.05$ ),金萃 628 和庆单 3 号的胚芽长分别显著高 60.5%和 60.0% ( $P<0.05$ );金萃 608、五谷 568 和陇单 9 号的胚芽长均无显著差异 ( $P>0.05$ )。15% PEG 处理时,相较先玉 335,金萃 608 和金萃 628 的胚根长分别显著高 144.7%和 117.5% ( $P<0.05$ ),庆单 3 号、五谷 568 和陇单 9 号的胚根长无显著差异 ( $P>0.05$ );金萃 608 和金萃 628 的胚芽长分别显著

高 57.8%和 44.9% ( $P<0.05$ ),五谷 568 的胚芽长显著低 36.5% ( $P<0.05$ );庆单 3 号和陇单 9 号无显著差异 ( $P>0.05$ )。25% PEG 处理时,相较先玉 335,金萃 608 和庆单 3 号的胚根长分别显著高 271.6%和 132.8% ( $P<0.05$ ),金萃 628、五谷 568 和陇单 9 号的胚根长差异不显著 ( $P>0.05$ ),金萃 608、金萃 628、庆单 3 号和五谷 568 的胚芽长分别显著高 51.0%、31.0%、31.0%和 27.0% ( $P<0.05$ )。

表 1 PEG-6000 处理对不同品种玉米种子胚根长和胚芽长的影响

Table 1 Effects of PEG-6000 treatment on radicle and germ length of different maize varieties

玉米品种 Maize variety	PEG 浓度/% PEG concentration	胚根长/cm Radicle length	胚芽长/cm Germ length
	0 (CK)	5.66±1.16ABCa	3.60±0.15Ba
先玉 335 Xianyu 335	5	2.32±0.30Cb	3.21±0.23BCa
	15	2.13±0.10Cb	1.97±0.12Bb
	25	0.67±0.10Cb	
	35		
	0 (CK)	7.97±0.22ABa	7.44±0.57Aa
金萃 608 Jinping 608	5	5.00±0.59ABb	4.07±0.25Bb
	15	5.22±0.29Ab	3.11±0.10Ab
	25	2.49±0.14Ac	0.51±0.02Ac
	35	0.22±0.11Ad	
	0 (CK)	8.30±1.67Aa	7.73±0.96Aa
金萃 628 Jinping 628	5	4.79±0.93ABb	5.15±0.39Ab
	15	4.64±0.82ABb	2.86±0.03Ac
	25	1.08±0.10BCc	0.31±0.03Bd
	35		
	0 (CK)	4.02±0.85Cb	5.02±0.21Ba
庆单 3 号 Qingdan 3	5	5.98±0.52Aa	5.12±0.28Aa
	15	3.48±0.70BCab	1.52±0.38BCb
	25	1.56±0.28Bc	0.31±0.09Bc
	35		
	0 (CK)	3.58±0.67Ca	4.45±0.19Ba
陇单 9 号 Longdan 9	5	2.00±0.32Cb	3.25±0.20BCb
	15	1.86±0.11Cb	1.92±0.13Bc
	25	0.59±0.06Cc	
	35		
	0 (CK)	4.75±0.79BCa	3.45±0.54Ba
五谷 568 Wugu 568	5	3.30±0.12BCb	2.80±0.29Ca
	15	2.65±0.28Cb	1.25±0.17Cb
	25	1.02±0.17BCc	0.27±0.04Bb
	35	0.13±0.13Ac	

注:表中大写字母表示相同浓度 PEG-6000 处理下不同玉米品种间种子的胚根长和胚芽长分别在  $P<0.05$  水平上差异显著;小写字母表示不同浓度 PEG-6000 处理下同一玉米品种间种子的胚根长和胚芽长分别在  $P<0.05$  水平上差异显著。

Note: Capital letters in the table indicated that there are significant differences in radicle and plumule length among different maize varieties at the same concentration of PEG-6000 at the level of  $P<0.05$ . Lowercase letters indicate that there are significant differences in radicle and plumule length at  $P<0.05$  level in different concentrations of PEG-6000 among the same maize varieties.

## 2.6 PEG-6000 处理对不同品种玉米种子贮藏物质转化率的影响

贮藏物质转化率也是反映植物耐旱的一项指标<sup>[27]</sup>。由图 6 可知,不同品种玉米的贮藏物质转化率随 PEG-6000 浓度的升高整体均呈下降趋势,各品种间响应程度不同。5% PEG 处理时,五谷 568 和陇单 9 号的贮藏物质转化率较 CK 分别显著降低 54.4%和 26.0% ( $P<0.05$ );金苹 608、庆单 3 号和先玉 335 的贮藏物质转化率分别较 CK 下降,但差异不显著 ( $P>0.05$ )。15% PEG 处理时,先玉 335、陇单 9 号、金苹 628、五谷 568 和庆单 3 号的贮藏物质转化率较 CK 分别显著降低 32.1%、46.9%、50.3%、64.5%和 65.1% ( $P<0.05$ );金苹 608 的贮藏物质转化率较 CK 下降,但差异不显著 ( $P>0.05$ )。25% PEG 处理时,金苹 608、金苹 628、陇单 9 号、庆单 3 号、先玉 335 和五谷 568 的贮藏物质转化率较 CK 分别显著降低 71.1%、79.8%、81.6%、85.1%、86.7%和 86.6% ( $P<0.05$ )。

无 PEG 胁迫时,相较先玉 335、金苹 628、庆单 3 号、五谷 568 和金苹 608 的贮藏物质转化率分别高 62.1%、73.7%、41.5%和 11.2%,陇单 9 号的贮藏物质转换率低 8.8%,无显著差异 ( $P>0.05$ )。5% PEG 处理时,相较先玉 335、庆单 3 号的贮藏物质转化率

显著高 74.7% ( $P<0.05$ );金苹 608 和金苹 628 的贮藏物质转化率分别高 21.7%和 24.8%,五谷 568 和陇单 9 号的贮藏物质转化率分别低 29.2%和 25.9%,差异均不显著 ( $P>0.05$ )。15% PEG 处理时,相较先玉 335、金苹 608 的贮藏物质转化率显著高 55.3% ( $P<0.05$ ),陇单 9 号的贮藏物质转化率显著低 28.8% ( $P<0.05$ );金苹 628 的贮藏物质转化率高 18.7%,庆单 3 号、五谷 568 的贮藏物质转化率分别低 10.9%、26.0%,但差异均不显著 ( $P>0.05$ )。25% PEG 处理时,金苹 628、金苹 608、庆单 3 号和五谷 568 的贮藏物质转化率较先玉 335 分别显著高 141.8%、146.4%、93.9%和 42.0% ( $P<0.05$ ),陇单 9 号的贮藏物质转化率差异不显著 ( $P>0.05$ )。

## 2.7 构建抗旱性综合评价体系

不同品种玉米的发芽势、发芽率、萌发指数、抗旱指数、胚根长、胚芽长、贮藏物质转化率不同,均可以用来作为玉米品种抗旱性的评价指标,但仅用某一评价指标不能综合反映该品种的真实抗旱性<sup>[28]</sup>。为了探究各品种的抗旱性,本文根据主成分的特征值和贡献率选择主成分,对玉米萌发期的 7 个评价指标进行主成分分析构建抗旱性体系<sup>[29]</sup>,得到相关矩阵(表 2),由表 2 可知,第一个主成分( $Y_1$ )解释了全部方差的 87.807%。

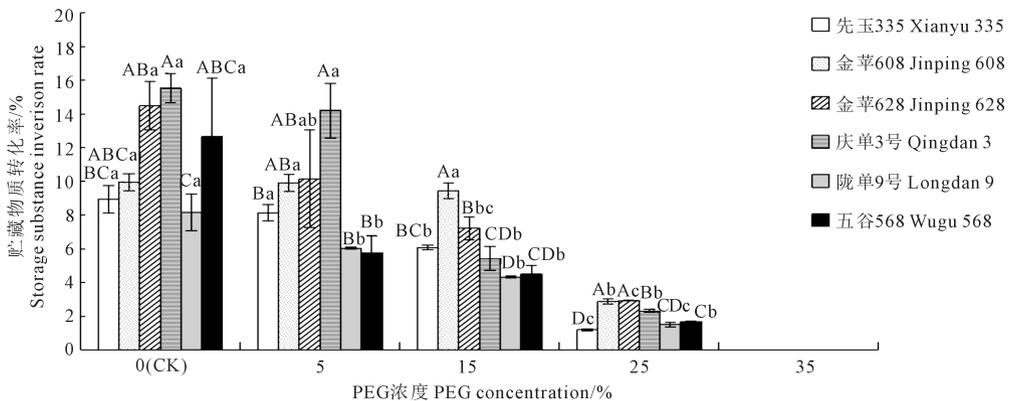


图 6 PEG-6000 处理对不同品种玉米种子贮藏物质转化率的影响

Fig.6 Effects of PEG-6000 treatment on storage substance inversion rate of different maize varieties

表 2 各处理测定指标的主成分分析

Table 2 Principal component analysis of comprehensive indexes of various maize varieties under PEG-6000 treatment

	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	特征值 $F$ Eigenvalue $F$	贡献率/% Contribution rate	累计贡献率/% Cumulative contribution rate
$Y_1$	0.396	0.382	0.378	0.378	0.376	0.370	0.365	6.146	87.807	87.807

注: $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 、 $X_4$ 、 $X_5$ 、 $X_6$ 、 $X_7$ 分别代表萌发指数、抗旱指数、发芽势、胚芽长、胚根长、发芽率、贮藏物质转化率。

Note:  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$ ,  $X_4$ ,  $X_5$ ,  $X_6$  and  $X_7$  represented germination index, drought resistance index, germination potential, germ length, radicle length, germination rate and storage substance inversion rate, respectively.

$Y_1$  的线性组合为:

$$Y_1 = 0.396X_1 + 0.382X_2 + 0.378X_3 + 0.378X_4 + 0.376X_5 + 0.370X_6 + 0.365X_7$$

根据主成分得分和以该主成分方差的贡献率为权重计算的综合得分得到表 3。

表 3 主成分得分和综合得分

Table 3 Principal component scores and comprehensive scores

PEG 浓度/% PEG concentration	品种 Variety	主成分 $Y_1$ 得分 Principal component $Y_1$ score	综合得分 Combined score	排名 Ranking
0	金萃 628 Jinping 628	4.15	3.64	1
	金萃 608 Jinping 608	3.96	3.48	2
	庆单 3 号 Qingdan 3	2.64	2.32	3
	五谷 568 Wugu 568	2.48	2.18	4
	先玉 335 Xinyu 335	2.25	1.98	5
	陇单 9 号 Longdan 9	1.06	0.93	6
5	庆单 3 号 Qingdan 3	3.16	2.78	1
	金萃 628 Jinping 628	2.58	2.26	2
	金萃 608 Jinping 608	2.40	2.11	3
	五谷 568 Wugu 568	0.86	0.76	4
	陇单 9 号 Longdan 9	0.40	0.35	5
	先玉 335 Xinyu 335	0.33	0.29	6
15	金萃 628 Jinping 628	2.14	1.87	1
	金萃 608 Jinping 608	2.12	1.86	2
	先玉 335 Xinyu 335	0.21	0.18	3
	庆单 3 号 Qingdan 3	0.18	0.16	4
	五谷 568 Wugu 568	-0.22	-0.19	5
	陇单 9 号 Longdan 9	-0.29	-0.25	6
25	金萃 608 Jinping 608	-0.82	-0.72	1
	庆单 3 号 Qingdan 3	-1.26	-1.10	2
	金萃 628 Jinping 628	-1.90	-1.67	3
	五谷 568 Wugu 568	-2.29	-2.01	4
	先玉 335 Xinyu 335	-2.89	-2.54	5
	陇单 9 号 Longdan 9	-3.10	-2.72	6

由表 3 可知:无 PEG 胁迫时,各品种的综合得分均大于 1,说明正常条件下所有品种表现较好,其中金萃 628 和金萃 608 表现最好,庆单 3 号次之。5% PEG 处理下,庆单 3 号、金萃 628 和金萃 608 的综合得分均大于 1,五谷 568、陇单 9 号和先玉 335 一般。15% PEG 处理时,金萃 628 和金萃 608 的综合得分均大于 1,庆单 3 号和先玉 335 一般,五谷 568 和陇单 9 号的综合得分均小于 0。25% PEG 处理时,各品种的综合得分均小于 0,其中综合得分相对较高的仍为金萃 608 和庆单 3 号。

由此可见,在各处理下,金萃 628 和 608 的综合得分都靠前,说明金萃 628 和金萃 608 在干旱条件

下具有较强耐旱性;庆单 3 号在 5% PEG 处理下综合得分最高,说明其在低浓度干旱胁迫下具有较强耐旱性。

### 3 讨论与结论

PEG-6000 模拟的干旱胁迫影响种子的发芽势、发芽率、萌发指数、抗旱指数、胚根长、胚芽长和贮藏物质转换率等相关指标,抑制玉米种子的生长活力,但各品种响应程度不同<sup>[30]</sup>。

5% PEG 处理时,相较先玉 335,金萃 608、金萃 628 和庆单 3 号的萌发指数、胚根长、胚芽长均显著升高,其他指标差异不显著;五谷 568 的发芽率显著升高,发芽势、萌发指数、胚根长、抗旱指数和贮藏物质转换率均差异不显著;陇单 9 号的各指标差异不显著。与 CK 相比,庆单 3 号、五谷 568 和陇单 9 号的发芽率有所升高,说明低浓度干旱胁迫不仅不会抑制其发芽,反而可以促进一些玉米品种发芽,与前人研究结果一致<sup>[24-26,31]</sup>,可能与干旱胁迫下植物体内离子平衡及干旱胁迫植物逆境调节机制有关<sup>[32]</sup>,除此之外,庆单 3 号的胚根长和胚芽长均有所增加,说明低浓度干旱胁迫也会促进个别玉米品种胚根和胚芽的生长。

15% PEG 处理时,相较先玉 335,金萃 608 的萌发指数、胚根长、胚芽长及贮藏物质转换率均显著升高,发芽率差异不显著;金萃 628 的发芽率、胚根长及胚芽长均显著升高,其他指标差异不显著;庆单 3 号各指标差异不显著;五谷 568 的胚芽长显著降低,其他指标差异不显著;陇单 9 号贮藏物质转化率显著降低,其他指标差异不显著。与 CK 相比,金萃 628 和陇单 9 号的发芽率略高,说明中浓度干旱胁迫也可以促进个别玉米品种的萌发;各品种的胚根长和胚芽长均受到一定程度的抑制,其中金萃 608、金萃 628 和庆单 3 号胚根长度受抑制较小,且胚芽长度受抑制较大,说明一定浓度的干旱胁迫可使胚芽生长变慢,与周芳等<sup>[33]</sup>研究结果一致,说明适度的干旱会控制胚芽旺长,有利于胚根发育,提高植株抗旱能力。

25% PEG 处理时,相较先玉 335,金萃 608 和庆单 3 号的发芽势、发芽率、萌发指数、抗旱指数、胚根长、胚芽长及贮藏物质转换率均显著升高;金萃 628 和五谷 568 的贮藏物质转换率显著升高,其他指标差异不显著;陇单 9 号的各指标差异不显著。与 CK 相比,6 个品种的发芽势、发芽率、萌发指数、抗旱指数、胚根长、胚芽长和贮藏物质转换率指标均受到严重影响,说明高浓度干旱胁迫严重影响各品种玉

米的正常生长,种子发芽能力和活力均受到不同程度的损伤,与前人研究结果一致<sup>[22,34]</sup>。

比较发现:在低浓度干旱胁迫(5% PEG 处理)时,庆单 3 号抗旱性最强,金萃 608 和金萃 628 较强,五谷 568 和陇单 9 号次之;在中浓度干旱胁迫(15% PEG 处理)时,金萃 608 和金萃 628 抗旱性最强,庆单 3 号和五谷 568 较强,陇单 9 号较弱;在高浓度干旱胁迫(25% PEG 处理)时,金萃 608、金萃 628 和庆单 3 号最强,五谷 568 较强,陇单 9 号较弱。

通过主成分分析和综合得分建立综合评价体系可知,在各 PEG 处理下,金萃 628 和 608 的排名都靠前,说明金萃 628 和金萃 608 在干旱胁迫条件下均具有较强耐旱性,庆单 3 号次之,五谷 568 和陇单 9 号排名均靠后,抗旱性较弱;在低浓度(5% PEG)处理时,庆单 3 号排名第一,说明其在低浓度干旱胁迫下具有较强耐旱性。

综上所述,本研究评价筛选出抗旱性较强的玉米品种为金萃 628 和金萃 608,有利于后续抗旱性玉米的育种与培养研究;在模拟低浓度干旱胁迫进行抗旱性玉米育种与培养时,可以优先选择庆单 3 号。发芽势、发芽率、萌发指数、抗旱指数、根长、芽长和贮藏物质转换率作为玉米抗旱性的筛选指标,可靠性较高,可为后续相关抗旱性试验提供借鉴。通过 PEG-6000 模拟干旱胁迫来筛选抗旱性较好的玉米品种,可以减少在田间费力费时的筛选工作,是一种玉米品种品质高质量筛选的方法。

#### 参考文献:

- [1] 于小兵,卢逸群,吉中会,等.近 45 a 来我国农业气象灾害变化特征及其对粮食产量的影响[J].长江流域资源与环境,2017,26(10):1700-1710.  
YU X B, LU Y Q, JI Z H, et al. Variation characteristics of agro-meteorological disasters in my country and their impact on grain yield in the past 45 years[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2017, 26(10): 1700-1710.
- [2] Stiles E I. Relation of water to the germination of corn and cotton seeds[J]. Plant Physiology, 1948, 23(2): 201-222.
- [3] SAEIDI M, AHMADI A, POSTINI K, et al. Evaluation of germination traits of different genotypes of wheat in osmotic stress situation and their correlations with speed of emergence and drought tolerance in farm situation[J]. Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources, 2007, 11(1): 281-294.
- [4] 郁飞燕,张联合,李艳艳,等.干旱胁迫对水稻种子萌发的影响[J].山东农业科学,2011,(8):36-39.  
YU F Y, ZHANG L H, LI Y Y, et al. Effect of drought stress on germination of rice seeds[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2011, (8): 36-39.
- [5] 邢鹏,杨玉玲,刘广辉,等.水分胁迫下亚麻种子萌发的生理响应[J].石河子大学学报(自然科学版),2011,29(1):79-82.  
XING P, YANG Y L, LIU G H, et al. Physiological response of flax seed germination under water stress[J]. Journal of Shihezi University (Natural Science), 2011, 29(1): 79-82.
- [6] 陆登义.甘肃旱作区玉米育种的实践与思考[J].甘肃农业科技,2013,(1):39-41.  
LU D Y. Practice and thinking of maize breeding in dry farming areas of Gansu[J]. Gansu Agricultural Science and Technology, 2013, (1): 39-41.
- [7] 张建华,中国地图出版社.甘肃省地图册[M].北京:中国地图出版社,2007.  
ZHANG J H, China Cartographic Publishing House. A series of atlases of China's Provinces: atlas of Gansu Province[M]. Beijing: China Cartographic Publishing House, 2013.
- [8] 姚小英,吴丽,田广旭,等.甘肃旱作区玉米近 40 年干旱影响评估[J].干旱区资源与环境,2015,29(5):192-196.  
YAO X Y, WU L, TIAN G X, et al. Variation of drought disaster characteristics and its risk assessment on maize for 40 years in the main growing area in arid regions of Gansu Province[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2015, 29(5): 192-196.
- [9] 张强强.甘肃西部旱作区不同类型土壤对玉米生长影响试验研究[J].农业与技术,2019,39(14):57-58.  
ZHANG Q Q. Experimental study on the effect of different types of soil on maize growth in dry farming areas in western Gansu[J]. Agriculture & Technology, 2019, 39(14): 57-58.
- [10] 张雪婷,杨文雄,柳娜,等.甘肃西部抗旱型玉米品种的综合评价及筛选[J].核农学报,2018,32(7):1281-1290.  
ZHANG X T, YANG W X, LIU N, et al. Comprehensive evaluation and screening of drought resistant maize varieties in western Gansu [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2018, 32(7): 1281-1290.
- [11] 周玉乾,杨彦忠,周文期,等.干旱胁迫下玉米自交系抗旱性评价及筛选[J].干旱地区农业研究,2020,38(5):211-217.  
ZHOU Y Q, YANG Y Z, ZHOU W Q, et al. Evaluation and selection of drought resistance inbred lines of maize under drought stress[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(5): 211-217.
- [12] 张雪婷,柳娜,杨长刚.河西走廊玉米水分高效利用种质的筛选方法探讨[J].北方农业学报,2019,47(1):68-73.  
ZHANG X T, LIU N, YANG C G. Discussion on screening methods of maize germplasm with high water use efficiency in Hexi Corridor [J]. Inner Mongolia Agricultural Science and Technology, 2019, 47(1): 68-73.
- [13] 钟源,赵小强.187 份玉米自交系抗旱性评价及 SSR 标记关联分析[J].干旱地区农业研究,2021,39(3):1-8,50.  
ZHONG Y, ZHAO X Q. Evaluation on drought resistance of 187 maize inbred lines and association analysis with SSR markers[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2021, 39(3): 1-8, 50.
- [14] 张文新,段迎新,章爽,等.基于 3 种水分控制条件的玉米品种抗旱性综合评价[J].干旱地区农业研究,2022,40(1):163-174,183.  
ZHANG W X, DUAN Y X, ZHANG S, et al. Comprehensive evaluation of drought resistance in maize varieties based on three water conditions[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2022, 40(1):

- 163-174, 183.
- [15] 吴晨,葛锦,张少斌.PEG模拟干旱胁迫处理辽宁省主栽玉米品种的萌发特性[J].贵州农业科学,2017,45(2):26-30.  
WU C, GE J, ZHANG S B. Seeds germination characteristics of maize with PEG simulated drought stress in Liaoning Province[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2017, 45(2): 26-30.
- [16] 文景茹,柯永培,余学杰,等.20%PEG-6000胁迫下54个玉米自交系苗期抗旱性评价[J].玉米科学,2021,29(1):46-53.  
WEN J R, KE Y P, YU X J, et al. Evaluation of drought resistance in 54 maize inbred lines under 20% PEG-6000 stress seedling stages[J]. Journal of Maize Sciences, 2021, 29(1): 46-53.
- [17] 朴明鑫,李成,金峰学,等.玉米耐旱鉴定研究进展[J].玉米科学,2013,21(4):89-93.  
PIAO M X, LI C, JIN F X, et al. Research development about identification of maize drought tolerance[J]. Journal of Maize Sciences, 2013, 21(4): 89-93.
- [18] 梁文英,邢辉,王睿勇.聚乙二醇模拟干旱条件下玉米和高粱的生理指标比较[J].江苏农业科学,2012,40(7):89-91.  
LIANG W Y, XING H, WANG R Y. Comparison of physiological indexes of maize and sorghum under simulated drought conditions with polyethylene glycol[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2012, 40(7): 89-91.
- [19] MICHEL B E, KAUFMANN M R. The osmotic potential of polyethylene glycol 6000[J]. Plant Physiology, 1973, 51(5): 914-916.
- [20] 王学智,曹敏建,蒋文春.抗旱剂处理对玉米种子的萌发及苗期抗旱力的影响[J].玉米科学,2005,13(2):82-84,89.  
WANG X Z, CAO M J, JIANG W C. Effects of maize seed treatment with drought-resistant agents on the germination and seedling drought resistance in maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2005, 13(2): 82-84, 89.
- [21] 葛文侠,王建民,王志斌,等.氯化胆碱提高玉米幼苗抗旱性研究[J].种子,2009,28(8):28-30.  
GE Y X, WANG J M, WANG Z B, et al. Studies on choline chloride increasing drought tolerance in maize seedling[J]. Seed, 2009, 28(8): 28-30.
- [22] 许健,于海林,孙善文,等.PEG模拟干旱胁迫对不同品种玉米萌发的影响[J].中国种业,2021,(1):61-64.  
XU J, YU H L, SUN S W, et al. Effects of PEG-simulated drought stress on the germination period of different maize varieties[J]. China Seed Industry, 2021, (1): 61-64.
- [23] 贡金梅.外源物质处理对茄子种子萌发及苗期生理特性的影响研究[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2015.  
GONG J M. Study of the effects of exogenous substance on seed germination and seedlings' physiological characteristics of eggplant seed[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2015.
- [24] 孙艳茹,石屹,陈国军,等.PEG模拟干旱胁迫下8种绿肥作物萌发特性与抗旱性评价[J].草业学报,2015,24(3):89-98.  
SUN Y R, SHI Y, CHEN G J, et al. Evaluation of the germination characteristics and drought resistance of green manure crops under PEG stress[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2015, 24(3): 89-98.
- [25] 汪建军,麻安卫,汪治刚,等.不同温度和PEG处理对中华羊茅种子萌发的影响[J].草业学报,2016,25(4):73-80.  
WANG J J, MA A W, WANG Z G, et al. Effects of different temperature and moisture conditions on seed germination of *Festuca sinensis* [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2016, 25(4): 73-80.
- [26] 赵璞,温之雨,董文琦,等.PEG-6000模拟干旱胁迫对8个玉米种质种子萌发及活力的影响[J].种子,2020,39(10):48-52.  
ZHAO P, WEN Z Y, DONG W Q, et al. Effects of PEG-6000 simulated drought stress on seed germination and seed vigor of 8 maize germplasm[J]. Seed, 2020, 39(10): 48-52.
- [27] 杜锦,肖萌,郝娜娜,等.不同药剂引发对干旱胁迫下玉米种子萌发及幼苗生长的影响[J].种子,2014,33(11):43-46.  
DU J, XIAO M, HAO N N, et al. Effect of Seed priming with different agents on Seed germination and seedling growth in maize (*Zea mays* L.) under water deficit stress[J]. Seed, 2014, 33(11): 43-46.
- [28] 朱志明,杨晓婉,李健荣,等.干旱胁迫对不同玉米自交系种子萌发的影响及种质的抗旱性比较[J].宁夏大学学报(自然科学版),2019,40(4):375-382,387.  
ZHU Z M, YANG X W, LI J R, et al. Effects of drought stress on Seed germination of different maize inbred lines and comparison of drought resistance of germplasm [J]. Journal of Ningxia University (Natural Science Edition), 2019, 40(4): 375-382, 387.
- [29] 徐蕊,王启柏,王滨,等.玉米品种抗旱性评价体系研究[J].玉米科学,2009,17(2):102-107.  
RUI X U, WANG Q B, WANG B, et al. Study on drought-resistance evaluation system of maize cultivars[J]. Journal of Maize Sciences, 2009, 17(2): 102-107.
- [30] 张美俊,杨武德,乔治军,等.不同糜子品种萌发期对干旱胁迫的响应及抗旱性评价[J].草地学报,2013,21(2):302-307.  
ZHANG M J, YANG W D, QIAO Z J, et al. Resistance evaluation and response of 16 millet varieties at germination stage to drought stress[J]. Acta Agrictir Sinica, 2013, 21(2): 302-307.
- [31] 朱志明,杨晓婉,李健荣,等.干旱胁迫对不同玉米自交系种子萌发的影响及种质的抗旱性比较[J].宁夏大学学报(自然科学版),2019,40(4):375-382,387.  
ZHU Z M, YANG X W, LI J R, et al. Effects of drought stress on seed germination of different maize inbred lines and comparison of drought resistance of germplasm [J]. Journal of Ningxia University (Natural Science Edition), 2019, 40(4): 375-382, 387.
- [32] MORAN P J, SHOWLER A T. Plant responses to water deficit and shade stresses in pigweed and their influence on feeding and oviposition by the beet armyworm (Lepidoptera: Noctuidae)[J]. Environmental Entomology, 2005, 34(4): 929-937.
- [33] 周芳,曹国璠,杨娟,等.20个玉米品种发芽期抗旱性鉴定与评价[J].种子,2020,39(12):73-79.  
ZHOU F, CAO G F, YANG J, et al. Identification and evaluation of drought resistance of twenty maize varieties in germination period[J]. Seed, 2020, 39(12): 73-79.
- [34] 江绪文,李贺勤,王晓琨,等.PEG-6000模拟干旱胁迫对5个玉米品种种子萌发及活力的影响[J].种子,2015,34(5):5-8.  
JIANG X W, LI H Q, WANG X K, et al. Effects of PEG-6000 simulated drought stress on Seed germination and vigor of five maize varieties[J]. Seed, 2015, 34(5): 5-8.